



TÉCNICAS INVESTIGATIVAS POR IMAGENS DIGITAIS UTILIZADAS NA
CARACTERIZAÇÃO FACIOLÓGICA DE AMOSTRAS DA FORMAÇÃO SOUZA,
BACIA DO RIO DO PEIXE, PB

Giselle Saboia Raposo

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Orientadores: José Luis Drummond Alves

José Agnelo Soares

Rio de Janeiro
Setembro de 2018

TÉCNICAS INVESTIGATIVAS POR IMAGENS DIGITAIS UTILIZADAS NA
CARACTERIZAÇÃO FACIOLÓGICA DE AMOSTRAS DA FORMAÇÃO SOUZA,
BACIA DO RIO DO PEIXE, PB

Giselle Saboia Raposo

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO
LUIZ COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA
(COPPE) DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE
DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE
EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA CIVIL.

Examinada por:

Prof. José Luis Drummond Alves, D.Sc.

Prof. José Agnelo Soares, D.Sc.

Prof. Luiz Landau, D.Sc.

Dr. Rodrigo Surmas, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL

SETEMBRO DE 2018

Raposo, Giselle Saboia

Técnicas Investigativas por Imagens Digitais
Utilizadas na Caracterização Faciológica de Amostras da
Formação Souza, Bacia do Rio do Peixe, PB/ Giselle Saboia
Raposo. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2018.

IX, 121 p.: il; 29,7 cm.

Orientadores: José Luis Drummond Alves

José Agnelo Soares

Dissertação (mestrado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de
Engenharia Civil, 2018.

Referências Bibliográficas: p. 114-121.

1. Caracterização Faciológica. 2. Formação Souza. 3.
Micro CT. I. Alves, José Luis Drummond *et al.* II.
Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa
de Engenharia Civil. III. Título.

***“Nós não estamos em uma época de
mudanças, e sim em uma mudança de época.”***

(Chris Anderson.

Autor do livro “A Cauda Longa”.)

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao coordenador Dr. José Luiz Drummond Alves, ao corpo técnico-administrativo dos laboratórios LAMCE e LAB2M da COPPE/UFRJ e ao professor Dr. José Agnelo Soares da Universidade Federal de Campina Grande/ PB pela oportunidade da realização deste projeto.

Agradeço a minha família pelo apoio, companheirismo e incentivo para a conclusão deste trabalho, em especial ao meu esposo Eduardo dos Santos Ferreira e a minha filha Maria Eduarda Raposo Ferreira pela compreensão nos momentos de ausência.

Agradeço as pessoas que passaram pelo meu caminho e que me auxiliaram de alguma forma para que o trabalho fosse realizado dando sua contribuição ao longo dos anos da dissertação

Agradeço ao Dr. Josias José da Silva e a equipe da empresa *Petrec* pela contribuição e companheirismo.

Agradeço aos pesquisadores da ANU (*Australia National University*) e da empresa FEI (*Field Electron Ion Company*) em especial ao professor Adrian Sheppard e o Dr. Dan Gostovic pela fundamental colaboração na aquisição das imagens das amostras da dissertação contribuindo com as pesquisas da COPPE / UFRJ.

Agradeço aos examinadores da banca pelas correções, revisões e contribuições para a elaboração do documento final.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

Resumo da Dissertação apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

TÉCNICAS INVESTIGATIVAS POR IMAGENS DIGITAIS UTILIZADAS NA
CARACTERIZAÇÃO FACIOLÓGICA DE AMOSTRAS DA FORMAÇÃO SOUZA,
BACIA DO RIO DO PEIXE, PB

Giselle Saboia Raposo

Setembro/2018

Orientadores: José Luis Drummond Alves

José Agnelo Soares

Programa: Engenharia Civil

As técnicas para a caracterização das rochas dos reservatórios petrolíferos vêm ganhando cada vez mais espaço para as inovações e destaques nos trabalhos científicos e nas aplicações dos fluxos exploratórios dos estudos das operadoras de petróleo. Para demonstrar a utilização das técnicas não destrutivas aplicadas na caracterização das rochas reservatório, optou-se pela utilização de ferramentas de análise não invasiva como a Tomografia Computadorizada, Microtomografia, e QEMSCAN, as quais avaliam diversos materiais de forma precisa. Este trabalho tem como objetivo aplicar os métodos de investigação por imagens digitais em amostras de rocha do reservatório da Bacia do Rio do Peixe (BRP), observando a distribuição de poros e minerais e corroborar com as pesquisas existentes na academia no que diz respeito a gênese e formação do reservatório da BRP. Para o desenvolvimento da dissertação, foram feitas duas etapas de investigação. A primeira foi designada como fluxo 1 utilizando 4 amostras do poço estratigráfico 1-BSB01-PB. O resultado do fluxo 1, levou a escolha de uma das quatro amostras para a aplicação do segundo fluxo de investigação com maior resolução. O resultado gerou mapa de distribuição de poros e minerais em sessões 2D, mostrando a influência de determinados minerais no grau de porosidade da rocha, mesmo que localmente. Desta forma conclui-se que as aplicações de técnicas descritivas utilizadas na petrografia sedimentar podem ser mais ágeis e precisas quando utilizadas com ferramentas de análise espectral como o QEMSCAN.

Abstract of Dissertation presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

DIGITAL IMAGE STUDY TECHNIQUES USED IN ROCK SAMPLES FOR
FACIOLOGICAL CHARACTERIZATION OF SOUZA'S FORMATION, RIO DO
PEIXE BASIN, PB

Giselle Saboia Raposo

September/2018

Advisors: José Luis Drummond Alves

José Agnelo Soares

Department: Civil Engineering

The techniques for the oil rocks reservoirs characterization have been gaining more space for innovations and highlights in the scientific works and in the exploratory flows studies applications of the oil companies. In order to demonstrate the use of non-destructive techniques applied in the characterization of reservoir rocks it was used non-invasive analysis tools such as Computed Tomography, Micro Tomography (MICRO CT), and QEMSCAN, which accurately evaluate many materials types. The main goal of this work is to apply non - destructive research methods to a rock sample from the Rio do Peixe Basin (BRP) reservoir, observing the pores and minerals distribution, and corroborate with academy researches, regarding genesis and formation of the BRP reservoir. For the development of the dissertation, two stages of investigation were done. The first was designated as flow 1 using four samples from the 1-BSB01-PB stratigraphic well. The result of flow 1, led to the choice of one of the four samples for the application of the second research flow with higher resolution. The result generated a map of the distribution of pores and minerals in 2D sessions, showing the influence of certain minerals on the degree of porosity of the rock, even locally. In this way it is concluded that the applications of descriptive techniques used in sedimentary petrography can be more agile and precise when used in spectral analysis tools such as QEMSCAM.

Sumário

| | |
|--|----|
| 1 - Introdução..... | 1 |
| 2 - A Bacia do Rio do Peixe (BRP) | 4 |
| 2.1 - Geologia Regional..... | 8 |
| 2.2 - Sedimentologia e Estratigrafia | 11 |
| 2.3 - A Formação Souza..... | 11 |
| 3 - Fundamentação Teórica..... | 14 |
| 3.1 - As Fácies Sedimentares | 14 |
| 3.2 - As Rochas Sedimentares..... | 14 |
| 3.3 - Mineralogia e Textura das Rochas Sedimentares | 15 |
| 3.3.1 - Granulometria..... | 16 |
| 3.3.2 - Maturidade textural e mineralógica | 17 |
| 3.3.3 - Cor | 17 |
| 3.3.4 - <i>Fabric</i> Sedimentar..... | 17 |
| 3.3.5 - Porosidade | 18 |
| 3.3.6 - Permeabilidade | 20 |
| 3.3.7 - Densidade | 21 |
| 3.4 - Folhelhos | 22 |
| 3.5 - Tomografia Computadorizada (CT)..... | 23 |
| 3.5.1 - Aquisição tomográfica a partir da projeção cônica | 24 |
| 3.5.2 - Aquisição tomográfica a partir da projeção helicoidal..... | 25 |
| 3.5.3 - Reconstrução | 26 |
| 3.5.4 - A qualidade da Imagem..... | 27 |
| 3.6 - Microtomografia de raios X (MICRO CT) | 28 |
| 3.7 - Tomografia Computadorizada – CT <i>versus</i> Microtomografia de Raios X (MICRO CT) | 32 |
| 3.8 - SEM – Microscópio Eletrônico de Varredura - MEV..... | 34 |
| 3.9 - EDS – Espectrometria Dispersiva de Energia..... | 36 |
| 3.10 - Análise EDS utilizando MEV | 37 |
| 3.11 - QEMSCAN – Avaliação Quantitativa de Materiais por Microscopia Eletrônica de Varredura | 39 |
| 4 - Materiais e Métodos | 44 |
| 4.1 - O Fluxo 1: | 51 |
| 4.2 - O Fluxo 2: | 52 |
| 5 - Resultados | 66 |
| 5.1 - Fluxo 1 | 66 |

| | |
|-------------------------|-----|
| 5.2 - Fluxo 2 | 68 |
| 5.3 - Petrografia | 105 |
| 6 - Discussões | 109 |
| 7 - Conclusão | 113 |

1 Introdução

A indústria do petróleo possui características tecnológicas diversas que são aplicadas nas suas demandas exploratórias, apoiando o desenvolvimento científico multidisciplinar. A exploração e a produção de petróleo em condições cada vez mais adversas demandam o desenvolvimento de pesquisas e a formação de recursos humanos qualificados. Para que as operadoras de petróleo invistam na perfuração de um poço são necessários anos de estudo. A academia contribui com a multidisciplinaridade efetuando pesquisas indispensáveis ao processo exploratório de bacias sedimentares, destacando o Programa de Engenharia Civil (PEC) da COPPE / UFRJ atuante no setor de Petróleo & Gás.

As pesquisas desenvolvidas tendem para a assertividade exploratória e consequente diminuição das incertezas quanto ao alvo, não sendo diferente na dissertação em questão. A integração da academia com a indústria se mostra bastante eficiente no que diz respeito aos projetos de P&D (Pesquisa e Desenvolvimento), colocando no fluxo de investigação exploratório, técnicas e resultados inovadores, para melhorar aspectos antes obscuros na ciência.

Quando a operadora de petróleo obtém de forma física, parte do reservatório, através dos testemunhos, plugs e amostra lateral, faz-se necessário a maior quantidade de estudos do reservatório aplicando na amostra física métodos investigativos não destrutivos mantendo a sua preservação na forma original. Geralmente utilizam-se técnicas de caracterização de amostras de rochas como a petrografia, ressonância magnética e microtomografia.

Com o intuito de obter resultados que agreguem valor as tecnologias tradicionais de descrição de rochas sedimentares, como a Petrografia, foi realizada a inserção de tecnologias não destrutivas como a Tomografia Computadorizada, Microtomografia de Raios X (Micro CT), MEV, EDS e QEMSCAN. As chamadas tecnologias não destrutivas se referem a métodos e técnicas aplicadas na indústria assegurando a integridade do material, inspecionando sem destruí-lo e a qualidade dos resultados obtidos através do imageamento do mesmo (CANTATORE, 2011).

A Tomografia Computadorizada e a micro CT são tecnologias de análise 3D e utilizam o mesmo princípio físico aplicado a estudos medicinais, porém no proposto trabalho, estas técnicas serão utilizadas na área pesquisas do petróleo. Recentemente diversos autores (Knackstedt, 2009; Dvorkin, 2011; Zhang, 2011; Medeiros *et. al.*, 2014) demonstraram a possibilidade de estimar propriedades como porosidade e permeabilidade a partir da análise computacional de imagens de rochas obtidas por Micro CT. O MEV, EDS e QEMSCAN são tecnologias de análise 2D, em nano escala, que possuem como base a classificação por diferenciação de espectros eletromagnéticos.

O objetivo do trabalho é analisar o material da Fm. Souza da Bacia do Rio do Peixe (BRP), identificando texturas internas, estruturas sedimentares, análise mineralógica e mapeamento de poros e assim corroborar com trabalhos já existentes na literatura. A motivação foi agregar valor científico as discussões literárias existentes, inserindo ferramentas de investigação ainda não utilizadas, em trabalhos prévios na Bacia do Rio do Peixe, mostrando uma nova forma de análise mineralógica e faciológica para a Formação Souza, principal rocha reservatório da bacia.

Para o desenvolvimento do trabalho foram definidos dois fluxos. No primeiro fluxo aplica-se a tomografia computadorizada e faz-se uma escolha baseada em distribuição de densidades de fases e análise de geologia sedimentar para a aplicação de uma segunda fase de investigação. O fluxo 2 se baseia na aplicação das ferramentas de Micro CT, e QEMSCAN em resoluções diferenciadas gerando mapas de poros num tomograma com valores de porosidade e mapas mineralógicos em sessão 2D. Para tal, foram escolhidas quatro amostras de mão, do furo estratigráfico 1-BSB01-PB (Figura 1), da Bacia do Rio do Peixe (BRP). As amostras representam as litofácies encontradas na Fm. Souza com base nas descrições da literatura. O poço 1-BSB01-PB está localizado na região central do semigrabem de Souza (Silva A. S., 2015).



Figura 1: Furo estratigráfico 1-BSB01-PB localizado na parte central da sub-bacia de Souza (Silva A.S., 2015)

Para a caracterização das amostras do primeiro fluxo, utilizou-se uma metodologia descritiva macroscópica observando a variação textural a olho nu. Após uma rápida análise descritiva, as amostras foram imageadas utilizando um tomógrafo médico para observação das variações de fases densas. O critério de escolha para a amostra ir para o segundo fluxo foi o grau de heterogeneidade representado pela quantidade de fases segmentadas no final do primeiro fluxo. Para a aplicação do segundo fluxo, a amostra de maior heterogeneidade foi o arenito arcoseano LTF-3, com 25 cm de comprimento, representando o reservatório da Fm. Souza (BRP). Os resultados dos fluxos 1 e 2 foram integrados e comparados com a literatura no que diz respeito a caracterização mineralógica e petrofísica da Fm. Souza (BRP). Além disso, uma análise petrográfica foi feita de modo a comparar os resultados obtidos e assim integrar com as pesquisas existentes na academia no que diz respeito a gênese e formação do reservatório.

2 A Bacia do Rio do Peixe (BRP)

A Bacia do Rio do Peixe (BRP), localizada no limite dos estados da Paraíba e do Ceará, tem se tornado alvo de estudos, por ser considerada uma fronteira exploratória de hidrocarboneto em território brasileiro, visto a ocorrência da exsudação de óleo em um sítio na sub-bacia de Sousa (Santiago, 2015). A BRP faz parte do *trend* Cariri-Potiguar (MATOS, 1992) na província Borborema (ALMEIDA, 1977) formando o sistema de bacias-rifte, com extensão territorial indo da Bacia do Araripe até a Bacia Potiguar (Figura 2).

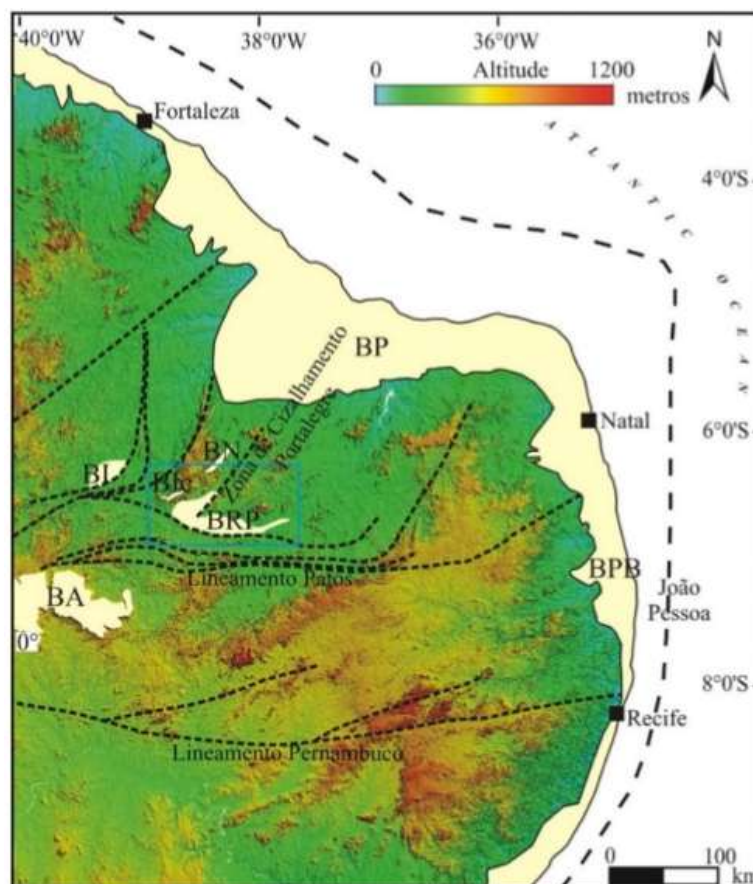


Figura 2: Mapa de localização da Bacia do Rio do Peixe (BRP) (CÓRDOBA, et al., 2008).

A gênese da BRP está ligada a separação dos continentes africano e sul americano, assim como as demais bacias interiores do Nordeste do Brasil (CÓRDOBA, et al., 2008) (PONTE, 1992).

A BRP possui uma área de 1315 km² (SILVA, 2009), dividida em dois grandes semigrabens: Brejo das Freiras e Souza, havendo ainda dois semigrabens menores: Icozinho-Vertentes e Pombal. Cada semigrabem se mostra como uma sub bacia, com a

presença de falhas de borda, margens flexurais, altos internos e rampas de revezamento (CASTRO, 2005; CASTRO *et. al.*, 2007).

Segundo LIMA FILHO (1991) os depósitos da BRP são de origem sedimentar terrígena, provenientes de ambientes fluviais (Fm. Antenor Navarro), passando para depósitos lacustres (Fm. Souza) e de leques aluviais (Fm. Rio Piranhas). De acordo com FRANÇOLIN (1992) o empilhamento estratigráfico das formações Antenor Navarro, Souza e Rio Piranhas é vertical. O preenchimento sedimentar é constituído predominantemente por sedimentos terrígenos continentais de um sistema flúvio-lacustre de idade eocretácica (BEURLIN, 1969; MABESOONE, 1974; PONTE, 1992; LIMA FILHO, 2002). O Grupo Rio do Peixe constitui toda a sequência litoestratigráfica da bacia, sub-dividida nas formações Antenor Navarro, Souza e Rio Piranhas (Figura 3). Estruturalmente cada formação estratigráfica localiza-se em dois semigrabens (Figura 4): semigraben de Brejo da Freiras – Triunfo e semigraben de Souza (Silva et al., 2014).

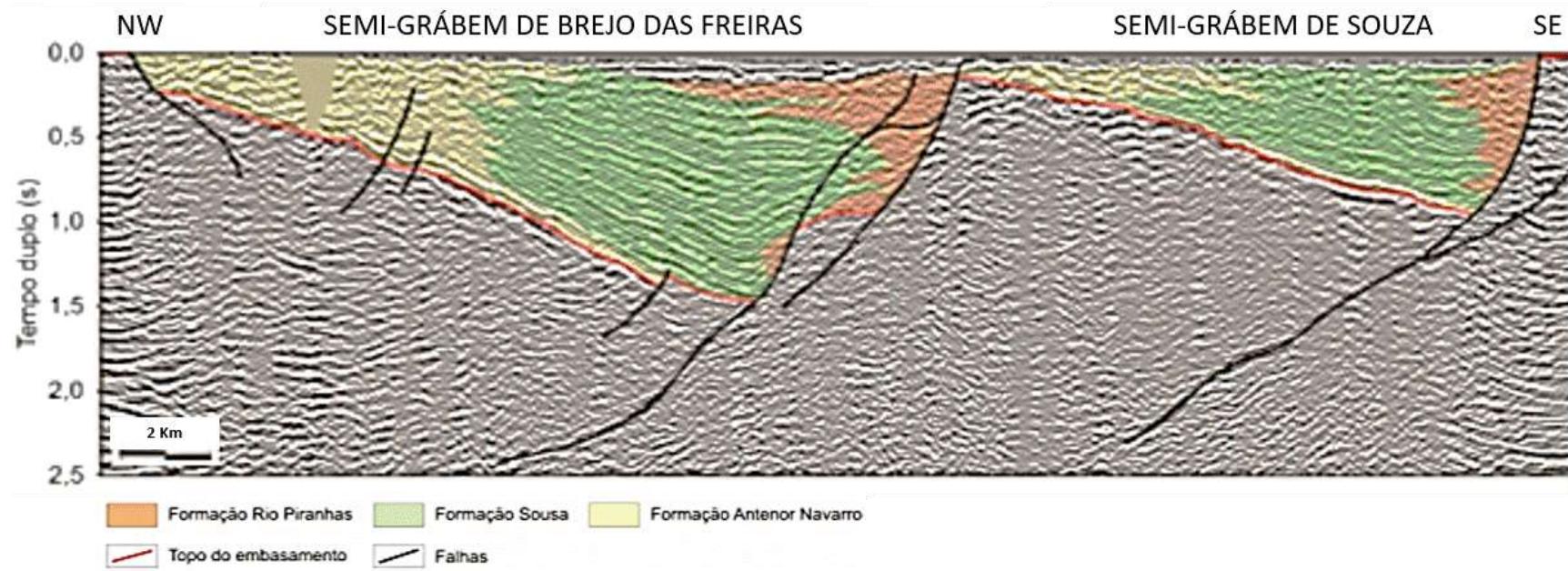


Figura 4: Seção sísmica interpretada da Bacia do Rio do Peixe, mostrando os semigrabens preenchidos, além de altos estruturais (modificado de Córdoba et al., 2008).

2.1 Geologia Regional

A evolução tectônica da BRP teve origem a partir do evento de separação Brasil – África, ocasionando a formação de grábens ao longo da costa brasileira (PONTE *et.al.*, 1991). A zona de cisalhamento originou o *trend* Cariri-Potiguar (PONTE & PONTE FILHO, 1996), dando espaço para o preenchimento das depressões formadas na parte interior e marginal do Nordeste do Brasil (Figura 5).

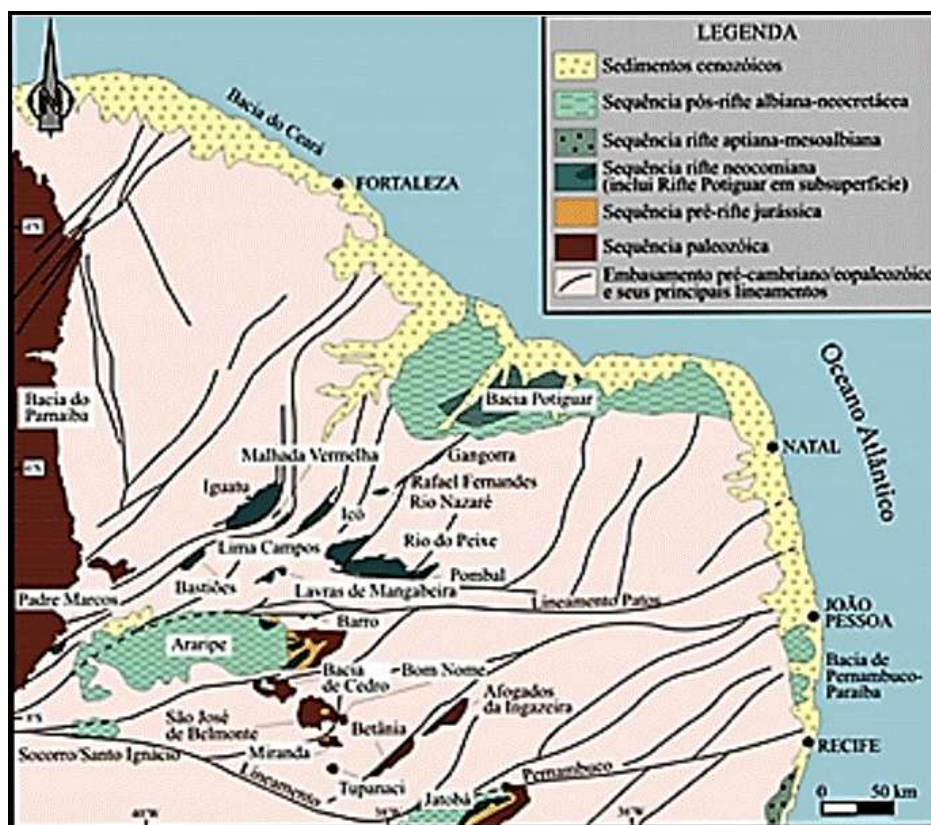


Figura 5: Bacias interiores e marginais do Nordeste do Brasil. Extraído de Silva (2009)

O Embasamento das bacias de interior cratônico do Nordeste do Brasil é composto por rochas da Província Borborema, de idades pré-cambrianas (FERREIRA & SANTOS, 2000). Esse mesmo autor relata uma ampla sedimentação neoproterozóica nos terrenos Rio Piranhas, Seridó e Orós-Jaguaribe representando o domínio tectônico do embasamento da BRP (Figura 5). O embasamento da BRP apresenta ortognaisses paleoproterozóicos, granitóides brasileiros foliados e miloníticos.

A sedimentação da BRP se deu início no Neocomiano, através de depósitos sinrifte (JARDIM DE SÁ *et al.*, 2007). Por esforços compressivos ENE-WSW e distensivos SSE-NNW, no Eocretáceo, houve o rotacionamento de blocos, reativando as

zonas de cisalhamento e deformando a crosta, dando início a separação Brasil – África e consequente abertura do oceano atlântico (FRANÇOLIN et al., 1994). Separadas por zonas de cisalhamento, a BRP se divide em três sub-bacias (E – W) denominadas de Pombal, Souza e Brejo das Freiras (RAND, 1984; LIMA & COELHO, 1987; FRANÇOLIN, 1992). No trabalho de SILVA (2009), surge uma quarta sub-bacia, denominada de Icozinho (Figura 6).

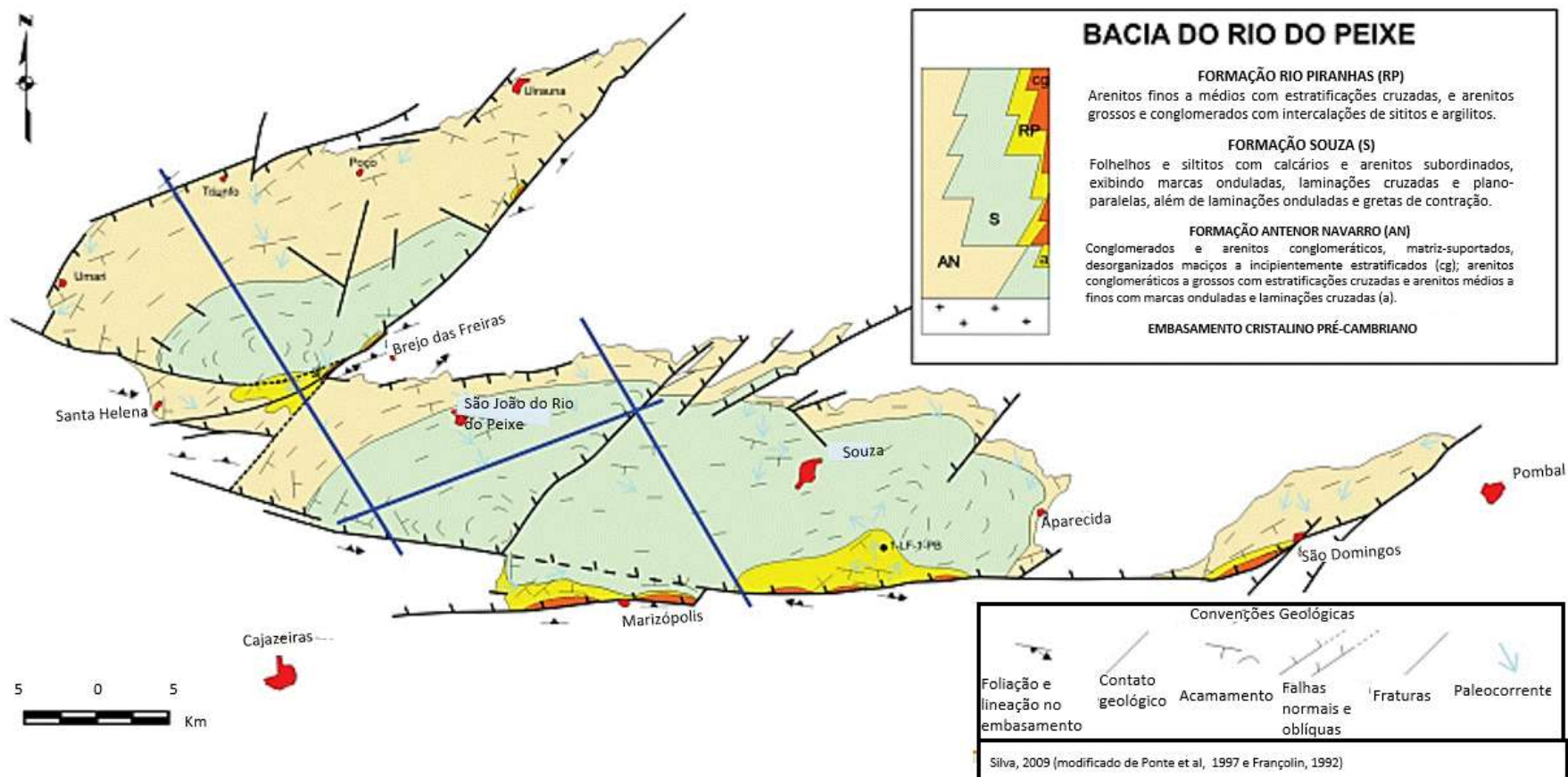


Figura 6: Mapa geológico da BRP mostrando, de NW – SE, as sub-bacias de Icozinho, Brejo das Freiras, Souza e Pombal. (Extraído de Silva, 2009)

2.2 Sedimentologia e Estratigrafia

CÓRDOBA et al., 2008 descreveram com detalhes a litoestratigrafia da BRP, destacando as características texturais das formações geológicas. Segundo os autores, o arcabouço litoestratigráfico da BRP é composto por intercalações de arenitos e folhelhos com alguns níveis carbonáticos, constituindo o Grupo Rio do Peixe, separados em três unidades: Fm. Antenor Navarro, Fm. Souza e Fm. Rio Piranhas.

A Fm. Antenor Navarro caracteriza-se por ter conglomerados e arenitos conglomeráticos com estratificações cruzadas tabulares /acanaladas e matriz-suportados. Tais arenitos possuem coloração avermelhada, a partir de um paleoambiente de sistemas de leques aluviais, fluviais entrelaçados grossos ou fluviais distributários, desenvolvidos nas margens flexurais ou em rampas direcionais.

A Fm. Souza é composta por intercalações de folhelhos, siltitos avermelhados e arenitos exibindo, como estruturas sedimentares, ondulações, laminações plano-paralelas e cruzadas até gretas de contração, e calcretes. Os sistemas deposicionais são distintos dentro de sistemas subaquosos, podendo ser formados por drenagens efêmeras.

A Formação Rio Piranhas é representada por arenitos finos a grossos, passando a conglomerático em algumas regiões, com estratificações cruzadas e intercalações de pelitos.

A presença dos arenitos grossos e conglomerados desorganizados e matriz-suportados, indicam um paleoambiente deposicional de leques aluviais com margem falhada associados a sistemas fluviais entrelaçados. As fácies descritas delimitam blocos soerguidos nos quais o embasamento cristalino esteve submetido a erosão recorrente, ao longo do preenchimento dos depocentros da bacia.

2.3 A Formação Souza

SILVA *et. al.*, (2008) realizaram um estudo faciológico e paleoambiental da Fm. Souza por meio de três furos estratigráficos, para alcançar os folhelhos geradores e os arenitos reservatórios. Os autores ressaltaram que as rochas encontradas em subsuperfície, ao contrário do que se esperava, não são de natureza puramente terrígena, como descrito na literatura (argilitos vermelhos calcíferos intercalados com corpos de arenitos depositados em paleoambientes aluvial, fluvial e leque distal). O material 1 descrito em testemunho são margas e argilitos calcíferos vermelhos e acinzentados,

intercalados por finas camadas de calcilitos, com laminações microbianas e *tepee*, ou por arenitos com laminações cruzadas. Tais fácies, exóticas para o contexto paleoambiental tradicionalmente proposto pela literatura, parecem indicar um contexto lacustre hipersalino e de *sabkha*.

MENDONÇA FILHO *et. al.*, (2006) fizeram um levantamento geoquímico do óleo proveniente da BRP, em específico da Fm. Souza. A amostra de óleo analisada se mostrou com características geoquímicas de um óleo maduro, não biodegradado, e sendo de origem lacustre de água doce. Segundo os autores a Fm. Souza possui espessura média de 800 m e ocupa cerca de dois terços da área total da bacia.

Na região próxima do registro da ocorrência de petróleo de origem lacustre de água doce (MENDONÇA FILHO *et al.*, 2006) foi feito um furo estratigráfico (1-BSB01-PB) para estudo do potencial sistema petrolífero da bacia. A caracterização das rochas geradoras, reservatórios e selantes de idade devoniana. O poço 1-BSB01-PB foi estudado por diversos autores, os quais fizeram uma distinção das fácies sedimentares existentes no mesmo. Foram diagnosticados 5 litotipos, ao longo do poço, com características faciológicas próprias.

Silva (2015) foi o primeiro autor a descrever e identificar as fácies presentes nos 300 m de testemunhos da sondagem 1-BSB01-PB determinando suas propriedades petrofísicas, utilizando como metodologia a análise faciológica dos testemunhos e a realização de ensaios de porosidade e permeabilidade em amostras de todas as fácies. O estudo de Silva (2015) visou a identificação do potencial de acumulação e de migração de fluidos associados aos litotipos. As fácies identificadas foram de folhelho calcífero vermelho (LTF 1), folhelho calcífero cinza (LTF 2), arenito argiloso (LTF 3) e folhelho negro (LTF 4), todas elas com baixos valores de permeabilidade (<0,1 mD). As fácies LTF1 e LTF3 apresentaram valores de porosidade superior das demais, de 13,24% e 13,42%, respectivamente. A fácies LTF1 é a que possui maior ocorrência no poço. Já a fácies LTF3 é a segunda mais representativa, englobando 9,2% dos testemunhos. A LTF3 possui espessuras das camadas arenosas que variam entre 0,86 m e 5,75 m, com granulometria variando de fina a grossa, sendo classificada como um arenito argiloso, tendo variação granulométrica grossa nas profundidades 19 a 22,5 m. As demais ocorrências da LTF 3 são arenitos de granulometria fina. A cimentação carbonática e a presença de sulfeto também são características desta fácies. A LTF3 apresenta estruturas de liquefação, escapes de fluido, sobrecarga e laminações convolutas. Indícios da presença de hidrocarbonetos são identificados através de possíveis manchas de óleo em

diversos intervalos aliados a estruturas rúpteis que barram ou permitem o fluxo desse fluido. Silva (2015) ainda identificou a presença de laminações plano-paralela e cruzada acanalada.

Santiago (2015) estudou as propriedades físicas e mecânicas das rochas do poço 1-BSB01-PB identificando cinco fácies sedimentares: calcilito vermelho (LTF1), calcilito cinza (LTF2), arenito (LTF3), folhelho negro (LTF4) e marga (LTF5). Os resultados da caracterização das fácies se deu através de ensaios de propagação de ondas elásticas, experimentos de petrofísica básica, e ensaios mecânicos de compressão uniaxial com o martelo de Schmidt. Com destaque a este trabalho foi feito a associação das fácies identificadas com os perfis de Caliper, Raios Gama, Resistividades e Velocidade da onda Compressional (V_p) corridos no poço. O autor caracteriza a facies LTF3 sendo um arenito fino intercaladas aos calcilitos cinza e vermelho, formadas por eventos deposicionais como correntes torrenciais e depósitos de inundação fluvial. As principais estruturas sedimentares encontradas foram estratificações cruzadas acanaladas, estruturas de liquefação e estruturas de sobrecarga. Além disso, nesta fácies são encontradas regiões nas quais há saturação de óleo, como também bandas de deformação que barram a passagem de fluidos, como descrito por Silva (2015).

3 Fundamentação Teórica

3.1 As Fácies Sedimentares

O conceito de fácies definido por Selley (1970) corresponde a uma massa de sedimentos ou de rocha sedimentar caracterizada e distinguida das demais pela abrangência de cinco parâmetros: geometria, litologia, estruturas sedimentares, padrões de paleocorrentes e fósseis. As fácies têm como objetivo a classificação de rochas sedimentares e por finalidade a descrição de uma sucessão estratigráfica. As litofácies correspondem as fácies de natureza litológica.

Através do estudo das litofácies é possível chegar ao processo de formação da rocha, qual o tipo de paleoambiente formador da litologia, sendo a base conceitual e o método de estudo para a exploração e desenvolvimento de jazidas minerais como óleo e gás.

Os ambientes deposicionais são controlados por diversos processos como por exemplo processos climáticos e tectônicos gerando diferentes tipos de fácies. As variações de fácies são tanto na horizontal quanto na vertical. O empilhamento de fácies na vertical gera uma sucessão de fácies podendo ser expressas em perfis estratigráficos na vertical. Uma associação de fácies corresponde a uma relação tridimensional, espacial das fácies. Os ambientes deposicionais possuem associações típicas de fácies. Um exemplo são os sistemas lacustres onde em épocas de clima úmido, o lago se mantém cheio e devido a abundante vegetação, há matéria orgânica lenhosa e aporte de sedimentos terrígenos. Em épocas de seca, há concentração de carbonato de cálcio (CaCO_2) aparecendo na forma de esteiras microbianas.

3.2 As Rochas Sedimentares

As rochas sedimentares são compostas por fragmentos de rochas provenientes de processos intempéricos e erosivos. Elas cobrem 75% da superfície terrestre e são importantes fontes de material fóssil (Suguio, 1980).

O intemperismo atuante nas rochas pode ser de ordem física (degradação), química (decomposição) e / ou biológica. Os produtos do intemperismo estão sujeitos a processos de erosão, transporte e deposição. Os agentes de transporte (água, ar, gelo) movem as partículas para regiões baixas, onde a medida em que os novos sedimentos se acumulam, os mais antigos começam a ser soterrados. Com as mudanças físicas e químicas no pacote sedimentar, este converte os sedimentos inconsolidados em rochas sedimentares, através dos processos de litificação e diagênese.

A litificação corresponde ao processo de consolidação dos sedimentos com o aumento da temperatura e da pressão em profundidade. A diagênese também atua diretamente na formação das rochas sedimentares através da compactação de grãos, cimentação química de substâncias preenchendo os espaços vazios entre os grãos e a recristalização, havendo mudança de tamanho, forma e orientação dos cristais minerais (WORDEN, 2003).

O processo diagenético associado à precipitação química de diversas substâncias que preenchem os poros de sedimentos é chamado de cimentação. Como materiais cimentantes, os mais comuns são a sílica, cimentos calcíticos, limoníticos e hematíticos (Dias, 2008).

3.3 Mineralogia e Textura das Rochas Sedimentares

Os minerais são sólidos estáveis representados por fórmula química, com estrutura atômica ordenada e são encontrados na forma cristalina. Eles são os constituintes das rochas, sendo únicos ou associados a diferentes volumes. Os minerais presentes na rocha podem ser essenciais, definindo a natureza da rocha e / ou acessórios quando não afetam a classificação da rocha por estar presente em pequenas quantidades. A classe mineral mais abundante da crosta terrestre são os silicatos. Os minerais formadores de rochas mais comuns na crosta terrestre são quartzo, feldspatos, piroxênios, biotita, muscovita, hornblenda, olivina, zircão, calcita, dolomita, apatita, magnetita e pirita. Os minerais mais comuns encontrados em rochas sedimentares são o quartzo, feldspato, argilo-minerais, fragmentos líticos, sílex, micas, minerais pesados (opacos, zircão, turmalina, rutilo, granada) e carbonatos.

Além dos minerais, características quanto a textura do grão, mostram como foi “moldado” o grão mineral até a sua deposição.

Todo sedimento possui tamanho, forma, textura, cor entre outras características que os diferem e dizem respeito aos processos intempéricos, erosivos e do transporte que sofreram até chegar a deposição final. Além do mais, a textura permite inferir relações entre porosidade e permeabilidade.

3.3.1 Granulometria

A granulometria reflete a energia hidráulica do ambiente. O tamanho dos grãos do arcabouço é classificado segundo Grotzinger (2010), onde o tamanho da partícula é classificado quanto ao seu diâmetro (< 0,0039 mm até > 256 mm); e assim são classificados os tipos de sedimento e, por consequência, a classificação das rochas siliciclásticas (Tabela 1).

Tabela 1: Classificação granulométrica das rochas siliciclásticas

| Tamanho da partícula | Sedimento | Rocha |
|-----------------------------|------------------|---|
| GROSSO | CASCALHO | CONGLOMERADO |
| > 256 mm | Matacão | |
| 256 – 64 mm | Calhau | |
| 64 – 2 mm | Seixo | |
| MÉDIO | AREIA | ARENITO |
| 2 – 0,062 mm | | |
| FINO | LAMA | SILTITO |
| 0,062 – 0,0039 mm | Silte | |
| < 0,0039 mm | Argilominerais | Lamito (fratura em bloco) |
| | | Folhelho (rompe ao longo do acamamento) |
| | | Argilito |

Fonte: (Grotzinger, 2010)

3.3.2 Maturidade textural e mineralógica

A maturidade de um sedimento detrítico é uma medida do quanto o sedimento foi intemperizado, transportado e retrabalhado até atingir o produto final. Existem três estágios de maturidade textural e mineralógica: Imaturo, Submaturo e Maduro. A Tabela 2 mostra a diferença entre eles colocando como exemplo arenitos e ruditos.

Tabela 2: Grau de maturação mineralógica e textural

| | Imaturo | Submaturo | Maduro |
|-------------------------|--|--|--|
| Maturidade Mineralógica | Diversos minerais, em destaque feldspatos, mica e líticos | Quartzo abundante junto com outros minerais presentes (argila, feldspato, mica, etc) | Quartzo puro, outros minerais raros ou ausentes |
| Maturidade Textural | Pouco selecionado: Diversas classes granulométricas e fragmentos angulosos | Areia, silte e argila ou conglomerado de quartzo. Grãos no início do arredondamento | Excelente seleção; somente classe areia e ótimo arredondamento |

3.3.3 Cor

Informa sobre a litologia, ambiente de deposição e diagênese. Depende também dos fatores mineralógicos e geoquímicos como o estado de oxidação por Ferro e conteúdo de matéria orgânica. Cores primárias como branco, cinza, preto e verde, correspondem a minerais / matéria orgânica que foram soterrados. Cores secundárias como vermelho, amarelo e castanho são frutos do intemperismo com oxidação por ferro.

3.3.4 *Fabric* Sedimentar

Refere-se ao arranjo dos grãos no sedimento, como orientação de clastos (imbricação) e predomínio de matriz ou arcabouço (empacotamento). As compactações podem ser mecânicas, devido a compactação por soterramento, ou químicas, deixando

rastros no contato entre os grãos. No caso da compactação química é possível classificar o contato entre os grãos como pontual, côncavo / convexo, longo planar e suturado (figura 7).

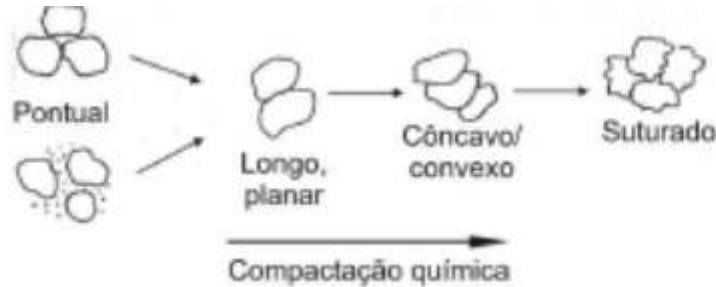


Figura 7: Grau de compactação dos sedimentos

Quanto maior a profundidade aumenta o número de contatos entre os grãos, com a natureza dos contatos mudando progressivamente de tangencial para curvilíneo (côncavo / convexo) até os grãos apresentarem-se suturados (DIAS, 2008).

3.3.5 Porosidade

A porosidade é a fração relativa do volume da rocha que é ocupada pelos poros e está relacionada à capacidade da rocha de armazenar fluidos. Segundo TIAB & DONALDSON (2004), o espaço vazio entre os grãos, chamado espaço poroso ou interstício, é ocupado por fluidos (líquidos e/ou gases). Matematicamente é definida pela seguinte equação (ROSA *et al.*, 2006):

$$\phi_{total} = \frac{V_b - V_{gr}}{V_b} = \frac{V_p}{V_b}$$

$$\phi_{efetiva} = \frac{V_{pint}}{V_b}$$

Onde ϕ_{total} é a porosidade total (em fração), V_b é o volume total (*bulk volume*), V_{gr} o volume de grãos, V_p é o volume de poros, $\phi_{efetiva}$ é a porosidade efetiva e V_{pint} é o volume de poros interconectados.

De acordo com a formação da porosidade na rocha sedimentar existem dois tipos de classificação: Porosidade primária, a que se desenvolve no momento da deposição, e

a porosidade secundária, se desenvolvendo por processos diagenéticos após a deposição (TIAB & DONALDSON, 2004). Os fatores que afetam a porosidade primária são a esfericidade das partículas, empacotamento e distribuição do tamanho dos grãos. Já a porosidade secundária é afetada pela cimentação, compactação, dissolução, fraturas e presença de argilominerais. A dissolução de alguns grãos minerais junto com a compactação da amostra, irregularidade dos grãos e a cimentação de espaços vazios, diminuem o valor da porosidade inicial. A porosidade primária se subdivide em porosidade intergranular, sendo espaços intersticiais entre os grãos da estrutura pode ser microporos e fraturas, sendo fissuras devido a tensões nos maciços rochosos. Os maiores graus de esfericidade e de arredondamento dos grãos afetam a porosidade intergranular diminuindo seus valores quando submetidas a estas características. Já na classificação de porosidade secundária ocorre a porosidade por dissolução parcial ou total de grãos. O tamanho de grão, o grau de cimentação, a compactação dos sedimentos e o empacotamento entre grãos minerais contribuem com a criação dos poros em sedimentos clásticos (TIAB & DONALDSON, 2004). O quartzo, a calcita e as argilas antigênicas são minerais que podem crescer nos poros.

Em termos de graus de seleção dos grãos, uma rocha bem selecionada apresenta boa porosidade, pois com o arranjo entre eles se dá sob forma organizada, criando espaços vazios bem-comportados. Porém em uma rocha mal selecionada, os grãos menores ocupam os espaços existentes entre os maiores, ocupando os espaços vazios, afetando a porosidade da amostra.

No trabalho de DIAS (2008) um grau alto de compactação diminui o volume e a porosidade de rochas, devido ao esforço de compressão exercido por materiais superpostos, envolvendo a deformação de intraclastos e de minerais lamelares, fraturamento e rotação dos grãos, ocorrendo assim, o rearranjo das partículas sedimentares e perda de fluidos intersticiais.

3.3.6 Permeabilidade

A permeabilidade é definida como a capacidade da rocha de conduzir fluidos pelo seu interior através da interconectividade dos poros (Donaldson, 2011). A permeabilidade aumenta quanto maior a granulometria e o grau de seleção da rocha. Cada grão de rocha está envolvido por uma superfície molhada, onde a velocidade do fluido é sempre zero por definição. Então, forma-se um atrito entre a camada de velocidade igual a zero e onde o fluido está escoando. Dessa forma, para um mesmo fluido e para meios de mesma porosidade, ocorre um atrito maior quando o fluido passa por um meio empacotado com grânulos finos do que com grãos mais largos (ROSA *et al.*, 2006). Rochas com poros isolados ou sem poros apresentam baixa ou nenhuma permeabilidade.

Henry Darcy desenvolveu em 1856 a equação do fluxo de fluido, ficando popularmente conhecida como a lei de Darcy. A equação depende da Velocidade do fluido (μ) expressa em cm/s; da área da seção reta da amostra de rocha (A_c - cm²), da viscosidade do fluido (η) expressa em centipoises - cp; do comprimento da amostra em cm do gradiente de pressão na direção do fluxo $\partial P/\partial l$ expressa em atm/cm e da permeabilidade K expressa em Darcy – D.

$$\mu = \frac{q}{A_c} = -\frac{k}{\eta} \frac{\partial P}{\partial l}$$

Onde:

κ - permeabilidade (Darcy – D)

μ - velocidade do fluido (cm/s)

q – vazão (cm³/s)

A_c – Área da seção reta da amostra de rocha (cm²)

η – Viscosidade do fluido (centipoises – cP)

l – Comprimento da amostra (cm)

$\partial P/\partial l$ – Gradiente de pressão na direção do fluxo (atm/cm)

A permeabilidade é um dos mais importantes parâmetros na definição do desempenho de um reservatório.

3.3.7 Densidade

Densidade é a razão entre massa e volume. Deve-se levar em consideração que o controle da densidade nas rochas é baseado na composição mineralógica, porosidade e composição de fluidos. A mineralogia possui papel fundamental no controle da densidade, pois está ligada a composição, estrutura cristalina e ligações químicas. A não regularidade no formato dos grãos, o fraturamento das rochas e os diferentes minerais constituintes, são fatores que fazem a simples equação se tornar complexa.

$$d = m/V$$

Onde: d = densidade (g/cm^3)

m = massa (g)

V = volume (cm^3)

O estudo de propriedades como a porosidade e a permeabilidade é de extrema importância. A porosidade é inversamente proporcional à resistividade elétrica e à densidade e diretamente proporcional à taxa de deformação das rochas, uma vez que os vazios podem dar lugar a zonas de fraqueza (VALLEJO *et al.*, 2002).

3.4 Folhelhos

Os folhelhos são rochas de sedimentos detríticos, com granulometria fina, tendo fissilidade em seus planos de estratificação. Segundo Bates, (1987) a fissilidade é a propriedade de algumas rochas de se partirem em placas em superfícies paralelas e finamente espaçadas, como é característico dos folhelhos. Os arranjos estruturais dos grãos minerais são determinantes para as dimensões dos poros e suas conexões. Minerais micáceos são os principais constituintes com características químicas peculiares e retenção de água em sua estrutura. Apesar de existirem muitos poros nos folhelhos, eles têm pequenos diâmetros e conseqüente baixa permeabilidade, variando de 10^{-9} a 10^{-12} D, de acordo com o estudo de Steiger, (1992).

3.5 Tomografia Computadorizada (CT)

No ano de 1979 o cientista engenheiro Godfrey Newbold Hounsfield ganhou o prêmio nobel de medicina por sua fabulosa invenção (Cormack & Hounsfield, 1979). Em 1972, Allan Macleod Cormack fez sua criação na área de pesquisa de Hounsfield, revolucionando a medicina com análise investigativa dos pacientes através de projeções 2D em clínicas médicas (Reiser *et al.*, 2001). Ambos autores criaram o primeiro equipamento de tomografia computadorizada. Desde então diversos cientistas vêm desenvolvendo algoritmos para a reconstrução tomográfica das imagens 2D através de aplicações numéricas na obtenção de recriar o objeto imageado o mais natural possível da realidade. Com o melhoramento da técnica na aplicação da tomografia vem surgindo soluções cada vez mais avançadas (Feldkamp, 1984).

O sistema CT consiste em uma fonte que emite raios X, uma mesa no centro do equipamento, um detector de raios X e uma unidade de processamento de dados para as computações, visualizações e análise dos resultados medidos. A aquisição das imagens do objeto é feita com a definição dos parâmetros de aquisição, como por exemplo, a magnificação, orientação do objeto, energia da fonte de raios X, tempo de integração do detector, entre outros. Inicialmente o CT cria imagens em sessões transversais ao objeto com a emissão de feixes de fótons atravessando um plano do objeto a partir de um ângulo definido fazendo uma volta em seu eixo. Como os raios X passam através do objeto, alguns deles são absorvidos, outros dispersos e outros transmitidos. Os raios X que são atenuados durante a interação com o objeto não são captados pelo detector de raios X. Já os fótons transmitidos pelo objeto em qualquer ângulo são captados pelo detector e visualizados pelo computador, criando assim, uma completa reconstrução do objeto escaneado. Os tons de cinza do dado 3D representam a distribuição de densidade do objeto medido (BARTSCHER, 1956). Após a aquisição das projeções 2D, o volume é reconstruído. O volume passa a ser modelado como uma matriz 3D de voxels, onde cada valor de voxel corresponde ao coeficiente de atenuação local do objeto escaneado. Após a etapa de reconstrução, os valores de *threshold* devem ser cuidadosamente determinados, pois é um parâmetro crítico para a acurácia da etapa de segmentação da amostra e determinação da superfície, tendo grande influência no resultado final (CARMIGNATO, 2007). Em seguida, a medição dimensional direta (por exemplo, montagem de geometrias primitivas, análise de espessura de parede, comparação

nominal / real) pode ser realizada em qualquer um dos conjuntos de dados mencionados anteriormente (volume / superfície). E por final, o resultado de medição é obtido.

3.5.1 Aquisição tomográfica a partir da projeção cônica

A aquisição das imagens é feita rotacionando o corpo de prova segundo a direção de radiação e gerando primariamente cortes transversais ao plano do material (figura 8).

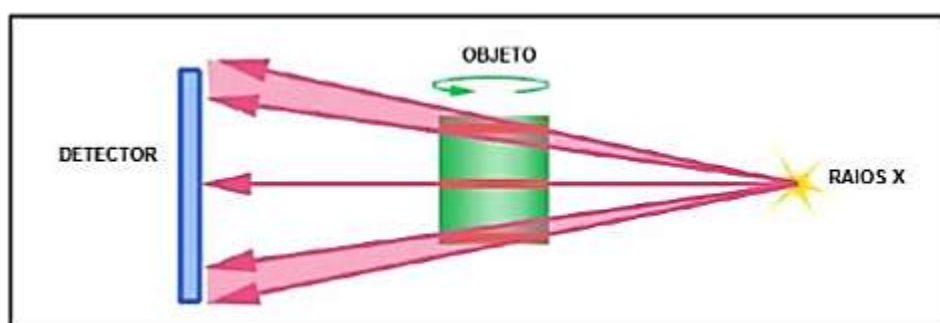


Figura 8: Processo de aquisição tomográfica por feixe cônico

A geometria cônica do feixe de raios x permite que a reconstrução de um volume isotrópico 3D, a partir das projeções 2D, tenha apenas 1 rotação na amostra, não havendo necessidade da translação mecânica, e que ocorra o empilhamento sequencial das fatias (REIMANN, 1997), (LIN & MILLER, 2002), (WITHERS, 2007). Com a aplicação da projeção cônica, a distância entre a fonte emissora de raios X e a amostra pode ser de até 1mm. A obtenção da imagem é feita pela conversão de raios X em luz visível por meio de um cintilador e projetada num dispositivo de carga acoplada (CCD). Quando a distância entre a fonte emissora e a amostra for grande, a resolução espacial do sistema de captura da imagem é a determinante, sendo limitada pelos cintiladores, pela eficiência ótica e pela difração de luz visível. As limitações são minimizadas com a utilização de uma geometria cônica de feixe, proporcionando a ampliação da imagem no detector. A resolução e o campo de visão são controlados pelas posições relativas entre fonte-amostra-detector, com configurações importantes na dimensão da fonte e na resolução do detector.

A magnificação ótica está relacionada com a ampliação visual através do uso de lentes e condensadores. A combinação da magnificação com a projeção cônica estabelece uma relação de independência na resolução de geração de imagens com o

diâmetro do feixe de raios X, do tamanho da amostra e da distância entre a fonte e a amostra (LIN *et al.*, 2012), assim melhorando o contraste da imagem.

3.5.2 Aquisição tomográfica a partir da projeção helicoidal

(Lee, 1998) estudou o desenvolvimento da tomografia helicoidal ou espiral, sendo o primeiro tomógrafo computadorizado helicoidal desenvolvido no final da década de 80 e comercializado no início dos anos 90. As vantagens da Tomografia Computadorizada Helicoidal (TC-Helicoidal) é o aumento da área de investigação, com aumento do volume de dados registrados e em menor tempo. Mesmo com tantos avanços ainda assim não era suficiente para resolver todos os problemas. Surge então a Tomografia Computadorizada Multi-Slice diminuindo ainda mais o tempo de resposta e aumentando a qualidade de imagens na aquisição. A diferença do TC-Helicoidal para o TC-Multi-Slice está na fileira de detectores do equipamento. No TC-helicoidal existe apenas um detector, enquanto que no TC-Multi-slice podem surgir 2 ou mais fileiras de detectores permitindo reconstruções multiplanares de alta definição (AiharaI *et al.*, 2003)

Uma outra diferença entre os processos de aquisição circular e helicoidal é o ângulo de detecção do feixe de raios x (Figura 9). Na aquisição circular, o cone de detecção de raios X varia de tomo para tomo, causando artefatos na imagem (Figura 10). Já o ângulo do cone de detecção de raios X da aquisição helicoidal, se mantém constante.

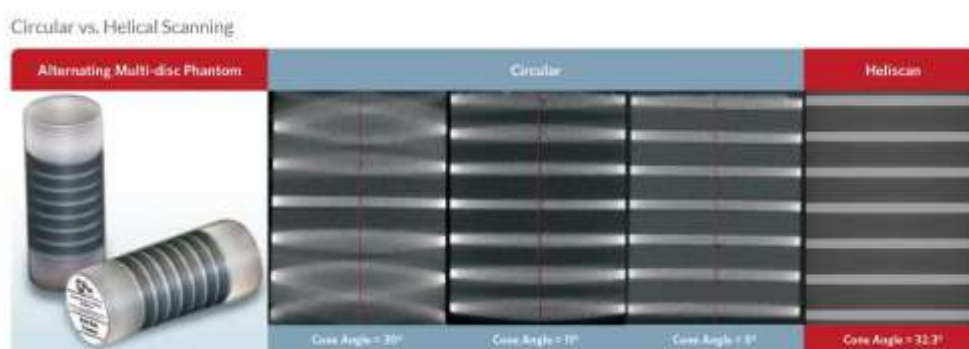


Figura 9: Cone de detecção de raios X entre as aquisições circular e a helicoidal (Thermo Fisher Scientific., 2018)

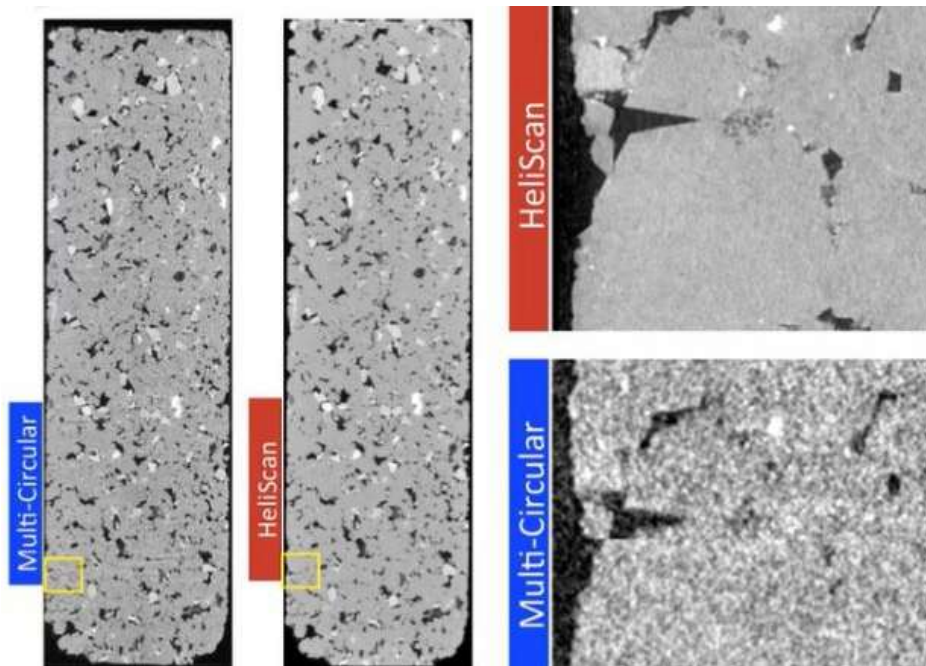


Figura 10: Diferenças entre as aquisições multi-circular e a helicoidal (Thermo Fisher Scientific., 2018)

3.5.3 Reconstrução

A reconstrução é um processo que utiliza algoritmos de convolução para calcular coeficientes de atenuação de uma determinada amostra de dados projetados. A reconstrução produz avaliações não invasivas de estruturas externas a partir de suas análises. O processo de reconstrução rearranja as informações distribuídas na matriz do sinograma (alinhamento de todas as projeções ao longo de uma matriz, enfileirando os perfis de atenuação em cada ângulo adquirido) de forma que elas sejam representativas da amostra.

A imagem da amostra aparece no campo de visão (FOV – *Field of View*), sendo a representação da própria matriz do sinograma. Cada célula na matriz é chamada de *pixel*.

A relação entre o tamanho do *pixel* e a espessura do corte gera o *voxel*. Uma imagem digital é composta por um número finito de elementos, cada qual com localização específica e valores particulares. Estes elementos são chamados de *pixels* e *voxels* (Gonzalez & Woods, 2008).

3.5.4 A qualidade da Imagem

Das imagens formadas a partir da radiação do espectro eletromagnético são mais familiares especialmente as imagens de Raios X e bandas de visualização do espectro. Ondas eletromagnéticas podem ter características como a de uma propagação sinuosa de ondas com variação em seu comprimento de onda. Essas ondas também podem se propagar através de uma corrente de partículas com massa, cada partícula vinda de uma onda diferente e se movendo na velocidade da luz. Cada partícula de massa contém uma certa quantidade de energia. Cada ponto de energia é chamado de *fóton*. Se bandas espectrais são agrupadas de acordo com a energia do *fóton*, obtemos um espectro eletromagnético variando de raios gama, que são de altíssima energia, até ondas de rádio, com mais baixa energia eletromagnética (Gonzalez & Woods, 2008).

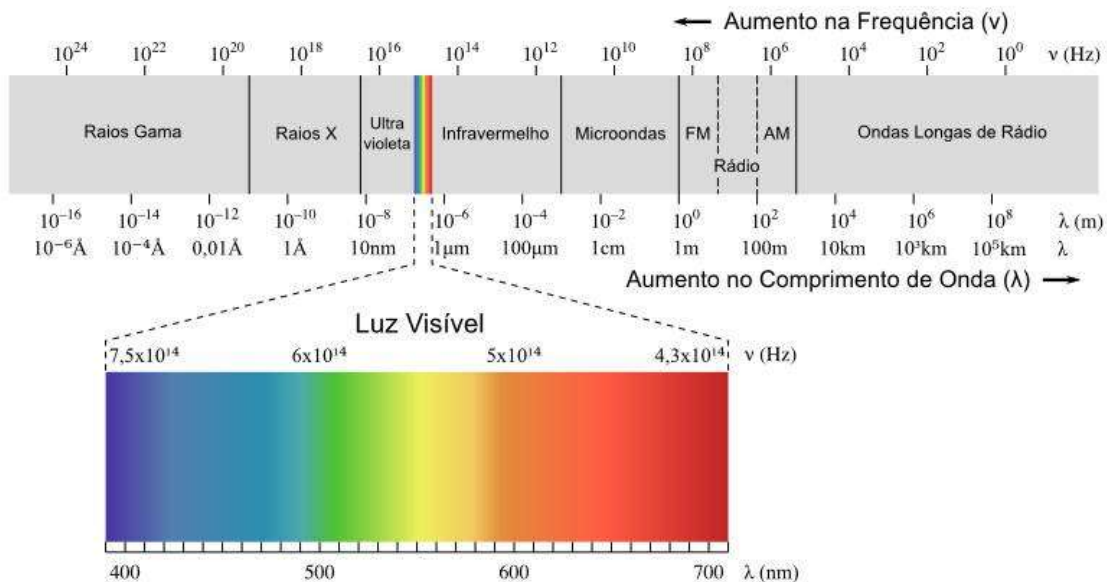


Figura 11: Bandas espectrais agrupadas de acordo com a energia do fóton (Gonzalez & Woods, 2008).

A qualidade da imagem digital está intimamente ligada à representação do coeficiente de atenuação do objeto. Para uma melhor qualidade na imagem são necessários cuidados com os seguintes parâmetros: ruído do pixel, resolução espacial, relação sinal – ruído, resolução em contraste e artefatos da imagem.

O ruído do pixel trata-se de um ruído quântico, em outras palavras, flutuações no número de raios X. Quanto menor for a quantidade de raios x que chega ao detector, maior será a quantidade de ruído.

A resolução espacial é a capacidade do sistema de distinguir pequenas estruturas da imagem. Parâmetros importantes são o tamanho do foco, a geometria do sistema, o espaçamento objeto – detector, algoritmo de reconstrução utilizado e o movimento do foco durante a medida.

A relação sinal-ruído (SNR) é definida pela razão entre o sinal e o ruído de fundo.

A resolução em contraste distingue as diferenças na intensidade da imagem, sendo determinante para o nível de ruído.

Os artefatos correspondem a estruturas geradas artificialmente que não fazem parte fidedigna do objeto. Os artefatos da imagem surgem principalmente pela movimentação do objeto, feixes policromáticos (efeito *bean hardening* – endurecimento de feixe), por objetos de alta densidade e variações na sensibilidade do detector.

3.6 Microtomografia de raios X (MICRO CT)

A partir de 1980 os centros de pesquisa e industriais começaram a utilizar as técnicas de tomografia computadorizada, havendo uma evolução dos estudos fazendo com que as análises tridimensionais em resoluções de investigação variada dessem origem ao micro CT (1994). Este é um equipamento capaz de observar, com precisão, a estrutura interna do objeto, com variados graus de investigação, indo de escalas milimétricas à micrométricas (MACHADO, 2015).

A microtomografia de raios X (MICRO CT) é um método de aquisição não destrutiva de imagens 3D a altas resoluções (SVITELMAN & DINARIEV, 2013). Com o MICRO CT a representação geométrica e as estruturas internas são caracterizadas de forma que as avaliações das propriedades físicas se tornem mais realistas possíveis (VÉRGES et al., 2011). As escalas de análise são diversas e seguem um padrão de visualização de menores a maiores resoluções. Considerada uma das mais modernas ferramentas de investigação 3D, o MICRO CT, que utiliza os mesmos princípios de investigação da medicina, porém aplicados a materiais diversos, neste caso rochas.

O objeto a ser investigado fica posicionado entre a fonte e o receptor, sobre a plataforma rotatória (Figura 12). A fonte emite raios X em todas as direções uniformemente, porém os raios captados pelo objeto são repassados para o detector, formando assim as projeções. A imagem 3D se forma após várias projeções fatia por fatia (*slices*). Para uma melhor investigação, quanto maior a quantidade de projeções, maior será a

qualidade da imagem. A distância entre o objeto, a fonte de emissão e o detector, também é mandatório para a qualidade da imagem. Essas configurações se mostram importantes para os resultados da investigação. Os raios x são produzidos uniformemente em todas as direções a partir do alvo, porém quanto mais perto da fonte a amostra estiver, haverá o maior fluxo possível passando pela amostra até a captura dos raios x pelo detector. Esta solução permite uma melhoria significativa no tempo de aquisição, mas, por outro lado, outros problemas surgem devido à fonte de feixes em cone. A dispersão das radiações e os artefatos da reconstrução do objeto, tanto no topo quanto na base, podem afetar a qualidade da geometria reconstruída. A qualidade da digitalização se deteriora do centro para as bordas do detector, por razões geométricas (FRANZ, 2009).

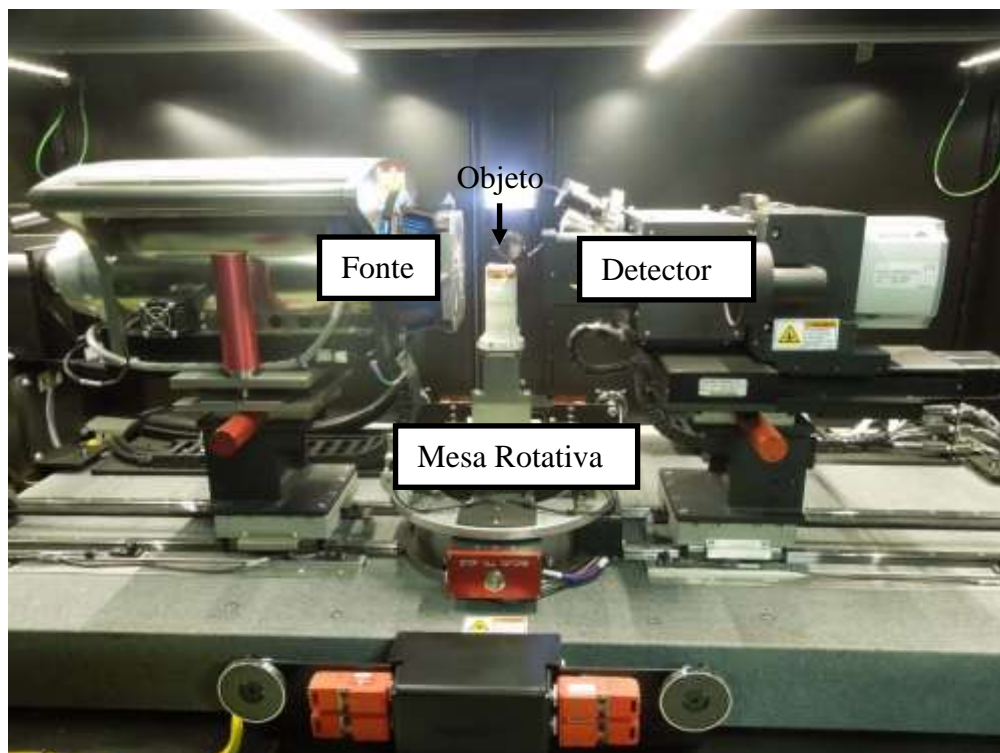


Figura 12: Micro Tomógrafo industrial. [Xradia - Versa XRM – 510]

NETO (2011) obteve êxito na pesquisa de uma brecha dolomítica através da análise de micro CT em conjunto com a avaliação petrográfica dos espaços porosos da amostra carbonática, esta se mostrando heterogênea em sua composição estrutural e mineralógica. Observou na amostra as diferentes fases calcíticas e dolomíticas, onde estas se formaram aos arredores dos poros, tendo influência direta com a porosidade da brecha. A partir da imagem de micro CT foi possível fazer o cálculo da porosidade

efetiva. A permeabilidade se estimou através de cálculos e simulações obtidas a partir da técnica aplicada.

OLIVEIRA (2012) mostra um estudo de porosidade de rochas calcárias com a aplicação da técnica de MICRO CT. Foram feitas imagens 3D de três amostras calcárias com altas resoluções a fim de investigar a distribuição dos tamanhos dos poros, porosidade total e tipos de poros. Os resultados do estudo se mostraram bastante promissores, visto que as três amostras de tamanhos variados e mesma resolução de análise forneceram informações de diferentes tipos de mineralogia constituinte e preservação da conectividade entre poros. Um resultado obtido foi a variação do tipo poroso variando de grandes *vugs* até mesmo micro porosidade intercrystalina.

SHEPPARD (2014) mostrou os avanços da microtomografia (MICRO CT) através de estudos e análises feitas em rochas, utilizando a estrutural laboratorial da Universidade Nacional da Austrália (ANU). O trabalho mostra as dificuldades e soluções encontradas para a tomografia por escaneamento helicoidal. A fonte de raios x é gerada a partir de um filamento de tungstênio, que bombardeia o material alvo com os raios X. Se a intensidade do feixe de *eletrons* for muito alta, ou seja igual ou superior a $2W/um^2$, a amostra é vaporizada. Então, o fluxo máximo permitido deve ser proporcional ao tamanho da área a ser mapeada. A aplicação do micro CT teve alguns desafios a serem vencidos para a aquisição de uma imagem com o mínimo de artefatos possíveis. Foram aplicados filtros e métodos para a redução ou extinção dos problemas quanto a *drift* termal, alinhamento do sistema, magnificação não homogênea e radiação secundária. Foram feitos experimentos com sucesso, para uma segmentação automatizada.

SOETE (2015) utilizou travertinos quaternários de dois locais diferentes (Turquia e Hungria) para estimar propriedades acústicas, suas relações entre poros e sua importância para a interpretação de dados sísmicos de reflexão. Neste trabalho a velocidade da onda compressional (V_p) e a velocidade da onda cisalhante (V_s) foram mensuradas em três locais diferentes das amostras de travertino, sob pressões confinantes que fossem equivalentes as condições naturais em sub superfície. A medida da velocidade sônica foi feita em combinação com as análises de petrografia, difração de raios X (XRD) e micro CT. Os autores chegaram à conclusão que os travertinos do quaternário são heterogêneos com porosidades variando de 2,8 a 34,7 % e valores de permeabilidade entre 0,05 e 18000 mD. Observaram uma composição calcítica em sua grande maioria. Os resultados das ondas acústicas V_p e V_s foram respectivamente

maiores que 2400 m/s e 1100 m/s, onde o *trend* desse resultado se mostra uma relação inversa com a porosidade das amostras. A velocidade da onda cisalhante (V_s) nas amostras é considerada da ordem de 50 à 55% menor comparadas a velocidade da onda compressional (V_p), com taxas de V_p/V_s de 1,8 à 2. Essas taxas são típicas de todos os carbonatos. A análise petrográfica subdividiu 7 tipos porosos dominantes (microporosidade, interpeloidal, interlaminar, móldica, micromóldica, vulgular e estrutural). Baixos valores de velocidades acústicas se mostraram evidentes na microporosidade, interpeloidal e interlaminar. Os maiores poros considerados como móldica e vulgular, bloquearam a propagação da frente de onda. Micromóldica obteve um resultado baixo de velocidade acústica quando comparado com a móldica. Alterações diagenéticas, pedogênese e porosidade estrutural primária resultaram num excesso de 25% de porosidade. As altas porosidades impedem ainda mais a propagação das frentes de onda. A velocidade compressional (V_p) nestas amostras é abaixo de 3695 – 4267 m/s. O formato dos poros possui controle das velocidades de ondas, estas se mostrando influenciáveis pelo seu tipo.

Em SAENGER (2016) apresentam-se fluxos de trabalho aplicados em rochas carbonáticas do Cretáceo utilizando a técnica de micro CT (MICRO CT). Estimções numéricas obtidas a partir das imagens digitais foram analisadas e comparadas aos resultados de estudos laboratoriais. Os experimentos laboratoriais com injeção de mercúrio (MICP) foram feitos em amostras carbonáticas centimétricas, enquanto que os experimentos em *Digital Rock Physics* (DRP) foram feitos em escala milimétrica. Foram feitas caracterização de duas amostras carbonáticas cretáceas, designadas de Carb. A e Carb. B em laboratório, assim como o relato dos procedimentos adotados para a obtenção das imagens CT (MICRO CT). Os fluxos de segmentação multifásicas da imagem e uma calibração cuidadosa do DRP com os dados laboratoriais foram elaborados. Os resultados numéricos, as investigações da porosidade, permeabilidade, elasticidade e anisotropia, a partir de altas e baixas resoluções foram feitos de forma comparativa em termos de resultados dos parâmetros petrofísicos. É possível tirar como parte da conclusão do trabalho que os poros da fase micrítica foram resolvidos parcialmente mesmo em altas resoluções. As predições das ondas P e S obtiveram resultados bem parecidos tanto na parte laboratorial como no MICRO CT. Várias comparações foram feitas entre os resultados petrofísicas das duas amostras analisadas. Os valores das análises laboratoriais de porosidade, permeabilidade e densidade total para a amostra Carb-A são respectivamente 0,167 %; 2,24 mD e 2,69 g/cm³. Para a

amostra Carb-B os mesmos parâmetros petrofísicos de mostram com valores iguais a 0,29 %, 1,90 mD e 2,70 g/cm³. Em termos do resultado de porosidade, a amostra Carb-A quando imageada a altas e baixas resoluções, obteve resultados de porosidade bastante discrepantes, com valores de 25 à 35% para alta e 7,5 à 31 % para baixas, não se mostrando representativa em sua totalidade quando comparada com a porosidade em laboratório (MICP). A amostra Carb-B obteve resultados bastante parecidos com a porosidade laboratorial (MICP) quando analisada à alta e baixa resolução, com valores de 13 à 45% para alta e 7 à 48% para baixa. Para o cálculo da permeabilidade ambas amostras foram recortadas virtualmente em 8 cubos de dimensões equivalentes para as simulações em alta e baixa resolução. Os resultados de permeabilidade e das densidades foram estipulados pelas imagens CT e análise laboratorial.

3.7 Tomografia Computadorizada – CT *versus* Microtomografia de Raios X (MICRO CT)

A principal diferença entre as configurações de um tomógrafo médico e um industrial está no modo em que o “objeto” é posicionado. Em outras palavras, no tomógrafo médico a fonte de raios X gira ao redor de uma mesa fixa central onde o paciente se posiciona. Já no tomógrafo industrial, o objeto se posiciona numa mesa rotatória com a fonte de raios X fixa (Figura 13).

Além do tipo de material destinado a cada tomógrafo, as diferenças mais significativas entre os dois estão na energia aplicada (< 200 Kv para os tomógrafos médicos, e > 15 MeV para os tomógrafos industriais) e na resolução do sistema (1 a 2 mm para partes humanas, <0,5 mm para macro CT e 10 a 20 um para micro CT nos tomógrafos industriais).

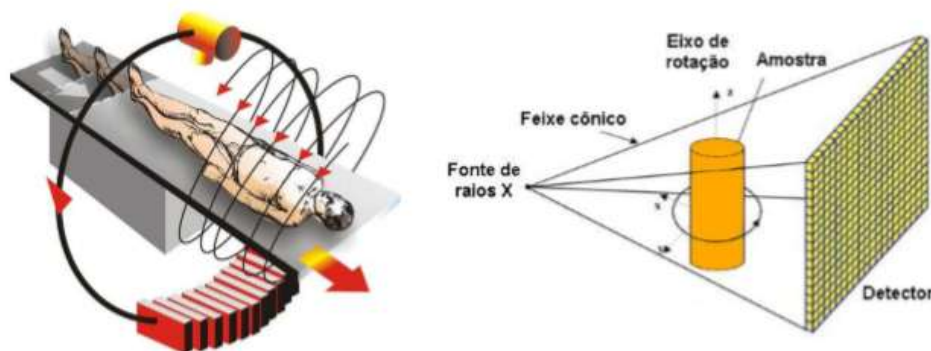


Figura 13: Diferenças entre os tomógrafos médico e industrial. (Miller & Lin, 2009)

Sistemas que exploram uma geometria de varredura helicoidal é o que se tem de mais atual quanto aos sistemas 3D-CT. Nos sistemas de varredura helicoidal a rotação do objeto é realizada simultaneamente com o movimento de translação ao longo do eixo de rotação (FRANZ, 2009), (SASOV, 2002). Existem duas vantagens para esta solução. A primeira é que não existem restrições no comprimento da amostra, ao longo da direção do eixo de rotação, podendo a trajetória helicoidal ser prolongada para o objeto maior que a dimensão do detector. A segunda é que com a mudança apropriada da peça, um número maior de fatias do objeto será projetado na parte central do detector, levando a uma aquisição mais completa e assim a uma resolução constante ao longo do eixo de rotação. Desta forma, também as áreas superior e inferior serão digitalizadas com a mesma resolução que a central (FRANZ, 2009).

A relação entre o tamanho da amostra e a resolução necessária para se obter um resultado fidedigno ao real é uma das questões da Tomografia Computadorizada. A classificação quanto ao grau de investigação em termos de resolução alcançável versus a faixa de medição do objeto imageado está sendo mostrado no gráfico da Figura 14

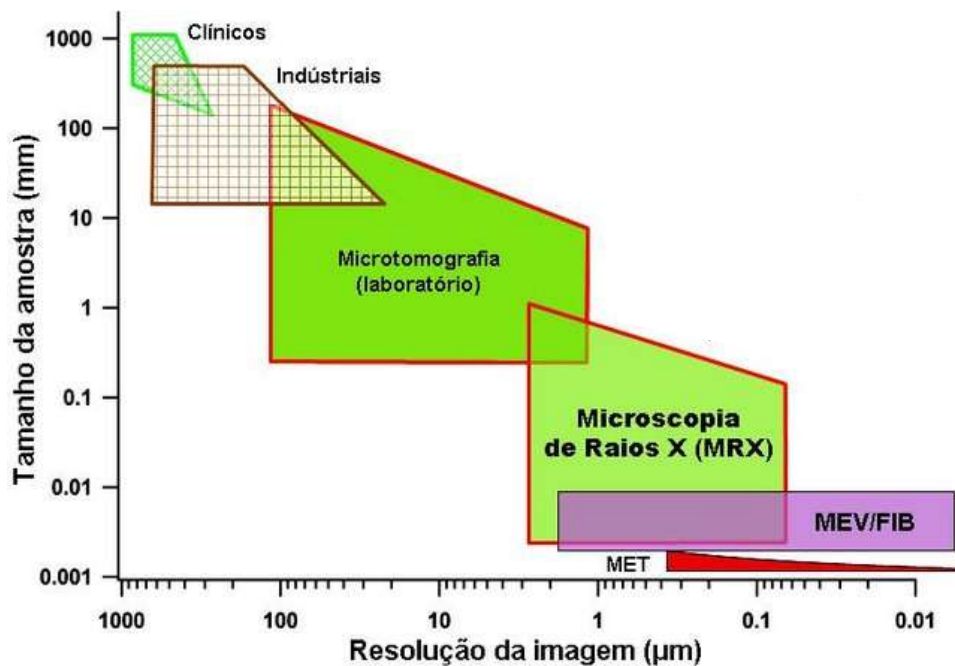


Figura 14: Classificação quanto as resoluções versus faixas de medições (Xradia inc) (ULIANA, 2014).

A classificação de macro CT é utilizada para grandes objetos imageados (entre 1000 até 10 mm) em clínicas médicas, industriais com resolução menor que 100 µm, ao

contrário do micro CT utilizado para medidas de objetos menores (100 até 0,5 mm) com resolução variando de 100 à 1 μm . O micro CT utiliza tubos de raios-X com pontos focais pequenos (de 1 a 50 μm) e posicionando o objeto próximo ao foco. Desta forma, uma maior ampliação geométrica é alcançada. A resolução do micro CT é limitada, devido ao tamanho do ponto focal. As fontes de raios-X com tubos de raios-X de nanofoco (ou seja, pontos focais menores que 1 μm) são as mais apropriadas para escanear objetos de menor tamanho.

3.8 SEM – Microscópio Eletrônico de Varredura - MEV

O SEM também conhecido como MEV é um Microscópio de Varredura Eletrônica, que produz imagens de alta resolução e alta ampliação da superfície de uma amostra. As imagens avaliam a estrutura superficial, os aspectos topográficos, e a composição da amostra. As imagens são de caráter virtual podendo chegar a uma ampliação de até 300.000 vezes (Dedavid et al., 2007).

O primeiro MEV foi construído em 1938 pelo físico alemão Von Ardenne (VON ARDENNE, 1938). Em 1942, Zworykin utilizou o MEV na observação de espessas amostras junto com a equipe de pesquisadores do laboratório RCA de Nova Jersey (ZWORYKIN et al., 1942).

Para o funcionamento do MEV faz-se necessário a utilização de feixes de elétrons de pequeno diâmetro para fazer a exploração da superfície da amostra, ponto a ponto, através da transmissão do sinal de um detector até uma tela catódica. O feixe de elétrons incidente tem que estar sincronizado com o feixe de elétrons varrido na superfície da amostra. Para haver a incidência e aceleração de elétrons é necessária uma fonte emissora por um filamento de tungstênio aquecido operando numa tensão de aceleração entre 1 à 50 Kv. O feixe acelerado na alta tensão entre o filamento e o ânodo é focalizado sobre a amostra por 3 lentes eletromagnéticas por um *spot* menor que 4 nm. O feixe ao interagir com a superfície da amostra produz elétrons e fótons que são coletados por detectores adequados e convertidos em sinal de vídeo. A resolução espacial depende da energia que os elétrons atingem os detectores (Dedavid et al., 2007).

Os principais componentes de um MEV (Figura 15) correspondem a coluna de elétrons, o sistema de varredura, detectores, monitores, sistema à vácuo e controladores do sistema eletrônico. A coluna de elétrons do MEV consiste numa pistola com duas ou mais lentes eletromagnéticas operando num sistema à vácuo, a qual gera elétrons livres que são acelerados numa faixa de energia variando entre 1 a 40 KeV.

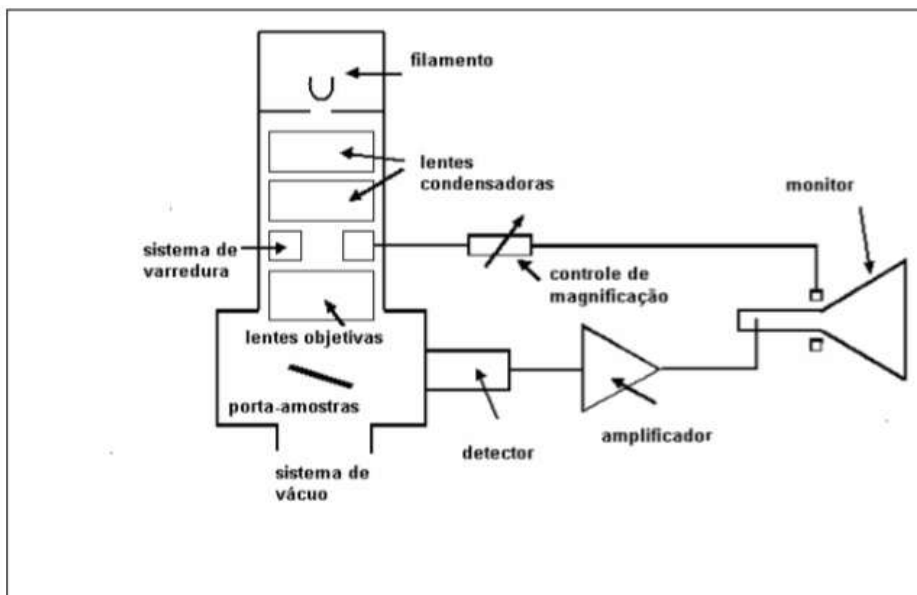


Figura 15: Principais componentes do MEV. (Dedavid et al., 2007) adaptado por (KESTENBAC., 1994)

O objetivo das lentes é criar uma pequena sonda eletrônica focalizada na amostra. A maioria dos MEVs geram um feixe de elétrons na superfície da amostra com um diâmetro inferior a 10 nm no ponto da amostra, enquanto ainda carrega corrente suficiente para formar uma imagem.

Para produzir as imagens o feixe de elétrons é focalizado numa fina sonda que é digitalizada através da superfície da amostra com a ajuda de bobinas de varredura. Cada ponto da amostra atingido pelos elétrons acelerados emite um sinal na forma de radiação eletromagnética.

As partes selecionadas dessa radiação, geralmente elétrons secundários (SE) e / ou elétrons retroespalhados (BSE) são coletados por um detector e o sinal resultante é amplificado e exibido em um monitor. A região resultante sobre a qual os elétrons incidentes interagem com a amostra é conhecida como volume de interação. A taxa de deposição de energia varia rapidamente ao longo do volume de interação sendo maior próximo ao ponto de impacto do feixe. O volume de interação aumenta com o aumento

da energia do feixe incidente e diminui com o aumento do número atômico médio da amostra. Os detalhes e a resolução da imagem no MEV são determinados não só pelo tamanho da sonda de elétrons, mas também pelo tamanho e pelas características do volume de interação. Para elétrons secundários (SE), a profundidade de amostragem varia de 10 à 100 nm e o diâmetro é equivalente a área emissora de elétrons retroespalhados (BSE). O BSE é emitido a partir de profundidades muito menores em comparação com a SE. Em última análise, a resolução no MEV é controlada pelo tamanho do volume de interação. A imagem do MEV é um mapa 2D de intensidade no domínio analógico ou digital. Cada pixel de imagem no visor corresponde a um ponto na amostra que é proporcional à intensidade do sinal capturado pelo detector em cada ponto específico

3.9 EDS – Espectrometria Dispersiva de Energia

A análise por EDS é uma ferramenta muito importante pois permite a identificação da composição da amostra, mesmo que qualitativamente, em pontos específicos da imagem (CRUZ et al., 2006). Em muitos artigos a sigla EDS (Energy Dispersive Spectroscopy), também é chamada de EDX (*Energy Dispersive X ray Analysis*), para se referir a mesma medição. O princípio da técnica envolve basicamente a energia resolvida do espectro de raios X emitidos por uma amostra sólida bombardeada com um feixe de elétrons focado para obter uma análise química localizada. Em princípio, todos os números atômicos dos elementos da tabela periódica, indo de 4(Be) até 92(U), podem ser detectados.

As medições envolvem análises qualitativas e quantitativas. As análises qualitativas correspondem a identificação das linhas no espectro de raios X, enquanto que a análise quantitativa mede as intensidades das linhas para cada elemento na amostra e para os mesmos elementos nos padrões de calibração de composição conhecida. Ao varrer o feixe de uma tela e exibir a intensidade de uma linha de raios X selecionada, as imagens de distribuição dos elementos são produzidas por elétrons coletados na amostra e revelam a topografia da superfície ou diferenças médias do número atômico, de acordo com o modo selecionado.

O Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) está relacionado com a sonda eletrônica e é projetado para a produção de imagens eletrônicas, porém pode ser usado para mapeamento de elementos e até mesmo na análise pontual, se houver a adição de um espectrômetro de raios X. Considera-se, portanto, a sobreposição nas funções desses instrumentos.

Os espectrômetros EDS empregam análise de altura de pulso, sendo proporcional a energia do fóton de raios X. Um detector em estado sólido é usado para emitir os pulsos e um analisador multicanal faz o registro dos mesmos. O detector de raios-X, ou mais especificamente, a técnica EDS (Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy), é usado para qualitativamente, e na maioria das vezes "semi-quantitativamente", determinar a composição elementar de uma área de interesse que foi visualmente identificada e observada usando os detectores secundários de elétrons e retroespalhamento. Trata-se de um sistema de classificação de diferentes minerais por diferença de número atômico através do seu espectro.

3.10 Análise EDS utilizando MEV

O microscópio de varredura eletrônica (MEV) emprega feixes de elétrons na obtenção de informações de uma amostra em escala nanométrica. Os principais tipos de sinais detectados são os elétrons retroespalhados (BSE) e secundários (SE), os quais geram uma imagem em tons de cinza na amostra com grandes ampliações. Entretanto, existem outros sinais que podem ser um produto da interação do elétron com a matéria e fornecer informações adicionais sobre a amostra. A interação da matéria com os feixes de elétrons gera uma variedade de sinais que transportam diferentes informações sobre a amostra.

Os elétrons retroespalhados produzem imagens com contraste que transportam informações sobre as diferenças no número atômico. Os elétrons secundários fornecem as informações topográficas. A catodoluminescência pode fornecer informações sobre a estrutura eletrônica, além da composição química dos materiais; e os elétrons transmitidos descrevem a cristalografia e a estrutura interna da amostra. Os raios X também são um tipo de sinal bastante usado em MEV.

A explicação do princípio da técnica de análise é através da geração dos raios X. Cada átomo tem um número de elétrons que residem sob condições normais em posições específicas. Essas posições pertencem a certas camadas, que possuem energias distintas. A geração dos raios X em um MEV é um processo dividido em duas etapas: Na primeira o feixe de elétrons atinge a amostra e transfere parte de sua energia para os átomos da amostra. Essa energia pode ser usada pelos elétrons dos átomos para pular de uma camada de energia baixa para outra alta, ou ser emitido de um átomo. Se tal transição ocorrer, o elétron sai atrás de uma valência livre. Esses locais possuem carga positiva e, na segunda etapa do processo, atraem os elétrons carregados negativamente das camadas de energia mais alta. Quando um elétron de um nível de energia alta preenche a valência do nível de energia inferior, essa diferença de energia obtida na transição pode ser liberada sob a forma de raios X. Dessa forma, os raios X correspondem a uma “impressão digital” de cada elemento e podem ser usados para identificar o tipo de elemento que existe em uma amostra.

O funcionamento da detecção de raios x na análise do material através de EDS se dá através dos detectores de desvios de silício (SDD). Eles são superiores aos detectores convencionais de Si (Li) devido as taxas de contagem mais elevadas, melhores resoluções e recursos analíticos ágeis. Esses detectores são colocados em um ângulo muito próximo da amostra e tem a capacidade de medir a energia dos fótons que chegam aos raios X. Quanto maior o ângulo sólido entre o detector e a amostra, maior a probabilidade de detecção dos raios X, e, portanto, a probabilidade de obter os melhores resultados.

Os dados gerados pela análise EDS consistem em espectros com picos correspondentes aos diferentes elementos presentes na amostra em sua totalidade. Cada elemento possui um pico de energia característica exclusiva. Além disso, o EDS pode ser usado para análise qualitativa (identificar o tipo de elemento), bem como quantitativa (a porcentagem de concentração de cada elemento da amostra). Na maioria dos MEVs, o software acoplado permite a identificação automática dos picos e o cálculo da porcentagem atômica de cada elemento que é detectado. São inúmeras as vantagens na aplicação da técnica de EDS, sendo mais uma delas a caracterização não destrutiva da amostra que requer pouca ou nenhuma preparação prévia.

3.11 QEMSCAN – Avaliação Quantitativa de Materiais por Microscopia Eletrônica de Varredura

A QEMSCAN (*Quantitative Evolution of Minerals by Scanning Electron Microscopy*) é uma ferramenta de identificação mineralógica automatizada e de alta definição. Esta ferramenta consiste num microscópio eletrônico de varredura (MEV) de base, equipado com quatro detectores do sinal de espectrometria dispersiva de energia de raios x (EDX), um microanalisador e uma unidade de processamento eletrônico projetada. A identificação mineralógica e de outros componentes da amostra é assim permitida devido a uma extensa base de dados mineralógicos acoplados no sistema de leitura / identificação.

A superfície da amostra é digitalizada ao longo de um grid pré-estabelecido e padronizado, onde cada nó desse grid é identificado como um mineral ou um espaço poroso. A resolução do grid selecionado define um mapa mineralógico como uma matriz de pixels, onde cada pixel contém detalhadas informações químicas.

O sistema digitaliza uma área de superfície de 10 x 10 mm ou 4 x 4 mm, dividido em grids (Figura 16). Para cada grid, o feixe de elétrons atravessa a superfície coletando dados em pontos espaçados de 50, 10 ou 4 μm , nas direções X e Y (intervalo de escalonamento). O volume de excitação do feixe dentro do material é de aproximadamente 1 μm^3 ou menos a depender do material.

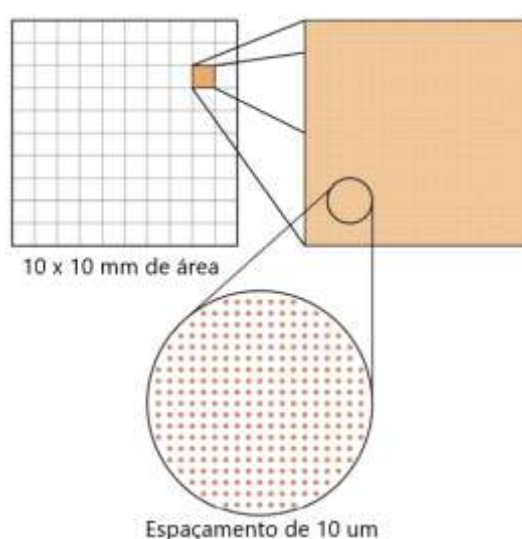


Figura 16: Espaçamento do grid de leitura do feixe de EDX (© Rocktype, s.d.)

O sistema primeiro faz a leitura da intensidade do elétron retroespalhado (BSE) para medir a densidade do material. O feixe de elétrons foca em pontos onde a leitura do BSE fica acima do limite permitido para a gravação dos espectros nos detectores de raios X. O espectro captado é então alimentado para a biblioteca de identificação de minerais. As áreas de menor intensidade são registradas como fundo ou porosidade. Os valores são extrapolados para formar as imagens dos grids que são unidos e assim produzem o mapa mineral.

A amostra de rocha é moldada em um bloco de resina Epoxi e carregada no MEV (Figura 17). Um padrão de grid é mapeado na superfície da amostra para ter a definição da área de varredura da superfície. Cada campo mede 1,5 x 1,5 mm com alguns μm de sobreposição aos campos circundantes.

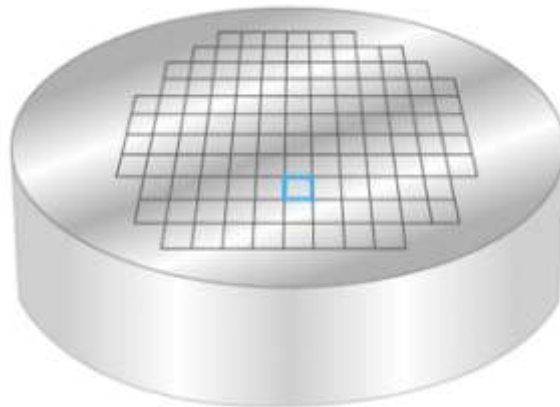


Figura 17: Bloco do MEV com o padrão grid da amostra embebida em resina epóxi.

O feixe de elétrons varre grid a grid para produzir uma imagem de elétrons retroespalhados (Figura 18). Áreas preenchidas com resina, composta principalmente de carbono, retornam baixos valores de BSE e são excluídos da análise EDX. Regiões com altos valores de BSE são varridas novamente com um feixe de elétrons mais potente usando uma tensão de aceleração de 15 Kv.



Figura 18: Varredura grid a grid na superfície da amostra.

O feixe de elétrons reside em cada ponto de análise enquanto os detectores fazem o registro do EDX. Uma vez contados suficientes raios X, o feixe se move para o próximo ponto de análise.

É utilizado tanto a intensidade dos sinais com os elétrons retroespalhados (BSE) quanto o sinal de espectrometria dispersivo de energia de raios x (EDX), para cada ponto de medição. Os EDX são utilizados na atribuição da identidade mineralógica, ponto a ponto medido. A identificação é comparada com o sinal BSE e também com a resposta do espectro EDX utilizando um programa de identificação de espécies minerais (SIP), ou também por meio de um banco de dados. Para a análise da QEMSCAN são feitos de quatro a cinco seções polidas para cada amostra (Gottlieb, 2000).

As figuras 19 e 20 mostram a média dos números atômicos dos minerais mais abundantes em rochas sedimentares e a proporção dos mesmos quando submetidos a incidência de feixes de raios x produzindo elétrons retroespalhados.

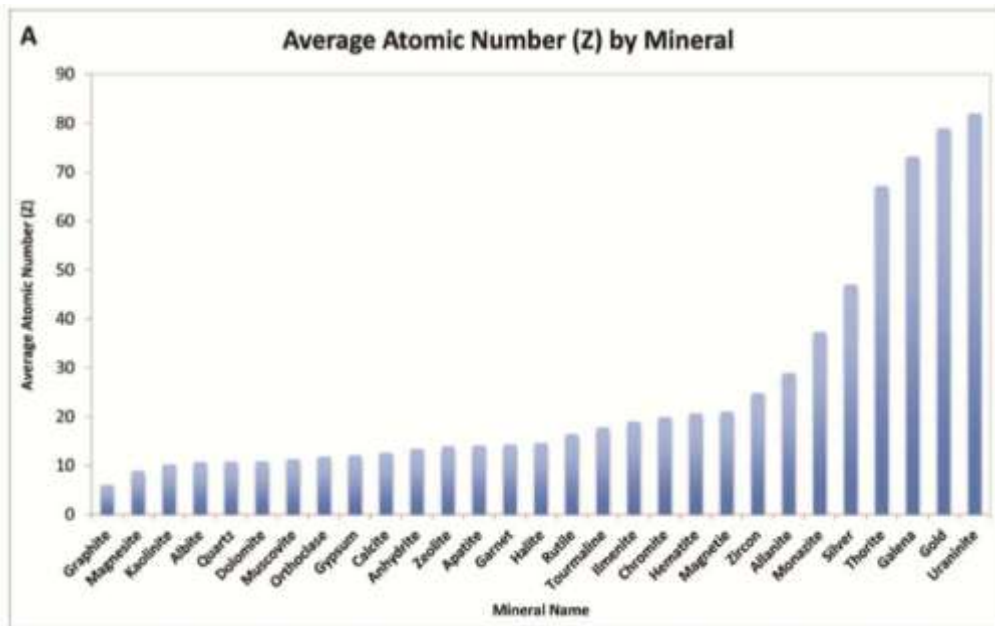


Figura 19: Média dos números atômicos (Z), dos minerais mais comuns encontrados em sedimentos e rochas sedimentares. (Sylvester, 2012)

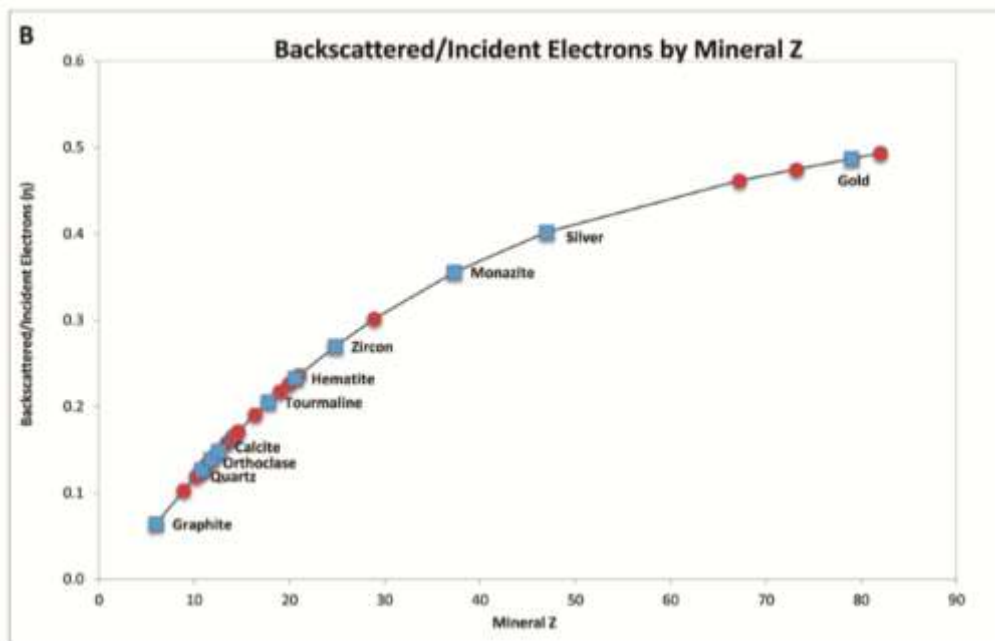


Figura 20: A relação de mineral Z com a proporção dos elétrons retroespalhados produzidos a partir da incidência de um feixe de elétrons. Os círculos vermelhos na curva são os mesmos minerais que estão na figura 23, com alguns minerais nos quadrados azuis.

A composição elementar combinada com o brilho dos elétrons retro-espalhados (BSE) e a taxa de contagem de raios x são informações que se convertem em fases minerais.

Além do QEMSCAN outro produto comercial de análise mineral automatizado é o MLA (*Mineral Liberation Analyzer*), com base na análise da imagem de elétrons

retospalhados (BSE) para a determinação do contorno do grão, dos locais para a aquisição espectral de raios X de um mineral através da comparação de uma biblioteca de referência de espectros. O MLA é aplicado com mais frequência na indústria metalúrgica otimizando os processos de identificação de minérios, permitindo uma análise qualitativa de partículas mistas (quando dois ou mais minerais estão distribuídos em um mesmo grão) e como elas estão associadas.

Ambas tecnologias (QEMSCAN e MLA) foram desenvolvidas no final dos anos 70 pela CSIRO na Austrália e surgiu para auxiliar os ensaios químicos feitos em minérios e orientar a tomada de decisões na exploração, processamento e refinamento de metais (Miller *et al.*, 1982), (Reid *et al.*, 1984). Com a evolução da tecnologia a aplicação se expandiu para a indústria forense (Pirrie *et al.*, 2004), Petróleo e Gás (Edwards, 1999), (Butcher, 2010), Geologia Planetária (Botha, 2008) e Geociências (Liu, 2005), (Grauch, 2008) como um todo.

4 Materiais e Métodos

Um furo estratigráfico (1-BSB01-PB) foi realizado na BRP, com a extração de trezentos metros de testemunhos, os quais se encontram disponíveis para análise no Laboratório de Petrofísica da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG) (Santiago, 2015), com o intuito de entender as características das fácies da BRP. Segundo Silva, 2015, a distribuição de fácies do furo se dá com intercalações de litofácies pelíticas e arenosas. A autora fez uma distinção de 4 litofácies recorrentes no furo (Figura 22). Foram selecionados do poço, para a elaboração desta pesquisa, 4 amostras, cada uma representando uma litofácies descrita por Silva (2015). As fácies identificadas foram de folhelho calcífero vermelho (LTF 1), folhelho calcífero cinza (LTF 2), arenito argiloso (LTF 3) e folhelho negro (LTF 4). A Figura 21 mostra as amostras das quatro litofácies do furo entregues para a análise CT.



Figura 21: Litofácies do furo 1-BSB01-PB

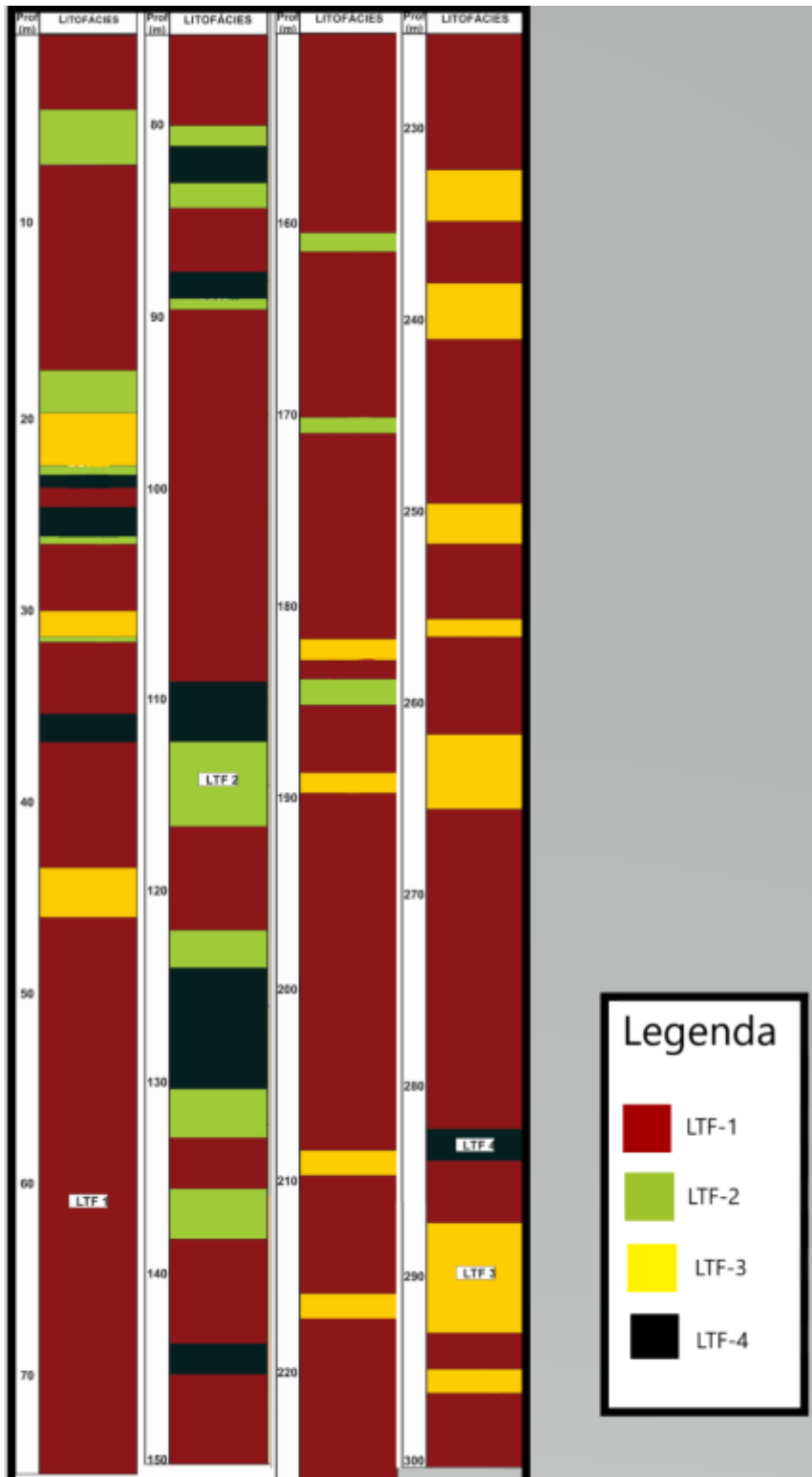


Figura 22: Distribuição de litofácies no furo 1-BSB01-PB, descritas por Silva (2015).

Com base nos dados disponíveis para o trabalho, foi montado um fluxograma (figura 23 e figura 24) para melhor entendimento das etapas a serem realizadas. O trabalho se divide em duas etapas sendo denominadas de fluxos 1 e 2.



Figura 23: Fluxo de trabalho aplicado

O fluxo 1 corresponde a realização da Tomografia Computadorizada, nas 4 litofácies identificadas por Silva, (2015) do furo estratigráfico 1-BSB01-PB.

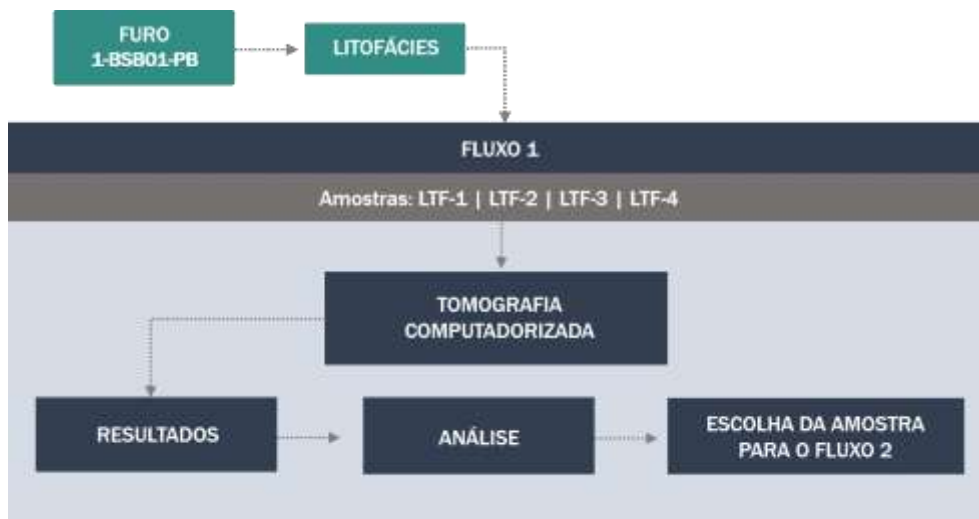


Figura 24: Detalhamento do Fluxo 1

As amostras LTF 1, 2, 3 e 4 foram escaneadas em clínica médica no Tomógrafo SIEMENS SOMATON SPIRIT (figura 25).

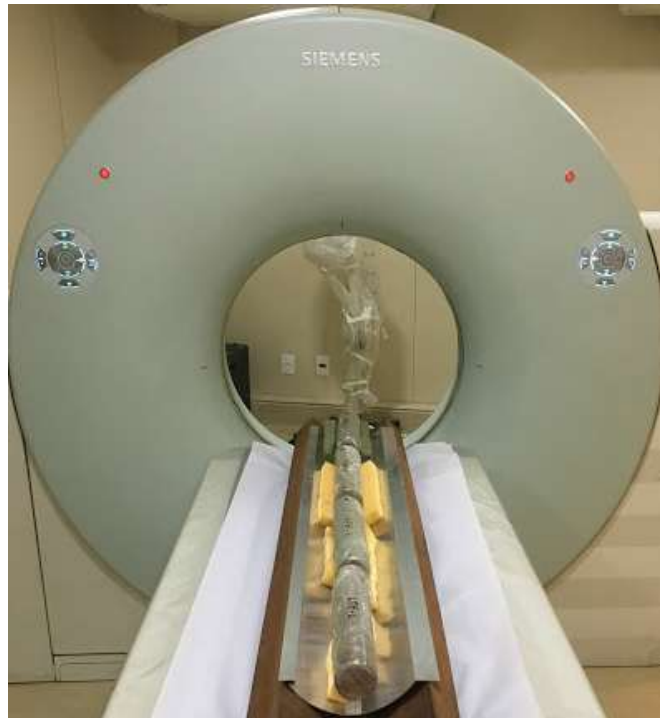


Figura 25: Tomografia Computadorizada realizada em clínica médica com as litofácies do furo

A partir da análise do resultado da Tomografia Computadorizada, foi feita a escolha de uma das litofácies para a aplicação do fluxo 2, a qual estou denominando de pré-conclusão. A pré-conclusão do trabalho significa o final do fluxo 1 e assim, dando início as etapas do segundo fluxo. O fluxo 2 corresponde ao detalhamento do estudo de uma das amostras, com o aumento na resolução de imageamento, através da aplicação das técnicas de micro CT, nano CT (QEMSCAN) em conjunto com a descrição petrográfica.



Figura 26: Detalhamento do Fluxo 2

Parte do fluxo 2 foi feito no departamento de matemática aplicada da ANU (*Australia National University*), com a equipe do professor Adrian Sheppard. O contato entre a COPPE / UFRJ e a ANU, se deu através da visita da empresa FEI ao LAMCE (Laboratório de Métodos Computacionais em Engenharia), em agosto de 2016. A FEI em conjunto com a ANU ofereceram, gentilmente, uma análise detalhada com a utilização do micro CT Heliscan (Figura 27), aplicado para reservatórios de óleo e gás, a fim de buscar novas iniciativas tecnológicas no Brasil. Sendo assim, foi necessário a aplicação de um critério de escolha da amostra a ser enviada para a ANU, para a realização do micro CT.



Figura 27: Micro CT Heliscan da empresa FEI (extraído de FEI, s.d.).

O micro CT Heliscan apresenta dois tipos de aquisições CT: a aquisição circular, sendo a aquisição convencional do mercado de óleo e gás (projeção cônica), e a aquisição helicoidal. No caso da amostra LTF-3 optou-se pela aquisição helicoidal para ter maior resolução em imagem. Com o resultado da análise no micro CT Heliscan, foi feita a retirada de subamostras em regiões homogêneas, para análise no microscópio eletrônico de varredura Apreo BSEM (Figura 28). O Apreo BSEM possui tecnologia que combina lentes de imersão eletromagnética (ML) e eletroestática (EL), criando um conjunto de lentes, que é o componente final do microscópio (FEI, s.d.)



Figura 28: Microscópio eletrônico de varredura Apreo SEM da FEI (extraído de FEI, s.d.).

As imagens adquiridas no Apreo BSEM, foram carregadas na plataforma QUANTA 250F (Figura 29) a qual permite registrar, coletar e / ou sobrepor múltiplas imagens de diferentes extensões e resoluções (SEM, SEM-EDS, Óptica, etc) para medições mineralógicas automatizadas para fins de análise, interpretações e integrações de dados.



Figura 29: Quanta 250F – QEMSCAN (extraído de FEI, s.d.).

A fim de corroborar com o resultado e validar as técnicas de análise não destrutivas, foram feitas lâminas delgadas. O microscópio utilizado para as descrições das lâminas delgadas foi o Leica tipo DMLP (Figura 30) e a câmera digital Leica MC 190 HD.



Figura 30: Microscópio Leica DMLP

Os softwares para processamentos das imagens de microtomografia e nanotomografia foram o AVIZO e PERGEOS da empresa FEI. Para o tratamento das imagens de microscopia utilizou-se o software Leica LAS. e, por conseguinte, foi feita a análise dos

poros, suas conexões e a identificação da mineralogia constituinte. A comparação dos resultados das duas análises do fluxo 2, nos dá a conclusão da dissertação.

4.1 O Fluxo 1:

As amostras LTF1, LTF2, LTF3 e LTF4 foram enroladas em plástico filme, individualmente devido a fragilidade das mesmas, e colocadas em uma plataforma de madeira e alumínio na bancada do tomógrafo médico, com o intuito de proteger e evitar possíveis artefatos na imagem (Figura 31). A amostra LTF-4 é mais próxima do tubo de raios x enquanto que a amostra LTF-1 encontra-se mais distante.

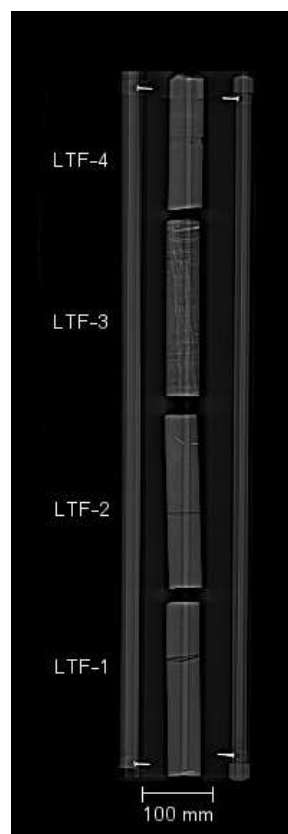


Figura 31: Litofácies do poço 1-BSB01-PB após o imageamento, mostrando a disposição das mesmas.

As amostras foram imageadas e reconstruídas na clínica radiológica Pedro II, localizada na cidade de Petrópolis, no estado do Rio de Janeiro. As imagens reconstruídas foram abertas no software Avizo para estudo da qualidade da imagem e seleção da amostra para a próxima etapa do estudo.

4.2 O Fluxo 2:

A amostra escolhida no fluxo 1 para aplicação do fluxo 2 foi enviada para a ANU (*Australia National University*) através da empresa FEI. A amostra LTF-3 trata-se de um arenito arcossiano de granulometria fina com 25 cm de comprimento e foi imageada no micro CT *HeliScan*, com as medidas originais. As resoluções das primeiras imagens alcançam 31,3 μm com 20mm de diâmetro. Após o escaneamento, foi feito um corte em sessão de um lado paralelo ao eixo principal e próximo a borda da amostra de forma que fique como uma fita vertical, tal que a maior parte do diâmetro do plug continua intacto para usos futuros. As imagens apresentam resoluções de 2,67 μm com 2 mm de diâmetro com o objetivo de atingir a escala de poro. As sequências das figuras 32, 33 e 34 mostram o resultado do imageamento da amostra original e do corte em sessão nas orientações, X, Y e Z, respectivamente.

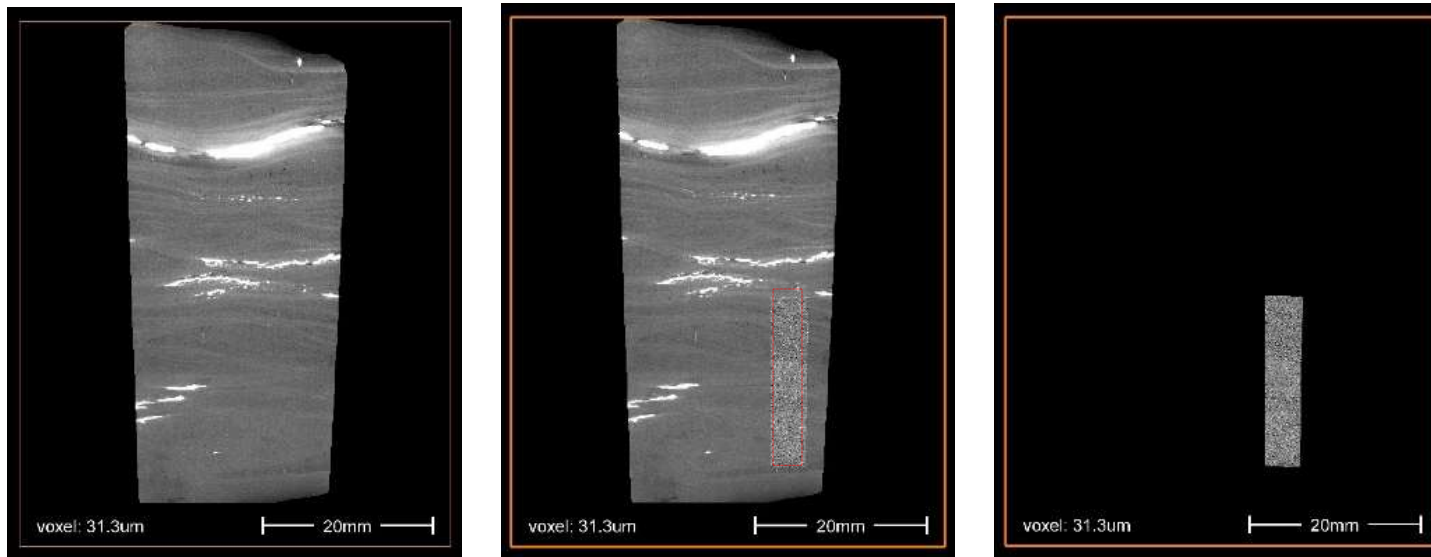


Figura 32: Seção X da amostra seca escaneada a baixa resolução no Heliscan e subamostra seca retirada e escaneada a alta resolução.

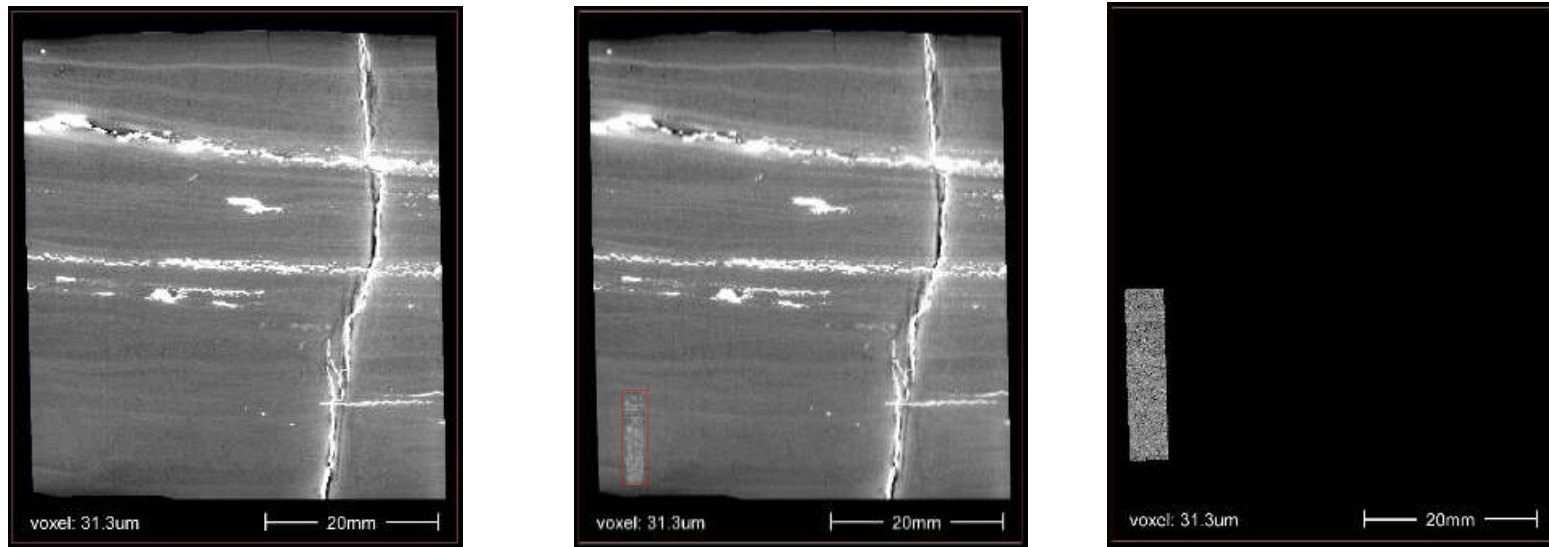


Figura 33: Seção Y da amostra seca escaneada a baixa resolução no Heliscan e subamostra seca retirada e escaneada a alta resolução.

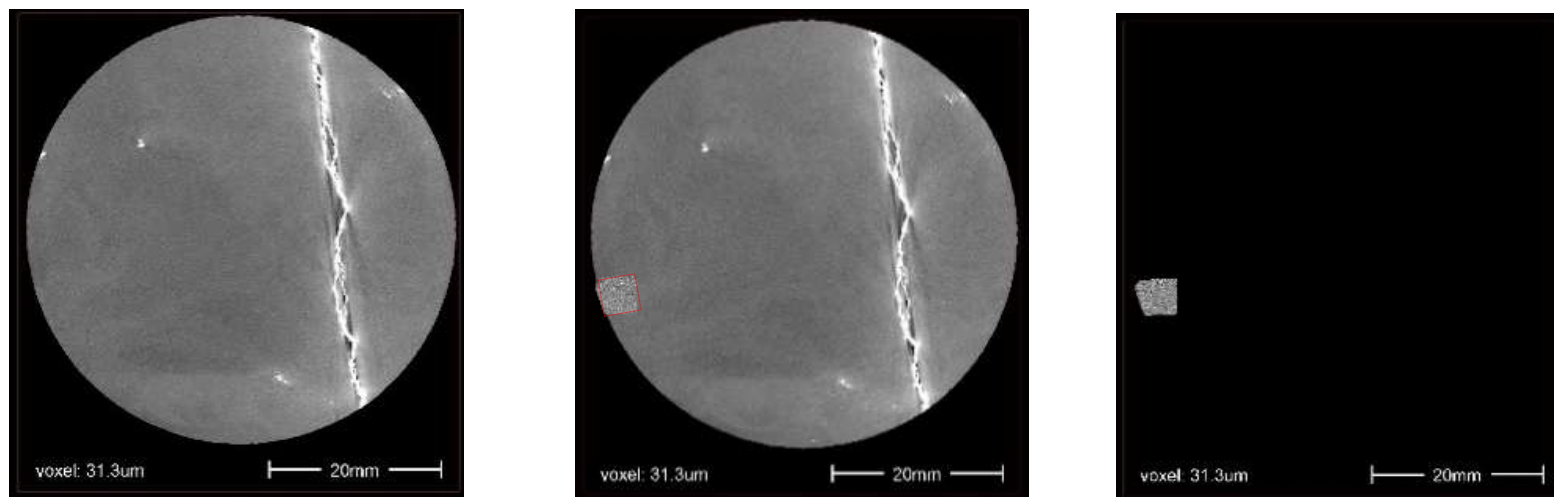


Figura 34: Seção Z da amostra seca escaneada a baixa resolução no Heliscan e subamostra seca retirada e escaneada a alta resolução.

A sub amostra em formato de mini prisma foi então saturada com um líquido denso aos raios X (alto contraste) e foi novamente imageado no micro CT HeliScan. Esta técnica foi feita para a estimativa da porosidade utilizando a sequência de imagens tanto da amostra seca quanto saturada com o fluido de atenuação aos raios X. A combinação das duas sequências de imagens microtomográficas resulta no mapa de poros. Muitos poros não ficaram bem resolvidos com a resolução obtida, alguns microporos não puderam ser captados, a não ser pela técnica de subtração das mesmas imagens a alta resolução e baixa resolução. O mapa de poros foi feito na ANU, porém apenas as imagens 2D foram entregues, sem o resultado numérico da quantidade de poros. Infelizmente na resolução de 31 μm fica ruim observar e segmentar os poros da amostra. Porém, foi feita uma imagem de alta resolução para a confecção do mapa mineralógico. A imagem tem resolução de 100 nm e com ela foi possível fazer uma identificação da distribuição de poros (Figura 35). Para saber quanto de poros e sólidos existem nos tomogramas a 100 nm, foi feita a segmentação das imagens.

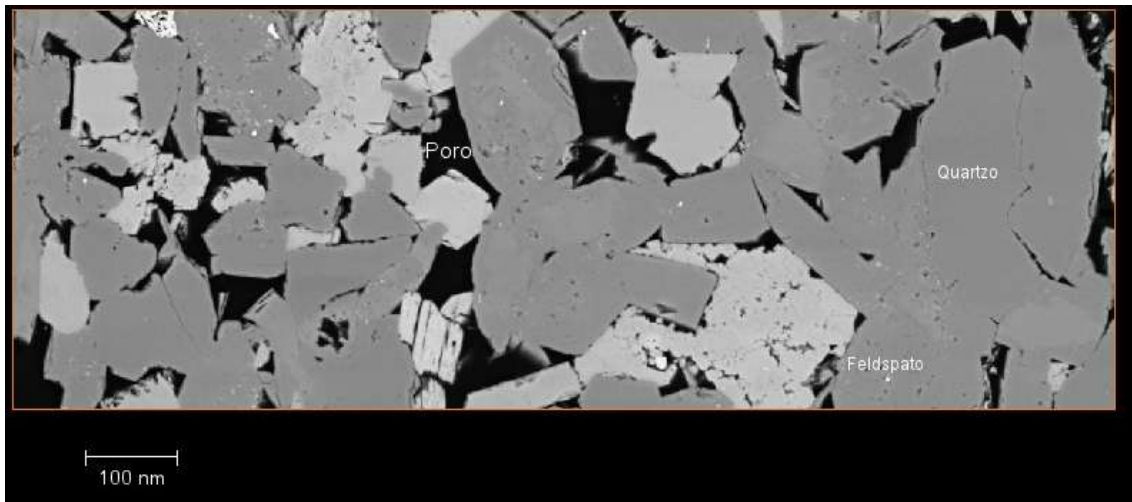


Figura 35: Imagem com resolução boa para segmentação de poros

A região da amostra que foi feita a imagem de alta resolução está na figura 36.

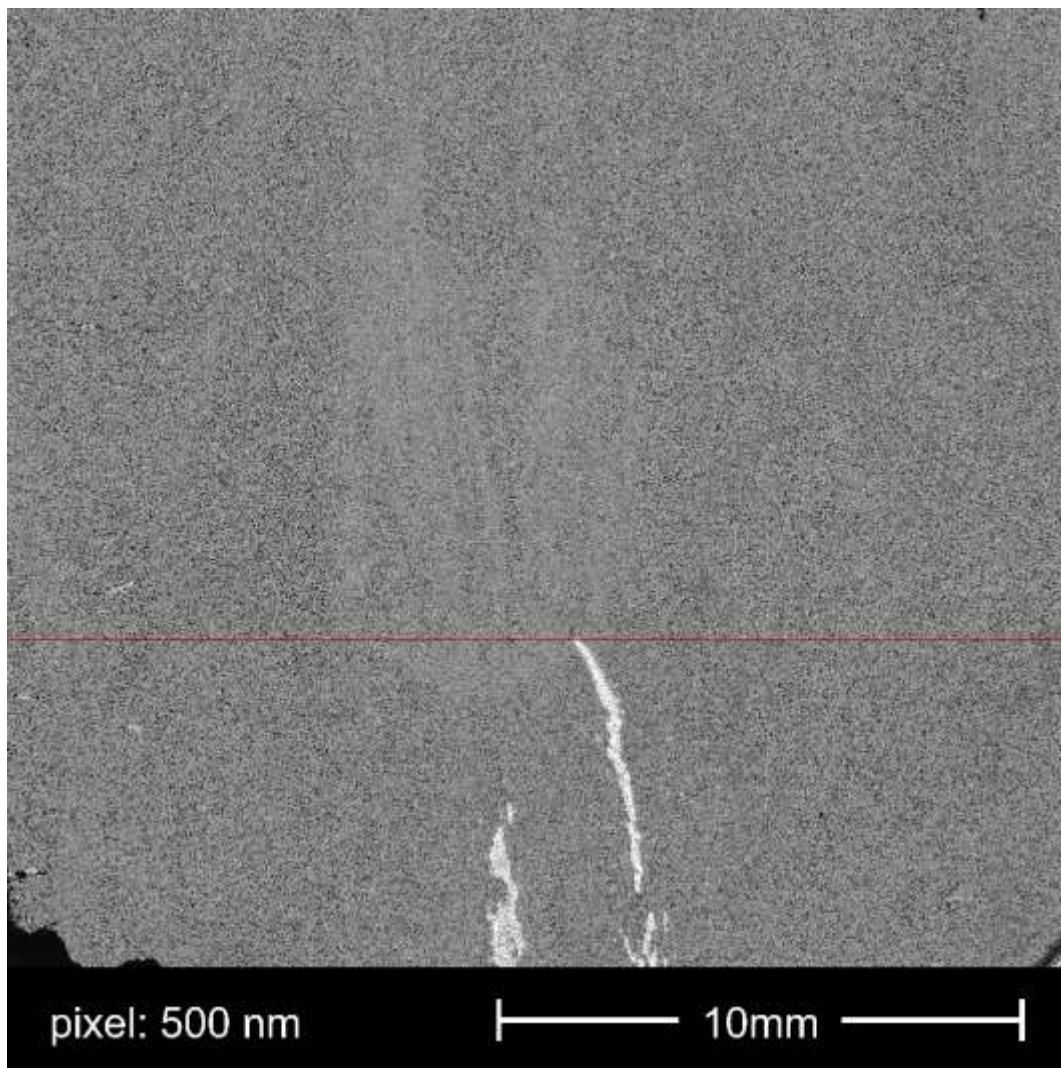


Figura 36: Região mostrando o local da amostragem de 100 nm, em vermelho.

A imagem da região em vermelho, da figura 36, apresentou um tamanho incompatível para abrir no software Avizo. Portanto, como solução, a imagem foi subdividida em 6 seções, gerando 6 imagens correspondentes. Cada imagem passou pelo processo de filtragem, segmentação e análise.

Para o processo de filtragem da imagem foi utilizado o filtro *Median* suavizando os ruídos e artefatos da imagem. As figuras 37 e 38 mostram a mesma imagem, antes e depois do filtro *Median*, respectivamente. O filtro *Median* corresponde a um filtro passa baixa permitindo a passagem de baixas frequências com o objetivo de atenuar os ruídos e as altas frequências. Ocorre a redução do contraste assim como o desfoque da imagem. Os níveis de cinza de todos os pixels da vizinhança são classificados com valores menores até altos valores. O pixel central na classificação é então o valor médio utilizado no processo de saída da filtragem.

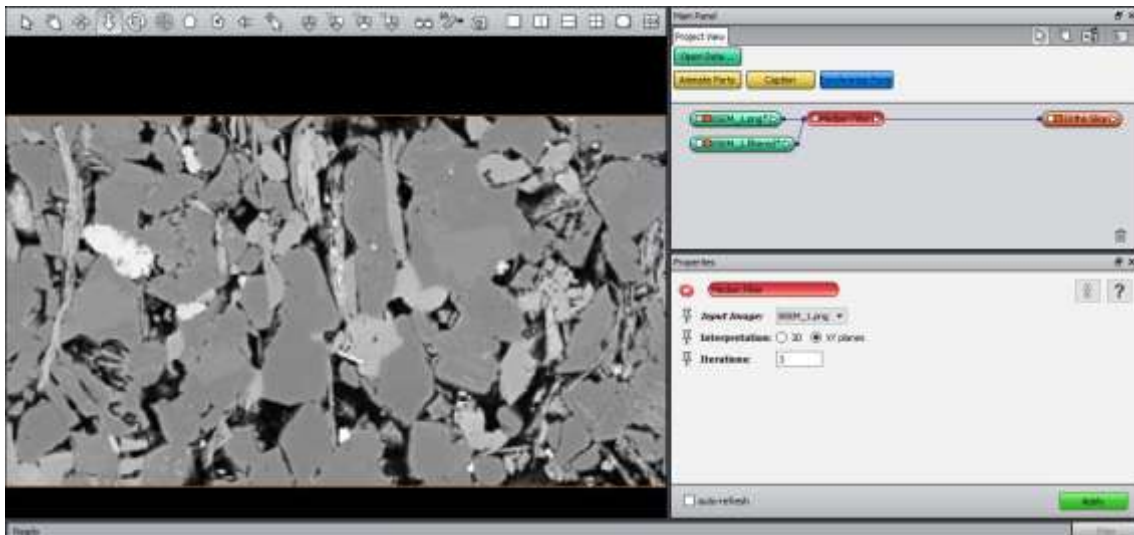


Figura 37: Antes da filtragem

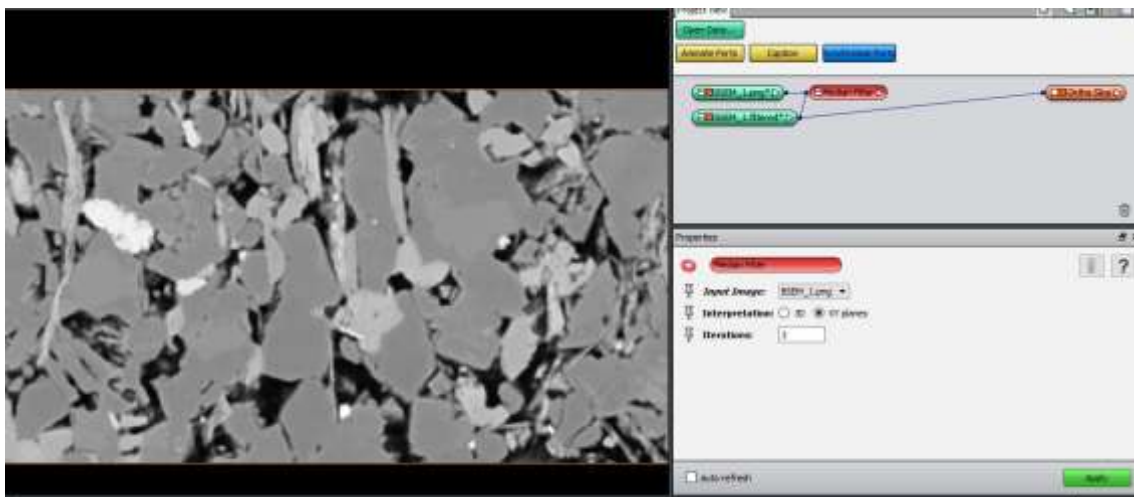


Figura 38: Depois da filtragem

Para o processo de segmentação optou-se por utilizar apenas 2 fases: poro e sólido. A técnica utilizada para trabalhar com a imagem 2D foi através do isolamento dos pontos escuros e extrapolação dos pontos claros até o limiar do contato poro/sólido, utilizando a ferramenta *Orthoslice*, ajustando o mapa de cor da imagem (colormap) do software Avizo conforme a

Para a segmentação foi utilizada a ferramenta *Interactive Thresholding* permitindo a visualização do limiar do nível de cinza da imagem para seleção. Foram selecionadas apenas as partes escuras da imagem, representado os poros. O resultado da segmentação gerou duas fases: uma fase exterior e uma fase porosa. A fase exterior é considerada a fase sólida da amostra ou seja, a parte que não foi selecionada pela ferramenta

Interactive Thresholding, possuindo um valor zero, enquanto que a fase porosa corresponde ao valor 1, pois foi selecionada. Para colocar a fase exterior como uma fase sólida foi utilizado a ferramenta *Segmentation Editor* e feita a inclusão de uma nova fase.

Essa ferramenta corresponde a um processo de divisão de imagens em diferentes sub-regiões, podendo ser regiões sólidas, porosas, diferentes objetos, fases e materiais. A segmentação é feita selecionando os voxels iniciais e atribuindo a eles um material específico.

Para a amostra segmentada, teremos três fases a partir de agora: fase exterior, fase poro e fase sólida. A fase exterior será zero, pois não tem nada, a fase poro será 1 e a fase sólida será 2. No campo *Materials*, inclui e nomeia-se uma nova fase para segmentação. Ao lado do campo *Exterior*, seleciona a ferramenta *Select* e clica em cima do novo material adicionando todos o valores da fase que quer que seja feita a transferência. A figura 40 mostra a inclusão do material e a passagem das informações do exterior, para a fase sólida.

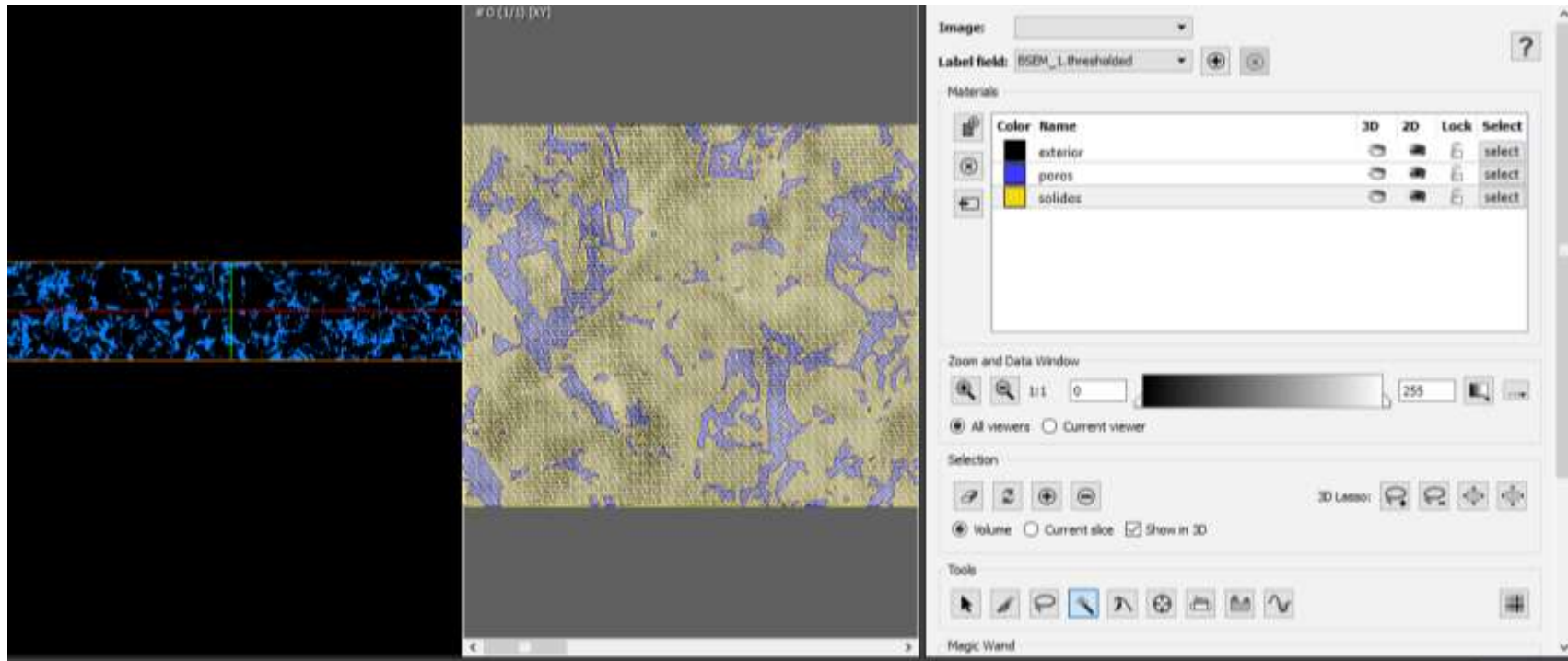


Figura 40: Inclusão da fase sólidos

Após a segmentação uma análise estatística da imagem foi feita através da ferramenta *Material Statistic*, calculando grandezas definidas no campo segmentado. O resultado é uma planilha com diferentes colunas, onde o significado de cada coluna irá depender das quantidades que forem calculadas seja por material ou por componentes conectados. O *Nr* enumera todos os materiais do campo do rótulo; *Material* indica qual material está armazenado na linha; *Count* corresponde ao número de voxels contido em uma determinada região; *Volume* é o total e voxels multiplicado pelo tamanho de um único voxel e *Center X, Y e Z* são as coordenadas X, Y e Z do centro da região. Cada uma das 6 imagens tem uma resposta para o *Material Statistic*. 39.

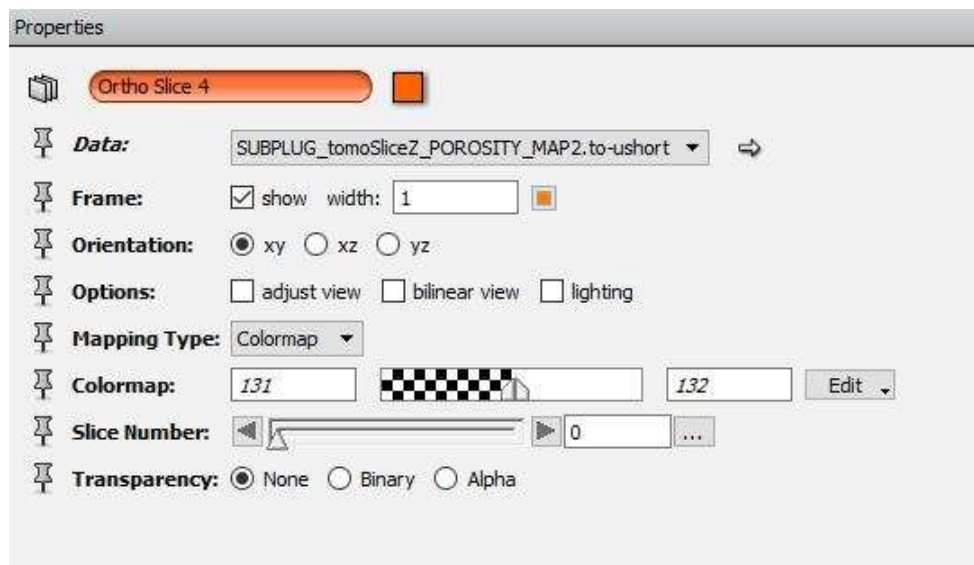


Figura 39: Orthoslice Colormap

Para a segmentação foi utilizada a ferramenta *Interactive Thresholding* permitindo a visualização do limiar do nível de cinza da imagem para seleção. Foram selecionadas apenas as partes escuras da imagem, representado os poros. O resultado da segmentação gerou duas fases: uma fase exterior e uma fase porosa. A fase exterior é considerada a fase sólida da amostra ou seja, a parte que não foi selecionada pela ferramenta *Interactive Thresholding*, possuindo um valor zero, enquanto que a fase porosa corresponde ao valor 1, pois foi selecionada. Para colocar a fase exterior como uma fase sólida foi utilizado a ferramenta *Segmentation Editor* e feita a inclusão de uma nova fase.

Essa ferramenta corresponde a um processo de divisão de imagens em diferentes sub-regiões, podendo ser regiões sólidas, porosas, diferentes objetos, fases e materiais. A

segmentação é feita selecionando os voxels iniciais e atribuindo a eles um material específico.

Para a amostra segmentada, teremos três fases a partir de agora: fase exterior, fase poro e fase sólida. A fase exterior será zero, pois não tem nada, a fase poro será 1 e a fase sólida será 2. No campo *Materials*, inclui e nomeia-se uma nova fase para segmentação. Ao lado do campo *Exterior*, seleciona a ferramenta *Select* e clica em cima do novo material adicionando todos o valores da fase que quer que seja feita a transferência. A figura 40 mostra a inclusão do material e a passagem das informações do exterior, para a fase sólida.

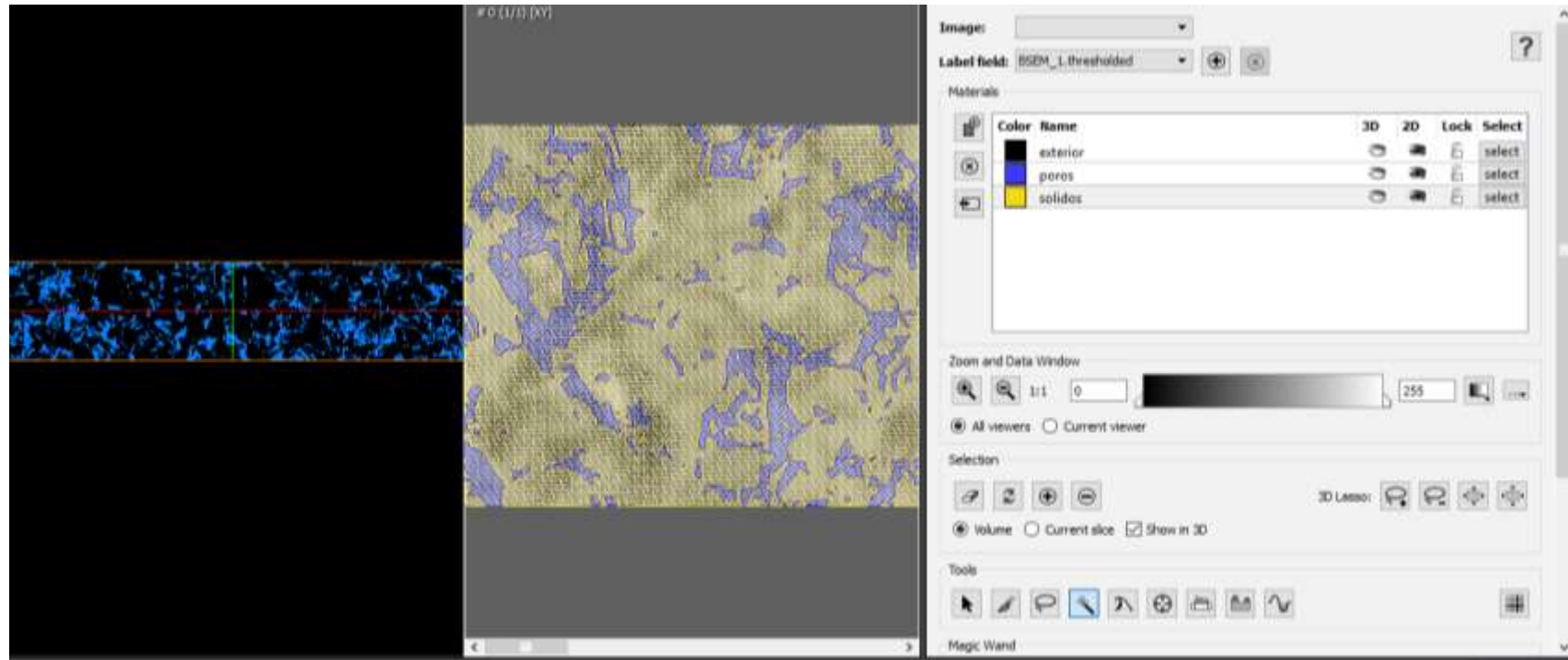


Figura 40: Inclusão da fase sólidos

Após a segmentação uma análise estatística da imagem foi feita através da ferramenta *Material Statistic*, calculando grandezas definidas no campo segmentado. O resultado é uma planilha com diferentes colunas, onde o significado de cada coluna irá depender das quantidades que forem calculadas seja por material ou por componentes conectados. O *Nr* enumera todos os materiais do campo do rótulo; *Material* indica qual material está armazenado na linha; *Count* corresponde ao número de voxels contido em uma determinada região; *Volume* é o total e voxels multiplicado pelo tamanho de um único voxel e *Center X, Y e Z* são as coordenadas X, Y e Z do centro da região. Cada uma das 6 imagens tem uma resposta para o *Material Statistic*.

Após o *Material statistic* foi utilizada a ferramenta *Line Probe*, na imagem segmentada para ver a variação as fases 0,1 e 2 (exterior, poros e sólidos) ao longo de uma linha pré-estabelecida na imagem. O *Line Probe* é um modulo de sondagem de dados utilizado para inspecionar campos de dados vetoriais ou escalares. As sondas são tomadas ao longo de uma linha que pode ser colocada arbitrariamente. Os pontos de controle dos módulos determinam os locais onde as amostras devem ser coletadas. Os valores amostrados são plotados em relação ao comprimento da linha da sonda. Cada uma das 6 imagens possui duas linhas de investigação *Line Probe*, na qual foram inseridas na parte superior e na parte inferior de cada imagem. Após a plotagem, o dado foi salvo no formato csv (Figura 41).

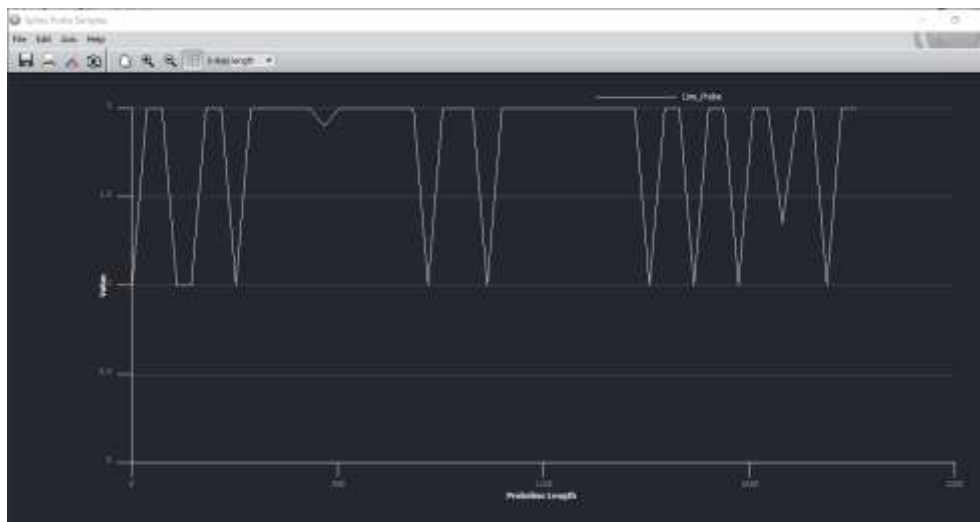


Figura 41: Resultado do *Line Probe*

Tanto os resultados do *Material Statistic* quanto do *Line Probe* foram trabalhados em planilha excel.

Uma vez definido o fluxo de mapeamento de poros, foi feita a análise de composição mineralógica da amostra. Para isso fez-se necessário um corte do mini prisma, para imagem no APREO BSEM. A amostra foi embebida com epóxi, cortada, lixada e escaneada. Os escaneamentos foram feitos por toda a área da amostra, a baixa resolução, porém uma sessão fina, perpendicular ao acamamento, foi escaneada a altas resoluções. As imagens foram adquiridas com o Microscópio Quanta FEI. O tomograma do mini prisma seco e das imagens do 2DBSEM e QEMSCAN da seção cortada e polida inicialmente foram registrados a partir do ponto original. Para corroborar com o resultado da análise do mapa mineralógico feito no QEMSCAN, foi feita uma análise petrográfica em duas partes da amostra para observar os minerais, suas formas e texturas.

5 Resultados

Os resultados da dissertação estão separados nos fluxos e integrados no final do capítulo embasados com o que existe na literatura. Das amostras estudadas na dissertação, 3 delas são folhelhos, porém a cor e a composição ditam suas diferenças. Segundo a classificação descrita por Silva, (2015), as amostras LTF-1 e LTF-2 são chamados de folhelhos calcíferos, devido a concentração carbonática variando de 20 a 35 % em sua composição mineral. A coloração avermelhada do LTF-1, denota um ambiente de clima árido, com exposição subaérea. Já a coloração cinza do LTF-2 sugere um aumento da matéria orgânica e um ambiente anóxico. A amostra LTF-3 por ser um arenito arcossiano sua matriz é composta basicamente de quartzo e feldspato, havendo cimentação e poros preenchidos por argilo-minerais. O LTF-4 por ser classificado como um folhelho negro é rico em matéria orgânica maturada tendo, possivelmente, presença de hidrocarbonetos.

5.1 Fluxo 1

Através das imagens da Tomografia Computadorizada pode ser feita uma análise visual dos componentes das fases das amostras LTF1, LTF2, LTF3 e LTF4. Alguns protocolos de segurança limitam a energia dos tomógrafos médicos para análise de no máximo 130 Kv, com isso, as investigações em materiais rochosos ficam com resolução insuficiente para identificação de fases mineralógicas. Porém, foi possível fazer a observação dos contrastes de densidade dos materiais das 4 amostras.

A amostra LTF-1 apresentou apenas 1 fase de cor clara, sugerindo uma riqueza de minerais de densidade elevada compondo a amostra. Com base na descrição anterior, uma sugestão são os minerais ferruginosos estando em sua grande maioria espalhados de forma homogênea.

As amostras LTF-2 e LTF-4 apresentaram 2 fases de densidades diferentes. Uma fase escura, de menor densidade, e uma fase clara, de maior densidade. Ambas as fases estão intercaladas com aparentes laminações. Por se tratarem de folhelhos, calcífero (LTF-2) e siliciclástico (LTF-4), sugere uma forte presença da matéria orgânica nas amostras (fase menos densa) e intercalação com minerais de maior densidade. A amostra de maior heterogeneidade foi a LTF-3, onde notam-se 3 fases de densidades distintas. A

fase escura intercalada com uma fase clara e uma fase de densidade mais alta preenchendo uma fratura (figura 42). Portanto, a amostra LTF-3, por se tratar de um arenito, sendo, possivelmente o reservatório da BRP e por possuir um maior número de fases de densidades distintas, foi a amostra escolhida para a aplicação do fluxo 2.

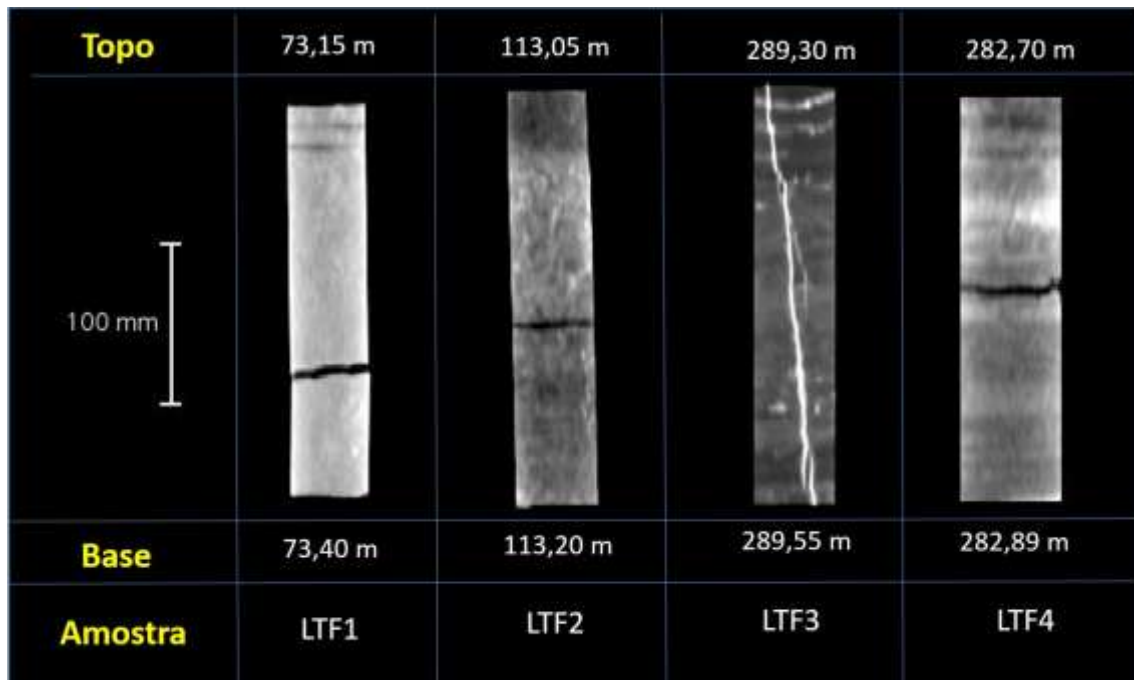


Figura 42: Resultado da Tomografia computadorizada

As demais amostras apresentam uma homogeneidade em sua distribuição de densidade mineralógica aparente, levando o aprofundamento do estudo das mesmas para uma ocasião futura. A figura 43, mostra de forma resumida as etapas e o resultado do fluxo 1.

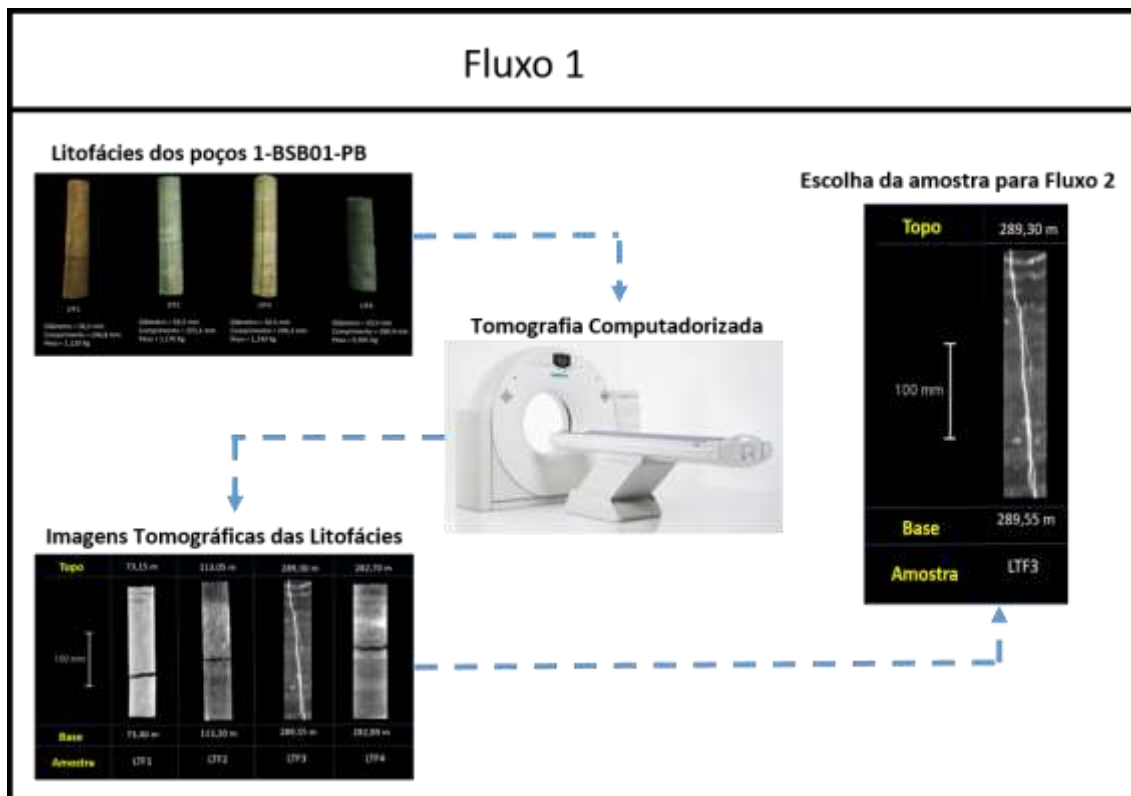


Figura 43: Etapas e Resultados do Fluxo 1

5.2 Fluxo 2

Os resultados da segmentação de poros das seções com resoluções de 100 μm e do mapa mineralógico estão descritos nesta seção. Com o objetivo de separar poros de sólidos das 6 seções, os resultados das segmentações estão representados pelas figuras 44, 46, 48, 50, 52 e 54. Para cada seção foram feitas duas linhas denominadas de line probe com o gráfico representando a distância média entre os materiais mostrando as variações e os picos de poros e sólidos ao longo da linha. A representação das respostas dos line probes das 6 seções estão nas figuras 45, 47, 49, 51, 53 e 55. Além disso foram feitas estimativas de percentuais de cada material segmentado nas 6 seções, utilizando como referência os valores totais dos *counts* da ferramenta *Material Statistic* do software *Avizo*. Foram somados os valores das fases exterior (0), poro (1) e sólido (2) tendo a partir daí proporções percentuais individuais conforme os resultados das tabelas 3, 4, 5, 6, 7 e 8.

Na seção 1 (figura 44) os poros apresentam um aspecto “sujo” com aparente impregnação de um material fibroso. Observou-se também outros minerais com aspecto

planar. Os line probes mostram poros e sólidos variando pouco estando próximos uns dos outros (figura 45). Na figura 45, da esquerda para direita, no line probe 1 os poros estão concentrados, conforme a marca verde no gráfico, passando por uma zona sólida. Os poros estão intercalados com as zonas sólidas e mantem esse padrão até o final do gráfico. O mesmo comportamento foi observado no line probe 2. A quantidade de material poroso na imagem é de 21 % e de material sólido de 78%, conforme a tabela 3.

Na seção 2 (figura 46) o comportamento dos minerais se mostram parecidos com a imagem da seção 1. Há de se notar que existem poros maiores e limpos, porém a impregnação do material fibroso é predominante. Os line probes 3 e 4 da figura 47 os poros variam localmente havendo ora poros com extensão menor ora poros com maiores extensões. Observam-se extensas zonas sólidas intercaladas com as zonas porosas. O percentual de poros na imagem é de 18% enquanto que o percentual de sólidos é de 81%.

Na seção 3 (figura 48) observam-se, da esquerda para a direita, 3 aspectos diferentes na imagem: o primeiro é a concentração moderada de minerais fibrosos, a segunda é a não concentração desses minerais na parte central da imagem e a terceira é a alta concentração dos minerais fibrosos no final da imagem. Na figura 49 os line probes 5 e 6 mostram a representação dos 3 aspectos através das cores amarela com poros intercalados nos sólidos fibrosos, cor verde com baixa concentração ou nenhuma aparência de sólido fibrosos intercalados com poros, e na cor rosa com poros entre uma matriz de alta concentração de sólidos fibrosos. A quantidade de poros é de 18% e de sólidos é de 81%, conforme a tabela 5.

Na seção 4 a imagem apresenta uma concentração de poros na parte inferior da imagem e os minerais de aspecto planar concentrados na parte central – superior. A resposta dos line probes 7 e 8 confirma esta concentração de poros e sólidos. O percentual de poros é de 21% e de sólido de 78%.

A seção 5 apresenta um grande agregado de argilomineral no centro da imagem com poros limpos ao redor, tendo também o mineral de aspecto fibroso. O line probe 9 mostra uma variação quase que uniforme entre poros e sólidos. O line probe 10 mostra uma tendência a ter mais sólidos do que poros. O percentual de poros e sólidos é de 24% e 75% respectivamente.

A seção 6 possui cimentação calcítica impactando significativamente a quantidade de poros e também tendo impregnação por argilominerais. Os line probes 11 e 12 mostram grande tendência a predominância da fase sólida quando comparada com a fase porosa. O percentual de poros fica torno em 12% e a quantidade de sólidos em 87%.

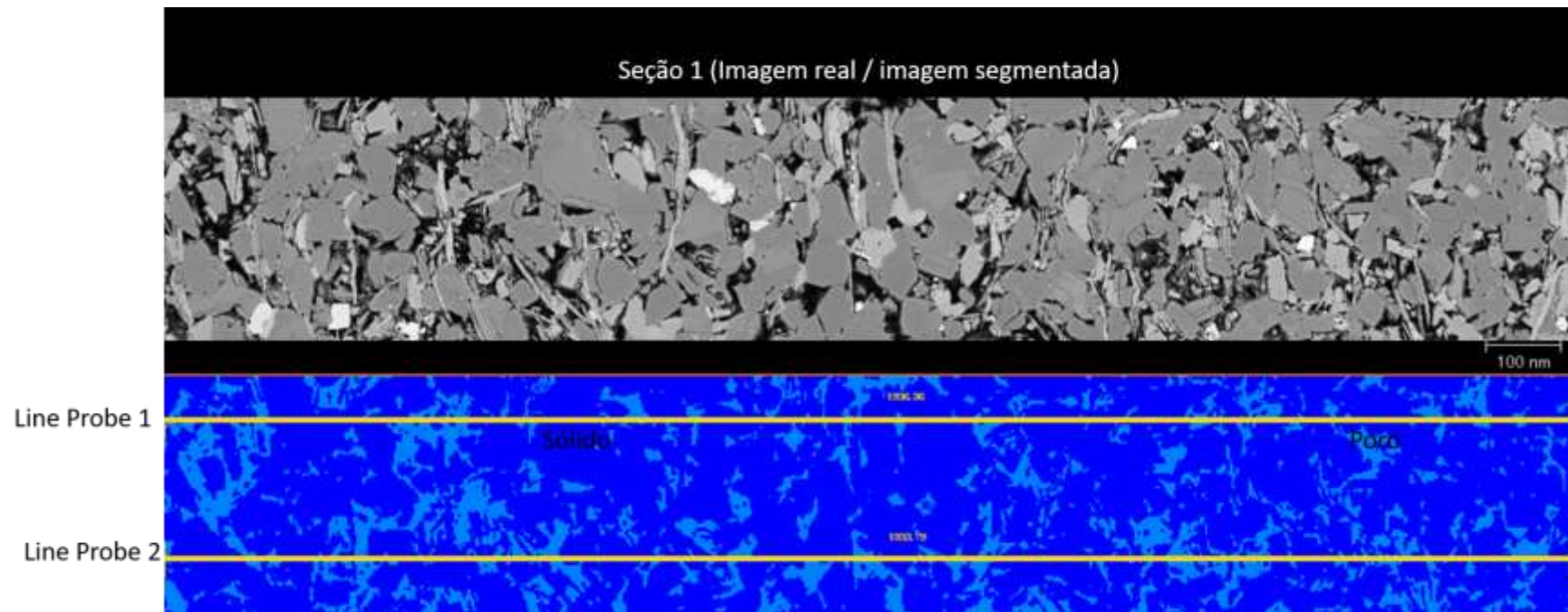


Figura 44: Seção 1 com presença de poros e sólidos. Os sólidos são minerais com aspectos fibrosos e planares estando mesclado com os poros. Na imagem segmentada foram feitas duas linhas denominadas de line probes 1 e 2 para observar a variação de poros e sólidos ao longo delas.

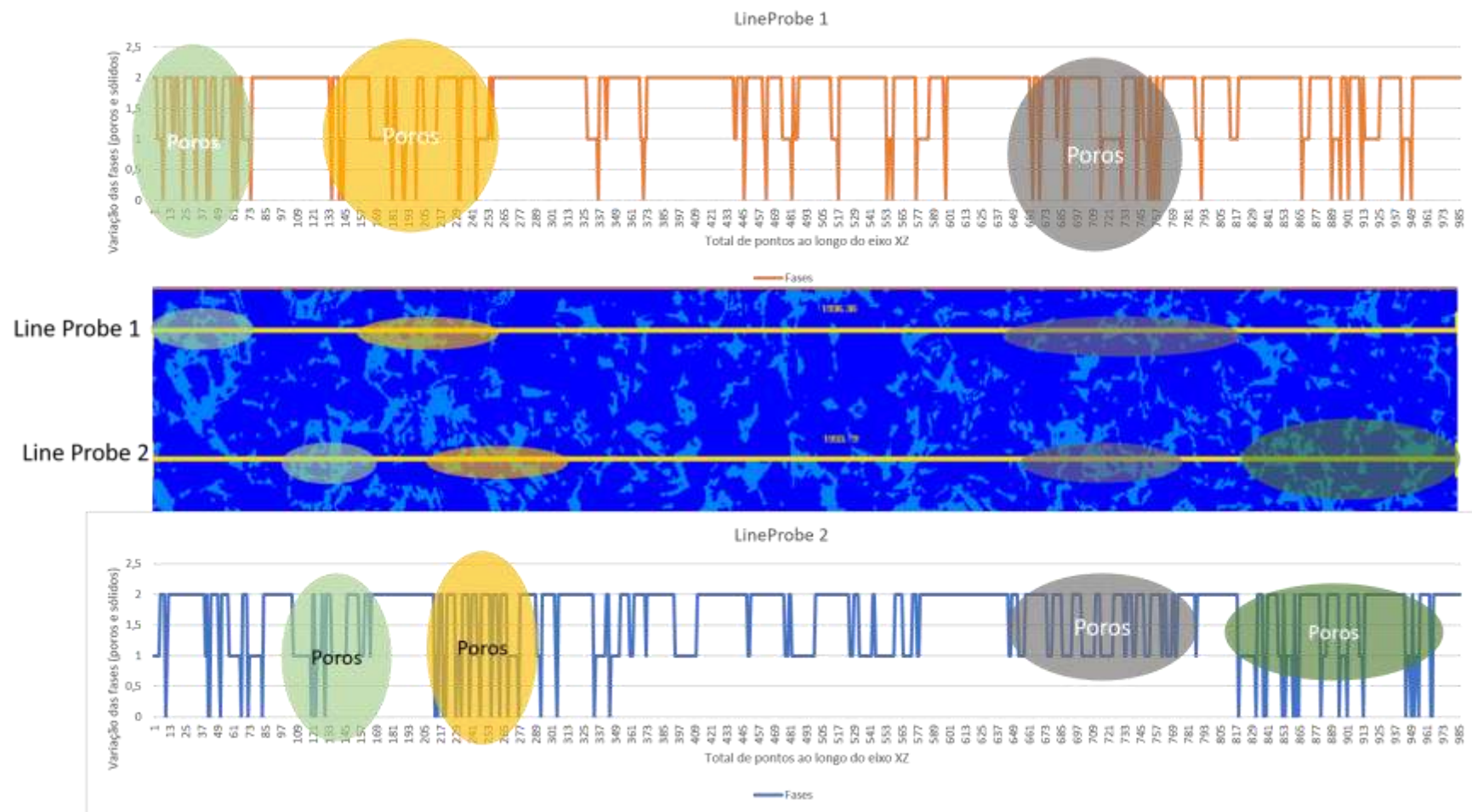


Figura 45: Ao longo das lines probes 1 e 2 foram observadas variações de poros (1) e sólidos (2).

Tabela 3: Informações da quantidade de material da seção 1

| Lineprobe 1 e 2 | | | | | | | |
|-----------------|----------|--------|--------|-------------|-------------|---------|----------|
| Nr | Material | Count | Volume | CenterX | CenterY | CenterZ | % |
| 0 | exterior | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 1 | poros | 137060 | 137060 | 940.916.809 | 192.550.659 | 0.5 | 21,17437 |
| 2 | solidos | 510232 | 510232 | 99.240.155 | 179.800.156 | 0.5 | 78,82563 |
| | | 647292 | | | | | 100 |

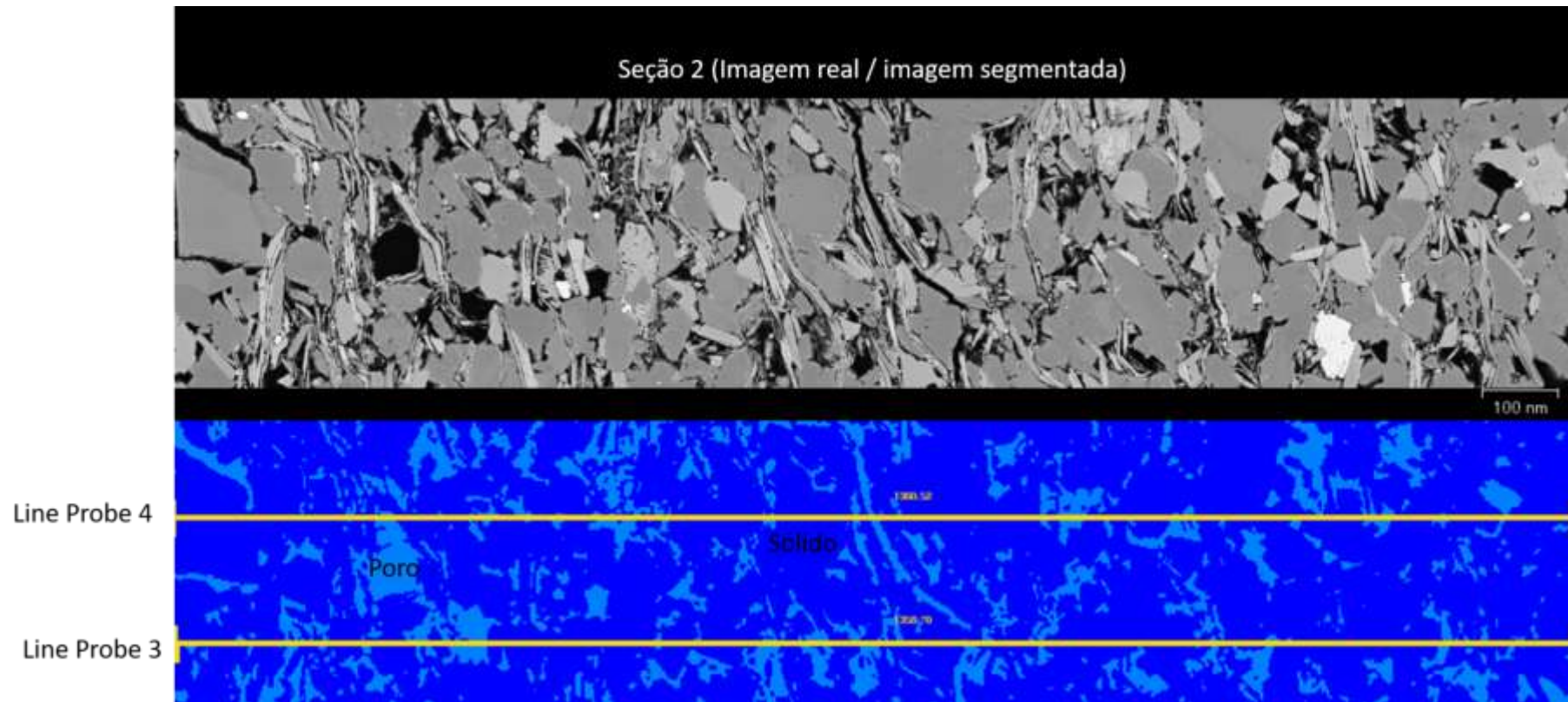


Figura 46: Seção 2 com poros e sólidos de formato fibrosos tendendo a ser micas. Na imagem segmentada foram feitas duas linhas denominadas de line probes 3 e 4 para observar a variação de poros e sólidos ao longo delas.

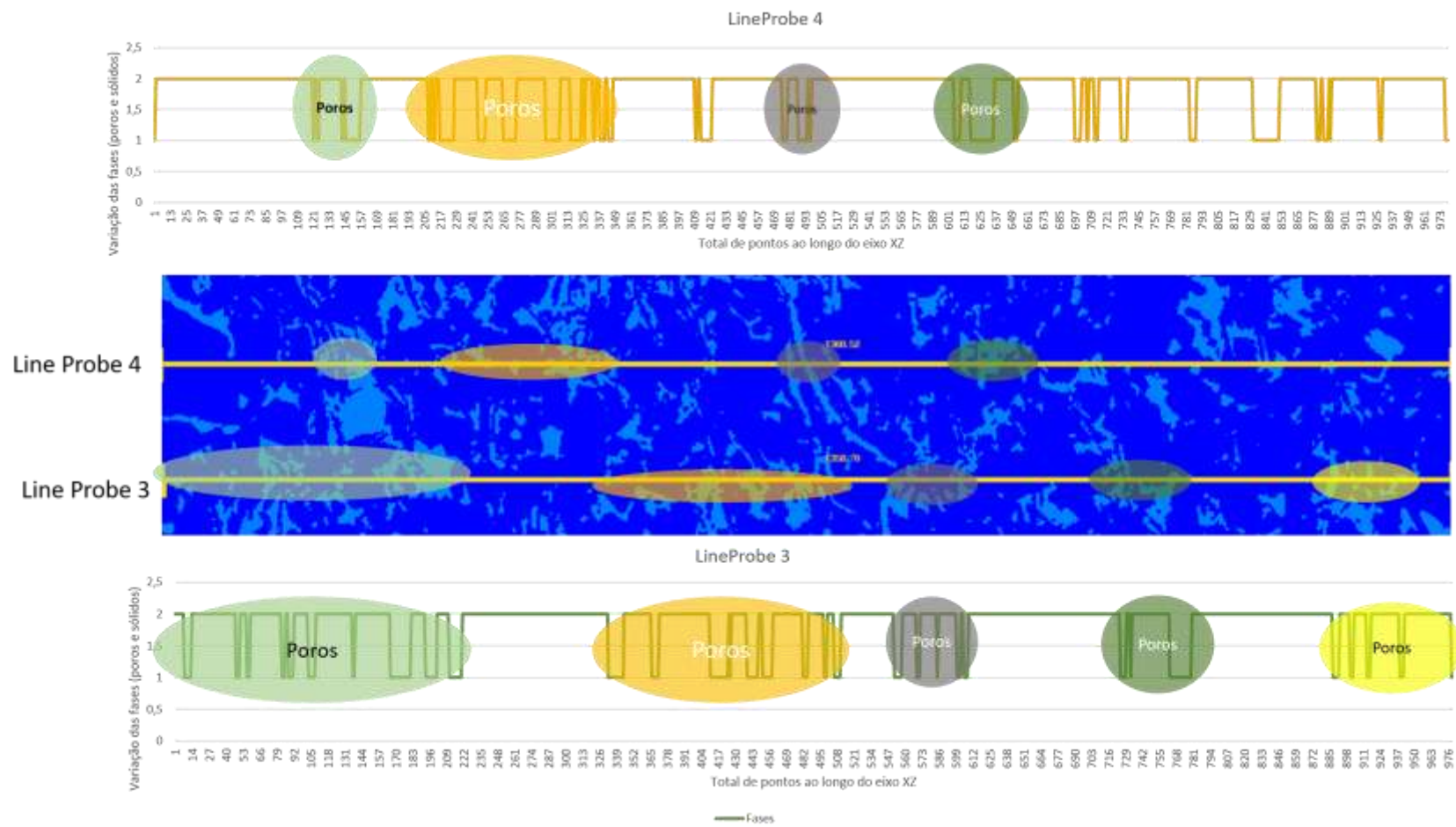


Figura 47: Ao longo das lines probes 3 e 4 foram observadas variações de poros (1) e sólidos (2).

Tabela 4: Informações da quantidade de material da seção 2

| Lineprobe 3 e 4 | | | | | | | |
|-----------------|----------|--------|--------|-------------|-------------|---------|----------|
| Nr | Material | Count | Volume | CenterX | CenterY | CenterZ | % |
| 0 | Exterior | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 1 | poros | 71518 | 71518 | 638.555.908 | 143.801.834 | 0.5 | 18,50028 |
| 2 | solidos | 315060 | 315060 | 69.247.522 | 140.363.983 | 0.5 | 81,49972 |
| | | 386578 | | | | | 100 |

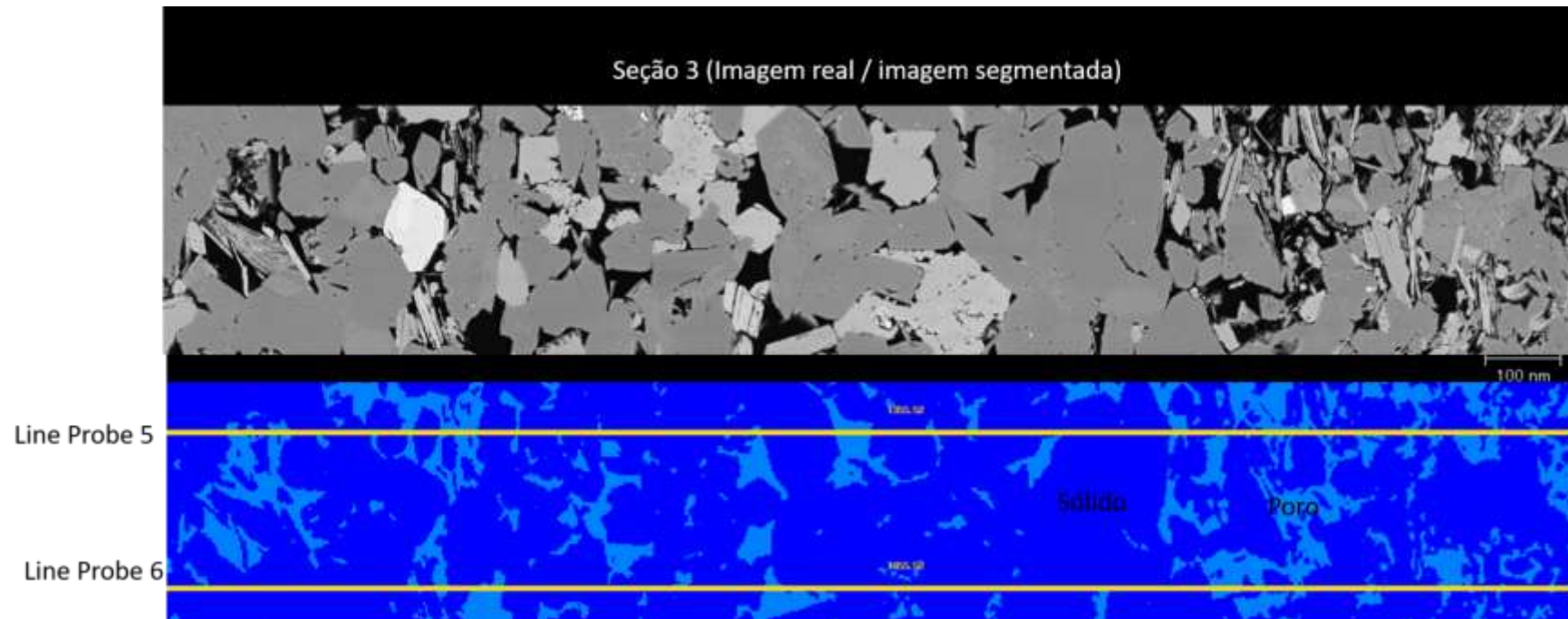


Figura 48: Seção 3 com presença de poros grandes e sólidos. Na imagem segmentada foram feitas duas linhas denominadas de line probes 5 e 6 para observar a variação de poros e sólidos ao longo delas.

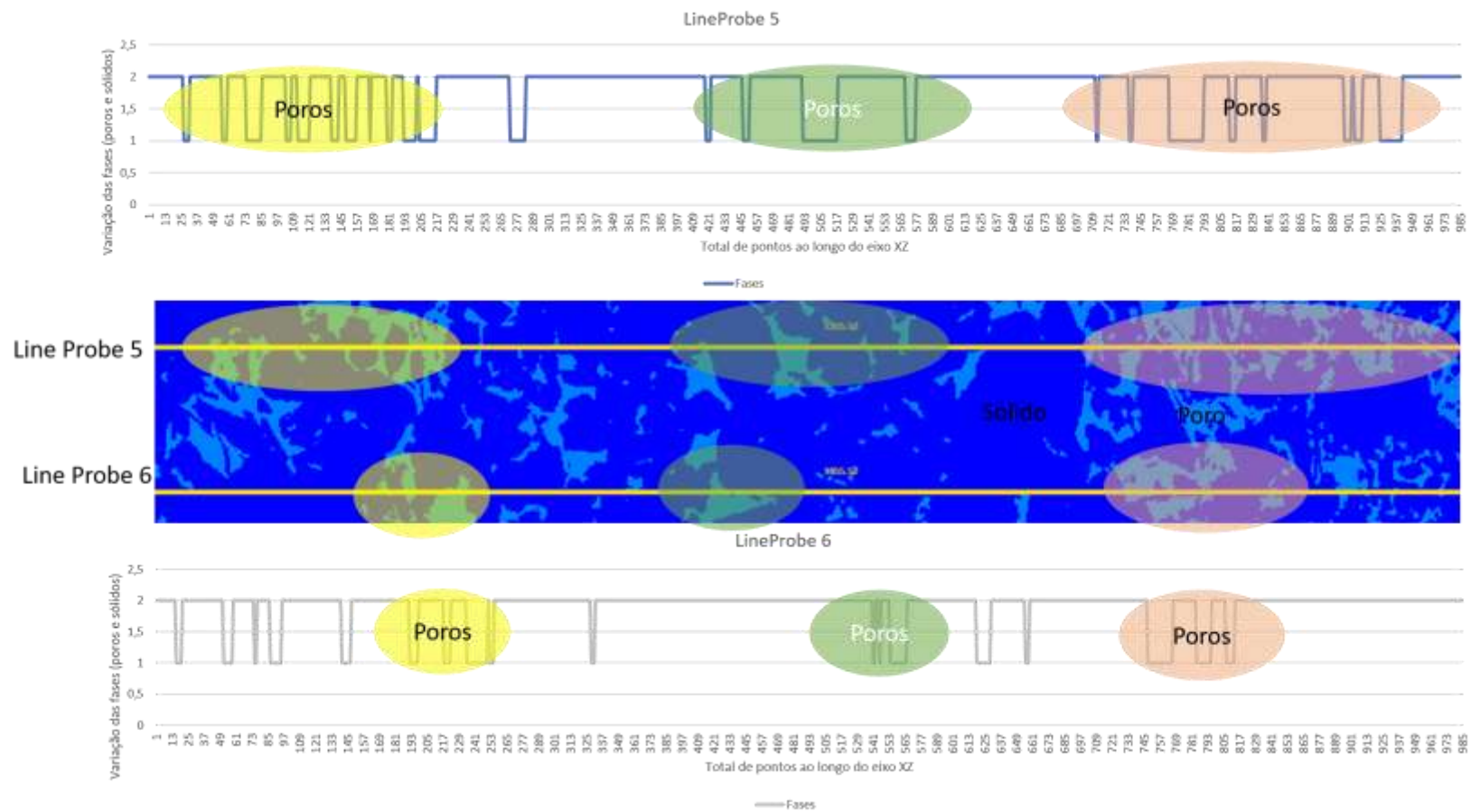


Figura 49: Ao longo das lines probes 5 e 6 foram observadas variações de poros (1) e sólidos (2).

Tabela 5: Informações da quantidade de material da seção 3

| Lineprobe 5 e 6 | | | | | | | |
|-----------------|----------|--------|--------|-------------|-------------|---------|---------|
| Nr | Material | Count | Volume | CenterX | CenterY | CenterZ | % |
| 0 | Exterior | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 1 | Poros | 60256 | 60256 | 727.601.685 | 108.809.944 | 0.5 | 18,5016 |
| 2 | Sólido | 265424 | 265424 | 666.739.502 | 121.926.834 | 0.5 | 81,4984 |
| | | 325680 | | | | | 100 |

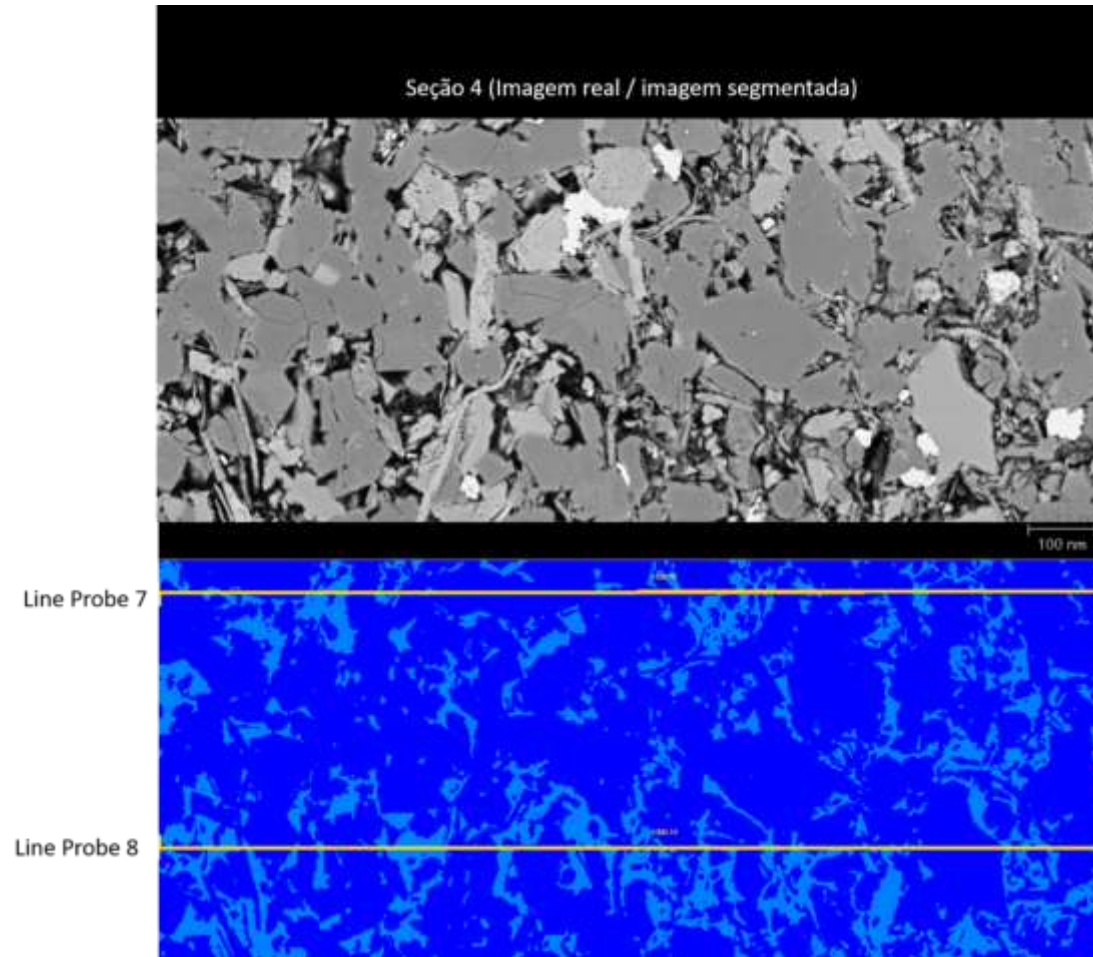


Figura 50: Seção 4 com presença de poros e argilominerais nas imagens. Na imagem segmentada foram feitas duas linhas denominadas de line probes 7 e 8 para observar a variação de poros e sólidos ao longo delas.

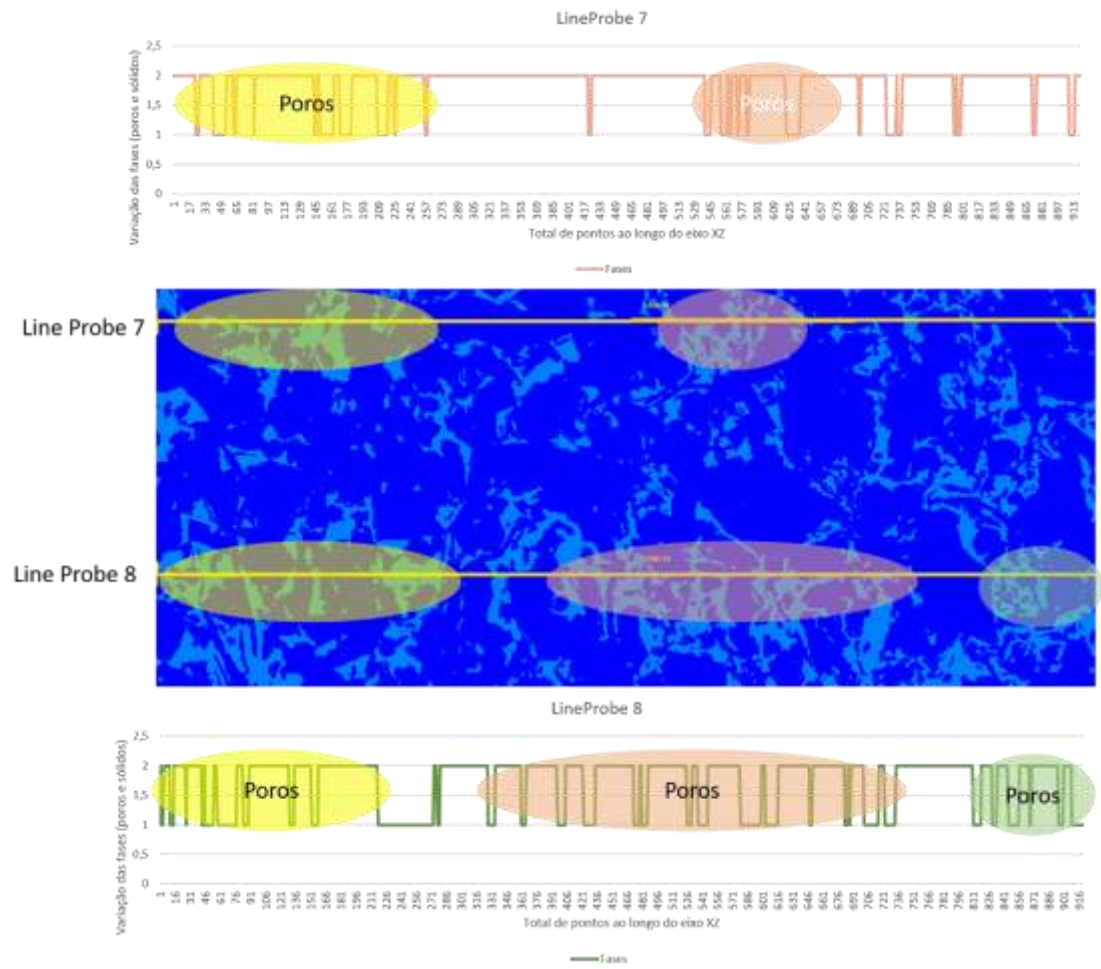


Figura 51: Ao longo das lines probes 7 e 8 foram observadas variações de poros (1) e sólidos (2).

Tabela 6: Informações da quantidade de material da seção 4

| Lineprobe 7 e 8 | | | | | | | |
|-----------------|----------|--------|--------|-------------|-------------|---------|---------|
| Nr | Material | Count | Volume | CenterX | CenterY | CenterZ | % |
| 0 | Exterior | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 1 | Poro | 172729 | 172729 | 67.977.478 | 317.770.782 | 0.5 | 21,9194 |
| 2 | Solido | 615290 | 615290 | 680.063.232 | 280.923.248 | 0.5 | 78,0806 |
| | | 788019 | | | | | 100 |

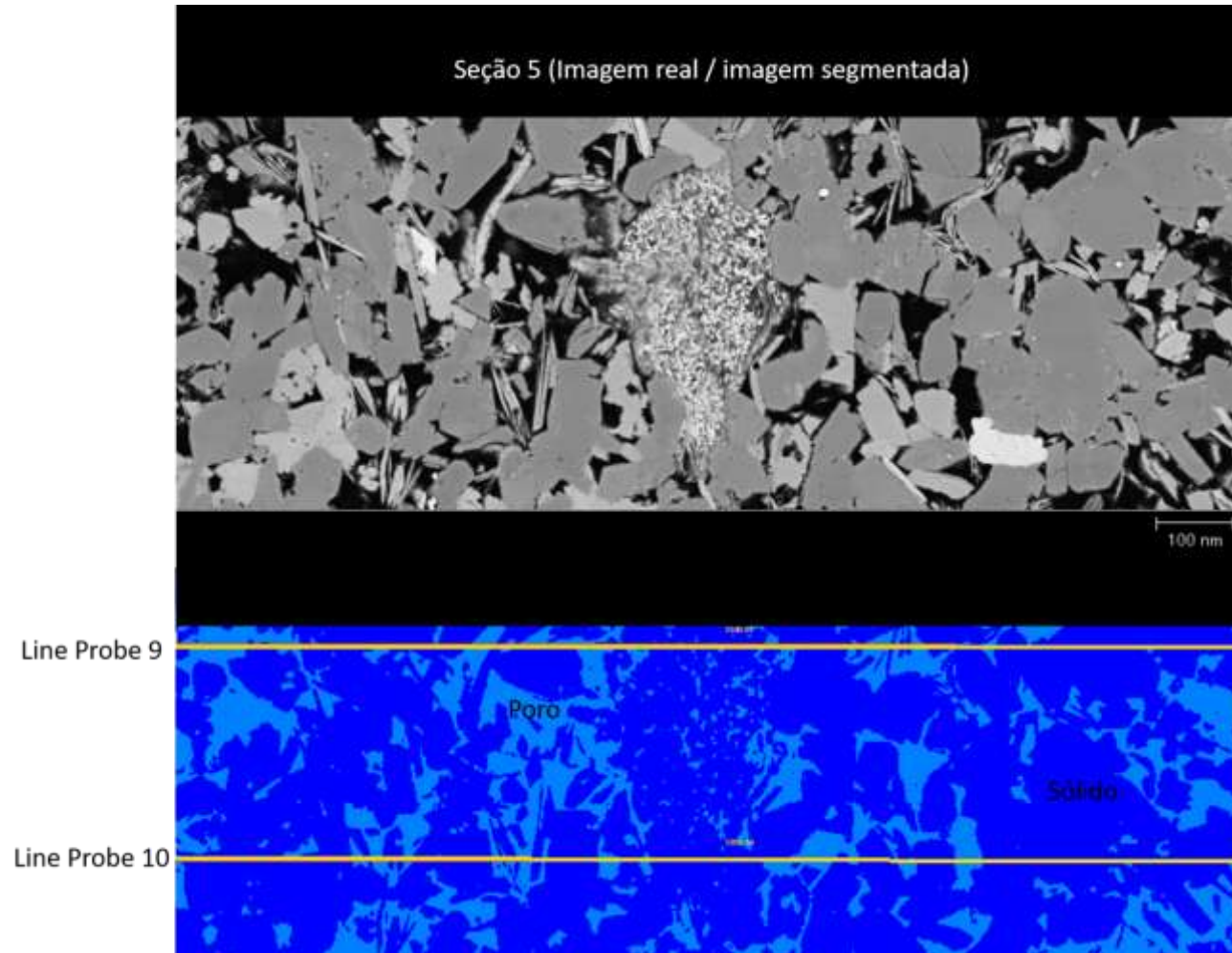


Figura 52: Seção 5 com presença de poros e um agregado de argilomineral no centro da imagem. Na imagem segmentada foram feitas duas linhas denominadas de line probes 9 e 10 para observar a variação de poros e sólidos ao longo delas.

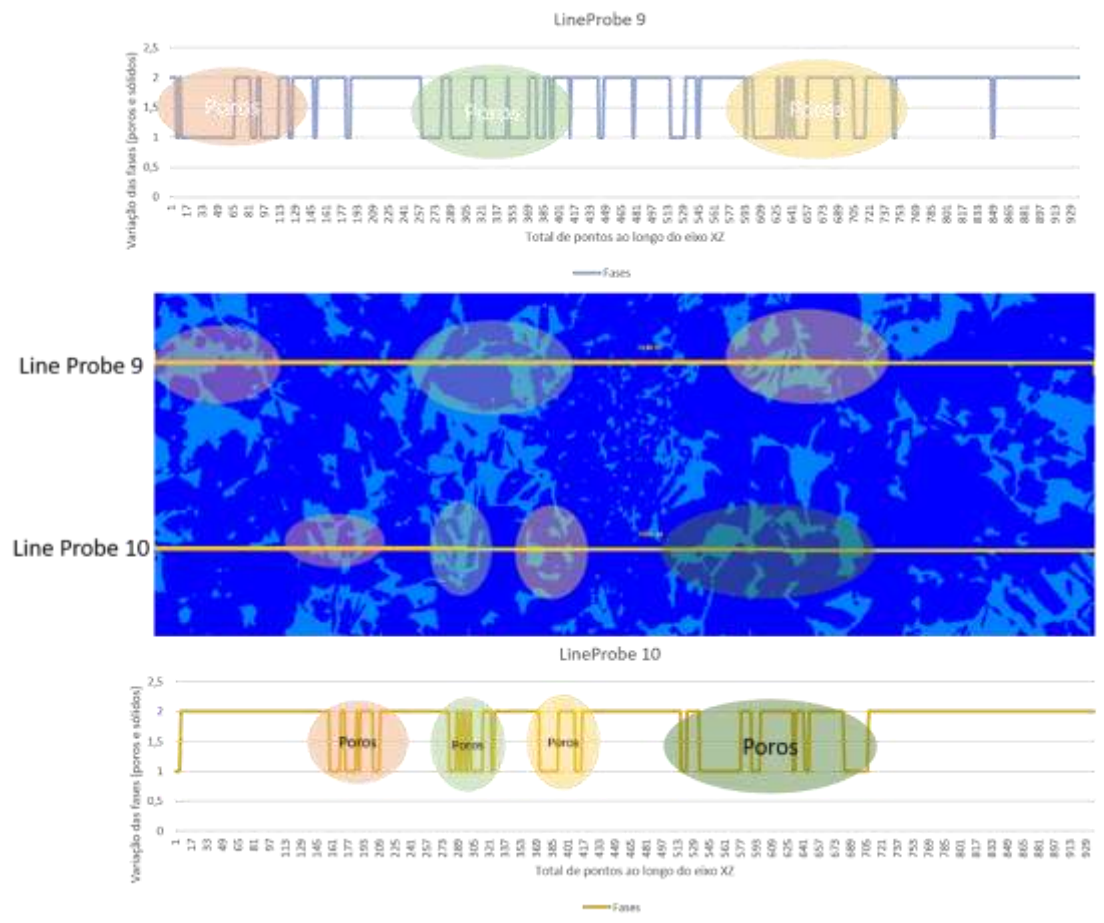


Figura 53: Ao longo das lines probes 9 e 10 foram observadas variações de poros (1) e sólidos (2).

Tabela 7: Informações da quantidade de material da seção 5

| Lineprobe 9 e 10 | | | | | | | |
|------------------|----------|--------|--------|-------------|-------------|---------|----------|
| Nr | Material | Count | Volume | CenterX | CenterY | CenterZ | % |
| 0 | Exterior | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 1 | Poros | 164958 | 164958 | 658.797.546 | 241.074.493 | 0.5 | 24,37885 |
| 2 | Solido | 511686 | 511686 | 683.529.297 | 251.555.038 | 0.5 | 75,62115 |
| | | 676644 | | | | | 100 |

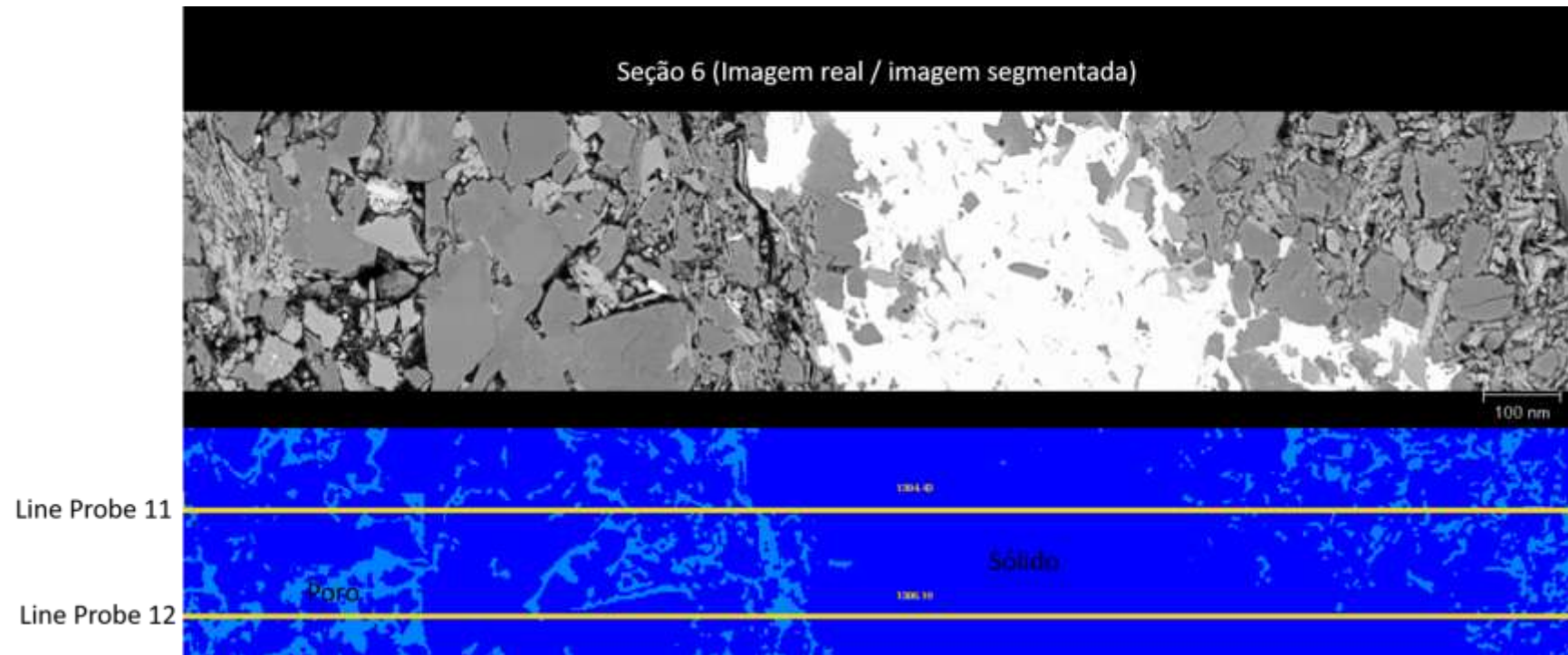


Figura 54: A seção 6 mostra uma grande fase sólida no centro da imagem e poucos poros ao redor. Na imagem segmentada foram feitas duas linhas denominadas de line probes 11 e 12 para observar a variação de poros e sólidos ao longo delas.

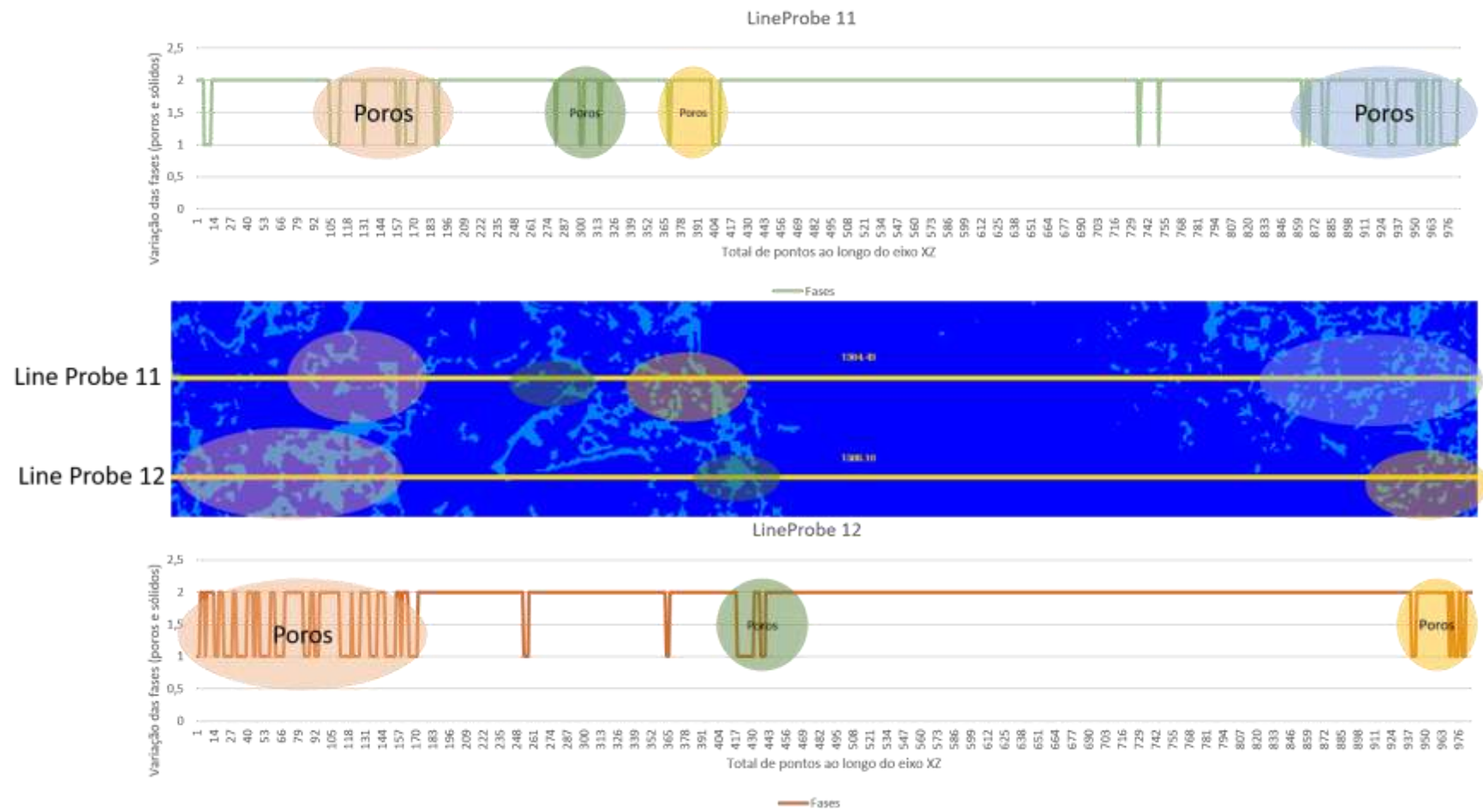


Figura 55: Ao longo das lines probes 11 e 12 foram observadas variações de poros (1) e sólidos (2).

Tabela 8: Informações da quantidade de material da seção 6

| Lineprobe 11 e 12 | | | | | | | |
|-------------------|----------|--------|--------|-------------|-------------|---------|----------|
| Nr | Material | Count | Volume | CenterX | CenterY | CenterZ | % |
| 0 | Exterior | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 1 | Poros | 37523 | 37523 | 556.187.256 | 108.898.865 | 0.5 | 12,85444 |
| 2 | Solido | 254384 | 254384 | 668.427.917 | 111.309.929 | 0.5 | 87,14556 |
| | | 291907 | | | | | 100 |

Quanto aos resultados do mapa mineralógico, as imagens com resolução de 500 nm, da parte inferior (BOT) e da parte central (MID) da amostra no BSEM e o próprio mapa mineralógico, estão na figura 56 e figura 57, respectivamente. Em ambos mapas mineralógicos os feldspatos estão abundantemente distribuídos, superando 50% do tomograma analisado.

Orientando os mapas mineralógicos e avaliando as feições texturais e estruturais, nota-se uma intercalação de fases argilosas e areníticas com estruturas de bioturbação intercalada com estrutura trativa de corrente (figura 58) no mapa da parte inferior. Além da estrutura de bioturbação encontrada na figura 58, o mapa de mineralogia da parte central mostra as estruturas de *climbing ripples* indicando uma variação de energia do ambiente de depósito da Fm. Souza.

A partir da imagem de 500 nm, optou-se em fazer um segundo imageamento (figura 59) com resolução de 100 nm, com o objetivo de observar as feições minerais e poros mais detalhadamente.

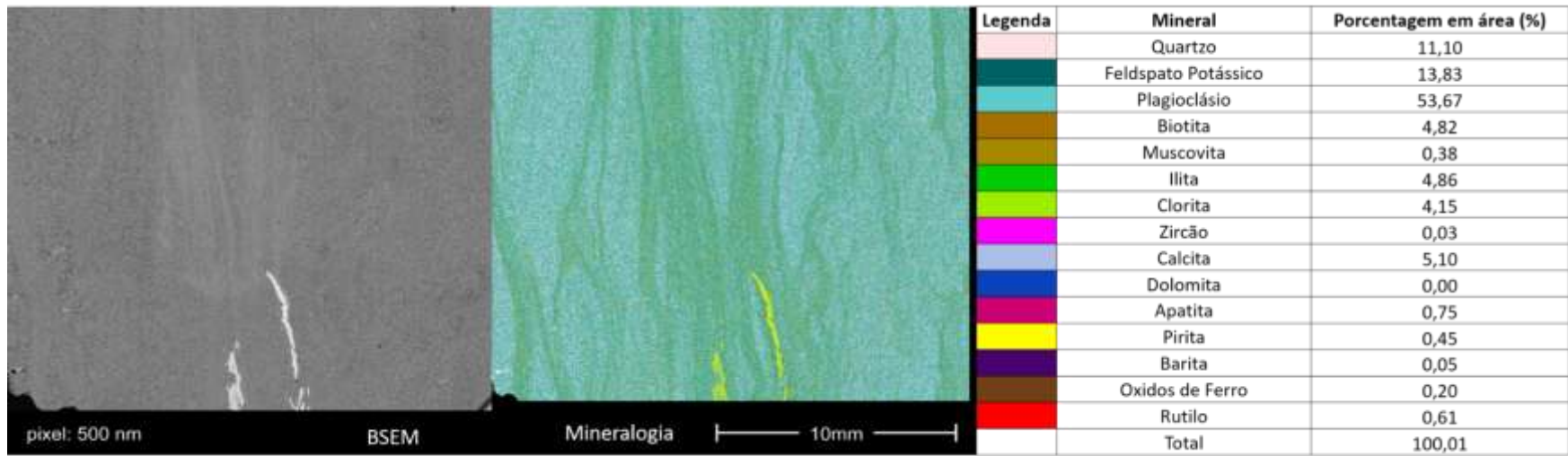


Figura 56: Imagem BSEM e mapa mineralógico da parte inferior da amostra e tabela de classificação e distribuição mineral

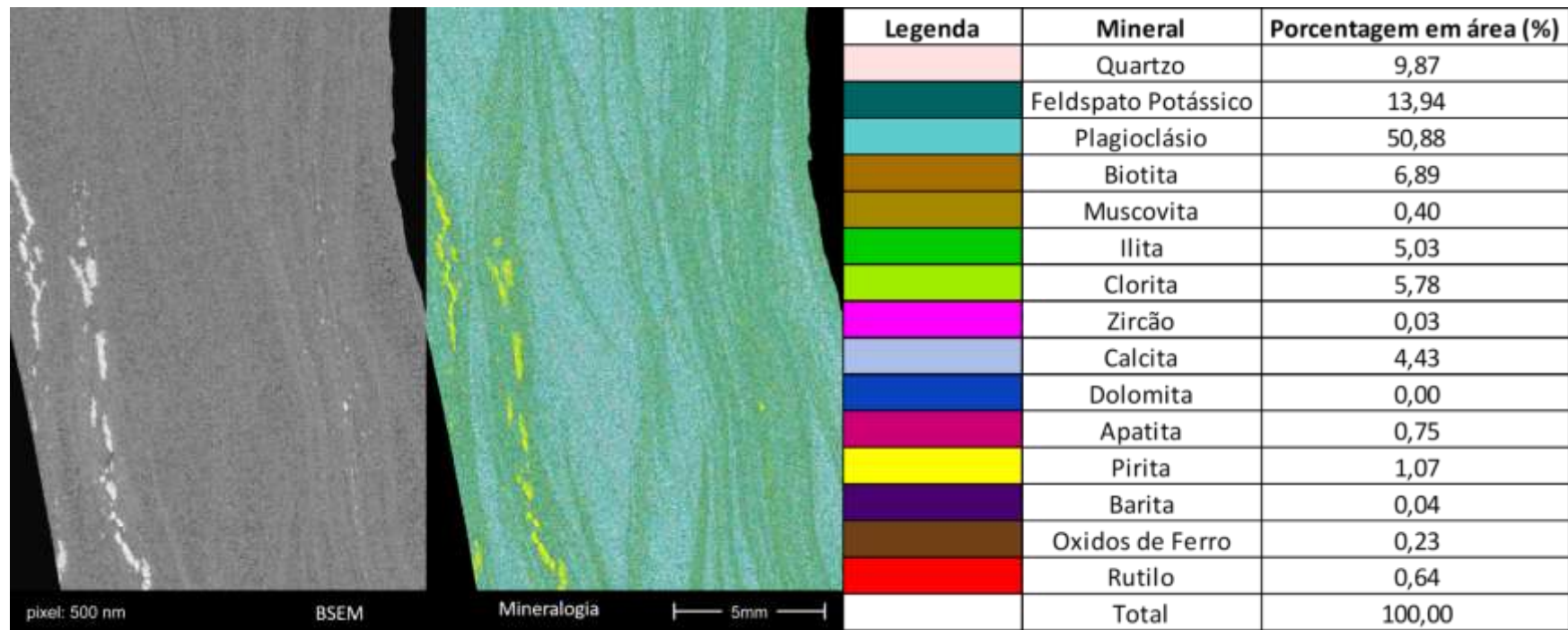


Figura 57: Imagem BSEM e mapa mineralógico da parte central da amostra e tabela de classificação e distribuição mineral

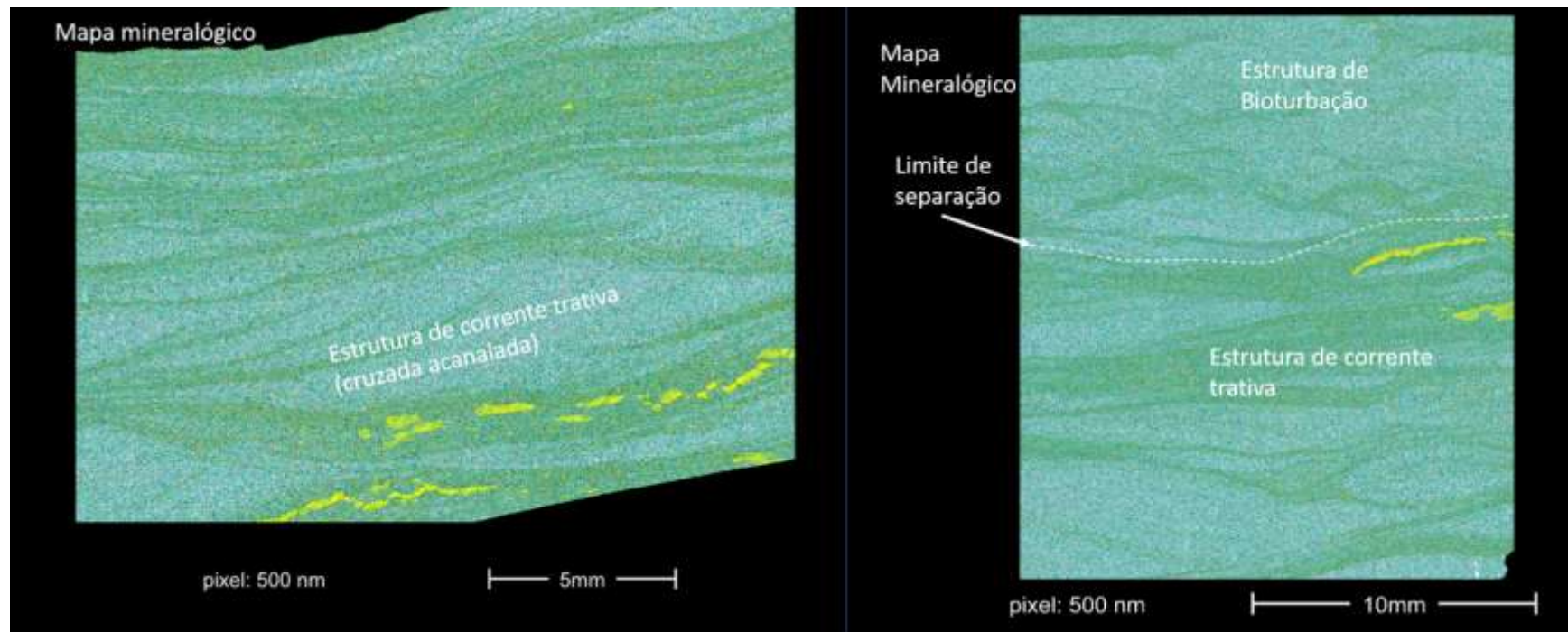


Figura 58: A esquerda a parte central com estrutura cruzada acanalada. A direita, a parte inferior com estrutura de bioturbação e corrente trativa

Na imagem de 100 nm, pode se notar regiões de intercalação com poros limpos, poros preenchidos por argilo-minerais e poros cimentados por pirita. Na figura 59, observa-se uma porosidade primária intergranular. Os grãos estão pouco arredondados, de tamanhos variados, com predominância de quartzo e feldspato. Observa-se a alteração do feldspato, com o aspecto de “sujeira” em alguns grãos. Há também a presença de mineral micáceo preenchendo alguns poros.

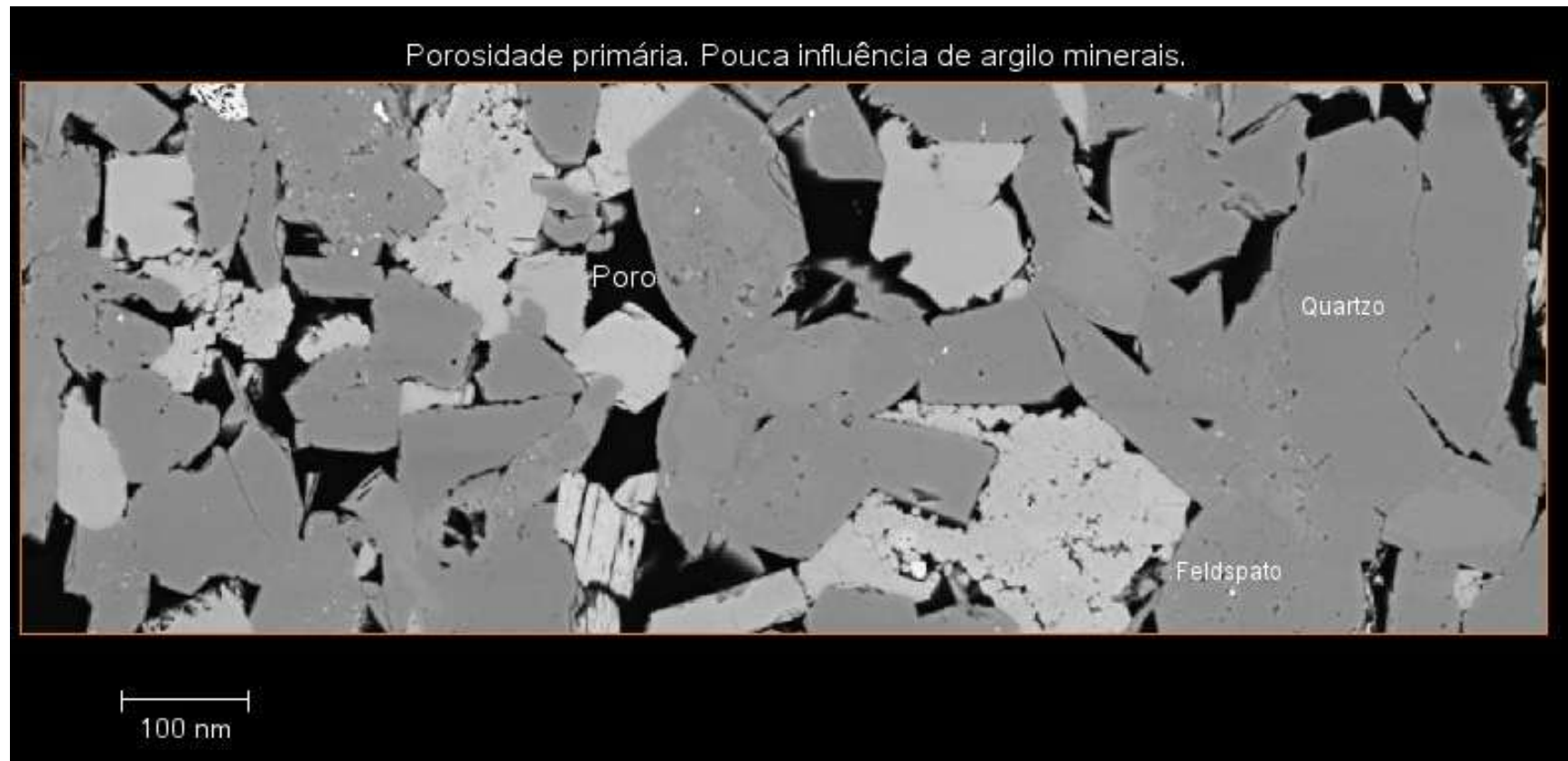


Figura 59: Poros limpos, pouca influência dos argilominerais. O feldspato e o quartzo apresentam mesmo tons de cinza, porém distingue-se um do outro pela textura da imagem. O feldspato apresenta um aspecto “sujo” na face do grão, devido a alteração em argilomineral

Já na figura 60 há uma mudança brusca de textura mineralógica, com poros preenchidos por micas oriundas da alteração do feldspato, não denotando uma orientação preferencial, sugerindo uma transformação mineralógica local deposicional.

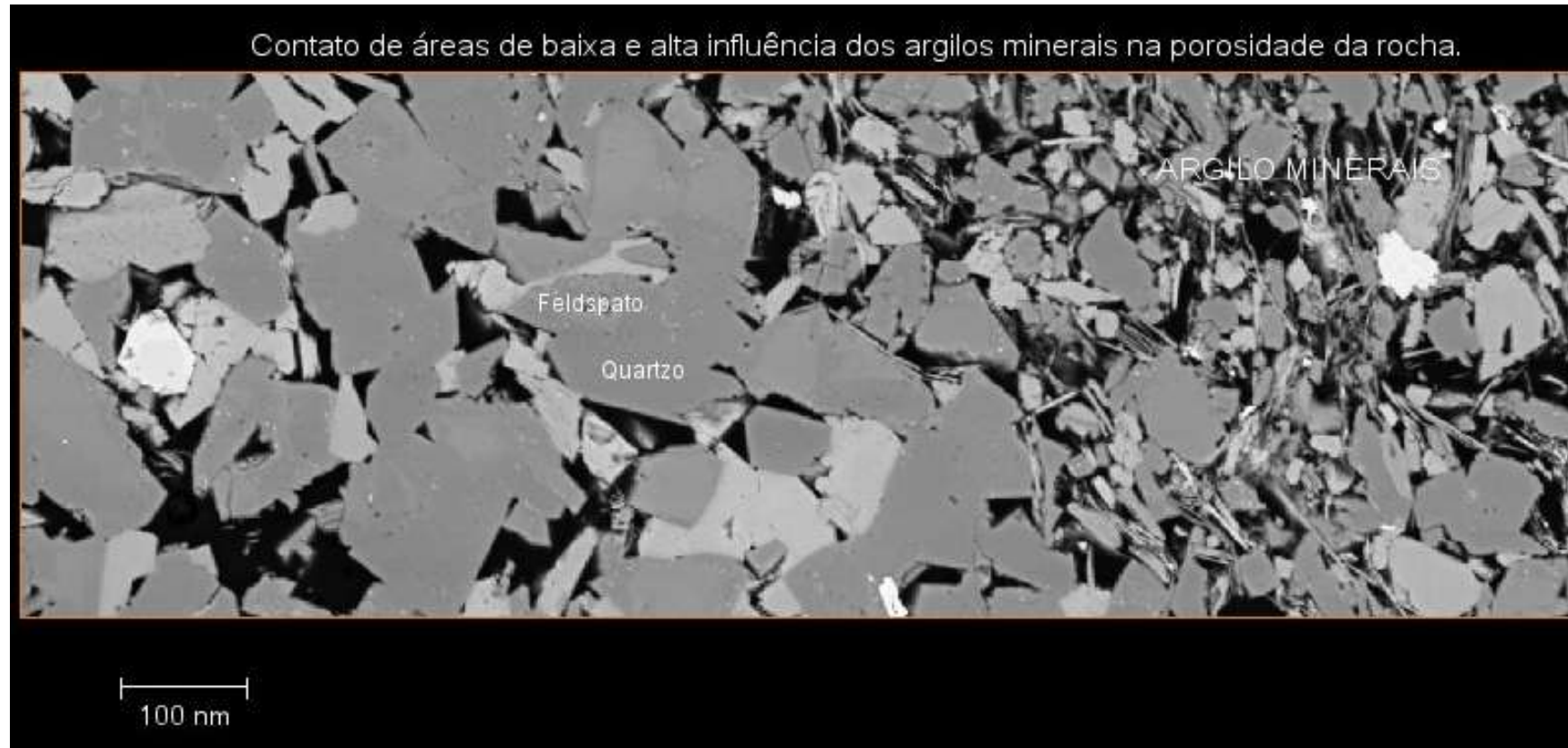


Figura 60: Zona de contato dos grãos de quartzo, feldspato ainda não alterado, para a zona de argilominerais.

Na figura 61 há um contato claro da cimentação dos poros por pirita e por micas. Os grãos estão bastante quebradiços, angulosos, sem indícios de porosidade aparente.

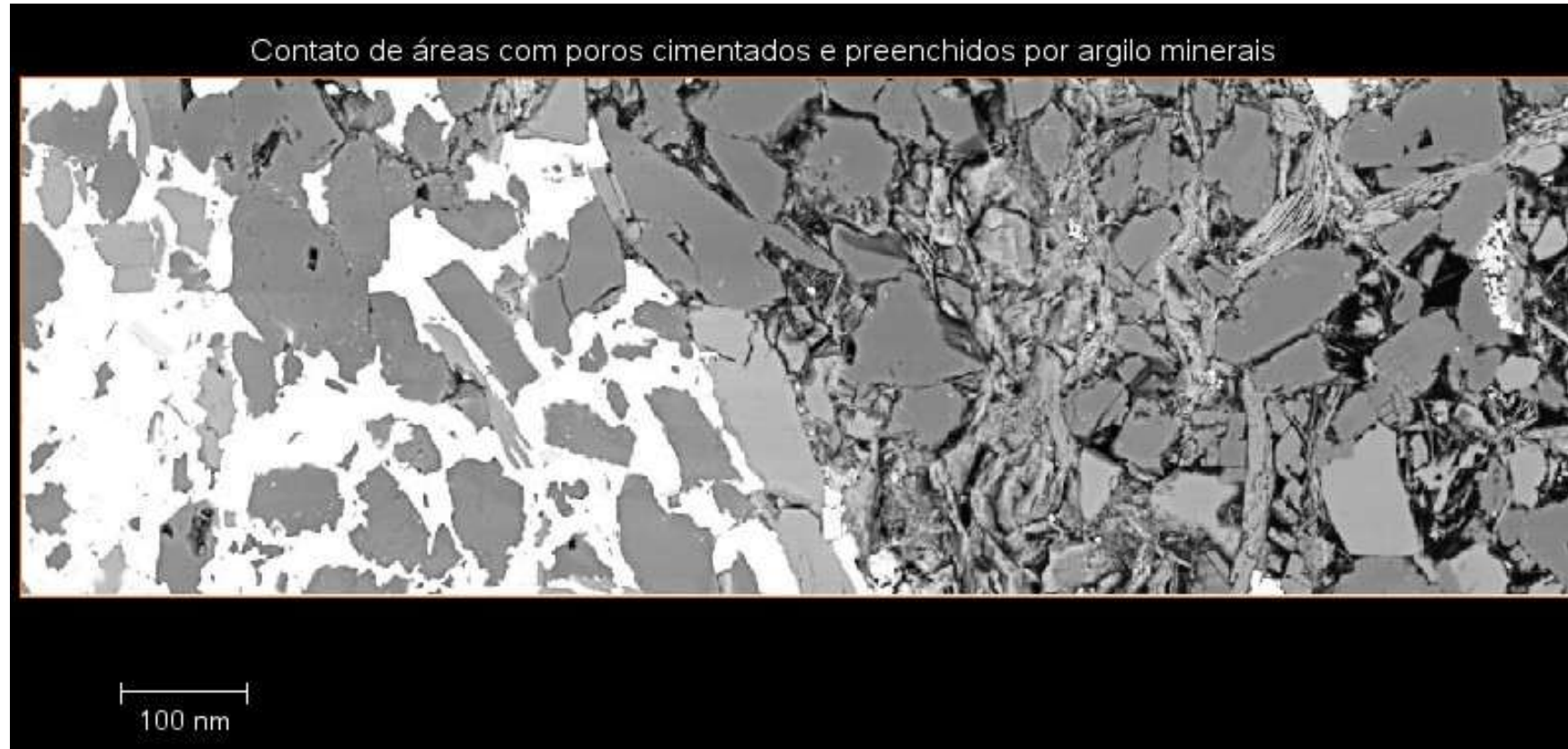


Figura 61: Contato da zona cimentada por pirita e da zona preenchida por micas.

Quanto a distribuição, identificação e morfologia dos grãos minerais estão distribuídas na sequência das figuras 62 à 67. Os grãos de feldspato potássico e plagioclásio estão mais abundantes quanto a distribuição e também associados as zonas de baixa porosidade, devido a presença da illita, clorita, biotita e muscovita no preenchimento dos poros. Um fato curioso é a presença do quartzo e a calcita estarem em regiões de poros limpos, onde o feldspato também está presente, porém a alteração não se mostrou intensa quanto nas demais regiões. Os grãos de quartzo estão com arredondamento e esfericidade maiores que a do feldspato potássico. Os grãos de rutilo se mostram esparsos ao longo de toda a amostra. A pirita parece estar cimentando os poros, como se estivesse sofrendo influência da intrusão hidrotermal. Porém, a pirita parece ser um mineral distinto do veio central que corta a amostra do topo à base.

Observa-se uma ciclicidade no aparecimento de alguns minerais e suas interdigitações ao avaliar as imagens do mapa mineralógico.

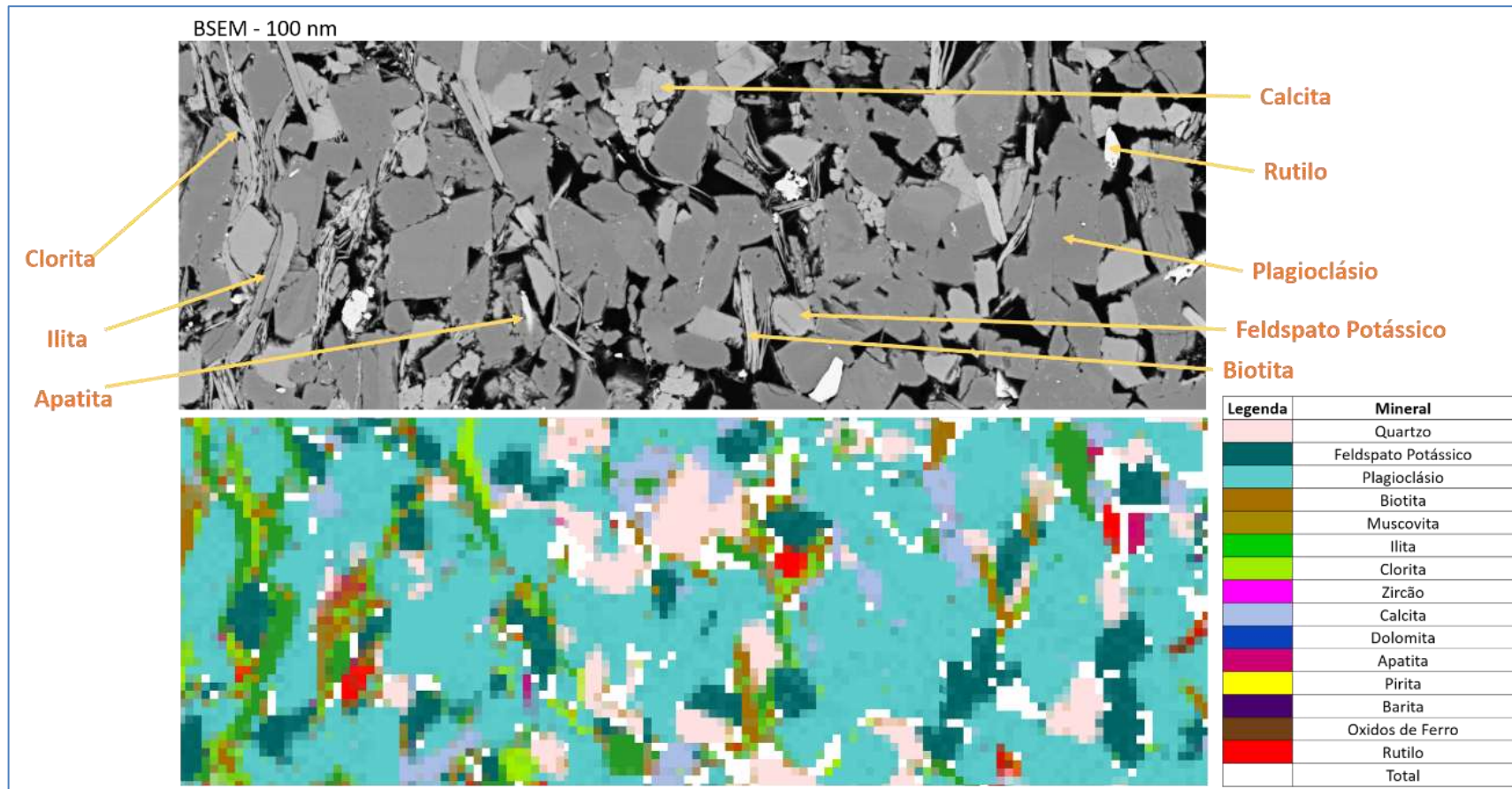


Figura 62: Distribuição dos grãos de plagioclásio, feldspato potássico, biotita, clorita, ilita, rutilo e apatita

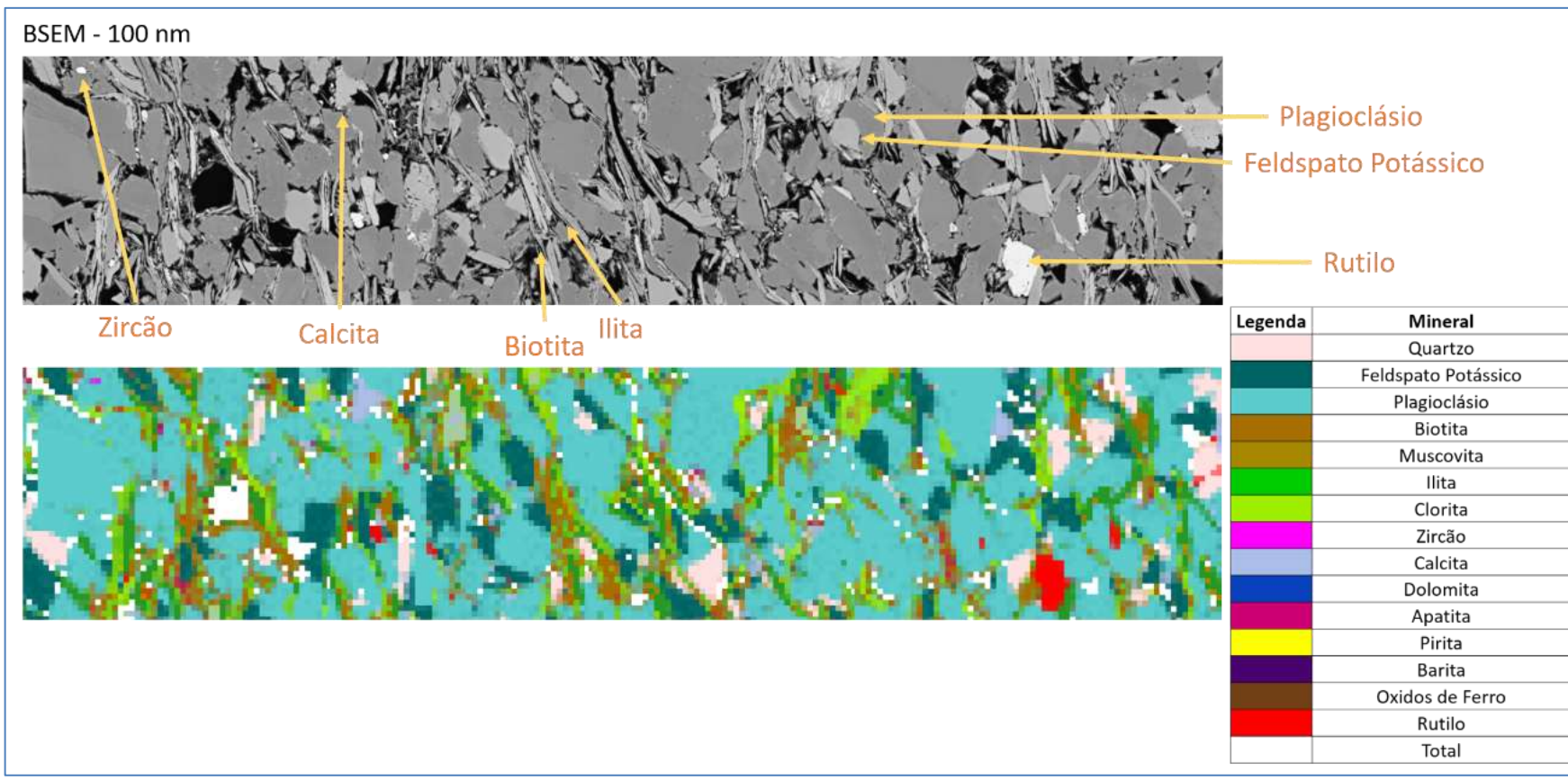


Figura 63: Distribuição dos grãos de plagioclásio, feldspato potássico, biotita, clorita, ilita, rutilo e apatita

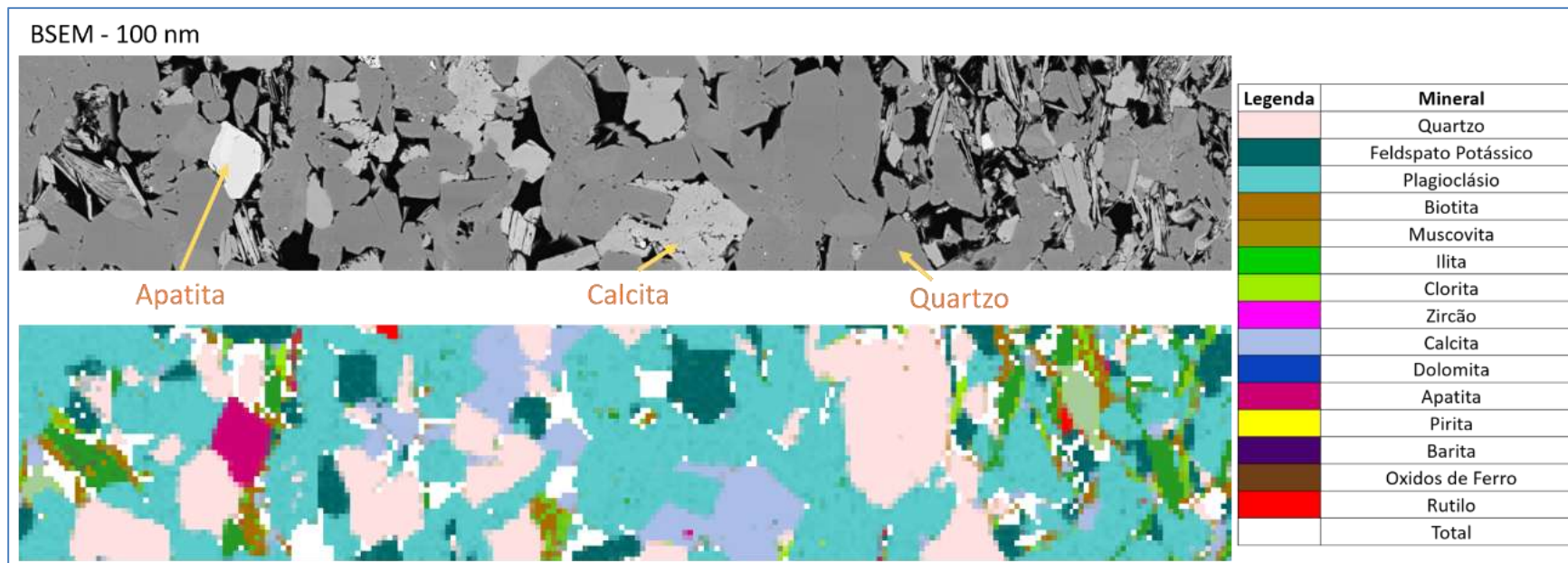


Figura 64: Grãos de quartzo e calcita

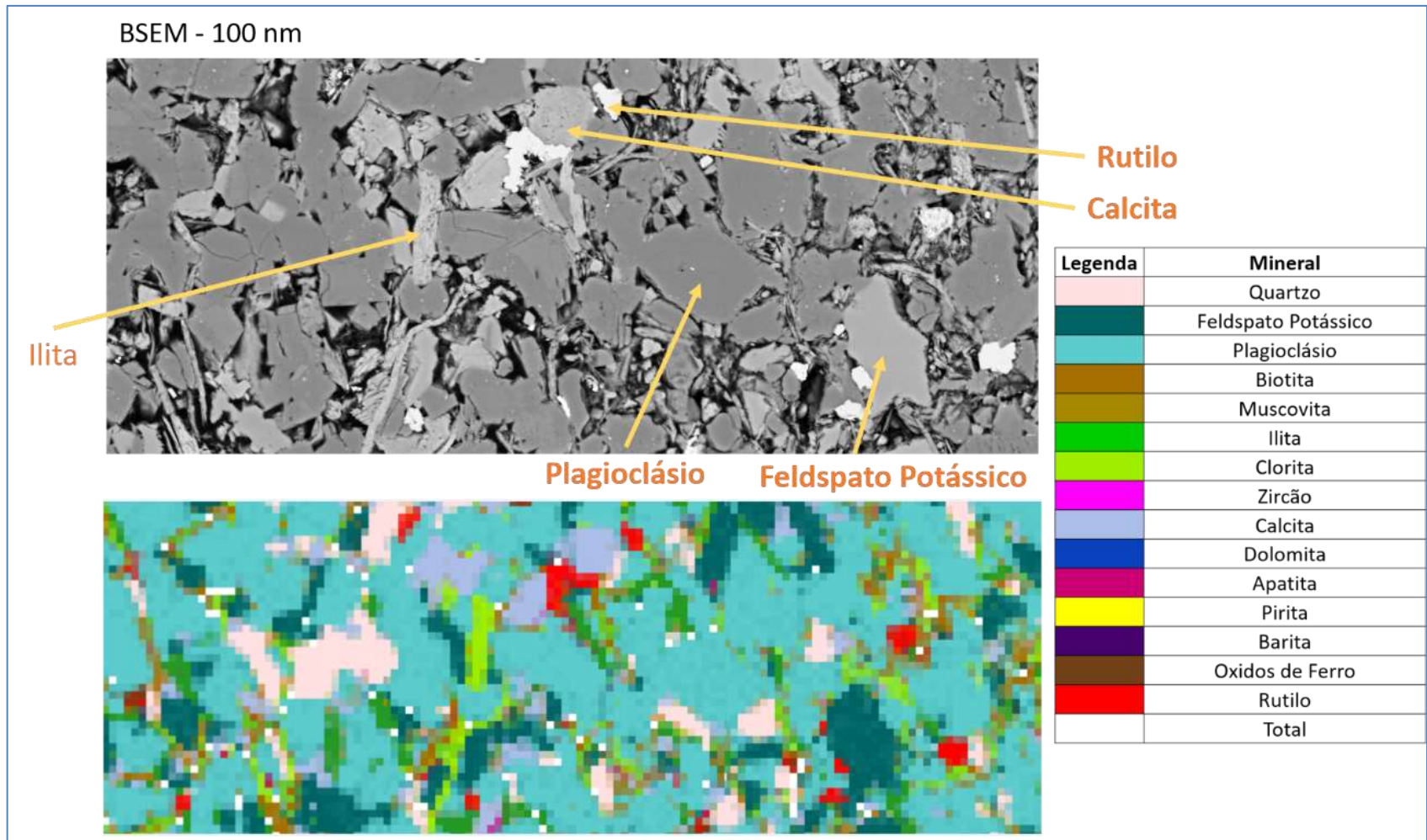


Figura 65: Grãos de calcita e rutilo

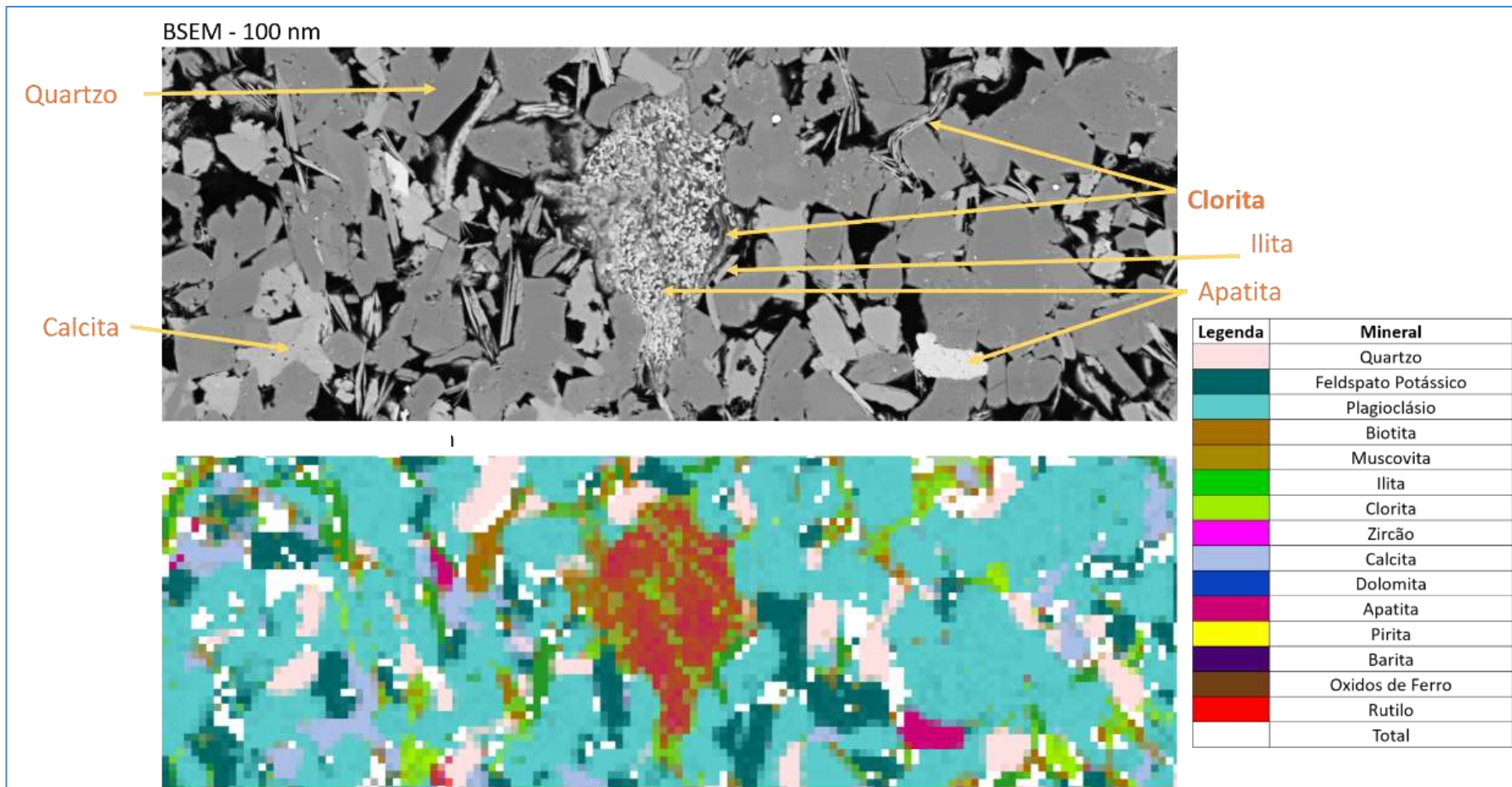
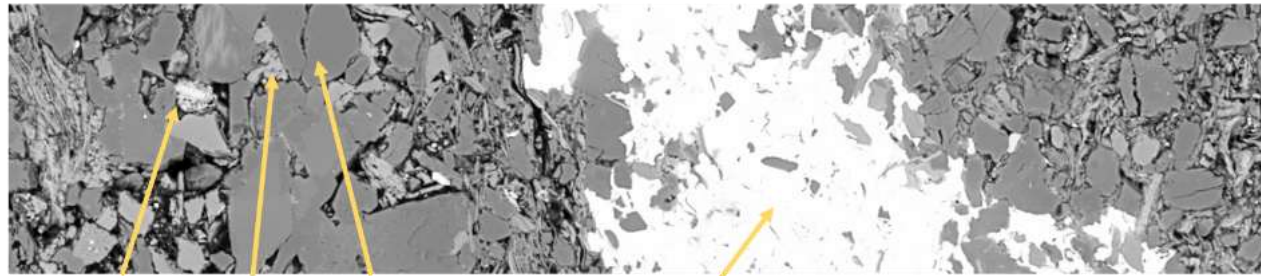
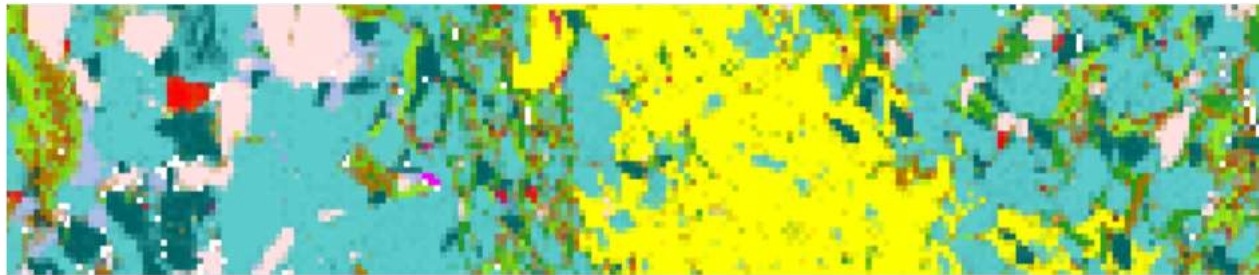


Figura 66: Agregado de argilomineral

BSEM - 100 nm



Rutilo Calcita Quartzo Pirita



| Legenda | Mineral |
|---------|---------------------|
| | Quartzo |
| | Feldspato Potássico |
| | Plagioclásio |
| | Biotita |
| | Muscovita |
| | Ilita |
| | Clorita |
| | Zircão |
| | Calcita |
| | Dolomita |
| | Apatita |
| | Pirita |
| | Barita |
| | Oxidos de Ferro |
| | Rutilo |
| | Total |

Figura 67: Cimentação por pirita

Um resumo de parte do fluxo 2 com as aplicações das ferramentas de investigação não destrutiva estão na figura 68.

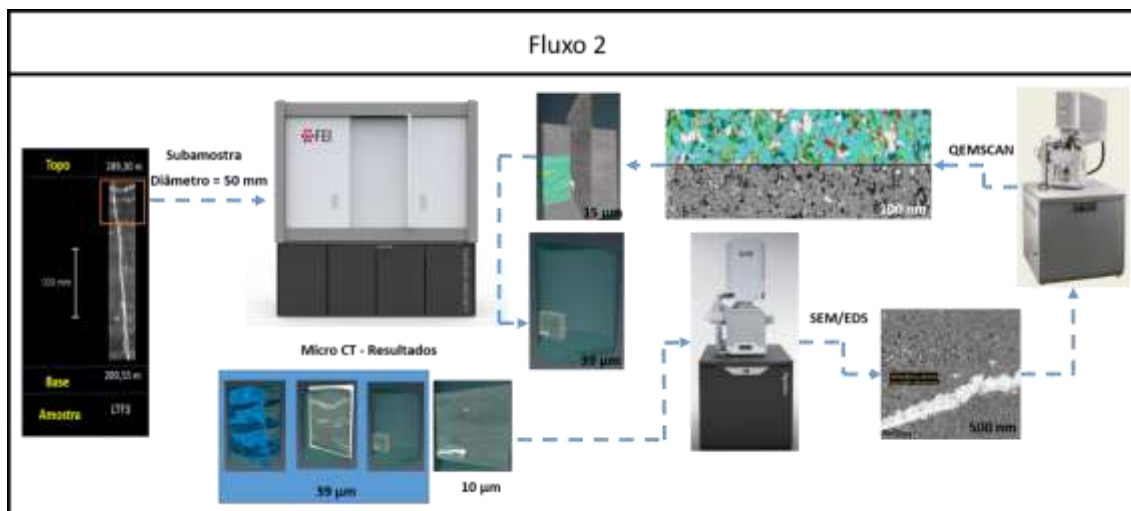


Figura 68: Ilustração do Fluxo 2

5.3 Petrografia

Duas lâminas petrográficas foram feitas e descritas para observar os minerais encontrados na análise QEMSCAN. As lâminas se localizam no topo e na base da amostra (figura 69). Na lâmina do topo da amostra, foi observada a presença de carbonato intersticial preenchendo poros, grãos anedrais limpos de quartzo (figura 70), plagioclásio e microclina passando para argilominerais (figura 71), grãos finos de muscovita, epidoto e sericita, os quais seguem o plano de acamamento da amostra, grãos de zircão e opacos intersticiais irregulares (figura 72). Em alguns pontos da lâmina, observou-se a deformação de grãos de plagioclásio. Há a presença de uma grande fratura contínua e regular e outras menores de forma irregular e descontínua, com carbonato as preenchendo (figura 73). A porosidade preenchida pelos carbonatos está ora isolada, ora conectada. Os opacos estão interconectados, acompanhando as fraturas e apresentam certa continuidade. A lâmina da base da amostra mostrou o mesmo comportamento da lâmina do topo. Observando alguns detalhes da fratura, esta se mostra posterior a deposição da amostra e a grande maioria dos minerais presentes são quartzo e feldspato, predominando o quartzo. A amostra possui uma seleção mediana dos grãos, com um grau de arredondamento e esfericidade moderado. Foi observado o processo de caulinitização dos feldspatos e micas. Presença abundante de argilominerais ocupando micro espaços porosos.

LTF-3

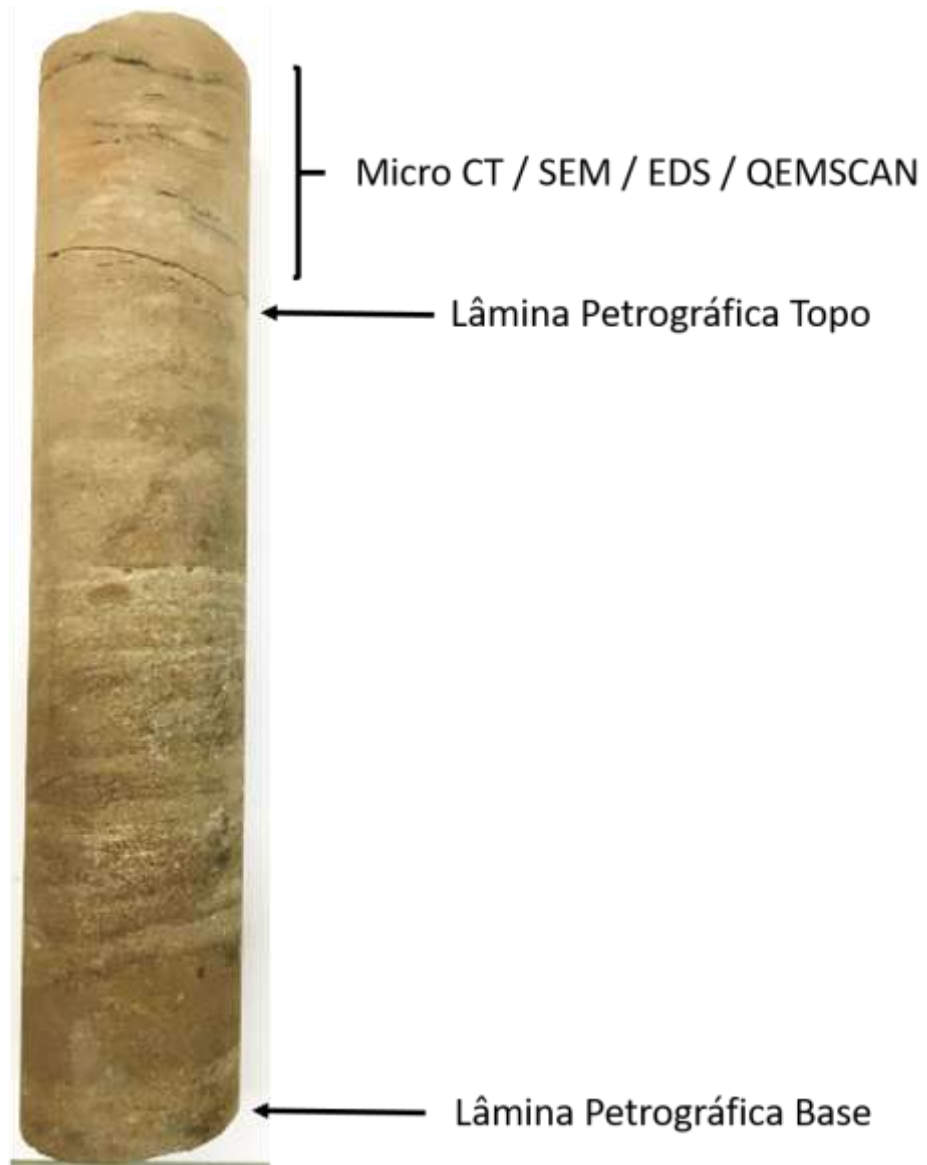


Figura 69: localização das lâminas petrográficas

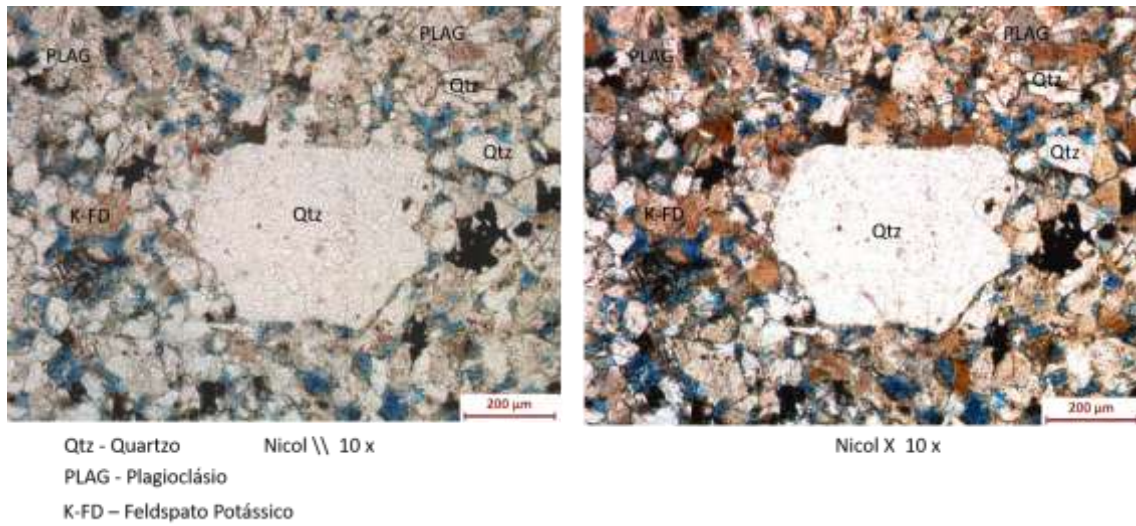


Figura 70: Grãos de quartzo e feldspato

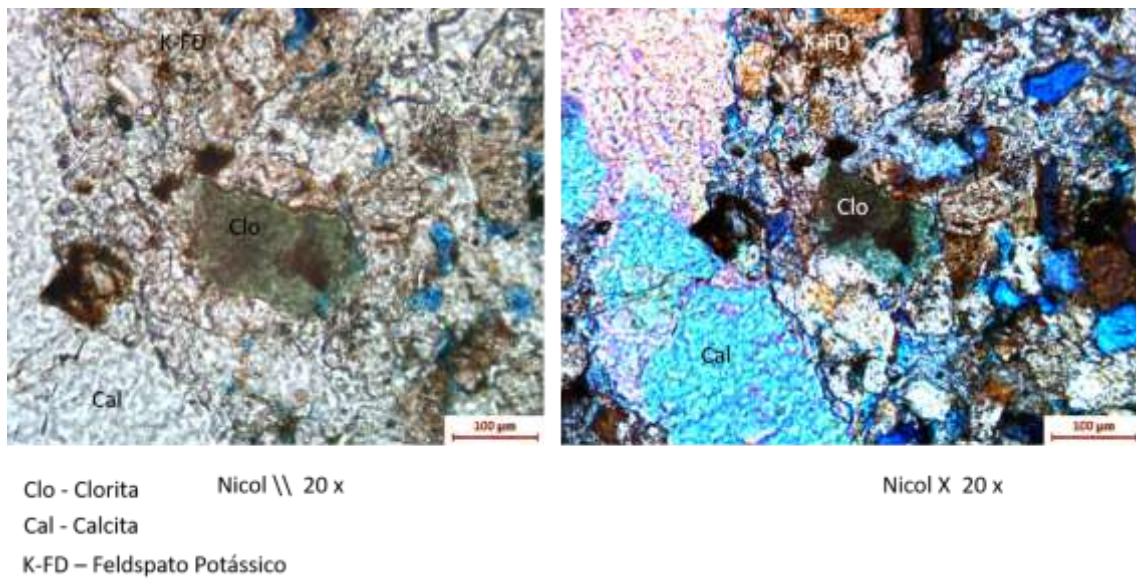
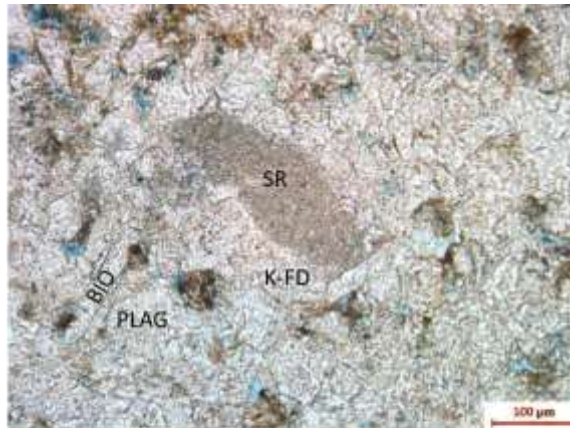
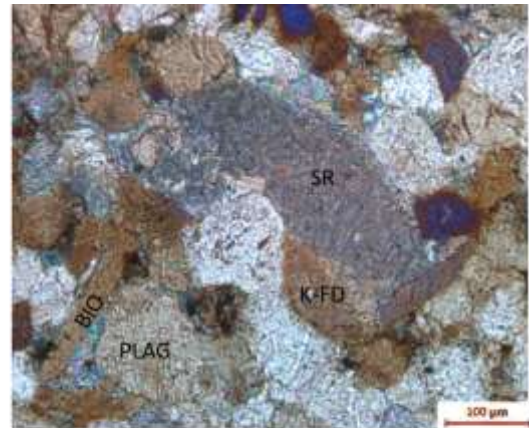


Figura 71: Grãos de feldspato potássico intemperizados



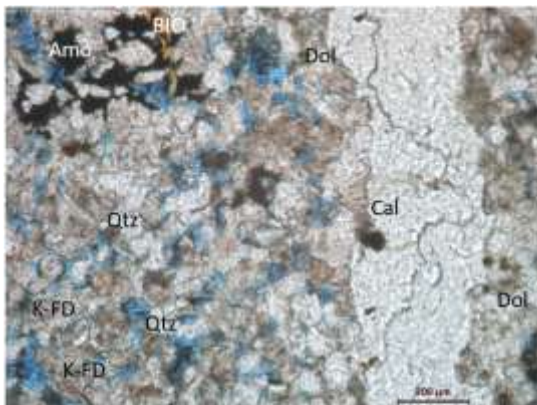
Nicol \\ 20 x



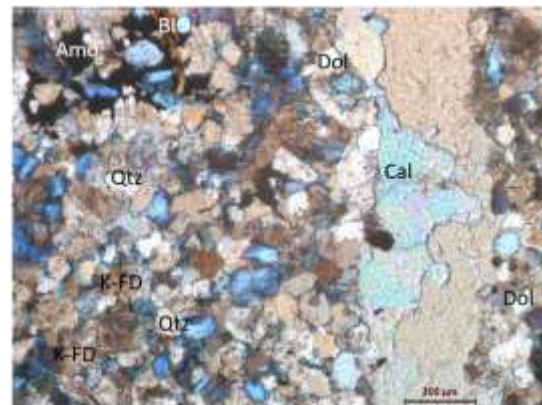
Nicol X 20 x

BIO - Biotita
 PLAG - Plagioclásio
 K-FD – Feldspato Potássico
 SR – Processo de Sericitização

Figura 72: Argilominerais, feldspato potássico, plagioclásio e biotita



Nicol \\ 10 x



Nicol X 10 x

Cal - Calcita
 BIO - Biotita
 Amo - Amorfo
 Dol - Dolomita
 Qtz - Quartzo K-FD – Feldspato Potássico

Figura 73: Intrusão hidrotermal de um veio calcítico

6 Discussões

O resultado das imagens das seções para a presença de poros, indica que as imagens que contém as maiores incidências no aparecimento dos minerais fibrosos, apresentam um percentual maior de poros do que as seções que possuem poros aparentemente “limpos”. É o caso das seções 1, 2, 3, 4 e 5 com percentuais de poros de 21, 18, 21, 18 e 24 % respectivamente. A explicação para tais percentuais pode ser dar devido a dissolução do mineral feldspato associado a processos intempéricos, gerando espaço dentro do próprio grão mineral e também dentro de agregados de argilominerais. A seção 6 apresentou uma porosidade de 12% devido a cimentação dos poros pela pirita. A figura 74 mostra o percentual dos materiais segmentados nas 6 seções.

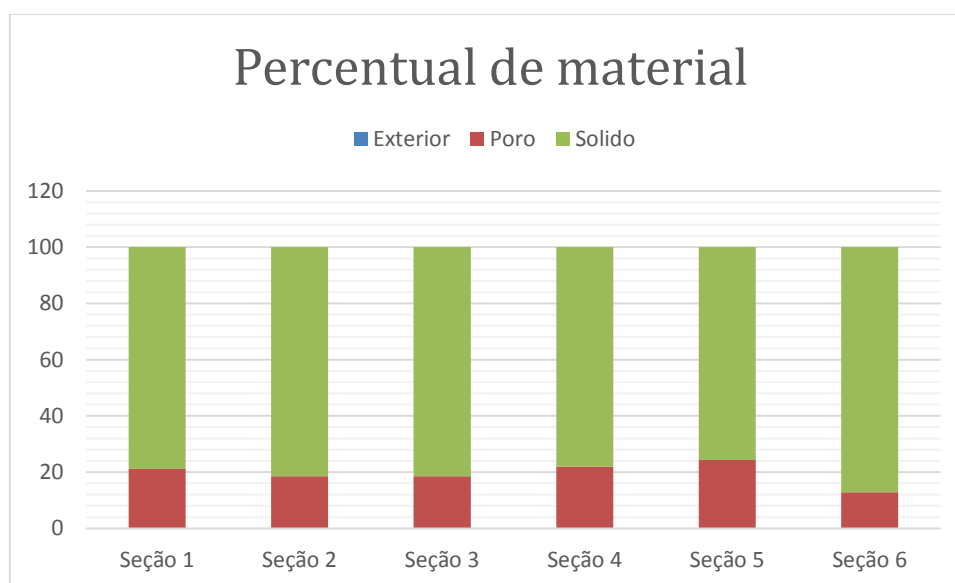


Figura 74: Percentual dos materiais segmentados

Baseado na resposta do gráfico da figura 74, pode ser feito um *upscaling* visual de 100 μm para 10 mm apenas observando a variação dos lugares com os índices de concentração de maior e menor porosidade. Zonas com a presença de argilomineral tende a ter maior porosidade do que zonas com ou sem a presença desses tipos de minerais, com base na resposta da segmentação das amostras. Zonas cimentadas por pirita e calcita, tendem também a ter baixa porosidade. A figura 75 mostram as zonas com maior interferência de minerais micáceos no preenchimento dos poros que correspondem as zonas escuras. A zona amarela corresponde a zona de cimentação por pirita e tende a ter a menor porosidade de toda a amostra, exceto se houver alguma

fratura que seja relevante. As zonas claras são as que possuem maior incidência de quartzo, calcita e plagioclásio, tendo poros mais limpos (figura 75). Portanto as zonas escuras tendem a ser mais porosas do que as zonas claras e a zona amarela.

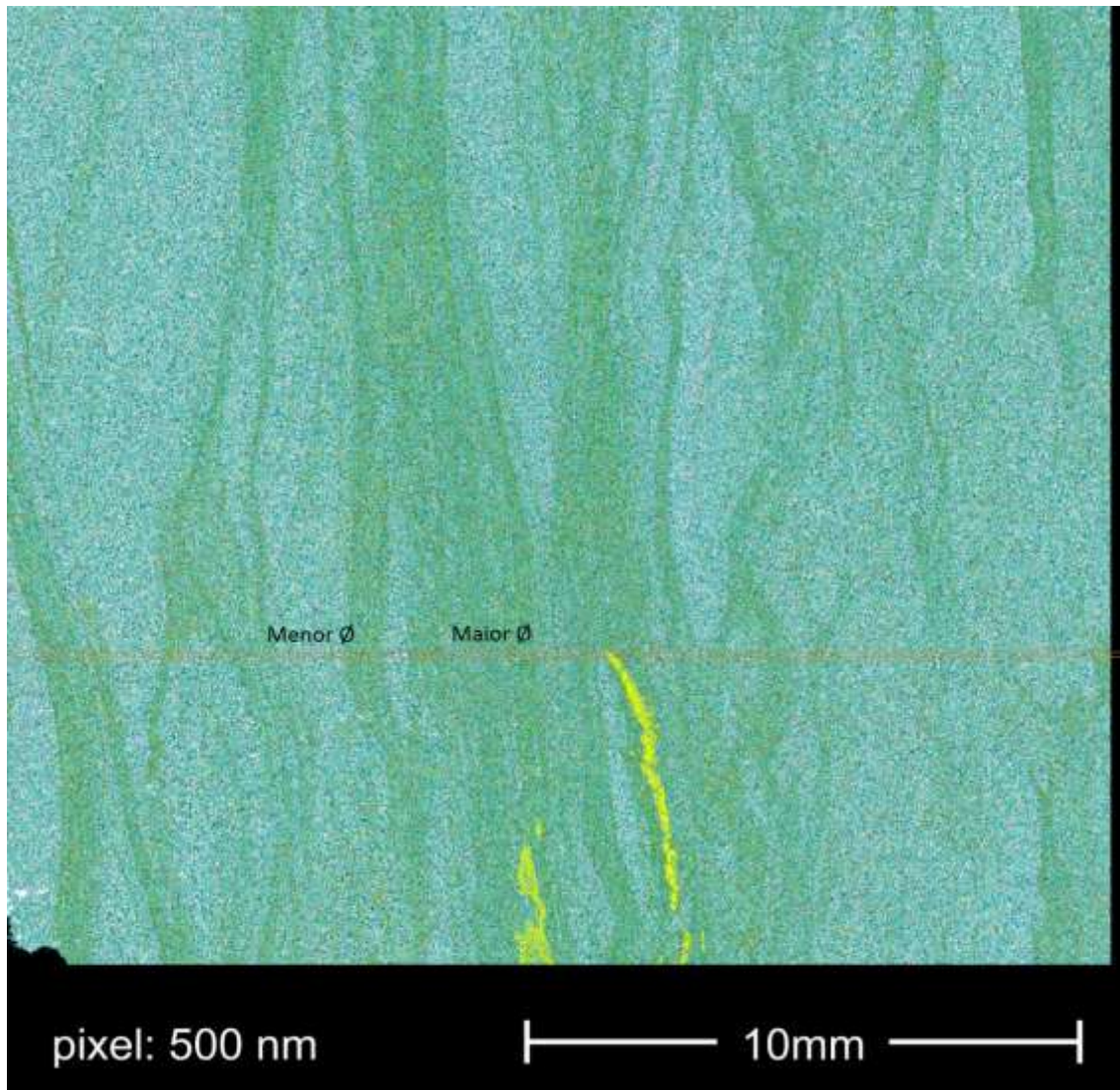


Figura 75: Zonas claras poros limpos, zonas escuras, poros preenchidos por argilominerais

Com o mapa de mineralogia e a petrografia foi possível observar que a Fm. Souza se caracteriza pela presença abundante de quartzo, feldspato potássico e plagioclásio. Em proporções menores, são encontrados biotita, muscovita, ilita, clorita, zircão, apatita, calcita, dolomita, pirita, barita, óxidos de ferro e rutilo. Os minerais secundários como rutilo, zircão, apatita e os opacos podem ser resíduos de uma assembléia de minerais pesados, hoje não mais existentes, afetados por uma dissolução pós-deposicional, devido a intensa lixiviação (Menezes, 1999).

O estudo da composição mineralógica do arcabouço dos arenitos devonianos descritos por Silva *et al.*, (2014), se dá pela presença de quartzo monocristalino e policristalino, feldspatos alcalinos, com maior presença de ortoclásio do que o microclíneo, plagioclásios. Micas (biotita e muscovita), e minerais pesados como o epidoto, granada, opacos e zircão, além de bioclastos (algas prasinofíceas). Houve uma substituição parcial dos feldspatos por caulinita, calcita e dolomita e a identificação da presença de analcima ($\text{AlSi}_2\text{O}_6\text{NaH}_2\text{O}$). A analcima é um mineral que vem da alteração do plagioclásio $(\text{Ca,Na})\text{Al}(\text{Al,Si})\text{Si}_2\text{O}_8$, comum em sedimentos depositados em ambientes alcalinos, em regiões áridas a semiáridas (Morad, 1991). A origem da analcima está relacionada com a alteração de vidros vulcânicos em contato com águas salinas / alcalinas, segundo Deer, (2010). De acordo com Godoy, (2006), os fluidos hidrotermais ricos em Na^+ , Si^{+4} e Al^{+3} , podem ser responsáveis pela formação da analcima. Para os resultados obtidos no trabalho, a mineralogia descrita tanto pela análise BSEM quanto na petrografia condiz com o que já foi publicado na literatura, porém não foi encontrada a analcima. As estruturas do tipo *climbing ripples* identificadas se formam em ambientes onde houve uma sedimentação rápida e brusca das partículas em suspensão. O contraste de densidade da corrente fluvial e da água do lago formam sigmóides na frente deltáica. O resultado mostrou laminações do tipo bioturbações provenientes de ambientes de baixa energia e expostos, intercalados com laminações cruzadas acanaladas indicando aumento de energia no ambiente e afogamento dos sedimentos expostos. Um fato a ser colocado é que a amostra após a deposição sofreu uma intrusão de um material calcítico e após a intrusão do veio, sofreu forte influência diagenética em sua litificação. Tanto que veios de diferentes mineralogias (pirita e calcita) são encontradas na mesma amostra, com orientações de deposição diferente.

LIMA FILHO (1991) sugere em seu trabalho que a Fm. Souza teve sua sedimentação em águas calmas provenientes de um ambiente lacustre raso ou de uma planície de inundação fluvial. O autor ainda observou a influência que o tectonismo teve sobre as rochas da bacia. Antunes (2007) propõe relações existentes entre as falhas e o preenchimento da bacia, destacando feições de espessamento de falhas principais para cada semi-gráben visando a demonstração do sintectonismo na deposição.

Com as análises da BSEM/QEMSCAN a fácies LTF3 da Formação Souza, caracteriza-se por ter mais de 50% de sua composição em feldspatos. Porém, na descrição petrográfica observa-se uma forte tendência a distribuição de quartzo na

amostra. A intrusão de um fluido hidrotermal de composição carbonática ocorreu juntamente com a deposição dos sedimentos da Fm. Souza. A pirita ocorre também em formato de veios, porém há uma forte tendência de ser pós deposicional, fruto da intensa diagênese sofrida pela sílica. A fenda preenchida por carbonato e a pirita, hoje servem como trapa na passagem do óleo.

7 Conclusão

Os estudos com a ferramenta EDS/QEMSCAN mostraram-se úteis no detalhamento das fácies sedimentares e na caracterização da Fm. Souza melhorando o conhecimento dos minerais existentes em microescala.

A facies LTF3 possui boa quantidade de poros quando feita a análise a 100 μm porém os poros estão impregnados por argilominerais. As regiões de maior incidência de feldspato potássico e das micas são as que concentram maiores índices de concentração de poros na amostra, diferente das regiões onde há a presença de quartzo, calcita e pirita.

A petrografia confirmou a resposta do EDS quanto aos minerais encontrados na lâmina e na análise EDS. Um ponto de atenção é quanto a porcentagem dos minerais quantificados no EDS. A amostragem superou 50% de plagioclásio não sendo característico da Fm. Souza tal abundância mineralógica. A lâmina delgada forneceu indícios de quartzo tanto quanto feldspato potássico e alcalino. Esse ponto faz-se necessário um estudo de mais amostras que sejam de tamanhos representativos para melhor análise estatística da variação mineralógica da Fm Souza, podendo utilizar a ferramenta EDS / QEMSCAN.

Para os próximos passos faz-se necessário um estudo complementar para a caracterização da permeabilidade da amostra e a quantificação numérica da porosidade da formação Souza.

Bibliografia

- z© Rocktype, L. (s.d.). *rocktype*. Fonte: <http://rocktype.com/qemscan-technology/>
- AiharaI, A., FernandesI, A., ViertlerI, C., & NatourII, J. (2003). Tomografia multi-slice no sistema músculo-esquelético. *Rev. Bras. Reumatol. vol.43 no.6*.
- ALMEIDA, F. H. (1977). As províncias estruturais brasileiras. *Oitavo Simpósio de Geologia do Nordeste*, (pp. 363-391). Campina Grande.
- Antunes, A. A. (2007). Estilo tectônico do rifte da Bacia do Rio do Peixe. *22 simpósio de geologia do nordeste*, (p. 218). Natal.
- BARTSCHER, M. H. (1956). Enhancement and proof of accuracy of industrial computed tomography (CT) measurements. *Anais de CIRP*, pp. 495-498.
- Bates, R. a. (1987.). *Glossary of geology (3ded.)*: . Alexandria, Va.,.
- BEURLEN, K. &. (1969). Bacias Cretácicas Intracratônicas do Nordeste do Brasil. *Notícias Geomorfológicas v.9 numero 18*, 19-34.
- Botha, P. B. (2008). Ultrafast Phase Mapping of Thin-Sections from An Apollo 16 Drive Tube – a New Visualization of Lunar Regolith. *GSA 2008 Joint Annual Meeting*, (p. 345). Houston, Texas.
- Butcher, A. a. (2010). Automated mineralogy derives key characteristics directly from reservoir rock. *The American Oil & Gas Reporter*,, 4.
- CANTATORE, M. A. (2011). Introduction to computed tomography. *Manufacturing Engineering. Department of Mechanical Engineering, Technical University of Denmark*.
- CARMIGNATO, S. 2. (s.d.). Traceability of dimensional measurements in computed tomography. *8th A.I.Te.M. Conference vol. 11*.
- CASTRO, D. (2005). Modelagem Gravimétrica 3D de Corpos Graníticos e Bacias Sedimentares com Embasamento Estrutural de Densidade Variável. *Revista Brasileira de Geofísica*, 295-308.
- CASTRO, D. L., OLIVEIRA, D., & CASTELO BRANCO, R. M. (2007). On the Tectonics of the Neocomian Rio do Peixe Rift Basin, NE Brazil: Lessons of Gravity, Magnetism, and Radiometric data. *Journal of South American Earth Sciences*, 24, 184 - 202.
- CÓRDOBA, V. C.; ANTUNES, A. F.; JARDIM DE SÁ, E. F.; SOUZA, D. C.; LINS, F. A. P. L. 2008. (s.d.). Análise estratigráfica e estrutural da Bacia do Rio do Peixe, Nordeste do Brasil: integração de dados a partir do levantamento sísmico

- pioneiro 0295_rio_do_peixe_2d. *Boletim de Geociências da Petrobras numero 16.*
- Cormack, A., & Hounsfield, G. (1979). *Development of computer assisted tomography.* NOBELFÖRSAMLINGEN KAROLINSKA INSTITUTET.
- CRUZ, H., GONZALEZ, C., A., J., HERRERA, M., & J., J. (2006). Quantification of the microconstituents formed during solidification by the Newton thermal analysis method. *Journal of Materials Processing Technology*, v 178, n 1-3, 128-134.
- Dedavid, B., Gomes, C., & Machado, G. (2007). *MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA.* Porto Alegre: EDIPUCRS.
- Deer, W. H. (2010). *Minerais constituintes das rochas: uma introdução.* Lisboa: Fundação Calouste.
- DIAS, G. P. (2008). *Determinação do Efeito de Escala na Porosidade de Arenitos Artificiais não Consolidados e Projeto de um Porosímetro a Gás para Amostras com Diferentes Diâmetros. 113p Dissertação de Mestrado.* Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro.
- Donaldson, D. T. (2011). *Petrophysics, 3rd Edition, Theory and Practice of Measuring Reservoir Rock and Fluid Transport Properties.* Gulf Professional Publishing.
- Dvorkin, J. D. (2011). Relevance of computational rock physics. *Geophysics*, Vol. 76, n. 5.
- Edwards, G. a. (1999). *A new application for QEMSCAN – quantifying the mineralogy of drill cuttings from oil and gas exploration and production wells.* CSIRO Report, DMR-1140, 97pp.
- FEI. (s.d.). <https://www.fei.com/products/sem/apreo-for-materials-science/>. Fonte: <https://www.fei.com/>: <https://www.fei.com/products/sem/apreo-for-materials-science/>
- FELDKAMP, L. D. (1984). Practical cone beam algorithm. *Journal of Optical Society of America*, Vol. 1(6), 612-619.
- FERREIRA, C. A. & SANTOS, E. J. (2000). *Programa Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil. Jaguaribe SE, Folha SB.24-Z. Estados do Ceará, Rio Grande do Norte, Paraíba e Pernambuco. Escala 1:500.000.* Brasília: CPRM.

- Filho, R. P. (2009). *Análise de fácies da Formação Sousa (Cretáceo Inferior), bacia de Sousa (PB), e seu contexto em um sistema petrolífero*. Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro.
- FRANÇOLIN, J. B. (1992). *Analyse structurale du bassin du Rio do Peixe (Brésil)*. 240p. *Tese de Doutorado*. Centre Armoricaïne d'Étude Structurale des Socles, Université de Rennes.
- FRANÇOLIN, J. B., COBBOLD, P. R., & SZATMARI, P. (1994). Faulting in the Early Cretaceous Rio do Peixe Basin (NE Brazil) and its significance for the opening of the Atlantic. . *FRANÇOLIN, J. B. L.; COBBOLD, P. R.; SZATMARI, P. 1994. Faulting in the Early Cretaceous Jour. Struct. Geol., 16, 647-661.*
- FRANZ, M. F. (2009). Reliability of dimensional measurements by computed tomography for industrial applications. *4th European-American Workshop on Reliability of NDE vol. 8.*
- GERBASI, R. B. (2012). *Propriedades ferroicas de soluções sólidas NaNbO₃ – BaTiO₃*. *Tese de Doutorado*. Maringá: Universidade Estadual de Maringá.
- Godoy, M. Z.-c. (2006). Características do cimento dos depósitos sedimentares da bacia de Bauru. Região de Presidente Prudente . *Geociências, 27-36.*
- Gonzalez, R. C., & Woods, , R. (2008). *Digital Image Processing (3rd Edition)*.
- Gottlieb, P. W.-T. (2000). Using quantitative electron microscopy for process mineralogy applications. *Journal of the Minerals, Metals and Materials Society, Vol. 52(4), 24-25.*
- Graton, L. C. (1935). Systematic packing of spheres with particular relation to porosity and permeability. *The Journal of Geology v43 n8, 785 - 909.*
- Grauch, R. E. (2008). Quantitative mineralogy of fine-grained sedimentary rocks: a preliminary look at QEMSCAN®. *Microscopy and Microanalysis, Vol. 14(2), 532-533.*
- Grotzinger, J. J. (2010). *Understanding Earth Sixth edition* . paperback.
- JARDIM DE SÁ, E. F., ANTUNES, A. F., CÓRDOBA, V. C., & SOUZA, D. C. (2007). Sedimentação pré e sinrifte: critérios e exemplos nas bacias cretáceas do Nordeste do Brasil. *XI Simp. Nac. Estudos Tectônicos* (pp. 52-53). Natal: Anais, SBG.
- KESTENBAC, H., & W.J., B. F. (1994). *Microscopia eletrônica transmissão e varredura*. São Paulo: ABM.

- Knackstedt, M. L. (2009). Digital rock physics: 3D imaging of core material and correlations to acoustic and flow properties. . *The Leading Edge*.
- Lee JKT, S. S. (1998). *Computed Body Tomography with MRI Correlation*. Philadelphia New york: Lippincott-Raven.
- LIMA FILHO, M. (2002). Mapa faciológico da Bacia do Rio do Peixe, Estado da Paraíba. *SIMPÓSIO SOBRE O CRETÁCEO DO BRASIL*, 6 (pp. 103-106). Rio Claro: UNESP.
- LIMA FILHO, M. L. (1991). *Evolução tectono-sedimentar da Bacia do Rio do Peixe – PB. Dissertação de Mestrado. UFPE*. . Recife: UFPE.
- LIMA, M. R., & COELHO, M. P. (1987). Estudo palinológico da sondagem estratigráfica da Lagoa do Forno, Bacia do Rio do Peixe, Cretáceo do Nordeste do Brasil. *Boletim do Instituto de Geociências – USP, Sériem Científica* 18, 67-83.
- LIN, C. L., MILLER, J. D., & HSIEH, C. H. (2012). Particle damage during HPGR breakage as described by specific surface area distribution of cracks in the crushed products. *XXVI INTERNATIONAL MINERAL PROCESSING CONGRESS (IMPC)* (pp. 3397-3410.). New Delhi: Proceedings. New Delhi.
- LIN, C., & MILLER, J. (2002). Cone beam X-ray microtomography: a new facility for three-dimensional analysis of multiphase materials. *Minerals & Metallurgical Processing*, v. 19, n. 2, 65-71.
- Liu, Y. G. (2005). Mineral matter-organic matter association characterisation by QEMSCAN and applications in coal utilization. *Fuel*, Vol. 84(10), 1259-1267.
- MABESOONE, J. M. (1974). Caracterização estratigráfica dos grupos Rio do Peixe e Iguatu. . *Museu Câmara Cascudo* (pp. 21-41). UFRN.
- MACHADO, A. S. (2015). X-ray microtomography characterization of carbonate microbialites from a hypersaline coastal lagoon in the Rio de Janeiro state - Brazil. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*.
- MATOS, R. M. (1992). *The Northeast Brazilian rift system*, *Tectonics*, 11: 766-791.
- Medeiros, L., Soares, J., Surmas, R., & Fernandes, C. (2014). Propriedades elásticas e elétricas de rochas estimadas computacionalmente. *VI Simpósio Brasileiro de Geofísica*. . Porto Alegre, RS.
- MENDONÇA FILHO, J. G., CARVALHO, I. S., & AZEVEDO, D. A. (2006). Aspectos geoquímicos do óleo da Bacia Souza (Cretáceo Inferior), Nordeste do Brasil: contexto geológico. *São Paulo, Geociências, UNESP*, 25, 91-98.

- Menezes, M. (1999). *Estudos sedimentológicos e o contexto estrutural da formação serra do martins, nos platôs e porto alegre, martins e santana / RN*. Universidade federal do rio grande do norte.
- Miller, J. D., & Lin, C. (2009). High resolution X-ray micro CT (HRXMT) - Advances in 3D particle characterization for mineral processing operations. *Recent Advances in Mineral Processing Plant Desing*, 48.
- Miller, P., Reid, A., & Zuiderwyk, M. (1982). QEM*SEM image analysis in the determination of modal assays, minerals associations and mineral liberation. *Proceedings of the 14th International Mineral Processing Congress*, (pp. 17-23). Toronto, Canada.
- Morad, S. (1991). *Diagenesis of clastic sedimentary rocks*. . Uppsala: Department of mineralogy and petrology, Institute of geology.
- NETO, J. (2011). A microtomografia computadorizada de raios X integrada à petrografia no estudo tridimensional de porosidade em rochas. *Revista Brasileira de Geociências Vol. 41*, 498-508.
- Nogueira, L. (2008). *Quantificação histomorfométrica óssea a partir de microtomografia 3D por contraste de fase e transmissão de raios x utilizando luz síncrotron*. Rio de Janeiro / RJ: Dissertação de Mestrado, Coppe / UFRJ.
- OLIVEIRA, M. S. (2012). X-ray microtomography application in por espace reservoir rock. *Applied Radiation and Isotopes, Vol.70*, 1376-1378.
- Pirrie, D., Butcher, A., Power, M., Gottlieb, P., & Miller, G. (2004). Rapid quantitative mineral and phase analysis using automated scanning electron microscopy (QEMSCAN®); potential applications in forensic geoscience. Em K. C. In: Pye, *Forensic Geoscience, Principles, Techniques and Applications, Vol. 232*. (pp. 23–136). London: Geological Society Special Publication.
- PONTE, F. (1992). Origem e evolução das pequenas bacias cretácicas do interior do Nordeste do Brasil. *SIMPÓSIO SOBRE AS BACIAS CRETÁICAS BRASILEIRAS, 2, Resumos Expandidos* (pp. 55-58). Rio Claro: UNESP.
- PONTE, F. C., & PONTE FILHO, F. C. (1996). Estrutura geológica e evolução tectônica da Bacia do Araripe. *Departamento Nacional da Produção Mineral (4º e 10o Distritos Regionais): Delegacias do Menistério das Minas e Energia em Pernambuco e Ceará*, (p. 68). Recife.

- PONTE, F. C.; HASHIMOTO, A. T.; DINO, R., coords. (1991). *Geologia das bacias sedimentares mesozoicas do interior do Nordeste do Brasil*. . PETROBRAS/CENPES/DIVEX/SEBIPE, relat. inédito.
- RAND, H. M. (1984). Reconhecimento gravimétrico da Bacia do Rio do Peixe. *SIMPÓSIO GEOLOGIA DO NORDESTE, 11* (pp. 42-47). Natal: Sociedade Brasileira de Geologia / Núcleo do Nordeste.
- Reid, A., Gottlieb, P., MacDonald, K., & Miller, P. (1984). “QEM*SEM image analysis of ore minerals: volume fraction, liberation and observational variances”. *Proceedings of the 2nd International Congress on Applied Mineralogy in the Minerals Industry*, (pp. 22-25). Los Angeles, California. .
- REIMANN, D. A. (1997). A cone beam computed tomography system for true 3D imaging of specimens. *Applied radiation and isotopes*, v. 48, n. 10, 1433-1436.
- Reiser, M., Takahashi, M., Modic, M., & Bruening, R. (2001). *Multislice CT*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- ROSA, A. J., CARVALHO, R. S., & XAVIER, J. A. (2006). *Engenharia de Reservatórios de Petróleo*. . Interciência.
- SAENGER, E. V. (2016). Digital carbonate rock physics. *Solid earth*, v. 7, 1185-1187.
- Santiago, K. F. (2015). *DETERMINAÇÃO DAS CONSTANTES ELÁSTICAS ESTÁTICAS E DINÂMICAS DAS ROCHAS DA FORMAÇÃO SOUSA, BACIA DO RIO DO PEIXE, PB*. CAMPINA GRANDE: UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE .
- SASOV., A. (2002). Comparison of fan-beam, cone-beam and spiral scan reconstruction in xray micro-ct. *SPIE 4503*, 124–131.
- Scientific., ©. 2. (2018). *Thermo Fisher Scientific FEI*. Fonte: Thermo Fisher Scientific: <https://www.fei.com/product/microCT/HeliScan/>
- Selley, R. C. (1970). *Ancient Sedimentary Environments*. London: Chapman & Hall Ltd.
- SELLEY, R. C. (1998). Elements of petroleum geology. *San Diego Academic Press*. San Diego.
- SHEPPARD, A. L. (2014). Techniques in helical scanning, dynamic imaging and image segmentation for improved quantitative analysis with X-ray micro - CT. *Elsevier*, v. 324, 49-56.

- SILVA, A. N. (2009). *Estratigrafia e evolução estrutural da bacia do rio do peixe, nordeste do Brasil. Dissertação (Mestrado)*. Natal: Programa de Pós-Graduação em Geodinâmica e Geofísica, Universidade Federal do Rio Grande do Norte.
- Silva, A. S. (2015). *FACIOLOGIA E PETROFÍSICA DE ROCHAS DA FORMAÇÃO SOUSA, BACIA RIO DO PEIXE*. CAMPINA GRANDE: UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE.
- Silva, J. G., Córdoba, V. C., & Caldas, L. H. (2014). Proposta de novas unidades litoestratigráficas para o Devoniano da Bacia do Rio do Peixe, Nordeste do Brasil. *Brazilian Journal of Geology*, v.44, n.4., 561-578.
- SILVA, R. P., BORGHI, L., CARVALHO, I. S., & IDAÉCIO, F. (2008). Laminações microbianas e fácies sedimentares da Formação Souza (Bacia de Souza, PB). *Congresso Brasileiro de Geologia*, 44 (p. 124). Curitiba: Sociedade Brasileira de Geologia. .
- SOETE, J. K. (2015). Acoustic properties in travertines and their relation to porosity and pore types. *Marine and Petroleum Geology*, v. 59, 320-335.
- Steiger, R. &. (1992). Quantitative determination of the mechanical properties of shales. *SPE Drilling Engineering*, 181-185.
- Suguio, K. (1980). *Rochas Sedimentares*. São Paulo: Edgard Blucher Ltda.
- SUGUIO, K. (1994). *Rochas Sedimentares: propriedades, gênese, importância econômica*. São Paulo: 4. Ed. São Paulo: Edgard Blücher.
- SVITELMAN, V., & DINARIEV, O. (2013). Geostatistical approach to the anisotropy analysis of 3D rock microtomographic models. *Computers & Geosciences*, v. 57, n. 0, 116-123.
- Sylvester, P. (2012). USE OF THE MINERAL LIBERATION ANALYZER FOR STUDIES OF SEDIMENTS AND SEDIMENTARY ROCKS. *Mineralogical Association of Canada Short Course 42* (pp. 1-16). St. John's NL: Department of Earth Sciences, Memorial University.
- Tauata, L., Salati, I.P.A., Prinzi, R.DI., Prinzi, M.A.R.R.DI., (2003). *Radioproteção e Dosimetria: Fundamento*, 5. ed. IRD/CNEN.
- TIAB, D., & DONALDSON, E. C. (2004). *Petrophysics: Theory and Practice of Measuring Reservoir Rock and Fluid Transport Properties*. Oxford: Elsevier, 2004, v.1., 926.
- ULIANA, e. a. (2014). MICROTOMOGRÁFIA DE ALTA RESOLUÇÃO NO SETOR MINERAL. *Holos*, 11-19.

- VALLEJO, L. I., FERRER, M., ORTUÑO, L., & OTEO, C. (2002). Ingeniería Geológica. *Madrid: Pearson Educación*, 744.
- VERGÉS, E. e. (2011). 3D pore analysis of sedimentar rocks. *Sedimentary Geology*, v. 234, n. 1-4, 109-115.
- VON ARDENNE, M. (1938). Das Elektronen-Rastermikroskop. *Theoretische Grundlagen. Z. Tech. Phys.* v. 109,, 553-572.
- WITHERS, P. J. (2007). X-ray nanotomography. . *Materials today*, v. 10, n. 12, 26-34,.
- WORDEN, R. H. (2003). *Sandstone Diagenesis: The evolution of sand to stone*. New York: Blackwell Publishing Ltda.
- Zhang, S. S. (2011). Poromechanics investigation at pore-scale using Digital Rock Physics Laboratory. . *Comsol Conference*.
- ZWORYKIN, V., HILLER, J., & SNYDER, R. (1942,). *ASTM Bulletin*.n. 15.