



INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES
Autarquia Associada à Universidade de São Paulo

Caracterização de rochas vulcânicas, quanto à morfologia, distribuição interna e interconexão das suas vesículas

RODRIGO SILVA DOS SANTOS

Dissertação apresentada como parte dos requisitos para
obtenção do Grau de
Mestre em Ciências na Área
de Tecnologia Nuclear - Aplicações

Orientadora:
Profa. Dra. Margarida Mizue Hamada

São Paulo
2021

INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES
Autarquia Associada à Universidade de São Paulo

**Caracterização de rochas vulcânicas, quanto à morfologia, distribuição interna e
interconexão das suas vesículas**

Versão Original

Versão Original disponível no IPEN

Rodrigo Silva dos Santos

**Dissertação apresentada como parte dos
requisitos para obtenção do Grau de
Mestre em Ciências na Área
de Tecnologia Nuclear - Aplicações**

**Orientador:
Profa. Dra. Margarida Mizue Hamada**

**São Paulo
2021**

Fonte de Financiamento: CNPq e Fapesp

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Como citar:

SILVA DOS SANTOS, R. ***Caracterização de rochas vulcânicas, quanto à morfologia, distribuição interna e interconexão das suas vesículas***. 2021. 88 f. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Nuclear), Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, IPEN-CNEN, São Paulo. Disponível em: <<http://repositorio.ipen.br/>> (data de consulta no formato: dd/mm/aaaa)

Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema de geração automática da Biblioteca IPEN,
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Silva dos Santos, Rodrigo
Caracterização de rochas vulcânicas, quanto à morfologia,
distribuição interna e interconexão das suas vesículas /
Rodrigo Silva dos Santos; orientador Margarida Mizue Hamada.
-- São Paulo, 2021.
88 f.

Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em
Tecnologia Nuclear (Aplicações) -- Instituto de Pesquisas
Energéticas e Nucleares, São Paulo, 2021.

1. rocha vulcânica vesicular. 2. interconexão entre as
vesículas. 3. reservatório de fluidos. 4. Tomógrafo Industrial
de 3ª geração. 5. radiação gama. I. Mizue Hamada, Margarida ,
orient. II. Título.

“Conhecimento real é saber a extensão da própria ignorância”.
Confúcio

AGRADECIMENTOS

À Sra. Suzete, minha mãe, que dentro das possibilidades dela sempre me incentivou a estudar e fez parte da formação meu caráter.

À Dra. Margarida Mizue Hamada pela: orientação, compartilhamento de saberes, amizade, compreensão e generosidade. É um exemplo de ser humano e profissional da ciência.

Ao Dr. Francisco de Assis Cavallaro que me que acompanha o meu desenvolvimento desde a monografia, pelo suporte durante o mestrado, amizade e incentivo. Admiro ele como pessoa e cientista.

Ao Dr. Alexandre pelo: auxílio com as análises processuais, didática, discussões e discussões e cafezes.

Ao Dr. Valdecir Janasi que sugeriu o tema, auxiliou na coleta das rochas, viabilizou a preparação das amostras para as análises geoquímicas e petrográficas, ao Samuca e à equipe laminação.

Ao Dr. Rafael, do CECON/IPEN, que mui gentilmente, disponibilizou os laboratórios do CECON para as análises de DRX, FRX e MEV.

Ao meu amigo Daniel que me recebeu no CRUSP, compartilhando vivências que fomentaram o meu processo desconstrução. À minha amiga Angélica pela: convivência agradável, amizade e incentivo no meu processo de desconstrução e empoderamento

Aos meus amigos do CCB USP – Nathalia, Davi, Matheus, Guilherme, Bruno, Victor e os demais – pelo companheiro, amizade e sensação de pertencimento.

Aos amigos da sala de estudos, do CTR/IPEN: Stalone, Bia, Diego, Mona, Thiago, Carla, Wilmer, Lucas Faustino, Lucas e Lil (FOFITO). Foram receptivos, presentes em alguns momentos de dificuldade e descontração.

Ao CNPq por ter me cedido a bolsa de mestrado e à FAPESP por ter financiado a coleta das amostras.

CARACTERIZAÇÃO DE ROCHAS VULCÂNICAS, QUANTO À MORFOLOGIA, DISTRIBUIÇÃO INTERNA E INTERCONEXÃO DAS SUAS VESÍCULAS

Rodrigo Silva dos Santos

RESUMO

Rocha vulcânica é a designação dada em geologia para as rochas ígneas extrusivas. Um tipo de rocha ígnea de interesse, em termos econômicos, é a vesicular, desde que o conhecimento da sua morfologia (posição, tamanho e interconectividade das vesículas) dessas estruturas dentro do derrame, como também, devido à possibilidade dessas rochas armazenarem fluidos (água e hidrocarbonetos). Nesse trabalho, algumas amostras de rocha vulcânica vesicular da Bacia do Paraná foram caracterizadas, visando somar informações para o conhecimento das propriedades dessas rochas como um reservatório de fluidos. Os elementos presentes nas rochas foram identificados e quantificados pela fluorescência de raios X. A petrografia foi utilizada para caracterizar aspectos como: textura, grau de cristalinidade, visibilidade, geometria, arranjo (trama), o tamanho dos cristais, preenchimento da porosidade e dos minerais secundários. A topografia e a morfologia dos minerais foram analisadas usando o Microscópio de Varredura Eletrônica (MEV). As dimensões das vesículas e a interconexão entre elas foram claramente observadas nas imagens reconstruídas das rochas medidas através de um Tomógrafo Industrial de 3ª geração de radiação gama.

Palavras-chave: rocha vulcânica vesicular; interconexão entre as vesículas; reservatório de fluidos; Tomógrafo Industrial de 3ª geração; radiação gama.

Characterization of volcanic rocks, regarding morphology, internal distribution and interconnection of vesicles

Rodrigo Silva dos Santos

ABSTRACT

Volcanic rock is a designation in geology given to extrusive igneous rocks. One type of igneous rock of interest, in economic terms, is vesicular, since, besides the knowledge of the morphology (positioning, size, direction, and interconnectivity of the vesicles) of these structures within the spill, there is also an economic interest regarding the possibility of this rock as a reservoir of fluids (water and hydrocarbons). In this work, samples of vesicular volcanic rock from the Paraná Basin were studied for their characterization, aiming to contribute to the knowledge of this rock properties as a reservoir of fluids. The elements present inside the rocks were identified and quantified by X-ray fluorescence and X-ray diffraction. The petrography is a method of characterization that analyzes aspects as texture, crystallinity, visibility, geometry, arrangement, the size of crystals, porosity primary, and secondary, and minerals secondaries. The topography and the morphology of the minerals were available using the Scanning Electron Microscopy (SEM). The dimensions of the vesicles and the interconnection between them could be clearly observed in the reconstructed images of the rocks measured by the third generation gamma-ray industrial tomography technique

Keywords: vesicular volcanic rock; interconnection between vesicles; fluid reservoir; 3rd generation Industrial Tomograph; gamma radiation.

Sumário

AGRADECIMENTOS	5
1 INTRODUÇÃO	12
2 OBJETIVO.....	14
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	14
3.1 Rochas Ígneas	14
3.1.1 Composição da rocha (ou do magma)	15
3.1.2 Os parâmetros utilizados para classificar as rochas ígneas.....	16
3.1.3 A solubilidade dos voláteis e as vesículas	17
3.1.4 Granulação das rochas ígneas.....	19
3.1.5 Tectônica Global e Magmatismo	21
3.1.6 Derrames de Lavas	23
3.2. Sistema Petrolífero	24
3.2.1 Migração	25
3.2.2 Fatores que controlam fraturas em reservatórios ígneos	26
3.2.3 Viabilidade dos Reservatórios Ígneos.....	27
3.3 Histórico De Exploração do Petróleo no Brasil.	28
3.4 A anatomia da Província Basáltica Continental	30
3.5 Evolução Tectonoestratigráfica da Bacia do Paraná	34
3.6 Magmatismo Serra Geral	41
3.7 Métodos de Caracterização.....	43
3.7.1 Petrografia	43
3.7.2 Fluorescência	45
3.7.3 Microscópio de Varredura Eletrônica.....	48
3.8 Tomografia Industrial 3D de radiação gama	50
4 METODOLOGIA.....	55
4.1 Coleta das Amostras	55
4.2 Pulverização das Amostras	56
4.3 Fluorescência de Raios X.....	56
4.4 Microscópio de Varredura Eletrônica.....	57
4.5 Ensaios petrográficos pela técnica de microscópio óptico de luz transmitida.....	57
4.6 Tomografia computadorizada 3D de radiação gama	58
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	61

5.1 Fluorescência de Raios X.....	61
5.2 Descrição Petrográfica pela técnica de Microscopia Optico	63
5.3 Imagens do Microscópio de Varredura Eletrônica (MEV)	65
5.4 Tomografia Industrial de raios gama de terceira geração	68
5.6 Ensaio de Permeabilidade.....	74
5.7 Correlação entre os resultados dos métodos estudados.	74
5.8 Discussão sobre os resultados	82
6 Conclusão	83
REFERÊNCIAS.....	84

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1:** Gráfico do teor de álcalis totais ($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$) relativo ao SiO_2 (ambos % em massa) para uma quantidade representativa de análises de rochas vulcânicas terrestres (representando composições de líquidos magmáticos ígneos).....15
- Figura 2:** Três maneiras simplificadas de classificação das rochas ígneas: (a) por tamanho do grão na matriz. O limite entre a granulação média e granulação grossa foi dado em 3 mm; outras convenções (por exemplo, Cox *et al.*, (1988)(6) utilizam o limite de 5 mm; (b) por proporções em volumes de minerais claros (félsicos) e escuros (máficos) observados ao microscópio; (c) por conteúdo de sílica (obtido por análise química).....17
- Figura 3:** (a) Solubilidade de um gás (neste caso, vapor de H_2O) no líquido magmático basáltico em função da pressão (isto é, profundidade). A forma da curva de solubilidade foi obtida por Dixon *et al.* (1995). (b) Grau de vesiculação como resultado da descompressão à medida que o líquido magmático ascende pelo conduto do vulcão em direção à superfície.....19
- Figura 4:** Diagrama mostrando as velocidades de nucleação e de crescimento cristalino como função do super-resfriamento abaixo da isoterma solidus. As três faixas arbitrárias de super-resfriamento (ou de velocidade de resfriamento) são ilustradas, gerando cristais de granulação grossa e fina e vidro livre de cristais.....21
- Figura 5:** O magma forma-se em condições estreitamente conectadas com os movimentos das placas litosféricas22
- Figura 6:** Colocação de um derrame de lava por inflação. O derrame final tem uma estruturação interna com um núcleo maciço e uma crosta fraturada e rica em vesículas (bolhas preservadas).....24
- Figura 7:** (a) Um lacólito em forma de árvore da Natal foi responsável pela formação da trapa estrutural intrudindo arenitos e calcáreos, localizadas no campo de Omaha Dome, em Llinois. (b) Lacólitos perfuradores elevam camadas sobrepostas, localizadas ao longo dos planos de falhas geológicas, podendo formar trapas estruturais.....25
- Figura 8:** Localização das maiores províncias basálticas.....31
- Figura 9:** Painel evolucionário do pré-rifte.....32
- Figura 10:** Painel evolucionário da fase onset.....33
- Figura 11:** Principal fase de desenvolvimento da Província Parana-Entedeka.....34
- Figura 12:** Contorno da distribuição das rochas da Formação Serra Geral na Bacia do Paraná justaposta à Namibia, parte análoga da bacia localizada no continente africano em Namibia.....35
- Figura 13:** Diagrama Estratigráfico da Bacia do Paraná36
- Figura 14:** Microscópio óptico.....43
- Figura 15:** Luz refletida e refratada.....44
- Figura 16:** Representação esquemática da região de ionização gerada na interação do feixe de elétrons com a superfície da gema..... 49
- Figura 17:** Quatro tipos de equipamentos para tomografia de transmissão gama..... 52

Figura 18: Quatro tipos de equipamentos para tomografia de transmissão gama.....	54
Figura 19: Região de coleta das amostras de rochas vulcânicas vesiculadas.....	56
Figura 20: Ilustração da amostra da rocha vulcânica vesicular analisada.....	59
Figura 21: Tomógrafo Industrial de Terceira Geração por radiação gama.....	60
Figura 22: Ilustração do Fantom multifásico confeccionado com acrílico (A). Esquema do Fantom com as dimensões dos constituintes (B). 1- Ar cercado por parede de vidro circular, 2- barra de ferro e 3- barra de alumínio.....	61
Figura 23: Vesículas parcialmente preenchidas por zeólita.....	63
Figura 24: Granulometria da matriz, textura intergranular e dikititaxítica.....	64
Figura 25: Amígdala totalmente preenchida por zeólita com hábito prismático (seta amarela).....	65
Figura 26: Vesículas resultantes do processo de porosidade primária.....	66
Figura 27: Amígdala preenchida totalmente por zeólita.....	67
Figura 28: Espaço angular entre os grãos de plagiocásio, alteração do plagioclásio e microfraturas.....	68
Figura 29: Imagem reconstruída do Fantom multifásico.....	69
Figura 30: Gráfico do coeficiente de Atenuação Linear x Densidades.....	70
Figura 31: Imagem reconstruída da rocha vulcânica mostrando as interconexões entre as vesículas representadas pela cor azul.....	71
Figura 32: Imagem segmentada do quartzo (a) e das vesículas (b).....	73
Figura 33: Imagem tomográfica da rocha imersa água durante 72 horas. A cor vermelha representa a vesícula preenchida com água e a interconexão entre elas....	74
Figura 34: Imagem reconstruída da rocha vulcânica.....	76
Figura 35: Vesícula parcialmente preenchida vista da imagem do microscópio óptico (a) e imagem do MEV indicada pela seta amarela(b).....	77
Figura 36: Imagem da vesícula preenchida obtida pela técnica de microscópio óptico (a) e MEV (b).....	78
Figura 37: Imagem reconstruída evidenciando as interconexões entre as vesículas, representadas pela cor preta.....	80
Figura 38: Correlação entre as imagens do microscópio óptico, o microscópio de varredura eletrônica e a tomografia industrial 3D de radiação gama (a) vesículas preenchidas totalmente e parcialmente ilustradas na imagem tomográfica; (b) vesículas preenchidas parcialmente nas imagens petrográfica e (c) no microscópio de varredura eletrônica (d) vesículas parcialmente preenchidas na imagem petrográfica e (e) no microscópio de varredura eletrônica.	81

1 INTRODUÇÃO

Rocha vulcânica é a designação dada em petrologia e geologia às rochas ígneas de origem vulcânica, que cuja gênese está relacionada ao arrefecimento do magma superficial. O magma superficial, também denominado lava, pode ser expelido através de um conduto central ou por fissuras (GILL *et al.*, 2010).

O interesse em relação às rochas ígneas é significativo por várias razões, incluindo a sua capacidade de armazenar hidrocarbonetos ou águas subterrâneas. A exploração de água subterrânea e hidrocarbonetos nas rochas ígneas tem sido secundarizada, principalmente devido à sua heterogeneidade comparada com as rochas sedimentares clásticas e carbonáticas (ROSSETI *et al.*, 2019).

No entanto, reservatórios significantes de água subterrânea e hidrocarbonetos têm sido associados à rochas ígneas de diferentes tipos de composição e estão distribuídos ao redor do mundo. Por essa razão, essas rochas deveriam ter uma relevância estratégica significativa em qualquer sistema de exploração levando em conta que a atividade ígnea pode produzir fontes distintas de hidrocarbonetos, maturação e migração, armadilhas e rochas reservatórios (BARRETO *et al.*, 2017).

Uma questão a ser respondida é se ocorre hidrocarbonetos em algumas rochas ígneas simplesmente por causa da migração após a intrusão. Partindo do pressuposto de que a geração de hidrocarbonetos não ocorra nas rochas cristalinas, os hidrocarbonetos encontrados nas rochas ígneas foram produzidos nas rochas sedimentares (SCHUTTER *et al.* 2003).

As rochas vulcânicas podem ser reservatórios de água e hidrocarbonetos de acordo com as seguintes condições: (1) os hidrocarbonetos das rochas sedimentares migram para as rochas ígneas mais porosas; (2) o resfriamento das rochas ígneas favorece a migração lateral ou vertical de hidrocarbonetos maturados das rochas sedimentares para as rochas ígneas bem fraturadas. A porosidade e permeabilidade das rochas ígneas se desenvolvem de maneiras diferentes: 1) processos primários da exsolução dos voláteis comumente associados com as rochas extrusivas; 2) processos secundários, particularmente de alteração hidrotermal; 3) fraturamento advindo do resfriamento ou do

intemperismo. Um importante aspecto de porosidade das rochas ígneas é perdido lentamente por meio da compactação, exceto nas tufas. Em alguns casos, o fluxo magmático nas partes mais profundas de uma bacia pode ser mais permeável do que nos sedimentos (BARRETO *et al.*, 2017).

A conectividade dos poros é uma medida da fração dos poros vazios (vesículas, vazios ou fraturas) em um material que é interconectado na escala de comprimento do sistema. Ela está fundamentalmente relacionada à permeabilidade, a qual tem controlado a degaseificação e o potencial explosivo do magma durante a sua ascensão até a parte mais rasa da crosta. (COLOMBIER *et al.*, 2017)

De qualquer forma, a evolução da permeabilidade está associada com a proporção da porosidade do sistema por leis constituintes das quais dependem a geometria dos espaços porosos. Métricas para a geometria do espaço incluindo o tamanho da sua abertura, a sua anisotropia e tortuosidade ou, o tamanho e a forma inicial das partículas, foram todos considerados úteis nos modelos de dimensionamento da permeabilidade com porosidade. (COLOMBIER *et al.*, 2017)

Técnicas analíticas comumente aplicadas para o estudo da microestrutura das rochas são restritas à duas dimensões por causa do microscópio óptico ou de escaneamento eletrônico. (BAKER *et al.*, 2012)

As pesquisas em laboratório têm contribuído para a correlação e caracterização dos litotipos e a sua capacidade em armazenar fluidos. Nos estudos relacionados à petrofísica, os dados quantitativos relacionados à porosidade são determinados tanto por métodos indiretos que utilizam injeção de gás ou mercúrio em picnômetro, quanto em lâminas petrográficas (BAKER *et al.*, 2012).

Neste trabalho, as amostras de rochas vulcânicas vesiculares foram caracterizadas com diversas técnicas analíticas e petrográficas convencionalmente utilizadas. Adicionalmente, as amostras foram caracterizadas utilizando a técnica de tomografia computadorizada de radiação gama e comparadas com as técnicas convencionais. A tomografia de radiação gama, é uma técnica não destrutiva que permite a análise de seções tomográficas, fornece dados quantitativos e qualitativos em relação à forma, tamanho, conectividade e distribuição dos poros em microescala. Além dos poros, é possível quantificar e

separar fases minerais com densidades distintas.’

2 OBJETIVO

O objetivo do presente trabalho é desenvolver uma metodologia para caracterizar as rochas vulcânicas vesiculadas, utilizando a técnica de tomografia computadorizada de terceira geração de radiação gama, integrada à petrografia e à microscopia de varredura eletrônica, com a finalidade de aumentar o conhecimento deste tipo de rocha e fornecer parâmetros petrofísicos, visando exploração de recursos minerais (água e hidrocarbonetos).

Para atingir esse objetivo as seguintes metas devem ser alcançadas, por meio dos parâmetros obtidos experimentalmente:

- A porosidade das rochas;
- A estrutura cristalina das rochas;
- A densidade dos minerais constituintes da rocha;
- O interconectividade e direção das vesículas da rocha;
- As propriedades mineralógicas das rochas;

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Rochas Ígneas

As rochas ígneas são aquelas cuja gênese está relacionada à fusão no interior da Terra. Dois termos são utilizados pelos petrólogos para se referir à rocha fundida. Magma é o termo mais geral, que descreve misturas de líquido e qualquer cristal que esse líquido contenha em suspensão (GILL *et al.*, 2010).

O líquido magmático, por outro lado, é apenas o material liquefeito, livre de qualquer material sólido que possa estar associado a ele de alguma forma ou em suspensão. Com frequência o termo “Magma” descreve o líquido magmático, os cristais e quaisquer bolhas de gás presentes nele. Uma vez que chega à superfície e perde parte de seus gases para a atmosfera, o líquido magmático passa a ser chamado de “lava” (GILL *et al.*, 2010).

3.1.1 Composição da rocha (ou do magma)

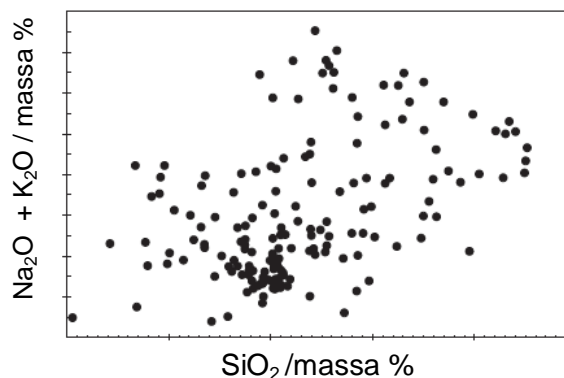
A composição global de uma rocha ígnea pode ser expressa de duas maneiras:

- uma lista de minerais presentes na rocha e visualizados ao microscópio e que pode incluir estimativa quantitativa ou qualitativa de suas proporções relativas;
- uma análise geoquímica quantitativa, que forneça os percentuais em massa de cada um dos principais constituintes químicos.

Conclui-se do exposto que uma análise petrográfica (da mineralogia) de uma rocha ígnea com base no mineral são fontes de informações que se complementam e que, isoladamente, não permitem a total compreensão da origem e da história dessa rocha (GILL *et al.*, 2010).

A Figura 1 ilustra um diagrama de variação, a representação gráfica das composições de diferentes rochas vulcânicas, originárias em uma variedade de ambientes geotectônicos, obtidas por análises geoquímicas. O eixo vertical é a soma dos teores de SiO_2 (também em % em massa) e cada ponto, ou par de coordenadas $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ e SiO_2 , indica o resultado da análise de uma rocha específica (GILL *et al.*, 2010). Esse gráfico específico é chamado de diagrama “álcalis totais vs sílica” (TAS, total- alkalis vs sílica).

Figura 1: Gráfico do teor de álcalis totais ($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$) relativo ao SiO_2 (ambos % em massa) para uma quantidade representativa de análises de rochas vulcânicas terrestres (representando composições de líquidos magmáticos ígneos).



Fonte: Rochas e Processos Ígneos (GILL *et al.*, 2010).

3.1.2 Os parâmetros utilizados para classificar as rochas ígneas

Os parâmetros utilizados para classificar rochas ígneas são baseados em:

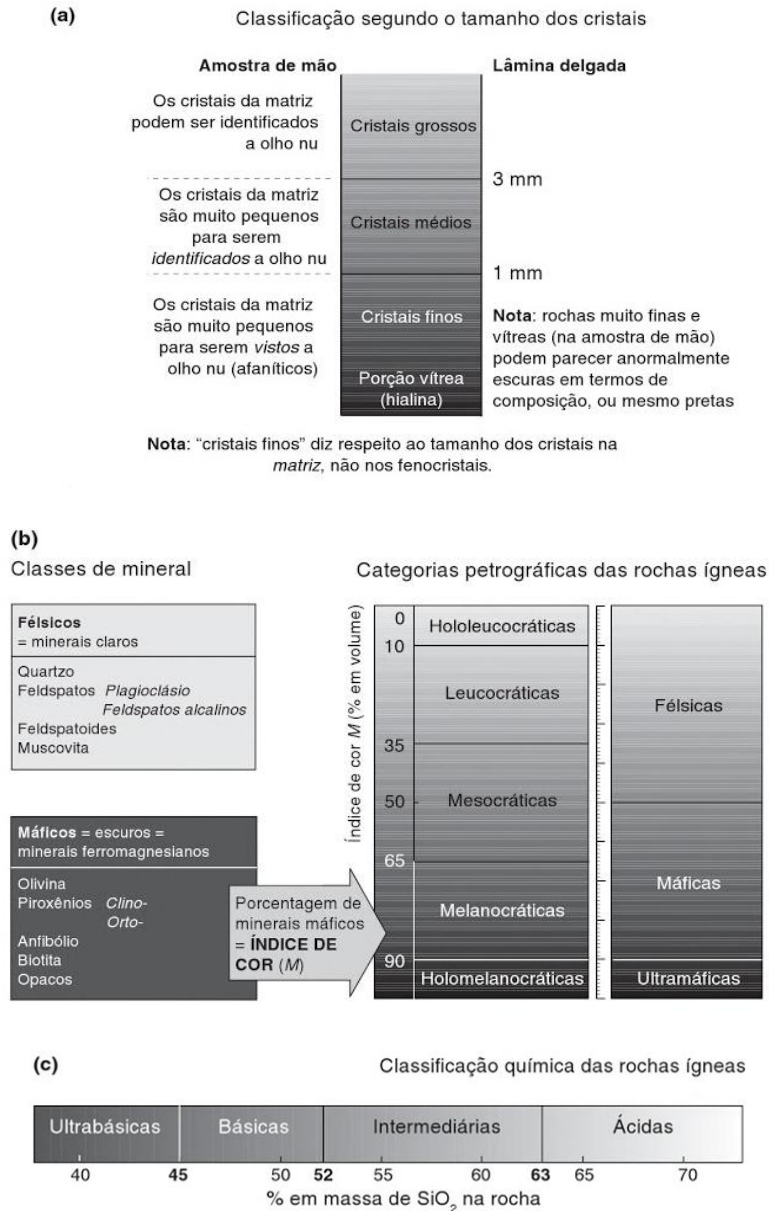
- critérios qualitativos – o tamanho do grão;
- na proporção de minerais – o índice de cor;
- na composição química – rochas ácidas e básicas.

A figura 2.a. apresenta a classificação das rochas ígneas baseando-se no tamanho do grão, como fina, média e grossa. Essa classificação é obtida com base em uma estimativa qualitativa (ou semiquantitativa) do tamanho médio de grão da matriz da rocha (não do tamanho dos fenocristais presentes) (GILL *et al.*, 2010).

Os adjetivos “leucocrático” e “ultramáfico”, muito utilizados nos estudos das rochas ígneas, dizem respeito às proporções relativas de minerais claros e escuros nelas. Os minerais claros são denominados minerais félsicos, ao passo que os escuros são chamados de máficos ou ferromagnesianos. A porcentagem de minerais escuros constituem o índice de cor da rocha. Os termos “claro” e “escuro” se referem à aparência dos minerais na amostra macroscópica, conforme o lado esquerdo da figura “2.b” (GILL *et al.*, 2010).

O primeiro sistema de classificação de rochas ígneas estudado é aquele que as divide em rochas ultrabásicas, básicas, intermediárias e ácidas. Essa classificação é baseada no teor de SiO₂ presente na rocha, como mostra a figura 2.c (GILL *et al.*, 2010).

Figura 2: Três maneiras simplificadas de classificação das rochas ígneas: (a) por tamanho do grão na matriz. O limite entre a granulação média e granulação grossa foi dado em 3 mm; outras convenções (por exemplo, Cox *et al.*, (1988)(6) utilizam o limite de 5 mm; (b) por proporções em volumes de minerais claros (félsicos) e escuros (máficos) observados ao microscópio; (c) por conteúdo de sílica (obtido por análise química).



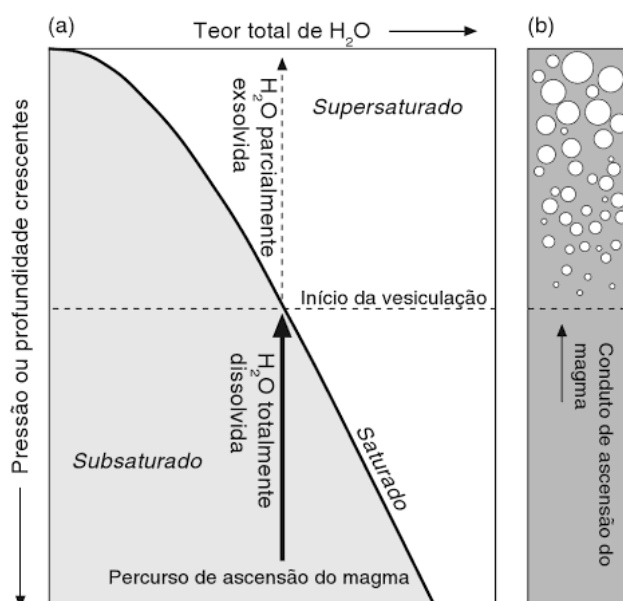
Fonte: Rochas e Processos Ígneos (GILL *et al.*, 2010).

3.1.3 A solubilidade dos voláteis e as vesículas

As vesículas são bolhas de gás formadas na lava liquefeita supersaturada em voláteis (sobretudo vapor d' água) após a ascensão à superfície. O líquido magmático ascende ao longo de um percurso de descompressão, representado pela seta contínua na Figura 3, até atingir uma profundidade em que se satura em água. Nesse ponto, ele apresenta o teor máximo de água dissolvida, no respectivo valor de pressão, e qualquer avanço na ascensão conduz o magma para o campo de supersaturação, em que o líquido magmático exsolva excesso de água por não conseguir retê-lo no líquido. Uma proporção do volume inicial permanece aprisionada no magma na forma de bolhas de vapor, mas um volume considerável de gás escapa para a atmosfera durante a erupção. As bolhas aumentam em número e de tamanho com o avanço da ascensão, como mostra a Figura 3 b. Quando a lava solidifica, essas bolhas são consideradas como vazios quase esféricos (GILL *et al.*, 2010).

Durante a formação das vesículas, o líquido magmático precisa expandir (quando os voláteis ocupam um volume maior na forma de bolhas, comparado ao volume ocupado quando dissolvidos no líquido magmático). No interior de um conduto cilíndrico hipotético de raio constante, essa expansão no conduto de um vulcão faz a lava jorrar quando atinge a superfície (GILL *et al.*, 2010).

Figura 3: (a) Solubilidade de um gás (neste caso, vapor de H₂O) no líquido magmático basáltico em função da pressão (isto é, profundidade). A forma da curva de solubilidade foi obtida por Dixon *et al.* (1995). (b) Grau de vesiculação como resultado da descompressão à medida que o líquido magmático ascende pelo conduto do vulcão em direção à superfície.



Fonte: Rochas e Processos Ígneos (GILL *et al.*, 2010).

3.1.4 Granulação das rochas ígneas

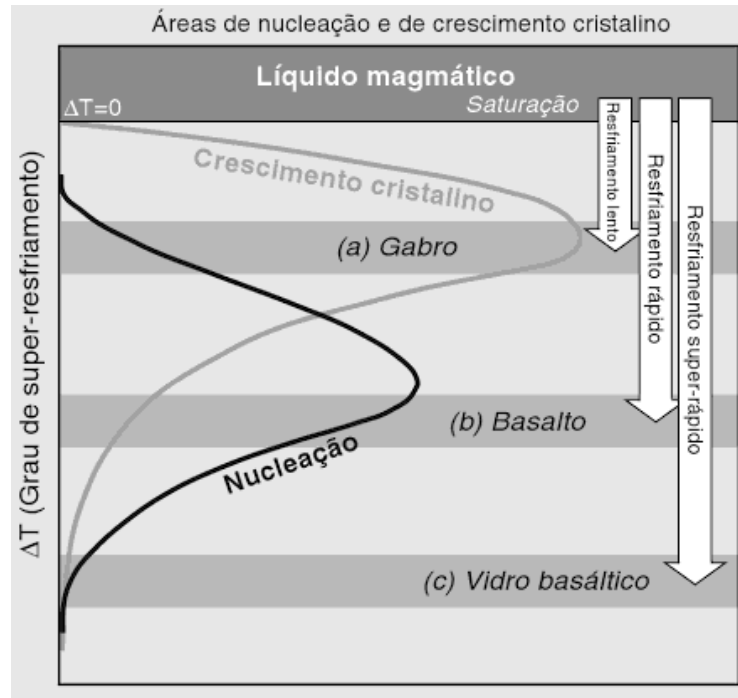
A velocidade de resfriamento de um magma é o fator determinante da probabilidade de ele formar uma rocha de granulação fina ou grossa ou um sólido. Comumente, é declarado que o resfriamento lento gera uma textura grossa, porque há tempo para a formação de cristais grandes, enquanto rochas de granulação fina se formam quando o resfriamento é rápido. A Figura 4 apresenta uma explicação mais plausível, que permite compreender as diferenças na granulação das rochas ígneas. A cristalização de um líquido magmático ocorre em dois estágios:

- A *nucleação*: é a formação inicial de cristais embrionários muito pequenos, que servem como base para a continuação do processo de crescimento do cristal.
- O *crescimento cristalino*: compreende a deposição de material cristalino adicional nos núcleos existentes:

A Figura 4 mostra três intervalos de super-resfriamento:

- O resfriamento lento gera um grau de super-resfriamento reduzido: a velocidade de crescimento cristalino (curva cinza) é alta nesse ponto, mas a criação de novos cristais é limitada pela velocidade de nucleação (zero ou muito baixa, curva preta). Nesse sentido, qualquer crescimento fica concentrado em alguns poucos cristais, o que gera a granulação grossa, característica do gabro;
- O resfriamento rápido gera um grau maior de super-resfriamento, o que aumenta a eficiência da nucleação (linha preta). No entanto, a velocidade de crescimento cristalino é muito menor (curva cinza). Logo, são formados por muitos cristais pequenos, conferindo ao material a textura e granulação fina, comum entre muitos basaltos;
- O resfriamento extremamente rápido acarreta um grau de super-resfriamento amplo o bastante para suprimir tanto a nucleação quanto o crescimento cristalino: não se formam cristais, e o estado desordenado do líquido magmático é “congelado” na forma de vidro (GILL *et al.*, 2010).

Figura 4: Diagrama mostrando as velocidades de nucleação e de crescimento cristalino como função do super-resfriamento abaixo da isoterma solidus. As três faixas arbitrárias de super-resfriamento (ou de velocidade de resfriamento) são ilustradas, gerando cristais de granulação grossa e fina e vidro livre de cristais.



Fonte: Rochas e Processos Ígneos (GILL *et al.*, 2010).

3.1.5 Tectônica Global e Magmatismo

Desde a década de 1960, os geólogos vêm tentando ajustar as teorias e os fatos relacionados à gênese das rochas ígneas ao arcabouço conceitual da teoria da tectônica de placas.

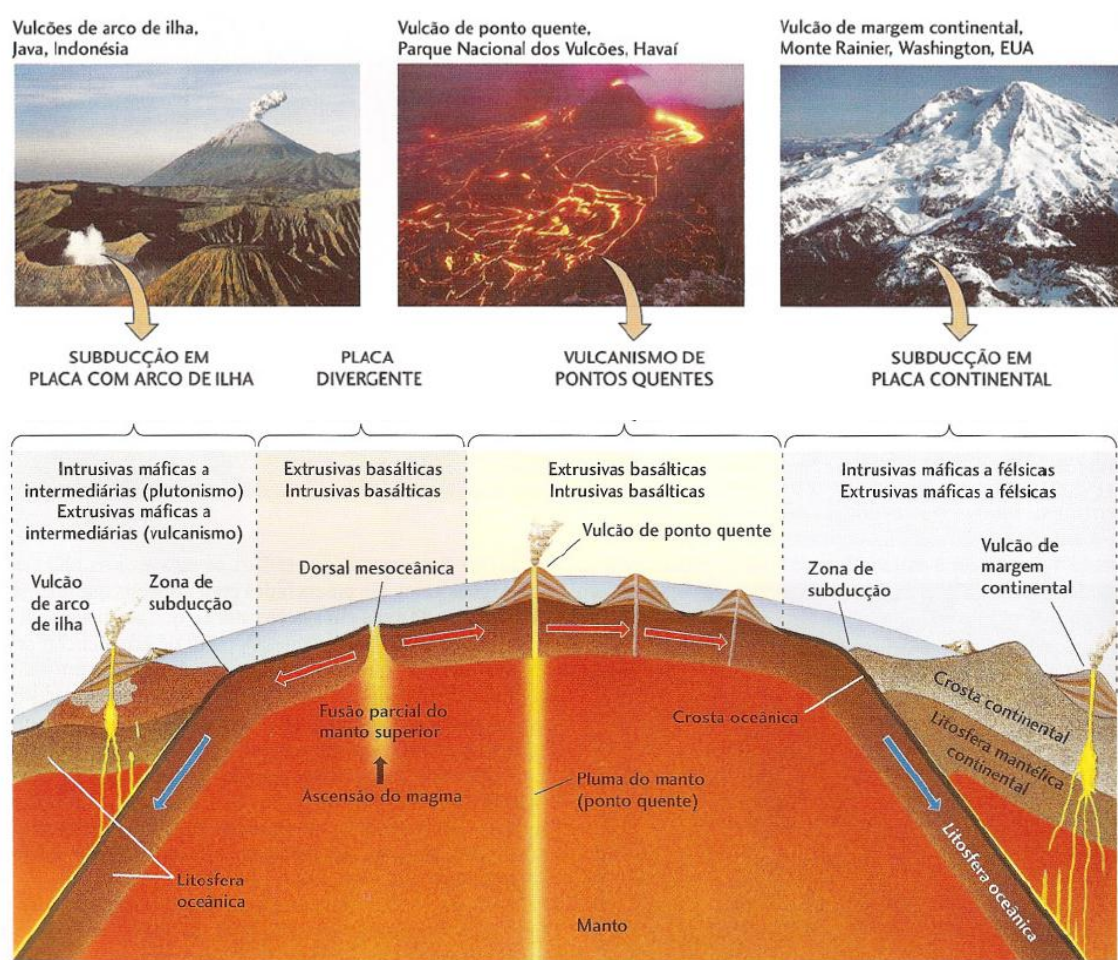
Por intermédio da Petrologia experimental é possível determinar as temperaturas e as pressões em que os diferentes litotipos fundem-se, possibilitando inferir os locais onde a fusão aconteceu. Logo, essa informação nos leva a esperar que as rochas sedimentares sofram fusão em profundidades mais baixas que aquelas em que o basalto se funde.

A geometria dos movimentos de placas é a chave de que se precisa correlacionar a composição das rochas aos processos de fusão. Dois tipos de

limites de placas estão associadas ao magmatismo: as zonas de subducção, onde uma placa mergulha sob a outra, e as dorsais mesoceânicas, onde o movimento divergente de duas placas causa expansão do assoalho oceânico.

O magma espalha-se sob a forma de lavas, que são fornecidas por câmaras magmáticas situadas abaixo do eixo da dorsal. Concomitante à intrusão gabroica em profundidade, conforme a Figura 5. (Frank Press, *et al.*, 2006)

Figura 5: O magma forma-se em condições estreitamente conectadas com os movimentos das placas litosféricas



Fonte: Para Entender a Terra (Frank Press, *et al.*, 2006).

3.1.6 Derrames de Lavas

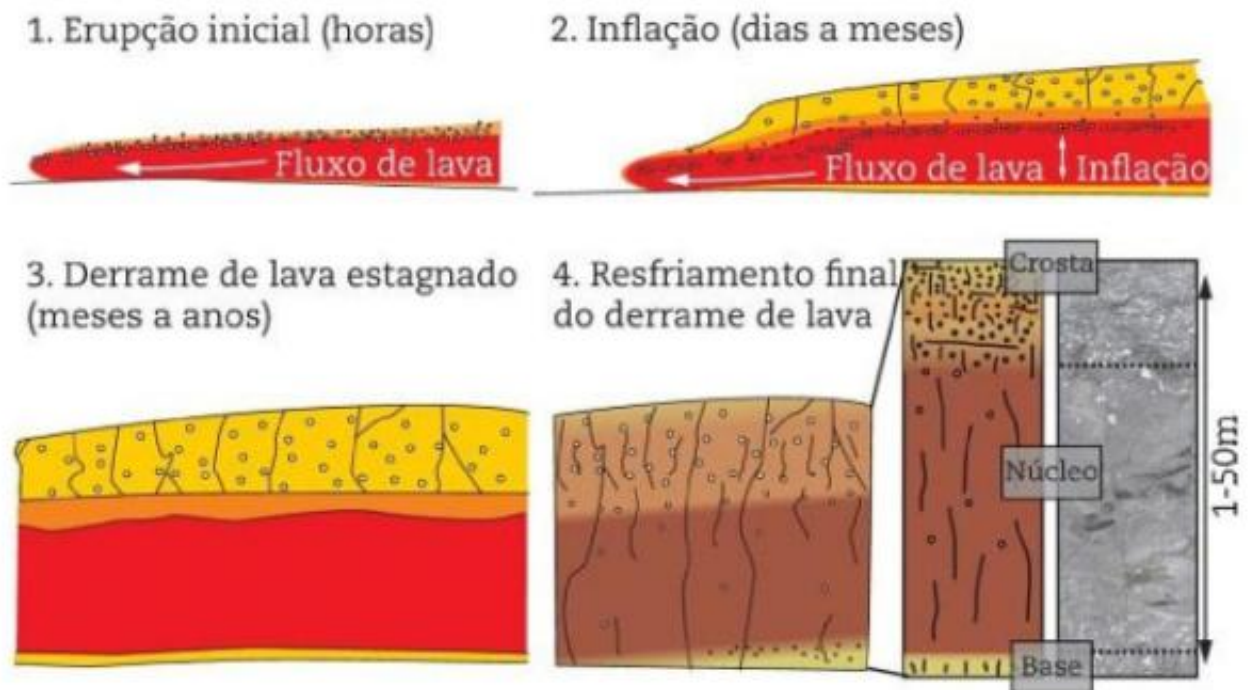
O tipo de lava mais comum na superfície terrestre, de longe, são os basaltos. A composição do basalto, com um conteúdo de sílica relativamente baixo (45-55% SiO₂), faz com que ele tenha uma viscosidade baixa, tendo características de uma lava que corre com uma certa facilidade. Logo, quando a viscosidade diminui é porque o teor de sílica também diminui. O derrama *pahoehoe* é o tipo de derrame mais comum observado em terra, sendo responsável pela formação de corpos tabulares ou vários lobos com estruturas em corda na superfície. Esse tipo de derrame se forma pelo processo de inflação. Quando a crosta e lisa da superfície do derrame é enrugada pela lava quente que flui abaixo dela, as estruturas em corda se formam.

Outro tipo de lava são os derrames *a'a* (termo havaiano que significa lava irregular ou rugosa), cuja superfície é formada por fragmentos afiados de lava e blocos irregulares. Os fragmentos são formados pela porção superior do derrame que foi quebrada, formados por peças de lava quebradas e pontiagudas que lembram uma pilha de material de resíduo em fundição.

Diferentes das erupções básicas mais comuns, os derrames ácidos possuem um alto teor de sílica, é mais viscoso e são caracterizados por erupções explosivas. Esse derrames raramente por grandes distâncias da área de descarga e tendem a possuir uma alta relação entre espessura e comprimento. A lateral desses derrames são íngremes e podem formar diques laterais e as suas frentes podem ter dezenas a centenas de metros de alturas.

As estruturas internas dos derrames podem ser divididas em dois grandes grupos: estruturas de grande escala, relacionadas com a estrutura geral do derrame, e texturas que são feições de pequena escala. As estruturas de grande escala exibidas pelo derrame são geralmente ligadas ao padrão das disjunções geradas por seu resfriamento e também pela distribuição das vesículas. Os núcleos e as crostas diferem no geral de um grau de fraturamento e na quantidade de vesículas na estrutura de um derrame geral de uma basalto inflado na Figura 6.

Figura 6: Colocação de um derrame de lava por inflação. O derrame final tem uma estruturação interna com um núcleo maciço e uma crosta fraturada e rica em vesículas (bolhas preservadas).



Fonte: Introdução à Vulcanologia (Jerram *et al.*, 2011).

3.2. Sistema Petrolífero

A migração dos hidrocarbonetos pode ter ocorrido ao longo dos planos de falhas ou diques de diabásio, ou por movimentos de fluidos em camadas permeáveis, planos de acamamento e superfícies de discordância.

O vulcanismo pode afetar todos os aspectos de um sistema petrolífero, acelerando a maturação do fluido, facilitando a migração do fluido, criando armadilhas, selos, reservatórios e fontes distintas de hidrocarbonetos (FAROOQUI *et al.*, 2009)

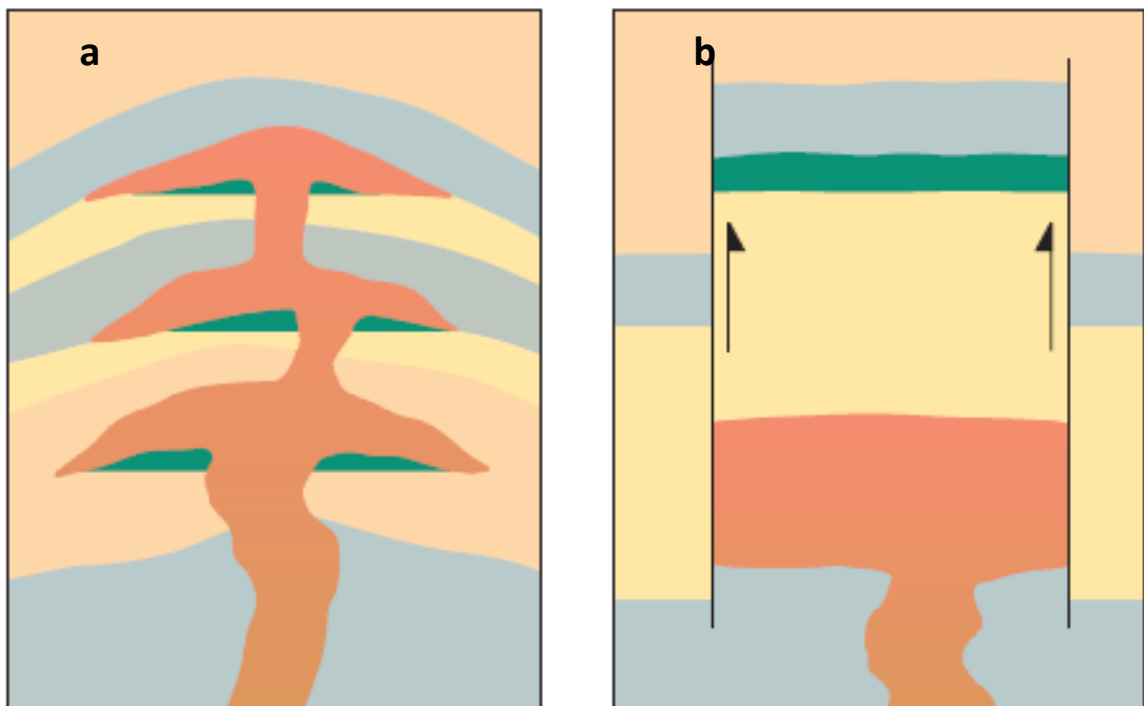
Apesar da maioria das reservas de hidrocarbonetos encontradas nas rochas vulcânicas ter como gênese as rochas sedimentares, algumas rochas vulcânicas também podem servir como rocha fonte: vegetação misturada com fluxo de cinzas e vulcanismo subaéreo que pode criar lagos e pântanos com

sedimentos ricos em querogênio (FAROOQUI *et al.*, 2009).

A maturação adiciona calor aos corpos ígneos e pode acelerar a maturação dos hidrocarbonetos. A circulação de fluidos hidrotermais também pode afetar a maturação (FAROOQUI *et al.*, 2009).

As armadilhas são intrusões ígneas encaixadas dentro das rochas sedimentares, chamada de rocha encaixante, frequentemente resultam em estruturas fechadas dentro das formações intrudidas, conforme a Figura 7 (FAROOQUI *et al.*, 2009).

Figura 7: (a) Um lacólito em forma de árvore da Natal foi responsável pela formação da trapa estrutural intrudindo arenitos e calcáreos, localizadas no campo de Omaha Dome, em Llinois. (b) Lacólitos perfuradores elevam camadas sobrepostas, localizadas ao longo dos planos de falhas geológicas, podendo formar trapas estruturais.



Fonte: (FAROOQUI *et al.*, 2009).

3.2.1 Migração

Há várias maneiras dos hidrocarbonetos migrarem e preencherem os interstícios das rochas vulcânicas:

- A compactação das rochas sedimentares podem forçar os hidrocarbonetos para dentro das rochas vulcânicas;

- Hidrocarbonetos podem passar verticalmente ou lateralmente às rochas sedimentares para dentro das rochas vulcânicas estruturalmente mais altas.
- Se a pressão de vapor torna-se baixa o bastante durante o resfriamento, os hidrocarbonetos podem preencher os espaços dentro dos poros;
- Os fluidos hidrotermais são capazes de dissolverem os hidrocarbonetos e depositá-los nas rochas ígneas;

As rochas ígneas possuem outras características similares às das rochas sedimentares, elas podem ter porosidade primária e, às vezes, desenvolver porosidade secundária (FAROOQUI *et al.*, 2009).

A porosidade primária pode ser intergranular – um tipo de porosidade resultante da presença das vesículas ou bolhas de gás, nas rochas ígneas. A porosidade nos basaltos pode chegar num valor de até 50% (FAROOQUI *et al.*, 2009).

A porosidade secundária pode resultar dos processos de: alteração hidrotermal, fraturamento e o estágio final de metamorfismo (FAROOQUI *et al.*, 2009).

3.2.2 Fatores que controlam fraturas em reservatórios ígneos

Desde que o “reservatório ígneo” da Bacia de São Joaquim, localizado no centro-oeste da Califórnia, foi encontrado em 1887, mais de 336 reservatórios ígneos ou hidrocarbonetos foram descobertos em cerca de 100 estados nos últimos 120 anos de exploração. No entanto, a exploração atual de óleo e gás que provém das rochas ígneas corresponde a somente 1% do total no mundo, logo, eles têm um excelente potencial para futuras explorações. Com o desenvolvimento da exploração de óleo e gás, as pesquisas relacionadas aos reservatórios ígneos vêm recebendo notoriedade (JINGHONG *et al.*, 2011).

A produção de gás e óleo nos reservatórios ígneos são geralmente baixas, no entanto, poços com alta produção tem sido encontrados ocasionalmente. Por exemplo, a produção de petróleo chegou a 45,18 t/d, e a produção de gás $43,6 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ no poço DXHW181 do campo de gás Carat-Meili na bacia de Junggar, na China. Reservatórios ígneos são caracterizados pela complexa heterogeneidade, mas os fatores de controle que regem a sua alta produtividade,

ainda não são claros. Os processos de formação e os fatores que condicionam a distribuição para os reservatórios ígneos de alta qualidade variam, consideravelmente, em diferentes bacias ou regiões. Embora os predecessores tenham estudado os fatores de controle de reservatórios ígneos a partir dos aspectos de litofácies, litologias, porosidade secundária e fraturas primárias, com ênfase na acumulação de hidrocarbonetos, poucos estudos foram feitos sobre os tipos de fraturas e os fatores que as controlam (JUNGHONG *et al.*, 2011).

Com base nas mais recentes realizações de exploração e pesquisa, Junghong estudou os fatores de controle para as fraturas nas rochas ígneas carboníferas do norte de Xinjiang e suas influências em reservatórios de alta qualidade e alta produção de petróleo e gás (JUNGHONG *et al.*, 2011).

3.2.3 Viabilidade dos Reservatórios Ígneos

A exploração das rochas ígneas tem sido secundarizadas por outras razões:

- Elas tendem a ser extremamente duras, embora o aprimoramento tecnológico estejam facilitando a perfuração dessas rochas;
- Em função delas atenuarem uma boa parte da energia sísmica, as camadas ígneas são consideradas um obstáculo para avaliar as camadas ígneas subjacentes;
- Os novos métodos sísmicos estão avançando na solução desses problemas, mas com alto índice de refração, os reservatórios ígneos são mais difíceis de caracterizar.

Dois campos são destacados na avaliação da formação das rochas vulcânicas:

- Um caso de estudo de um reservatório rico em gás, na China utiliza uma técnica que combina *logging measurements* e imagens log com espectroscopia de captura de nêutrons;
- A Índia mostra a relevância de incorporar imagens de resistividade em poços para avaliação do “escoamento” de óleo nas rochas vulcânicas (FAROOQUI *et al.*, 2009).

O primeiro reservatório ígneo foi descoberto e registrado no campo de Hara no Japão, que começou a produzir em 1900. A produção ocorria em 3 camadas de Tufas (FAROOQUI *et al.*, 2009)

Outra produção de óleo antiga foi registrada no Texas, em 1915, ao longo de uma sequência de vulcões submarinos que entrou erupção durante a deposição do Austin Chalk. As formações vulcânicas produziram 54 milhões barris de óleo [8,6 milhões m³] nos anos 90, em mais de 200 corpos ígneos (FAROOQUI *et al.*, 2009).

Hidrocarbonetos em rochas ígneas podem ser um critério de exploração valioso para uma bacia em geral. Várias regiões produtoras importantes foram perfuradas inicialmente devido ao vazamento de hidrocarbonetos ao longo de rochas ígneas, incluindo o México e a Bacia de Maracaibo da Venezuela. Muitas áreas que produzem hidrocarbonetos comerciais, como Sibéria, Califórnia, Texas e até Illinois, possuem rochas ígneas com hidrocarbonetos associados. Isso pode ser um indicador positivo para áreas como a bacia de Columbia de Washington e Oregon e as bacias do Triássico do leste da América do Norte (SCHUTTER, 2003).

3.3 Histórico De Exploração do Petróleo no Brasil.

O Decreto nº 3.352 – A, de 30 de novembro de 1864, no qual, concedeu ao inglês “Thomas Denuy Sargent noventa anos, por meio de uma Companhia ou por si, para extrair turfa, petróleo e outros minerais nas Comarcas do Camanú e Ilhéos, da Província da Bahia”. Os artigos do decreto fazem ainda referência direta ao tratamento do petróleo e/ou turfa, impedindo de executar a extração sem instruções e cuidados de ordem sanitária, com o objetivo de prevenir ou remediar qualquer dano causado à salubridade das regiões próximas à exploração (PEYERL, 2017).

Um segundo decreto referente à exploração de petróleo no Brasil, foi publicado em 1872. Trata-se dos usos de técnicas geográficas e geológicas em buscas de resultados concretos, com a apresentação de mapas geológicos dos terrenos explorados pelo concessionário (PEYERL, 2017).

O Decreto nº 8.840, de 5 de janeiro de 1883, sugere que outros avanços técnicos, como a utilização de sondagens, que na ocasião exigiam a autorização prévia dos proprietários da terra explorada (PEYERL, 2017).

Tais decretos, concedidos durante o Segundo Reinado (1840 – 1889), são iniciativas de exploração geral de recursos minerais, dentre os quais o petróleo (PEYERL, 2017).

A partir do final do século XIX, várias instituições públicas envolvidas na exploração de petróleo foram fundadas pelo Estado brasileiro: a Comissão Geográfica e Geológica de São Paulo (CGG, 1886), o Levantamento Geológico e Mineralógico do Brasil (SGMB, 1907), o Conselho Nacional do Petróleo (CNP, 1938), e a estatal petrolífera Petrobras (1953) (PEYERL; DE MENDONÇA FIGUEIRÔA, 2020).

Apesar dos historiadores econômicos comumente caracterizarem a industrialização no Brasil como um processo retardatário iniciado após a Primeira Guerra Mundial, tais estudiosos afirmam que setores como o do petróleo alcançaram níveis competitivos internacionalmente incontestáveis. Seguindo do avanço tecnológico do mapeamento geológico, o texto contextualiza e interroga os caminhos percorridos pela indústria do petróleo brasileira desde seus primeiros estágios (PEYERL; DE MENDONÇA FIGUEIRÔA, 2020).

Até a década de 1920, os dados geológicos forneciam as principais características das dobras anticlinais e domos de sal a serem estudados quanto ao seu potencial exploratório na busca por reservas petrolíferas (PEYERL; DE MENDONÇA FIGUEIRÔA, 2020).

Quando as pesquisas de petróleo se voltaram à estudar as características além da superfície para determinar o melhor local para perfurar, recorreram à geofísica (PEYERL; DE MENDONÇA FIGUEIRÔA, 2020).

Histórias de tecnologia de petróleo centradas na inovação destacam "quatro técnicas, em particular, revolucionaram a exploração para localizar campos de petróleo (PEYERL; DE MENDONÇA FIGUEIRÔA, 2020).

- A primeira técnica era o magnetômetro, que empregava o magnetômetro, inventado por engenheiros suecos em 1870;
- A segunda, a detecção de variações gravitacionais na superfície, usando uma variante da balança de torção inventada no século XVIII;

- A terceira técnica, criada em 1912, usava medições da resistividade elétrica da superfície da terra;

- A quarta técnica, exploração sísmica, aplicada para registrar tremores de terremotos desde 1885, quando "o primeiro dispositivo moderno para detectar o movimento da Terra foi construído".

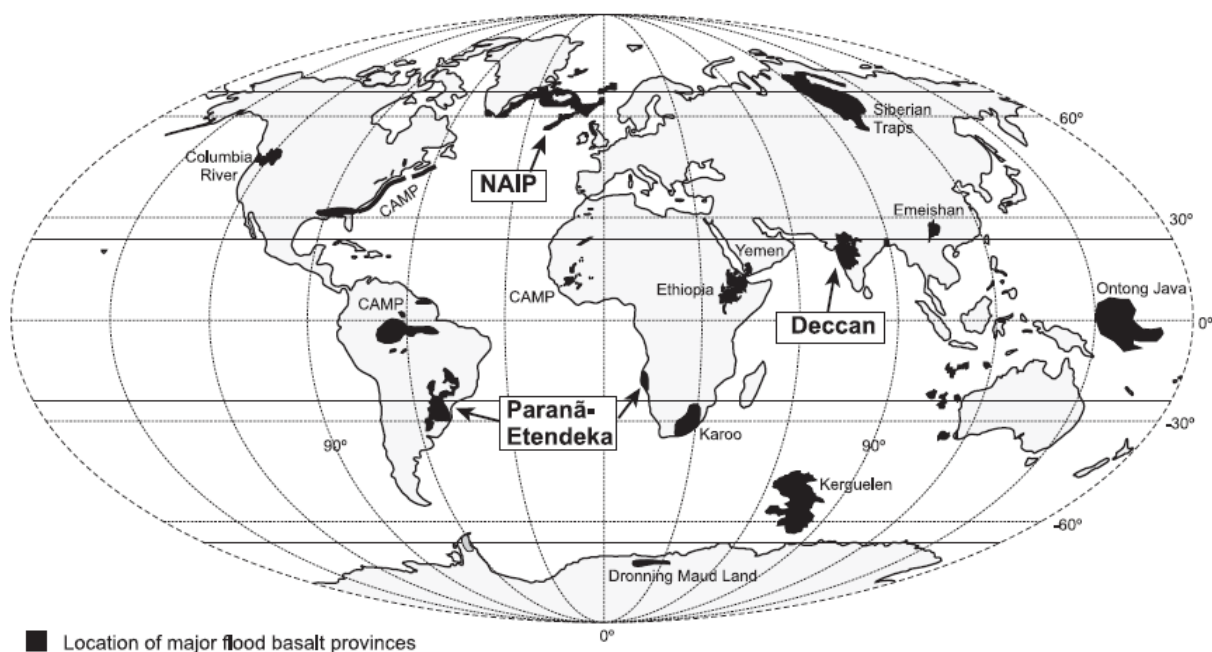
Juntos, eles assinalaram o início da exploração geofísica (PEYERL; DE MENDONÇA FIGUEIRÔA, 2020).

3.4 A anatomia da Província Basáltica Continental

As Províncias Continentais de Derrames Basálticos (CFBPs) estão comumente associadas à anomalias térmicas localizadas no manto superior que possuem um período de duração prolongado, sendo capazes de produzir altas taxas de fusão (JERRAM; WIDDOWSON, 2005).

As observações apresentadas na Figura 8, são baseadas em dados vulcanológicos, estratigráficos e geoquímicos detalhados e analisados principalmente nas províncias ígneas do Paraná – Etendeka, Deccan e do Atlântico Norte (NAIP) e, em menor extensão, em outras CFBPs, incluindo a Província de Basalto do Rio Columbia (CRBP) e a Província Etiópia - Iêmen (JERRAM; WIDDOWSON, 2005).

Figura 8: Localização das maiores províncias basálticas



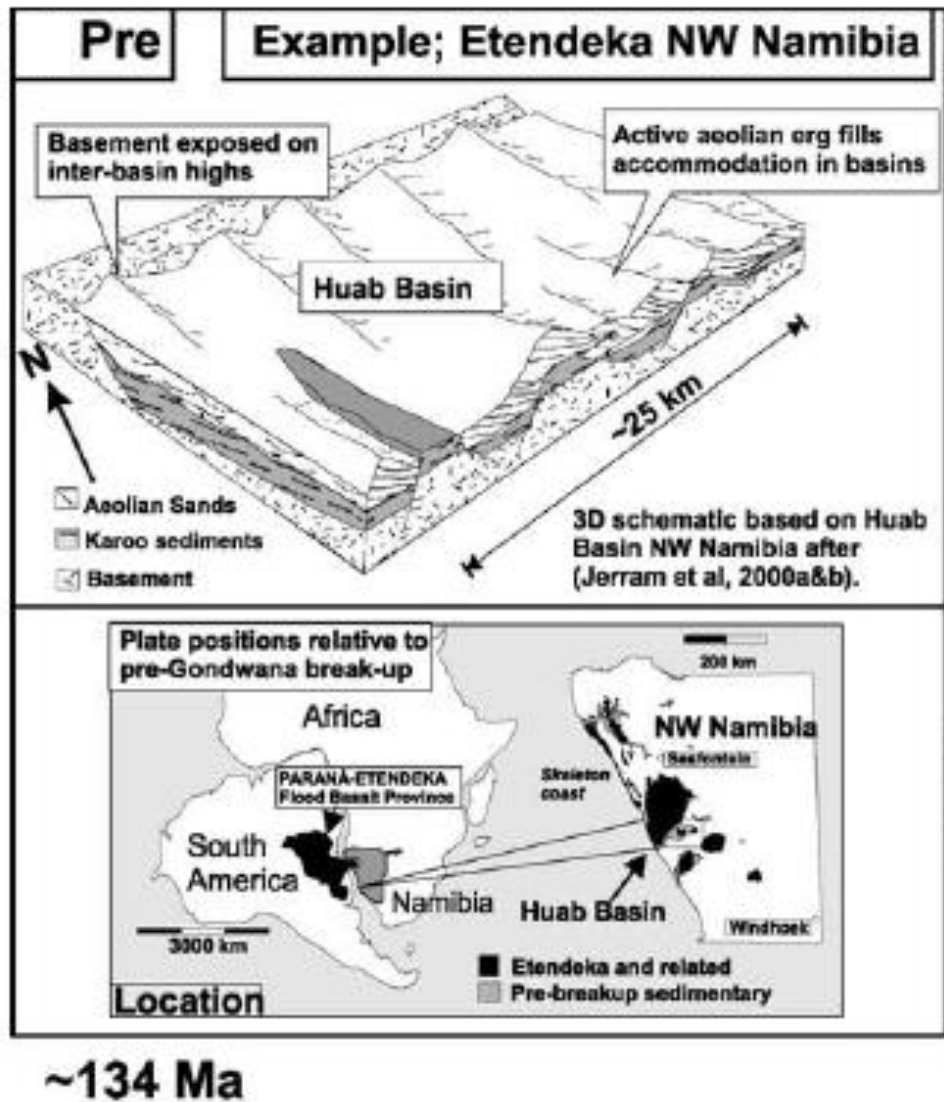
Fonte: (JERRAM; WIDDOWSON, 2005).

As Figuras 8,9 e 10 são um resumo evolutivo do diagrama do painel para o lado Etendeka da Bacia do Paraná - Etendeka CFBP - e destaca o paleoambiente diretamente antes da erupção, durante o início da vulcanismo de inundação, e durante a fase principal do derrame vulcânico (JERRAM; WIDDOWSON, 2005).

Os estratos sedimentares foram de suma importância na preservação local das texturas *pahoehoe* associadas às primeiras fusões, especificando o seu modo de erupção (JERRAM; WIDDOWSON, 2005).

A topografia do ambiente de dunas (fig. 9) preservou muitos fluxos iniciais, levando a unidades ponderadas de ~ 100 m de espessura máxima na base do Paraná – Etendeka. Na parte norte e sul da Bacia de Huab, as lavas irromperam o Supergrupo Karoo ou rochas do porão, sugerindo hipoteticamente uma paisagem pré-vulcânica, formada por fendas preenchidas com sedimentos flanqueados pelas alturas do *horst* e do porão (JERRAM; WIDDOWSON, 2005).

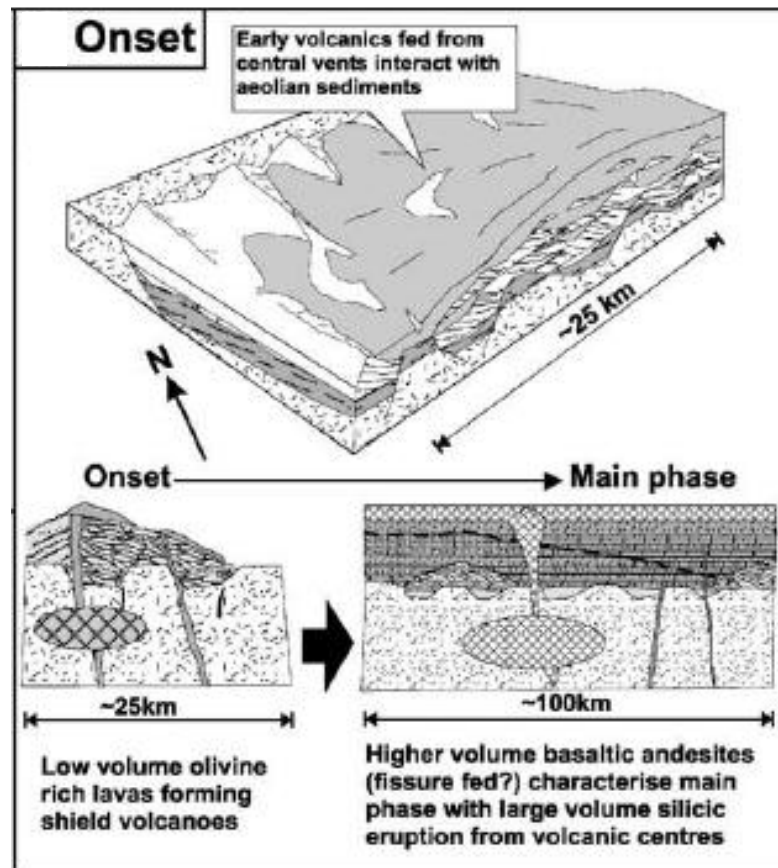
Figura 9: Painel evolucionário do pré-rifte.



Fonte: (JERRAM; WIDDOWSON, 2005).

Essas primeiras características do escudo foram posteriormente cobertas por derrames de composição andesíticas mais volumosos (Figura 10), conhecidos como Tipo Tafelberg no Etendeka, durante o início da fase principal do episódio vulcânico (JERRAM; WIDDOWSON, 2005).

Figura 10: Painel evolucionário da fase onset

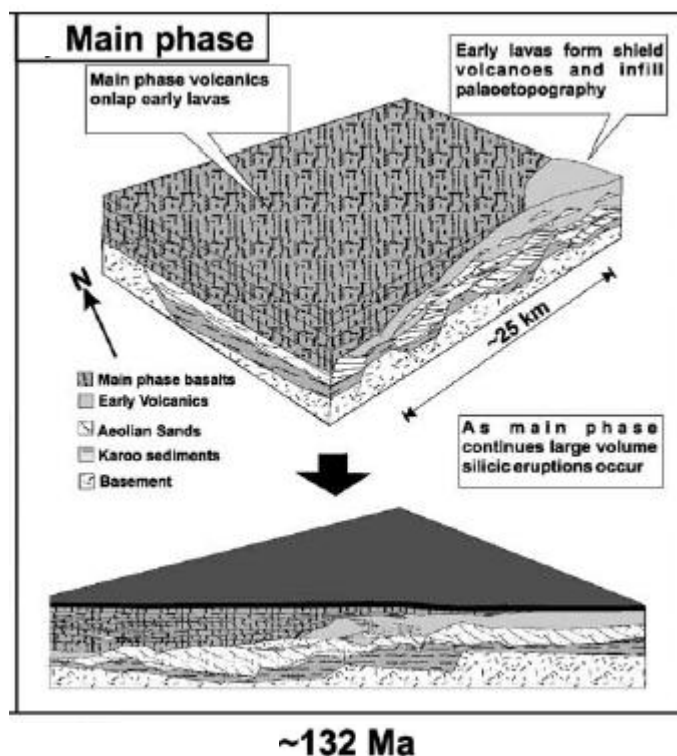


~133 Ma

Fonte: JERRAM; WIDDOWSON, 2005.

Esses fluxos formaram fácies de fluxo tabular mais típicas ou “clássicas” (Jerram, 2002), com topos em *rubbly*. Estes últimos têm núcleos de fluxo maciço atingindo espessuras de 50 m e são mais semelhantes à lava *aa*. À medida que a pilha vulcânica se acumulou, um alto volume de material silícico marcou o desenvolvimento de grandes câmaras de nível raso (por exemplo, o complexo ígneo Messum), que irrompeu de rochas ígneas silícicas com volumes individuais de até 6.340 km³ (Figura 11). É importante notar que essas unidades são maiores do que os fluxos máficos individuais registrados (por exemplo, Roza member, 1300 km³ (JERRAM; WIDDOWSON, 2005).

Figura 11: Principal fase de desenvolvimento da Província Parana-Entedeka



Fonte: JERRAM; WIDDOWSON, 2005.

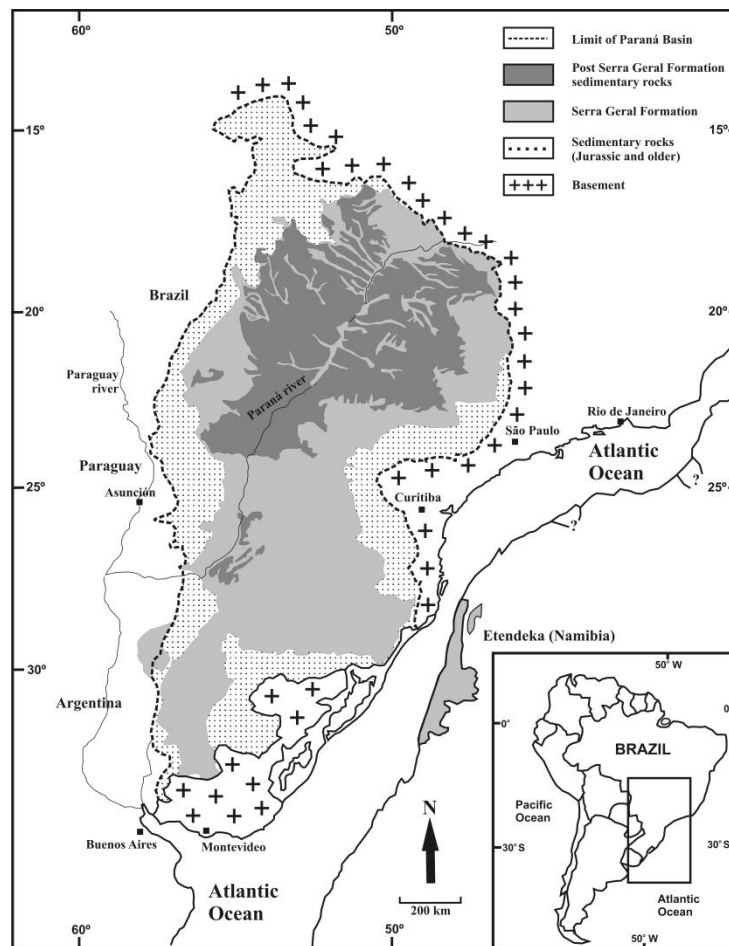
A fase principal do vulcanismo no Paraná– Etendeka também foi associada à mudanças climáticas registradas por excursões de isótopos de carbono, e é possível que essas grandes erupções individuais desempenhem um papel significativo no potencial climático resultante dos efeitos do vulcanismo de inundação (JERRAM; WIDDOWSON, 2005).

3.5 Evolução Tectonoestratigráfica da Bacia do Paraná

A origem da CFBP Paraná-Entedeka está relacionada à abertura do oceano Atlântico Sul, mas os modelos conhecidos de vulcanismo ainda são controversos, como em outras CFBP (Self *et al.*, 1996; Bondre *et al.*, 2004). Segundo alguns autores, o mecanismo e a fonte de calor provêm do *hotspot* Tristão da Cunha (e.g. Hill, 1991; Hawkesworth *et al.*, 1992; Wilson, 1993), mas outras contribuições como as refusões da pluma mantélica também influenciaram o evento vulcânico (FRANK; GOMES; FORMOSO, 2009).

A maior parte da CFPB do Paraná-Etendeka está localizada na Bacia do Paraná (Brasil, Argentina, Uruguai e Paraguai), uma bacia intracratônica de 1.500.000 km², desenvolvida entre o Ordoviciano e o Cretáceo (Zalán *et al.*, 1987), conforme a Figura 12 (FRANK; GOMES; FORMOSO, 2009).

Figura 12: Contorno da distribuição das rochas da Formação Serra Geral na Bacia do Paraná justaposta à Namíbia, parte análoga da bacia localizada no continente africano em Namíbia.



Fonte: (FRANK; GOMES; FORMOSO, 2009)

A sequência vulcano-sedimentar tem 7,5 km de espessura e é composta de seis supersequências: Rio Ivaí, Paraná. Gondwanal, II e III e Baurú (Milani, 1997). A porção africana da província está localizada em Namíbia e em Angola. As rochas vulcânicas compõem a Formação Serra Geral no Brasil e Argentina, Formações Arapey (vazões) e Cuaró (soleiras) no Uruguai e Formação Alto Paraná no Paraguai (FRANK; GOMES; FORMOSO, 2009).

O registro completo da Superseqüência Rio Ivaí inclui conglomerados e arenitos na base (Formação Alto Garças), diamictitos (Formação Iapó) e folhelhos fossilíferos e siltitos (Formação Vila Maria), compreendendo o intervalo temporal Caradociano-Landoveriano. Os folhelhos documentam condições paleoambientais relacionadas à máxima inundação do ciclo ordovício-siluriano. A associação dos sedimentitos Rio Ivaí com rochas ígneas (basalto Três Lagoas) sugere uma tectônica sinsedimentar, provavelmente algum mecanismo de rifteamento que estaria então ligado à implantação da Bacia do Paraná. O topo da Superseqüência Rio Ivaí é definido por uma superfície de discordância que erodiu profundamente o pacote ordovício-siluriano e estabeleceu um vasto e regular peneplano (MILANI; RAMOS, 1998).

De fato, o limite Devoniano-Carbonífero constitui um marco fundamental na geologia do Gondwana, representado na Bacia do Paraná por uma lacuna que abarca cerca de 55 Ma conhecida como "discordância pré-Itararé" ou "discordância infra-Pensilvaniano. A mesma superfície de discordância apresenta grande angularidade naquelas porções da margem do Gondwana diretamente afetadas pela Orogenia Chánica, tais como as bacias do oeste argentino e a bacia de Sauce Grande. Fatores climáticos, entretanto, contribuíram certamente ao aparecimento da ampla lacuna de 55 Ma. A presença e movimentações de geleiras relacionadas à grande glaciação gondwânica, cujo clímax deu-se durante o Mississipiano, forneceram importantes mecanismos de erosão e constituíram-se em obstáculos efetivos ao transporte e à acumulação sedimentar (MILANI; RAMOS, 1998).

A Superseqüência Gondwana I sucedeu ao ápice das condições glaciais. A sedimentação foi retomada com o degelo que resultou num intenso afluxo sedimentar, proveniente das áreas agora expostas. O degelo patrocinou mecanismos de transporte e deposição em que fluxos de massa e ressedimentação foram muito importantes, retrabalhando fortemente o substrato e definindo um estilo muito particular para a seção westfaliana-sakmariana da Bacia do Paraná. O pacote diretamente ligado à fase de degelo da calota gondwânica, com 1.500 metros de espessura máxima e conhecido como Grupo Itararé (Formação Aquidauana na porção norte da bacia) é constituído predominantemente

por diamictitos intercalados a arenitos, com elementos tanto glacioterrestres quanto glaciomarinhos (MILANI; RAMOS, 1998).

Diamictitos intercalados a arenitos constituem predominantemente o pacote diretamente ligado à fase degelo da calota gondwânica, com 1.500 metros de espessura máxima e conhecido como Grupo Itararé (Formação Aquidauana na porção norte da bacia) (MILANI; RAMOS, 1998).

O pacote glaciogênico apoia-se em *onlap* de norte para sul sobre a discordância infra-Pensilvaniano, estendendo-se sobre áreas progressivamente mais amplas. No Eopermiano, a sedimentação alcança a porção meridional da bacia, até então exposta à erosão (MILANI; RAMOS, 1998).

Uma importante fase de rearranjo da geometria da bacia viria a seguir. O sentido regional de *onlap* das unidades sedimentares, um indicativo seguro de paleogradientes da bacia de sedimentação, foi subitamente invertido; o padrão de norte para sul, dominante durante toda a sedimentação Itararé, é sucedido por uma distribuição em *onlap* de sul para norte quando da acumulação do Grupo Guatá e equivalentes (MILANI; RAMOS, 1998).

Na Formação Palermo, ao início do Neopermiano estão sendo documentados condições de máximo paleobatimétrico para a Superseqüência Gondwana I. O sentido regional de *onlap* das unidades sedimentares foi subitamente invertido; o padrão de norte para sul, é sucedido por uma distribuição em *onlap* de sul para norte devido à acumulação do Grupo Itararé e equivalentes (MILANI; RAMOS, 1998).

Acima, uma possante seção regressiva com até 1.400 metros de espessura (Grupo Passa Dois) foi acomodada por um ciclo de subsidência renovada do embasamento, culminando nos depósitos eólicos eotriássicos (Formações Sanga do Cabral e Pirambóia). (MILANI; RAMOS, 1998).

Na seqüência sobrejacente, foi acomodada por um ciclo de subsidência renovada do embasamento uma possante seção regressiva com até 1.400 metros de espessura (Grupo Passa Dois).

Acompanhando a deformação da margem gondwânica, do Meso a Neopermiano, teve lugar uma progressiva e irreversível continentalização dos sistemas deposicionais na Bacia do Paraná, registrada na porção terminal da Superseqüência Gondwana I (Formação Rio do Rasto) (MILANI; RAMOS, 1998).

A porção terminal da Supersequência Gondwana I (Formação Rio do Rastro) registra uma progressiva e irreversível continentalização dos sistemas deposicionais na Bacia do Paraná, sendo posterior à deformação da margem gondwânica do Meso ao Neopermiano (MILANI; RAMOS, 1998).

Desertos arenosos cobriram completamente a bacia e regiões vizinhas durante o Neojurássico (Formação Botucatu), seguidos pelas lavas eocretáceas da Formação Serra Geral (MILANI; RAMOS, 1998).

Durante o Neojurássico, desertos arenosos da Formação Botucatu seguidos pelas lavas da Formação Serra Geral cobriram completamente a bacia e as regiões vizinhas (MILANI; RAMOS, 1998).

Em dados de subsuperfície, observa-se que a seção correspondente à pelíticos sobrepõem-se abruptamente aos arenosos da unidade anterior. Este contato abrupto, na realidade refletindo uma rápida “transgressão lacustre” sobre a superfície de discordância que marca o topo da Supersequência Gondwana I, poderia ser indicativo de um episódio de afundamento acelerado do substrato e desenvolvimento de uma bacia faminta (MILANI *et al.*, 2007).

A seção correspondente à Supersequência Gondwana II exhibe um contato basal nítido, depósitos arenosos da unidade anterior são subjacentes aos depósitos pelíticos. Este contato abrupto poderia ser indicativo de um episódio de afundamento do substrato e desenvolvimento de uma bacia faminta, sendo reflexo da rápida “transgressão lacustre” sobre a superfície de discordância que marca o topo da Supersequência Gondwana I (MILANI *et al.*, 2007).

O posterior preenchimento por aportes arenosos progradacionais encontra-se documentado nos dados de poços que amostraram essa seção sedimentar. O conjunto pelitos lacustres/progradações arenosas é recoberto em contato abrupto pelos arenitos da Formação Tacuarembó no Uruguai e pelos da Formação Botucatu no Rio Grande do Sul (MILANI *et al.*, 2007).

Os arenitos lacustres da Formação Tacuarembó no Uruguai e os da Formação Botucatu no Rio Grande do Sul recobrem o conjunto de pelitos lacustres/progradações arenosas. Tais preenchimentos encontram-se documentados nos dados de poços que amostraram essa seção sedimentar.

Assim, o conjunto de atributos da Supersequência Gondwana II permite uma interpretação de que a subsidência meso-neotriássica da Bacia do Paraná

poderia estar relacionada ao desenvolvimento de grábens distensivos assimétricos, acomodando-se a drenagem fluvial sobre a rampa flexural deste sistema, com mergulho regional do substrato para norte na porção gaúcha e para sul em uma calha uruguaia análoga, enquanto que os pelitos lacustres teriam se acumulado junto às porções mais subsidentes (MILANI *et al.*, 2007).

O desenvolvimento de grábens distensivos assimétricos podem estar associados à subsidência meso-neotriássica da Bacia do Paraná, enquanto que os pelitos lacustres teriam se acumulado junto às porções mais subsidentes e a drenagem fluvial tenha se acomodado sobre a rampa flexural (MILANI *et al.*, 2007).

A ciclicidade observada neste pacote, em que se intercalam pelitos lacustres e arenitos fluviais, teria se desenvolvido em resposta a variações do nível de base do lago em função de um controle combinado da tectônica e do clima (MILANI *et al.*, 2007).

As variações do nível de base do lago em função de um controle combinado da tectônica e do clima (MILANI *et al.*, 2007) teriam desenvolvido a ciclicidade observada nesse pacote, em que se intercalam arenitos fluviais e pelitos lacustres (MILANI *et al.*, 2007).

O clássico registro ladiniano-noriano da região central do Rio Grande do Sul corresponde à sedimentação lacustre - e fluvial associada - que aconteceu em resposta a um pulso de subsidência nos grábens meso-neotriássicos da Formação Santa Maria. Na porção gaúcha da bacia, o estabelecimento da ocorrência do Sistema Triássico na Bacia do Paraná apresenta um forte vínculo ao pacote pelítico fossilífero da Formação Santa Maria (MILANI *et al.*, 2007).

De todo o modo, a pronunciada erosão a que este pacote foi submetida, principalmente durante o desenvolvimento da ampla superfície de deflação eólica ligada à Formação Botucatu, dificulta sobremodo uma reconstituição mais confiável do contexto paleofisiográfico do Meso-Neotriássico da Bacia do Paraná. O estabelecimento da ocorrência do Sistema Triássico na Bacia do Paraná apresenta um forte vínculo ao pacote pelítico fossilífero da Formação Santa Maria, que ocorre na porção gaúcha da bacia e que, em termos de conteúdo fossilífero, não encontra analogia nos demais domínios da sinéclise (MILANI *et al.*, 2007).

3.6 Magmatismo Serra Geral

Dentre as características comuns às bacias cratônicas sul-americanas encontra-se o intenso vulcanismo fissural que as afetou no Mesozóico, constituindo ampla província magmática que, no conjunto de todas as áreas por ela compreendidas, define a maior manifestação ígnea não-oceânica durante o Fanerozóico e uma importante contribuição à geração da crosta continental do planeta. De alguma forma, a série de episódios magmáticos aí envolvidos está vinculada aos campos tensoriais e fenômenos endógenos que levaram à desagregação do Pangea (MILANI *et al.*, 2007).

Na Bacia do Paraná, o evento traduziu-se como uma espessa cobertura de lavas, uma intrincada rede de diques cortando a inteira seção sedimentar e múltiplos níveis de soleiras intrudidas segundo os planos de estratificação dos sedimentos paleozóicos. Praticamente nenhuma região da bacia foi poupada pela invasão magmática e, hoje, após mais de 100 Ma de retrabalhamento erosivo, ainda restam cerca de três quartos da área total da bacia recobertos pelas rochas ígneas da Formação Serra Geral, com uma espessura remanescente que se aproxima dos 2.000 m na região do Pontal do Paranapanema (SP). De maneira generalizada, constituem a Formação Serra Geral, termos petrológicos dominados por basaltos toleíticos e andesitos basálticos, ocorrendo subordinadas quantidades de riolitos e riodacitos. Geoquimicamente, ocorre uma diferenciação destas rochas ao longo da bacia em termos de conteúdo de TiO_2 e de elementos-traço, especialmente Y e Yb. Tais pesquisas conduziram ao reconhecimento de uma distribuição estratigráfica sequencial, interpretada inicialmente como à uma devida migração da fonte magmática de sul para norte ao longo da bacia (MILANI *et al.*, 2007).

Na porção norte da bacia dominam rochas enriquecidas em TiO_2 , ao passo que no sul prevalecem empobrecidas neste constituinte, tendo tais autores creditado esta variação a uma composição diferenciada já em nível de fonte primária do magma. O manto sob esta área não seria homogêneo em termos composicionais quando analisado regionalmente. Em termos geocronológicos, com base em determinações pelo método K/Ar, o magmatismo Serra Geral foram assinaladas ao intervalo temporal de 147 a 119 Ma. A utilização mais recente da

técnica Ar/Ar data as rochas que o evento Serra Geral foi extremamente rápido, a 133 ± 1 Ma e com duração aproximada de 1 Ma (MILANI *et al.*, 2007).

Do ponto de vista químico, as rochas vulcânicas básicas têm sido divididas em dois grupos (REIS *et al.*, 2014).

- Basaltos com alto Ti (HTiB) – elevados teores de TiO_2 ($\geq 2\%$ em peso) e elementos incompatíveis (Ba, La, Ce, Sr, Zr, Hf, Ta, Nd, Sm, Tb e Y);
- Basaltos com baixo Ti (LtiB) - baixos teores de TiO_2 ($\leq 2\%$ em peso) e os mesmos elementos incompatíveis acima. Tais basaltos foram interpretado como uma devida migração da fonte magmática de sul para norte da área atual (REIS *et al.*, 2014).

Foram definidas seis sub-unidades usando os dois grupos relativos ao teor de titânio. O grupo LTiB é representado pelas sub-unidades Urubici, Pitanga e Paranapanema. As sub-unidades Ribeira, Esmeralda e Gramado denominam o grupo HTiB (REIS *et al.*, 2014).

A classificação das rochas ácidas foi feita por (BELLIENI, 1986 apud REIS, 2014) em dois grupos:

- Chapecó: formado por riódacitos, que afloram nos Estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina e, principalmente ao norte da Bacia do Paraná;
- Palmas – PAV – aflorando principalmente nos estados do Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul, os riólitos apresentam cor cinza claro, texturas afíricas e uma alteração denominada sal e pimenta. A matriz destas rochas é predominantemente hialina e, subordinadamente, hipocristalina. O plagiocásio, augita, pigeonita e opacos ocorrem como fenocristais ou microfenocristais.

Há um contato entre a porção mais basal da Formação Serra Geral com os arenitos da Formação Botucatu. Um intervalo de quiescência na atividade vulcânica, parece estar relacionado às intertraps deste arenito em meio aos derrames de lava (REIS *et al.*, 2014).

Os derrames da Formação Serra Geral podem ser definidos como corpos tabulares de grande continuidade lateral que possuem em média 30m. Destacam-se na porção mais superior do derrame, cavidades em que os gases, denominadas vesículas, são preenchidas parcialmente ou totalmente por zeólitas, quartzo e calcita (REIS *et al.*, 2014).

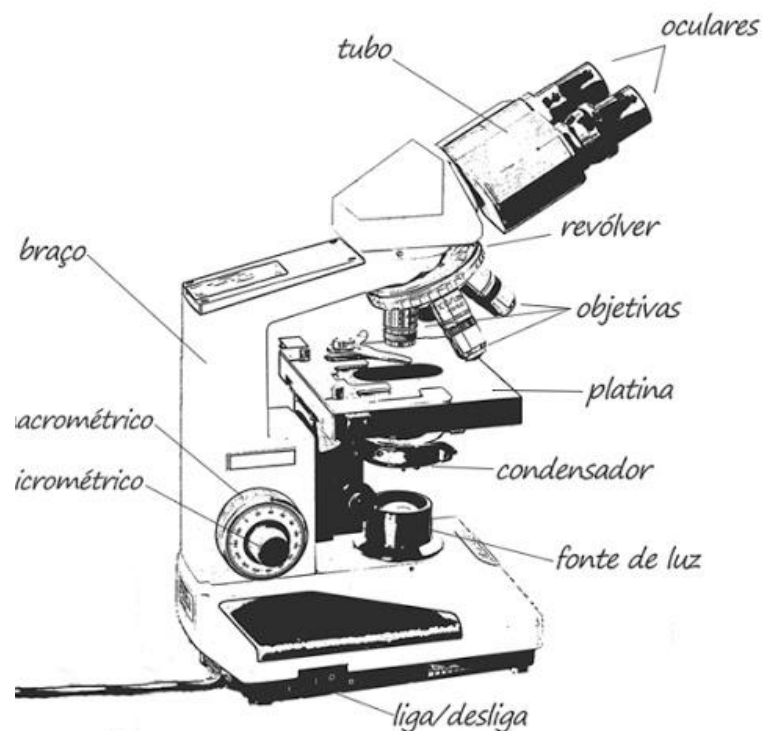
3.7 Métodos de Caracterização

3.7.1 Petrografia

Os estudos realizados com microscópio óptico polarizante baseiam-se nas caracterizações das principais propriedades ópticas dos minerais. No caso dos minerais opacos são: reflectância, forma, cor, pleocroísmo, isotropismo e anisotropismo. A luz refletida pelos minerais opacos pode ser determinada pela reflectividade ou poder refrator dos minerais. (Mineral, C. D. T., Bertolino, L. C., & Janeiro, R. De, 2010)

A determinação do sinal óptico, a cor, o pleocroísmo, a extinção, a forma, o relevo, as geminações, os planos de clivagem e de fraturas são as propriedades consideradas fundamentais para identificação dos minerais transparentes. Um modelo de microscópio óptico para uso acadêmico é ilustrado na Figura 14, com a indicação das suas partes importantes. (Mineral, C. D. T., Bertolino, L. C., & Janeiro, R. De, 2010)

Figura 14: Microscópio óptico.

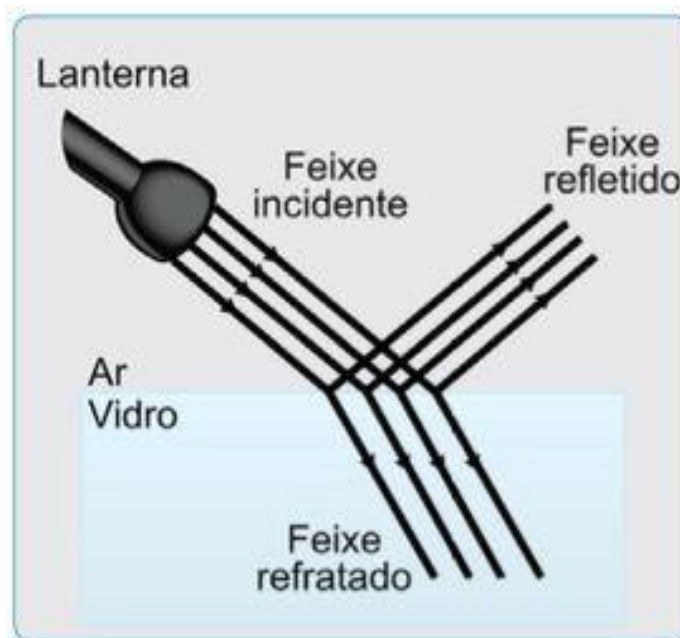


Fonte: Adaptado de Klein *et al.* (2012).

Para estudos petrográficos, são selecionados fragmentos de uma amostra representativa para a confecção das lâminas delgadas. Para examinar com precisão todas as propriedades ópticas dos minerais transparentes ao microscópio de luz transmitida, a espessura das lâminas delgadas deve atingir 30 μm . Geralmente é examinado ao microscópio óptico polarizante materiais com granulometria na faixa de 208 μm e 37 μm . (Mineral, C. D. T., Bertolino, L. C., & Janeiro, R. De, 2010)

É necessário uma compreensão dos fenômenos associados à luz porque ela é utilizada como fonte de energia pela microscopia óptica. Conforme a Figura 15, a passagem da luz de um meio menos denso, como o ar, para outro meio mais denso, como vidro, parte dessa luz penetra no vidro e a outra parte reflete de volta para o ar (Klein *et al.* , 2012).

Figura 15: Luz refletida e refratada.



Fonte: Adaptado de Klein *et al.* (2012).

As seguintes leis da reflexão regem o fenômeno físico do raio refletido:

- (1) Os raios refletidos e incidentes são coplanares;
- (2) O ângulo de reflexão (r') é igual ao ângulo de incidência (i) e ambos são medidas a partir de uma linha normal à superfície no ponto de incidência.

Caso a velocidade da luz sejam diferentes nos dois tipos de material, a direção da propagação muda de acordo com a lei de Snell:

$$\frac{\text{Sen}\theta_1}{\text{Sen}\theta_2} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2}$$

onde θ_1 = ângulo de incidência, θ_2 = ângulo de refração, n_1 e n_2 são índices de refração e v_1 e v_2 são velocidades da luz. Um raio de luz passando de um meio com n_1 baixo para outro meio com n_2 mais alto refratado em direção à normal à interface que separa esses dois meios, e vice-versa (Klein *et al.*, 2012).

Opticamente, as substâncias transparentes podem ser classificadas em dois grupos: anisotrópicas e isotrópicas. Nas substâncias anisotrópicas, exceto as que pertencem ao sistema cúbico, possuem mais de um índice de refração e, dessa maneira, a velocidade da luz varia conforme a direção cristalográfica (Klein *et al.*, 2012).

As substâncias isotrópicas possuem um só índice de refração. Por esse motivo, a luz se move em todas as direções com a mesma velocidade (Klein *et al.*, 2012).

3.7.2 Fluorescência

Um espectrômetro de fluorescência de raios X (XRF) é um instrumento de raios X usado para análises químicas de rotina e relativamente não destrutivas de rochas, minerais, sedimentos e fluidos. O método de XRF depende de princípios fundamentais que são comuns a vários outros métodos instrumentais envolvendo interações entre feixes de elétrons e raios-X com amostras, incluindo: espectroscopia de raios-X (por exemplo, SEM - EDS), difração de raios-X (XRD) e

espectroscopia dispersiva de comprimento de onda (microsonda WDS). Ele funciona em princípios espectroscópicos dispersivos de comprimento de onda que são semelhantes a uma microsonda eletrônica (EPMA). A relativa facilidade e baixo custo de preparação de amostra, e a estabilidade e facilidade de uso de espectrômetros de raios-X tornam este um dos métodos mais amplamente usados para análise de elementos principais e traços em rochas, minerais e sedimentos. No entanto, um XRF geralmente não pode fazer análises nos pequenos tamanhos de pontos típicos do trabalho de EPMA (2-5 microns), por isso é normalmente usado para análises em massa de frações maiores de materiais geológicos (Integrating Research and Education, 2021).

Quando interagem com a radiação, o comportamento dos átomos possibilita a análise de elementos maiores e traços em materiais geológicos por fluorescência de raios X. Os materiais podem se tornar ionizados quando são excitados com radiação de alta energia e comprimento de onda curto (por exemplo, raios-X). Se a energia da radiação for suficiente para desalojar um elétron interno, o átomo se torna instável e um elétron externo substitui o elétron interno ausente. Quando isso acontece, a energia é liberada devido à diminuição da energia de ligação do orbital eletrônico interno em comparação com o externo. Como a energia do fóton emitido é característica de uma transição entre orbitais de elétrons específicos em um elemento particular, os raios-X fluorescentes resultantes podem ser usados para detectar a abundância de elementos que estão presentes na amostra. A radiação emitida é denominada radiação fluorescente, sendo de menor energia do que os raios X incidentes primários. (Integrating Research and Education, 2021).

Esta energia de ligação eletrônica pode ser calculada de modo aproximado, aplicando-se a teoria atômica de Bohr para o átomo de hidrogênio e átomos hidrogenóides, e posteriormente, fazendo-se algumas considerações sobre as experiências de Moseley. Desse modo, a equação 1 permite o cálculo aproximado dessa energia para os elétrons das camadas K e L dos átomos de um elemento (Corrêa, J.C., 2019).

$$E = \frac{me^4(2-b)^2}{8\epsilon_0 \cdot 2h^2 \cdot n^2} \quad (1)$$

onde: E = energia de ligação eletrônica (joules), m = massa de repouso do elétron = $9,11 \cdot 10^{-31}$ kilogramas, e = carga elétrica do elétron = $1,6 \cdot 10^{-19}$ coulombs, Z = número atômico do elemento emissor dos raios X, b = constante de Moseley, com valores iguais a 1 e 7,4, para as camadas K e L, respectivamente. ϵ_0 = permitividade elétrica no vácuo = $8,8534 \cdot 10^{-12}$ coulombs.newton⁻¹.metro⁻², h = constante de Planck = $6,625 \cdot 10^{-34}$ joules.s, e n = no quântico principal do nível eletrônico ($n = 1$ para camada K, $n = 2$ para camada L, etc.) (Corrêa, J.C., 2019).

A análise de elementos maiores e traços em materiais geológicos por XRF é possibilitada pelo comportamento dos átomos quando interagem com a radiação-X. Um espectrômetro de XRF funciona porque se uma amostra é iluminada por um feixe de raios X intenso, conhecido como feixe incidente, parte da energia é espalhada, mas parte também é absorvida dentro da amostra de uma maneira que depende de sua química. O feixe de raios-X incidente é normalmente produzido a partir de um alvo Rh, embora W, Mo, Cr e outros também possam ser usados, dependendo da aplicação. Quando este feixe de raios-X primário ilumina a amostra, diz-se que está excitada (Integrating Research and Education, 2021).

A amostra excitada, por sua vez, emite raios-X ao longo de um espectro de comprimentos de onda característicos dos tipos de átomos presentes na amostra. Como isso acontece? Os átomos na amostra absorvem a energia dos raios X ionizando e ejetando elétrons dos níveis de energia mais baixos (geralmente K e L). Os elétrons ejetados são substituídos por elétrons de um orbital externo de alta energia, que liberam energia devido à diminuição da energia de ligação do orbital eletrônico interno em comparação com o externo. Esta liberação de energia é na forma de emissão de raios X característicos, indicando o tipo de átomo presente. Se uma amostra tem muitos elementos presentes, como é típico para a maioria dos minerais e rochas, o uso de um espectrômetro dispersivo de comprimento de onda muito parecido com o de um EPMA permite a separação de um espectro de raios-X emitido complexo em comprimentos de onda característicos para cada elemento presente. Vários tipos de detectores (fluxo de gás proporcional e cintilação) são usados para medir a intensidade do feixe emitido. Para medir longos comprimentos de onda ($> 0,15$ nm) de raios X que são típicos de espectros K de elementos mais leves que Zn, o contador de fluxo é

comumente utilizado. Para analisar comprimentos de onda mais curtos no espectro de raios-X (espectros K do elemento de Nb a I; espectros L de Th e U), o detector de cintilação é comumente usado. Os dois detectores em conjunto, geralmente medem Os raios X de comprimento de onda intermediário (espectros K produzidos de Zn a Zr e espectros L de Ba e os elementos de terras raras). A intensidade da energia medida por esses detectores é proporcional à abundância do elemento na amostra (Integrating Research and Education, 2021).

Dentre a vasta aplicação da fluorescência de raios X, podemos citar:

- ✓ Fabricação de cerâmica e vidro;
- ✓ Análise de campo em estudos geológicos e ambientais (usando espectrômetros XRF portáteis e portáteis);
- ✓ análises químicas em massa dos principais elementos (Si, Ti, Al, Fe, Mn, Mg, Ca, Na, K, P) em rochas e sedimentos;
- ✓ análises químicas em massa de elementos traço (em abundância > 1 ppm; Ba, Ce, Co, Cr, Cu, Ga, La, Nb, Ni, Rb, Sc, Sr, Rh, U, V, Y, Zr, Zn) em rochas e sedimentos - os limites de detecção de oligoelementos são normalmente da ordem de algumas partes por milhão;
- ✓ mineração (por exemplo, medição do teor do minério).

3.7.3 Microscópio de Varredura Eletrônica

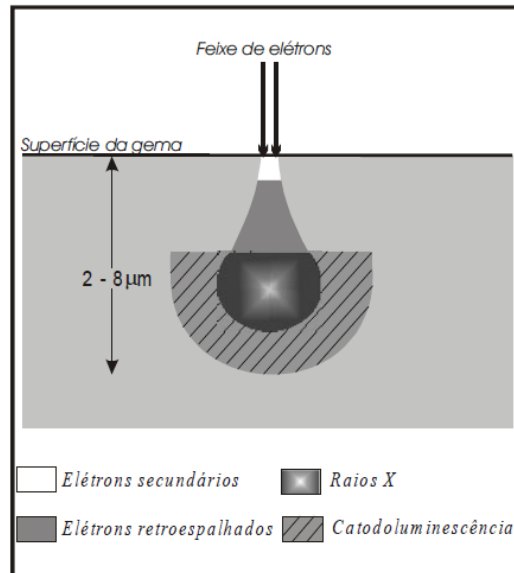
A microscopia eletrônica de varredura é utilizada em várias áreas do conhecimento, incluindo a mineralogia. O uso desta técnica vem se tornando mais freqüente por fornecer informações de detalhe, com aumentos de até 300.000 vezes (Corrêa, J.C., 2019).

A técnica de microscopia eletrônica de varredura permite a obtenção de informações topográficas, morfológicas, químicas e estruturais de amostras de diversos materiais, possibilitando correlacionar sua microestrutura com propriedades químicas, mecânicas e processos de fabricação relacionados. Uma das vantagens da utilização do MEV/ EDS é a rapidez e facilidade na preparação das amostras, que depende do objetivo da pesquisa (Corrêa, J.C., 2019).

A imagem eletrônica de varredura é formada pela incidência de um feixe de elétrons no mineral, sob condições de vácuo (Figura.16). A incidência do feixe de

elétrons no mineral promove a emissão de elétrons secundários, retroespalhados, *auger* e absorvidos, assim como de catodoluminescência e raios X característicos (Duarte, *et al.*, 2003).

Figura 16: Representação esquemática da região de ionização gerada na interação do feixe de elétrons com a superfície da gema



Fonte: Pesquisa em Geociências (Duarte, *et al.*, 2003).

A imagem eletrônica de varredura representa em tons de cinza: os elétrons retroespalhados (BSE – *backscattering electrons*) emitidos pelo material analisado, o mapeamento e a contagem de elétrons secundários (SE – *secondary electrons*) (Duarte, *et al.*, 2003).

A imagem de BSE (*backscattering electrons*) é gerada pela emissão de elétrons retroespalhados e demonstra diferenças composicionais na região ionizada do mineral. Esta região possui formato de “pêra” e se estende desde a superfície até alguns micrômetros no interior do mineral (Figura. 16). As imagens BSE são representadas em tons de cinza, onde os tons claros correspondem às porções constituídas por elementos com Z médio relativamente maior do que aquelas com tons mais escuros. Contudo, a resolução da imagem de BSE é menor que a de SE, pois as regiões de *back-scattering* abrangem uma área maior

que aquelas de liberação de elétrons secundários na superfície analisada (Duarte, *et al.*, 2003).

A imagem de SE (*secondary electrons*), fornece detalhes da superfície ionizada do mineral em tons de cinza. Os tons mais claros podem representar as faces do mineral orientadas para o detector, bem como defeitos da metalização e bordas do mineral. A resolução obtida em imagens de SE corresponde ao diâmetro do feixe de elétrons incidente (Figura. 16), e que pode variar de acordo com as especificações do equipamento utilizado na análise. Outro condicionante de resolução para a imagem de SE são as condições de calibração do aparelho, tal como a intensidade da corrente e condições de vácuo (Duarte, *et al.*, 2003).

O feixe de elétrons pode danificar a superfície de certos minerais, como fosfatos ou gemas orgânicas. A metalização consiste na precipitação, a vácuo, de uma película micrométrica de material condutor (*e.g.*, ouro ou carbono) sobre a superfície do mineral, possibilitando a condução da corrente elétrica. Os minerais não condutores de corrente elétrica para serem analisados no MEV/EDS devem ser previamente metalizados (Duarte, *et al.*, 2003).

3.8 Tomografia Industrial 3D de radiação gama

A tomografia é uma técnica de diagnóstico, não invasiva, que permite a obtenção de imagens bidimensionais ou tridimensionais dos materiais a serem analisados. A tomografia computadorizada (CT) foi desenvolvida inicialmente como uma técnica de diagnóstico médico, com o intuito de fornecer informações sobre os detalhes do corpo humano, baseando-se na atenuação da radiação nuclear e dos raios X. Esta técnica gera imagens que não são influenciadas pela estrutura externa, revelando detalhes da distribuição da estrutura interna de um objeto com alta precisão e exatidão, melhorando a resolução espacial (MESQUITA *et al.*, 2014).

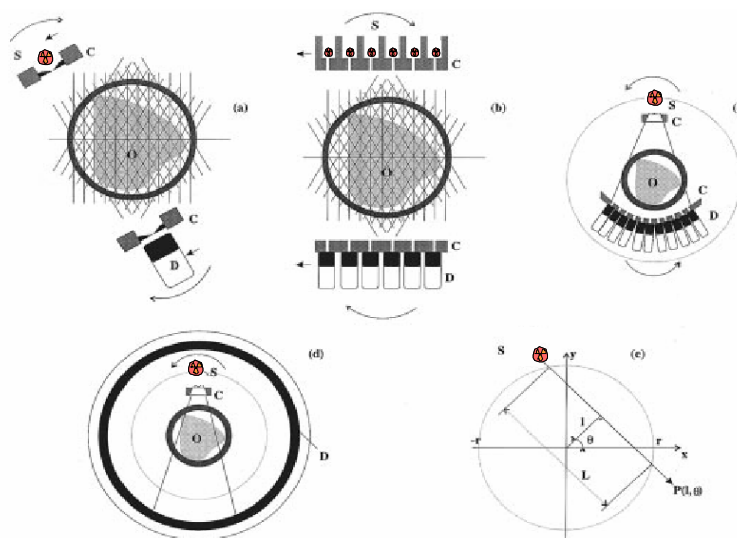
Observa-se na literatura um crescente interesse no desenvolvimento e aplicações de sistemas tomográficos com raios gama para estudo de sistemas multifásico em indústrias de materiais, farmacêuticas, bioquímicas, petroquímicas e químicas (MESQUITA *et al.*, 2014). Apesar de haver um grande número de

artigos, não existem trabalhos relacionados à tomografia gama para a análise de rochas na Geociências.

O princípio da tomografia computadorizada (CT) por transmissão consiste na transmissão de raios gama através de um meio heterogêneo acompanhada pela atenuação fornece a medida da integral na linha de distribuição da massa através do caminho percorrido pelo feixe. A medição de vários feixes com diferentes orientações, tanto espaciais como angulares em relação ao volume estudado, seguida de um processo de reconstrução de imagem, fornece a distribuição de densidade das fases com um alto grau de resolução espacial. O processo pode ser chamado de tomografia computadorizada (CT) se a coleta de dados e o procedimento para a reconstrução de imagem for realizada por um computador. Os conjuntos de fontes radioativas encapsuladas e detectores são utilizados pelos sistemas tomográficos baseados na transmissão. São posicionadas nos lados opostos do objeto a ser estudado (MESQUITA *et al.*, 2016).

Os sistemas tomográficos da primeira geração consistem de uma fonte que emite um feixe pontual de radiação e um detector (Figura 17). Estes se movimentam pelos lados opostos do objeto de estudo, medindo a atenuação da radiação em cada posição. Este método tomográfico não é capaz de coletar vários dados para movimentos rápidos do sistema sem introduzir erros importantes na reconstrução da imagem e depende do tempo (MESQUITA *et al.*, 2014).

Figura 17: Quatro tipos de equipamentos para tomografia de transmissão gama: (a) translação–rotação de um feixe em paralelo (primeira geração); (b) translação – rotação de múltiplas fontes em paralelo (segunda geração); (c) rotação de um feixe em leque (terceira geração); (d) detector fixo – rotação da fonte (quarta geração); (e) sistema de coordenadas para a reconstrução de imagem na tomografia por transmissão e definição do raio soma. D: detectores; S: fonte; C: colimador; O: objeto estudado.



Fonte: M. Noninvasive Tomographic and Velocimetric of Multiphase Flows, 1997.

Nos sistemas tomográficos da segunda geração, conjuntos de detectores são colocados na frente de uma fonte radioativa simples que se movimentam ao redor do objeto estudado fornecendo um número de projeções igual ao número de detectores. Empregando-se este método, o tempo de aquisição de dados pode levar menos de 1 min. Algumas vezes, estes sistemas de segunda geração utilizam também fontes radioativas múltiplas para reduzir o tempo de análise do sistema (FADERANI *et al.*, 1998).

A fonte utilizada em sistema tomográfico de terceira geração é colimada de forma que o caminho percorrido pelos feixes seja semelhante a um leque. Neste tipo de sistema podem ser utilizados várias fontes e vários arranjos de detectores. O sistema movimenta-se ao redor do objeto estudado obtendo-se uma vista particular para uma posição “X” do conjunto fonte-detectores (FADERANI *et al.*, 1998).

Os sistemas de quarta geração utilizam uma fonte radioativa que se movimenta ao redor do objeto e um arranjo detector fixo (grande número de detectores montados em um anel fixo). Os registros de qualquer medida são

provenientes do detector, representando uma vista do objeto. No entanto, todos os CT são constituídos de um sistema de aquisição de dados do objeto estudado e um computador adequado. No seu interior, o feixe em forma de leque é detectado em 10^{-3} segundos (FADERANI *et al.*, 1998).

Dois fatores são fundamentais para as medidas de atenuação: os sistemas de detecção e a escolha do tipo e geometria do material radioativo.

As principais variáveis que devem ser consideradas para a escolha do material radioativo apropriado para cada tipo de estudo são: a) atividade; b) elemento; c) meia-vida; d) tipo de energia (FADERANI *et al.*, 1998).

A radiação gama é o tipo de radiação mais adequado para usos industriais, pois possui maior penetrabilidade em relação à radiação X. A sensibilidade de detecção está relacionada com detector e o radioisótopo utilizados. Os detectores mais adequados são aqueles que atendem o compromisso de maior eficiência de contagem e menor “tempo morto”. Atualmente, para aplicações em tomografia, os detectores de radiação mais utilizados são os cintiladores.

A radiação interage com a matéria por meio de quatro efeitos: produção de pares, retroespalhamento, efeito fotoelétrico e efeito Compton. Todas estas interações dependem do número atômico do material absorvedor e da energia do fóton incidente. A lei de Beer rege a passagem pela matéria de um feixe fino e bem colimado de fótons de raios gama, como demonstrado na EQ. 1 (SHOLLENBERGER *et al.*, 1997)

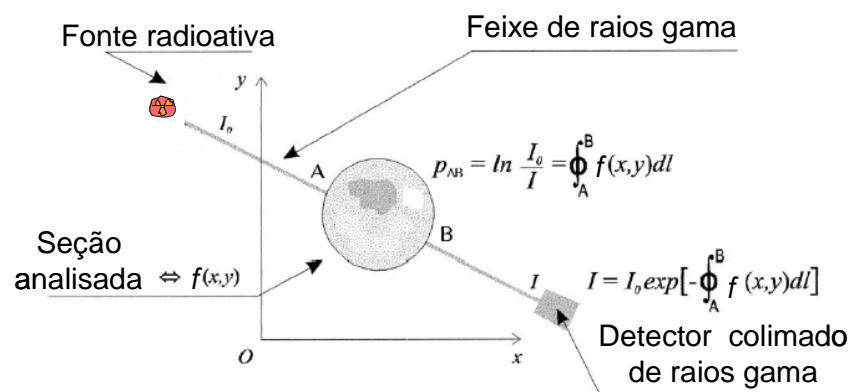
$$I = I_0 * \exp(-\mu x) \quad (1)$$

Onde I é a intensidade do raio detectado após o objeto, I_0 é a intensidade do raio gama incidente, x é a espessura da amostra e μ é o coeficiente linear de atenuação da amostra.

O método de reconstrução é aplicado para qualquer objeto bidimensional que possuir uma propriedade desconhecida que dependa do espaço, $f(x,y)$ (função da imagem ou distribuição dos coeficientes de atenuação). As informações sobre esta propriedade podem ser obtidas pelas medições das projeções destas funções nas linhas que atravessam o objeto estudado (Figura 18).

Na EQ. 1, pode-se determinar a projeção do coeficiente de atenuação linear em uma determinada direção em um sistema de coordenadas cartesianas como é mostrada na Figura 18. Quando um grande número de feixes de radiação atravessa em um objeto em um mesmo plano, pode ser medido um número igual de projeções, simultaneamente. As projeções dos feixes determinarão uma seção através do objeto se todos eles forem coplanares.

Figura 18: Projeção do coeficiente de atenuação linear em uma determinada direção em um sistema de coordenadas cartesianas.



Fonte: M. Noninvasive Tomographic and Velocimetric of Multiphase Flows, 1997.

A aplicação industrial da tomografia computadorizada visa as áreas em que o controle de qualidade, a confiabilidade e a segurança são de suma importância na qual as falhas dos materiais podem ter grandes repercussões nos processos.

Dentro destas áreas, a tomografia gama pode estudar profundamente sistemas, como:

- Meios porosos (reatores de leito fixo, filtros, jazidas de petróleo) para estudo da permeabilidade relativa, porosidade, adsorção, saturação em jazidas de petróleo e determinação de volumes ativos de reatores catalíticos fixos;

No entanto, para a caracterização de rochas não foi encontrado na literatura, trabalhos utilizando desse tipo de tomógrafos industriais. Para aplicação em geociências, são utilizadas microtomógrafos, que necessitam serem processados e reduzidos a dimensões de 1cm^3 (CNUdde *et al.*, 2011)

4 METODOLOGIA

4.1 Coleta das Amostras

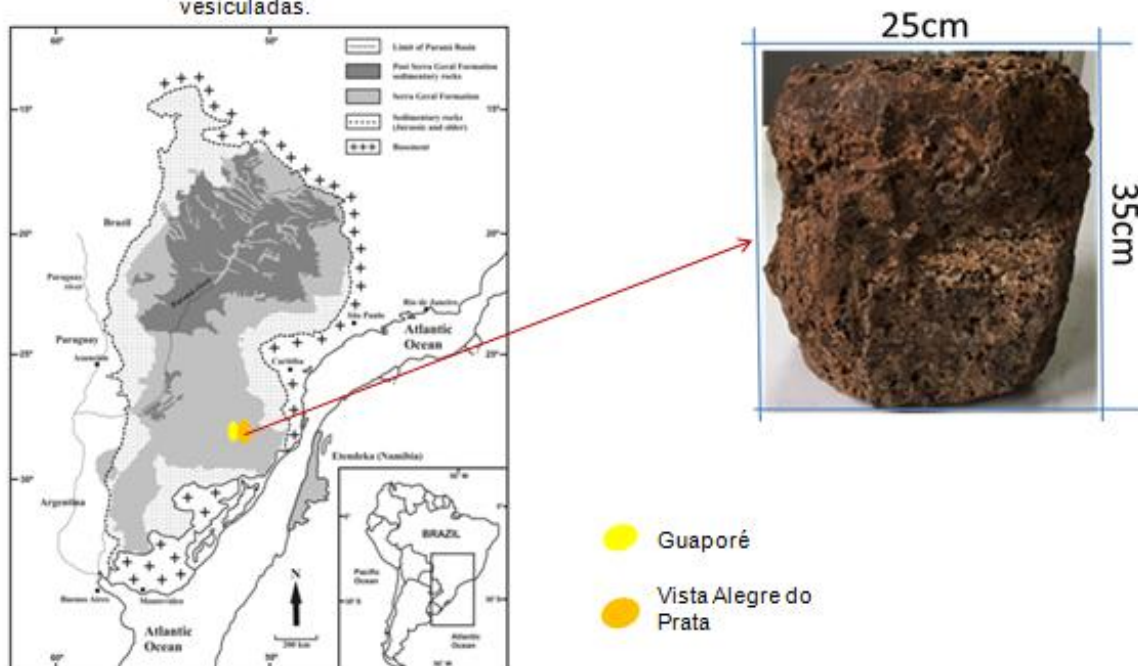
As amostras das rochas vulcânicas vesiculadas foram coletadas nos municípios de Guaporé e Vista Alegre do Prata, no Estado do Rio Grande do Sul, cujos pontos de coletas são mostrados na Figura 3. As coletas foram realizadas sob a orientação do Prof. Dr. Francisco Assis Cavallaro, do Instituto de Geociências da USP. Para a coleta e trabalhos de campo, este trabalho teve o suporte do Projeto Temático da FAPESP processo 2012/06082-6, intitulado A Província Magmática Paraná Etendeka no Brasil: relações temporais e petrológicas entre o magmatismo toleítico e alcalino e suas implicações geodinâmicas, coordenado pelo Prof. Dr. Excelso Ruberti – Instituto de Geociências da USP.

Para a coleta das amostras os seguintes materiais foram utilizados:

- bússola para medir a direção do fluxo magmático no momento em que as vesículas se formaram;
- martelo petrográfico e marreta para retirar a rocha do afloramento (exposição de rochas em superfície);
- caderneta de campo;
- GPS, para tirar as coordenadas geográficas do local em que as amostras foram coletadas.

Figura 19: Região de coleta das amostras de rochas vulcânicas vesiculadas.

Figura 19: Região de coleta das amostras de rochas vulcânicas vesiculadas.



Fonte: (FRANK; GOMES; FORMOSO, 2009)

4.2 Pulverização das Amostras

As amostras foram pulverizadas no Departamento de Mineralogia e Geotectônica do Instituto de Geociências, da Universidade de São Paulo, USP, Brasil para sua utilização nas caracterizações físicas químicas (Sertek et.al., 2010).

Inicialmente, as amostras foram fragmentadas com serras diamantadas e uma prensa hidráulica. A seguir, foram pulverizadas no moinho de bolas cujo princípio de funcionamento baseia-se nas oscilações horizontais fornecidas pela placa de vibração.

As amostras pulverizadas foram utilizadas para medidas de Fluorescência de raios X.

4.3 Fluorescência de Raios X

A composição química qualitativa e quantitativa das rochas vulcânicas coletadas foi determinada pela técnica da fluorescência de Raios X, usando o

equipamento de Fluorescência de Raios X, modelo EDX – 900HS, da marca SHIMADZU, do Centro do Combustível Nuclear – CECOM do IPEN/CNEN-SP A fluorescência de raios X é uma técnica para identificar os elementos presentes na amostra. Nesse método de caracterização, uma alta energia emitida por uma fonte de radiação de Raio X excita as substâncias dos átomos do material analisado. Quando um átomo é submetido à uma alta energia de radiação, os elétrons saltam níveis energéticos. A energia envolvida na absorção é uma característica específica de cada elemento químico, permitindo a identificação e a quantificação (GARCIA, 2019, p.72).

4.4 Microscópio de Varredura Eletrônica

A topografia e a morfologia dos minerais constituintes da rocha foram avaliadas utilizando um microscópio eletrônico de varredura (MEV) da marca Philips, modelo XL30, pertencente à Centro de Ciência e Tecnologia de Materiais – CECTM do IPEN/CNEN-SP. A amostra da rocha foi fragmentada e sua superfície cortada, polida e recoberta por evaporação de carbono para sua análise no microscópio. As imagens foram processadas pelo software livre ImageJ 1.50b. Um microscópio eletrônico de varredura (MEV) utiliza um feixe de elétrons no lugar dos fótons empregados em um microscópio de luz convencional, resolvendo o problema de resolução relacionado à fonte de luz branca. Como resultado, os aparelhos modernos permitem aumentos de 300.000 vezes ou mais para a maioria dos materiais sólidos, mantendo a profundidade de campo consistente com a observação de superfícies rugosas. O MEV é um dispositivo que pode fornecer rapidamente informações sobre a morfologia e identificação de elementos químicos em uma amostra sólida. O MEV é um dos instrumentos mais versáteis disponíveis para a observação e análise de características microestruturais de objetos sólidos (GARCIA, 2019, p.72).

4.5 Ensaios petrográficos pela técnica de microscópio óptico de luz transmitida.

Para a realização dos ensaios petrográficos, inicialmente, foram

confeccionadas cinco lâminas petrográficas. Para a preparação das lâminas, a rocha é cortada com uma serra adiamantada, obtendo-se uma fatia plana. A seguir, ela é impregnada a 60° por uma mistura de acetona e resina e o excesso de resina retirado com o auxílio de um estilete (PALERMO e COELHO, 2009).

A seguir, utilizando-se dessas laminas preparadas, foram realizadas estudos petrográficos utilizando um microscópio óptico de luz transmitida Olympus BX40, da marca Philips, pertencente ao Departamento de Mineralogia e Geotectônica, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, USP, Brasil.

A petrografia é um método de caracterização que considera aspectos como: textura, grau de cristalinidade, visibilidade, geometria, arranjo (trama), o tamanho dos cristais, caracterização da porosidade e dos produtos de alteração. Por meio de um sistema de lentes de vidro que ampliam a imagem das amostras de luz visível, o microscópio tem como finalidade observar estruturas invisíveis a olho nu. O controle da intensidade luminosa pode ser feito diretamente na regulação da fonte luminosa ou indiretamente através do diafragma e do consensador.

4.6 Tomografia computadorizada 3D de radiação gama

Medida tomográfica da rocha foi realizada na sua forma e tamanho real ilustrado na Figura 21, sem necessitar nenhum processamento para realizar as medidas, utilizando um tomógrafo computadorizado industrial de terceira geração por raios gama desenvolvido no Centro de Tecnologias de Radiação, CETER do IPEN, mostrado na Figura 18. O tomógrafo é composto de dez detectores NaI (TI) de 25,4mm x 50,8 mm (diâmetro x espessura), dispostos em um arranjo com geometria de feixe de leque, diametralmente oposto à uma fonte de raios gama de ^{192}Ir (~ 317 e 468 keV) armazenado dentro de porta fonte radioativa. Os dez detectores NaI (TI) foram colimados individualmente com chumbo contendo septos de 2 x 5 x 50 mm³ (largura, altura, profundidade). Os detectores se movem 14 vezes em um ângulo de passo de 0,26 graus, emulando 140 detectores por projeção. O tempo de contagem para amostragem foi de 6 segundos.

Posteriormente, na Figura 21, a mesa de suporte que contém o arranjo detectores e a porta fonte contendo fonte de radiação gama (^{192}Ir) gira um grau para a frente, e esse processo continua até completar 360 graus, totalizando 360

projeções. Para um total de 50400 amostras (140 'detectores virtuais' x projeções 360), o sistema gasta 17,5 horas para obter cada imagem tomográfica. A fonte radioativa ^{192}Ir , com uma atividade de 7,4 GBq (200 mCi), foi colocada em um porta fonte radioativa de tungstênio com um ângulo de abertura de 36 graus. As amostras de rocha de 25 cm x 35 cm (largura x altura) foram colocadas no centro do sistema de tomografia. As imagens foram reconstruídas usando o método de retroprojeção filtrada (FBP), com algoritmos e análises desenvolvidas no software Matlab® r2013b por Velo, A.F. (Velo et al, 2019). Vale ressaltar que a tomografia é uma técnica não destrutiva e a rocha pode ser tomografada em grandes dimensões e formatos diferentes, sem necessitar processar antes da medida.

Figura 20: Ilustração da amostra da rocha vulcânica vesicular analisada

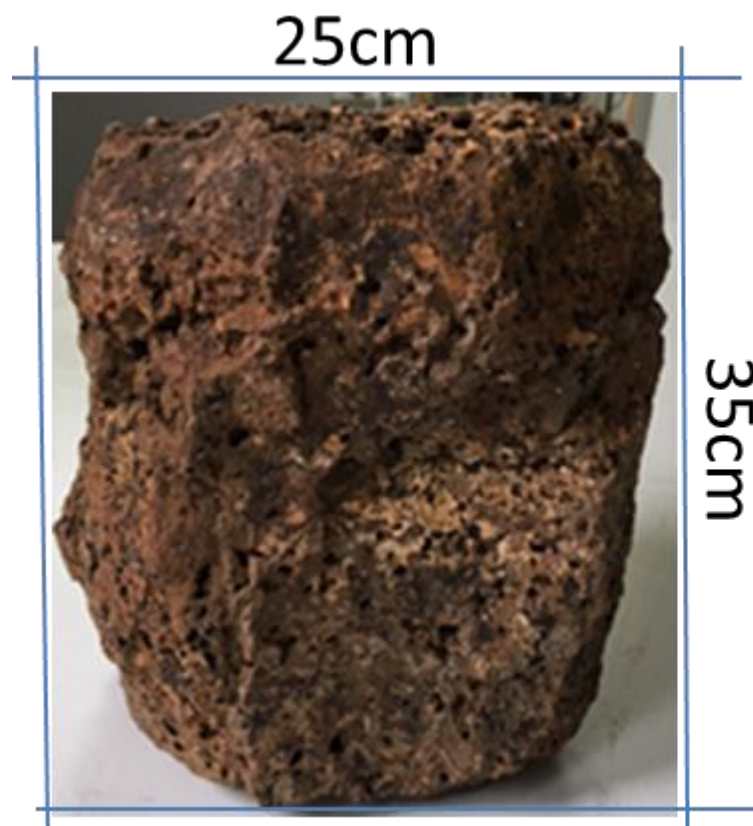
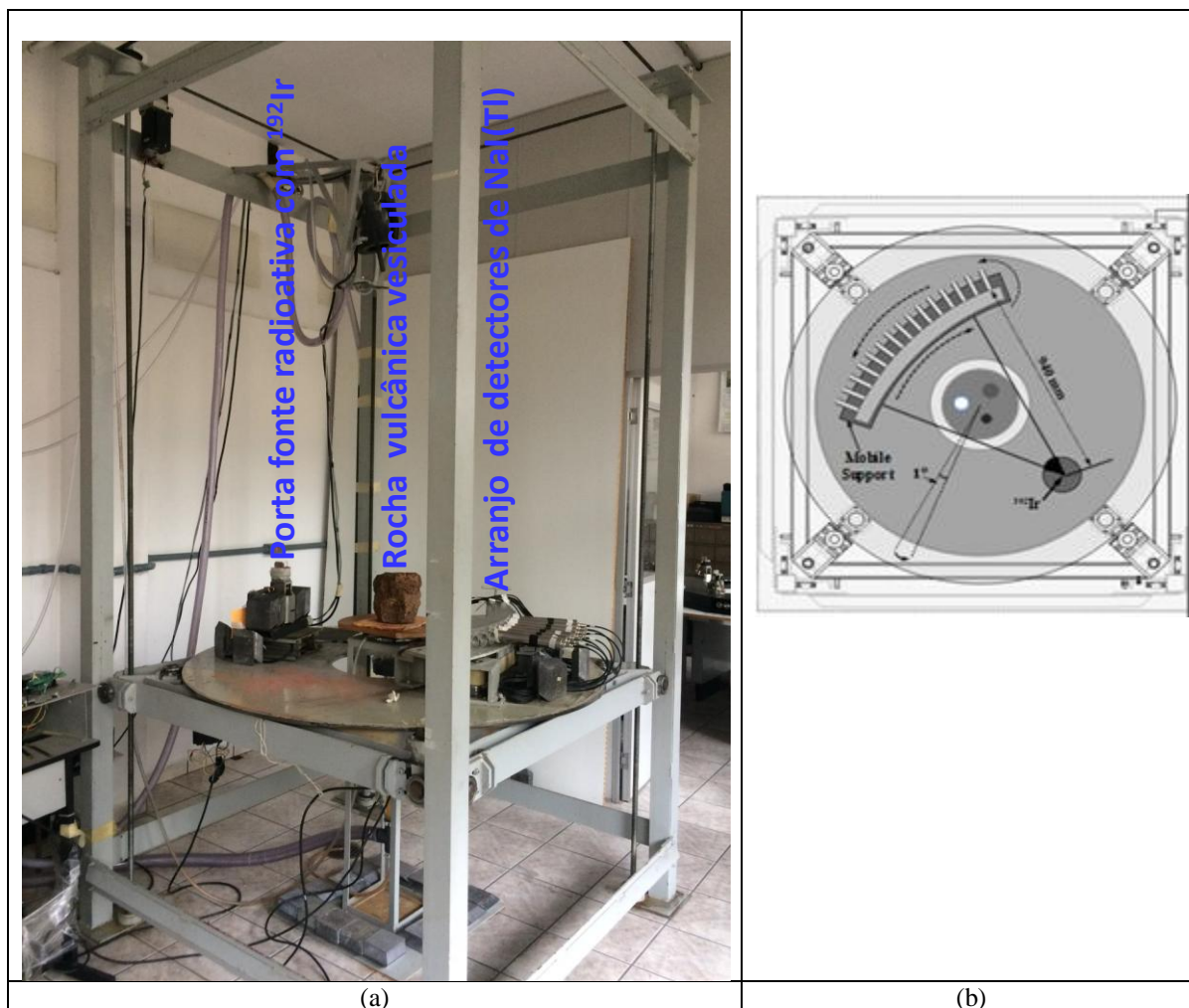
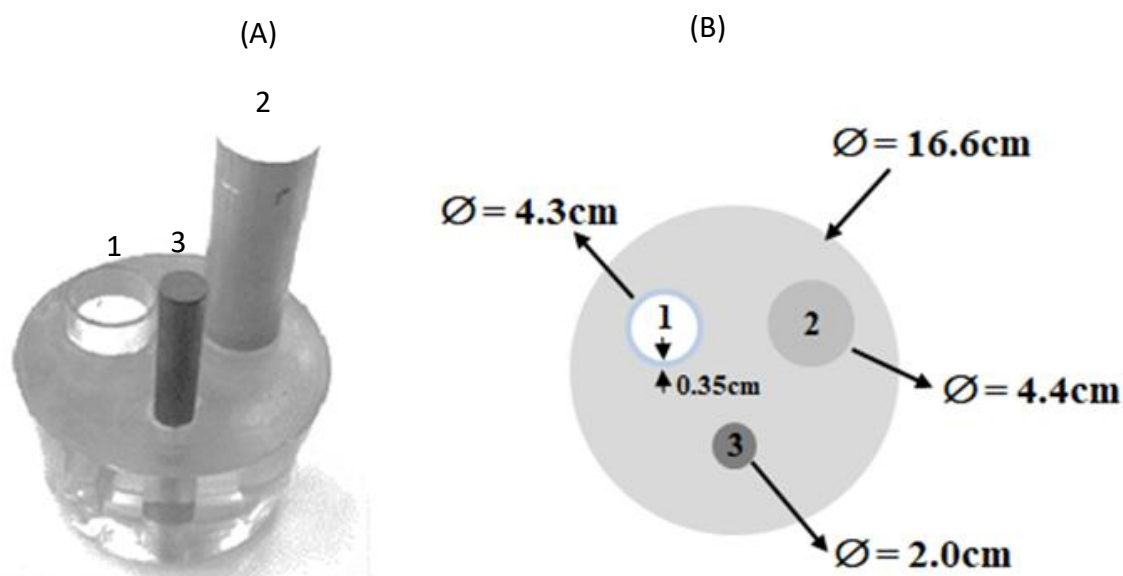


Figura 21: Tomógrafo Industrial de Terceira Geração por radiação gama. Foto (a) e Diagrama da parte superior (b).



Previamente, medida tomográfica foi realizada em um Fantom multifásico constituído por materiais conhecidos, a fim de converter o coeficiente de atenuação linear obtida experimentalmente em densidade. O Fantom consiste de um cilindro sólido de PMMA ($\rho \approx 1,19 \text{ g/cm}^3$) contendo três orifícios: um preenchido com ferro ($\rho \approx 7,874 \text{ g/cm}^3$) e outro com alumínio ($\rho \approx 2,698 \text{ g/cm}^3$) e o terceiro vazio (preenchido com ar) e ladeado de vidro com parede de espessura de 3,5 mm, conforme ilustrado na Figura 22 (Velo *et al*, 2019).

Figura 22: Ilustração do Fantom multifásico confeccionado com acrílico (A). Esquema do Fantom com as dimensões dos constituintes (B). 1- Ar cercado por parede de vidro circular, 2- barra de ferro e 3- barra de alumínio.



5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Fluorescência de Raios X

Os elementos determinados na amostra de rocha vulcânica, pela análise de Fluorescência de Raios X encontram-se sumarizados na Tabela 1. Os elementos estão expressos na forma de óxidos, sendo que os elementos com concentrações maiores estão representados em wt% e a dos elementos de concentrações menores em ppm, representados na Tabela 1. Como pode ser observado na tabela, a rocha analisada é, predominantemente, composta de SiO_2 (51,87%), evidenciando que a rocha tem composição ferromagnésiana.. Concentrações de Fe_2O_3 (15,70%) e Al_2O_3 (13,50%), também, foram encontrados em quantidades significativas, porém, menores que da SiO_2 .

Tabela1:Concentração dos elementos presentes na amostra de rocha vulcânica vesicular.

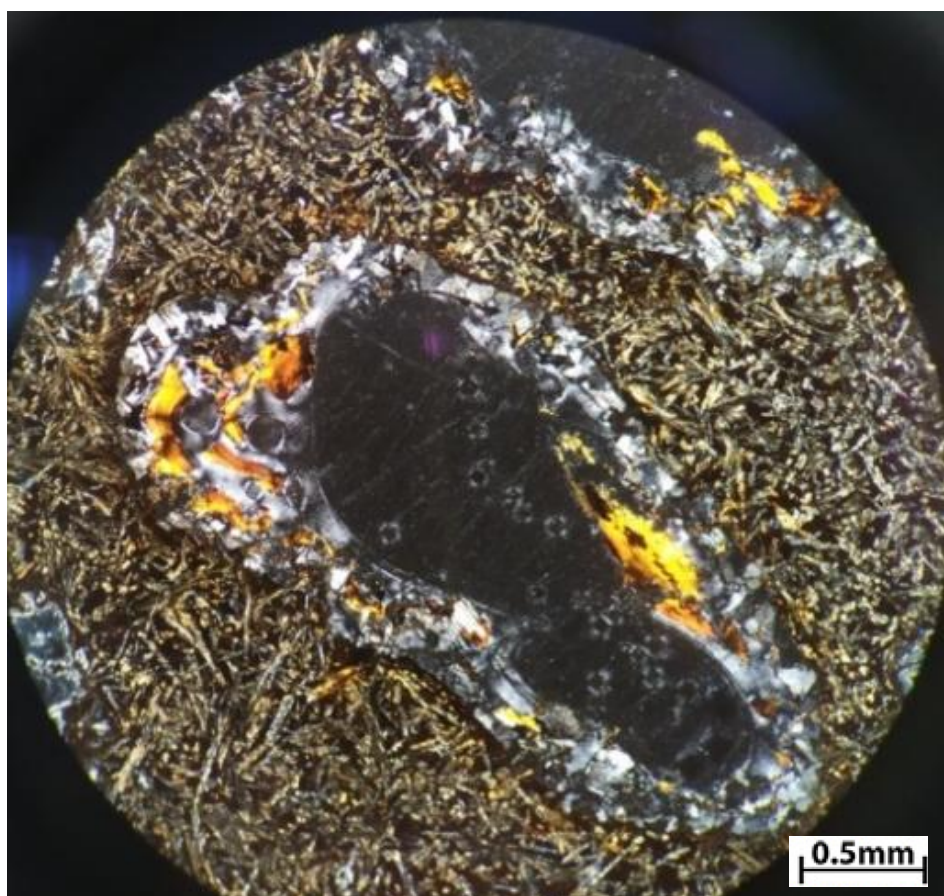
Fórmula	Z	Concentração	Status
SiO ₂	14	49,50%	XRF1
Fe ₂ O ₃	26	15,70%	XRF1
Al ₂ O ₃	13	13,50%	XRF1
CaO	20	3,99%	XRF1
MgO	12	2,11%	XRF1
K ₂ O	19	2,05%	XRF1
TiO ₂	22	1,79%	XRF1
Na ₂ O	11	0,93%	XRF1
P ₂ O ₅	15	0,21%	XRF1
MnO	25	0,14%	XRF1
BaO	56	450 PPM	XRF1
SrO	38	262 PPM	XRF1
CuO	29	255 PPM	XRF1
ZrO ₂	40	247 PPM	XRF1
ZnO	30	188 PPM	XRF1
SO ₃	16	94.2 PPM	XRF1
Rb ₂ O	37	80.4 PPM	XRF1
NiO	28	61.7 PPM	XRF1
Y ₂ O ₃	39	61.6 PPM	XRF1
Ag ₂ O	47	31.2 PPM	XRF1
Ga ₂ O ₃	31	22.1 PPM	XRF1
Nb ₂ O ₅	41	16.3 PPM	XRF1
Tb ₄ O ₇	65	1.27 PPM	XRF1

5.2 Descrição Petrográfica pela técnica de Microscopia Óptica

Por meio da metodologia petrográfica, foi possível analisar aspectos como: grau de cristalinidade, morfologia dos grãos, trama mineralógica, o tamanho relativo dos cristais e a caracterização dos poros.

Na Figura 23, pode-se notar uma vesícula preenchida parcialmente por zeólita, mineral secundário formado pela hidratação de silicatos de Al, Ca e Na, principalmente dos feldspatos e dos outros aluminossilicatos (ROSSETI *et al.*, 2019; BARRETO *et al.*, 2017).

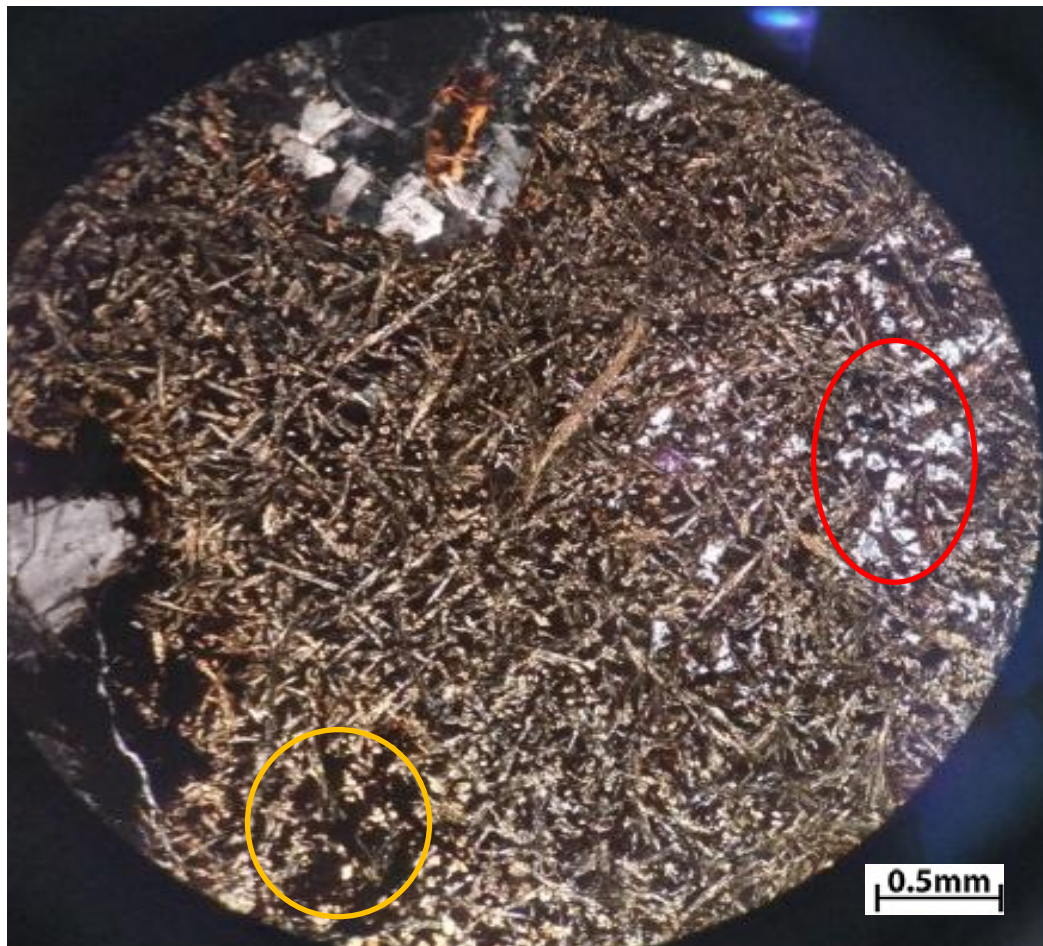
Figura 23: Vesículas parcialmente preenchidas por zeólita.



Na imagem da Figura 24, nota-se que a rocha é hipocristalina devido à presença de vidro e material cristalino. A granulometria da matriz é fina, microvesicular que varia de fina a média, formada por microfenocristais euédricos

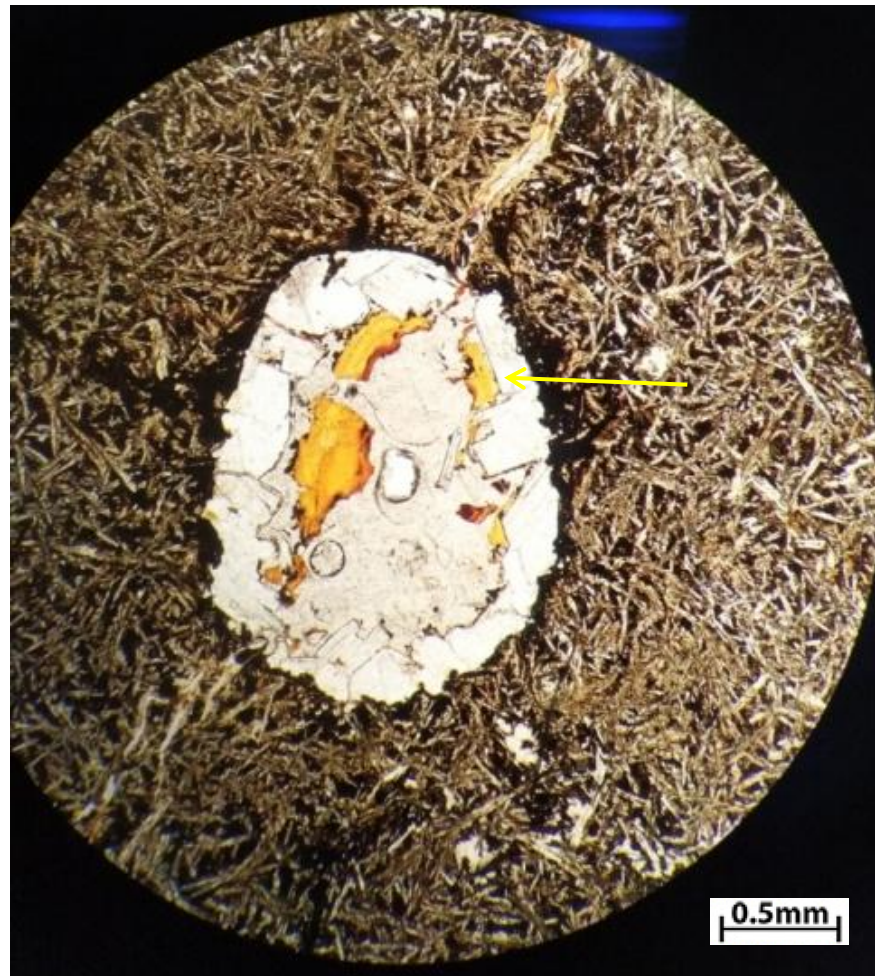
e subédricos de plagiocásio oxidado, com mineral intergranular (círculo vermelho). Nota-se a presença de plagioclásio em volta de alguns poros, caracterizando uma textura dikititaxítica (círculo laranja). Observa-se também a presença de cristais de augita incluindo ripas minúsculas, euédricas e subédricas de plagioclásio, caracterizando uma textura intergranular.

Figura 24: Granulometria da matriz, textura intergranular e dikititaxítica.



Na Figura 25 observa-se uma amígdala preenchida por zeólita. É possível identificar os grãos de zeólitas por meio do hábito prismático. No centro da cavidade, nota-se a presença de uma bolha de gás, que fez parte da reação química que formou a zeólita.

Figura 25: Amígdala totalmente preenchida por zeólita com hábito prismático (seta amarela).



5.3 Imagens do Microscópio de Varredura Eletrônica (MEV)

Por meio dos resultados das medidas no Microscópio de Varredura Eletrônica, foi possível analisar o relevo e a morfologia dos minerais constituintes da rocha.

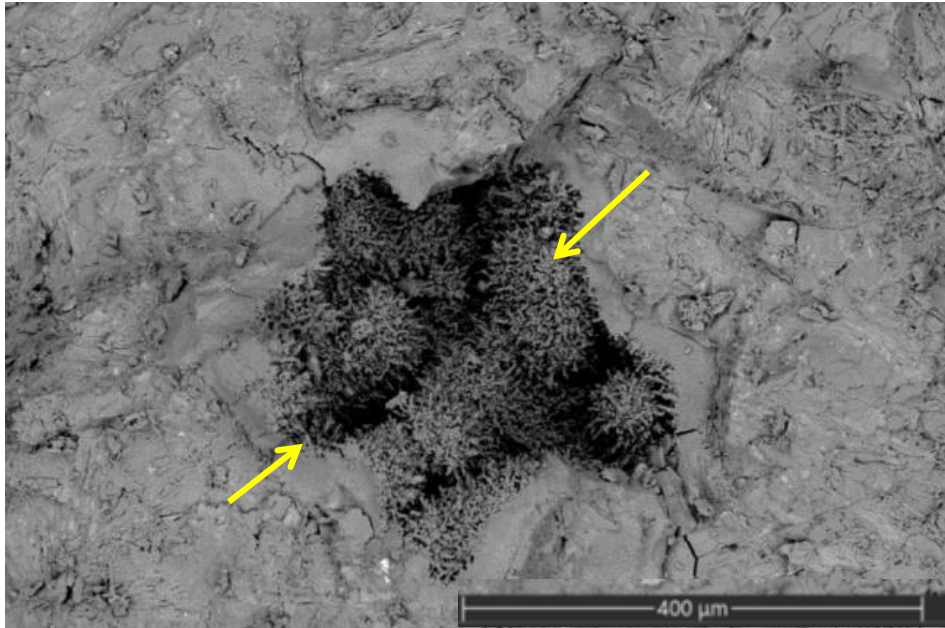
Na Figura 26, nota-se a presença de bolhas de gás remanescentes da formação da rocha. Tais bolhas resultam na formação de porosidade primária, nas vesículas (círculos amarelos). As vesículas podem ser observadas na Figura 26.

Figura 26: Vesículas resultantes do processo de porosidade primária.



Na Figura 26, pode-se observar uma zeólita, cujo hábito é fibro-radial, preenchendo totalmente uma vesícula, denominada amígdala. No entorno da amígdala, é possível notar a presença de microfraturas (setas amarelas). Uma amígdala preenchida também pode ser visualizadas na Figura 28, pela imagem obtida com MEV.

Figura 27: Amígdala preenchida totalmente por zeólita.



Na Figura 28, observam-se ripas minúsculas, euédricas e subédricas de plagiocásio. É notório um espaço entre os grãos de plagioclásio (seta amarela), evidenciando a textura intergranular. Nota-se também algumas microfaturas (seta laranja) e o processo de alteração do plagioclásio (seta vermelha), cujo produto pode preencher os poros e reduzir a permeabilidade da rocha.

Figura 28: Espaço angular entre os grãos de plagiocásio, alteração do plagioclásio e microfraturas.



5.4 Tomografia Industrial de raios gama de terceira geração

A Figura 29 ilustra a imagem reconstruída do Fantom multifásico com o intuito de converter o coeficiente de atenuação linear obtida experimentalmente em densidade. A partir dessa imagem, calculou-se a média do coeficiente de atenuação linear dos objetos constituintes do fantom, a saber:: PMMA ($\rho \approx 1,19 \text{ g/cm}^3$), ar ($\rho \approx 0,00122 \text{ g/cm}^3$), vidro ($\rho \approx 2,5 \text{ g/cm}^3$), alumínio ($\rho \approx 2,698 \text{ g/cm}^3$) e ferro ($\rho \approx 7,8740 \text{ g/cm}^3$). A seguir, correlacionou-se com suas respectivas densidades, como mostra a Figura 30.

Figura 29: Imagem reconstruída do Fantom multifásico.

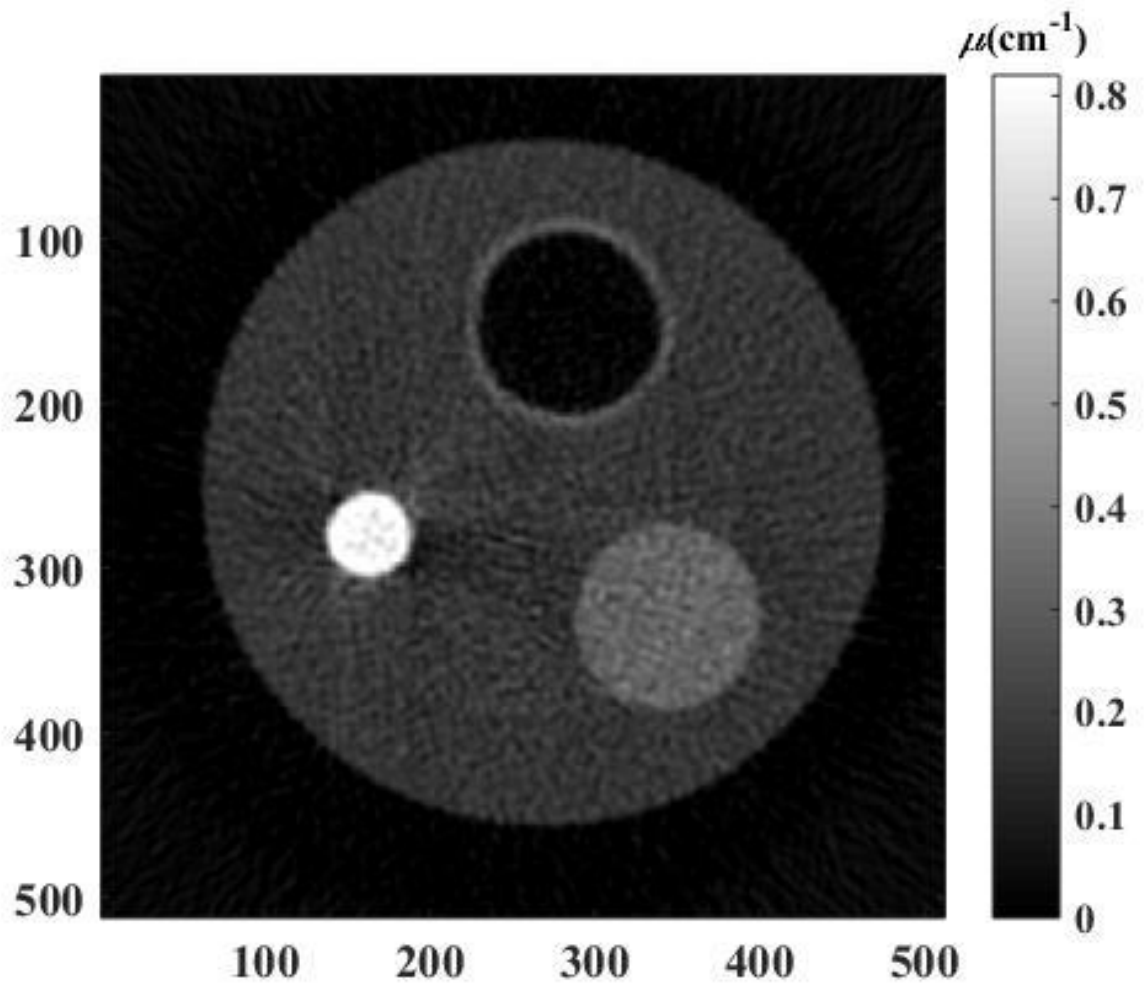
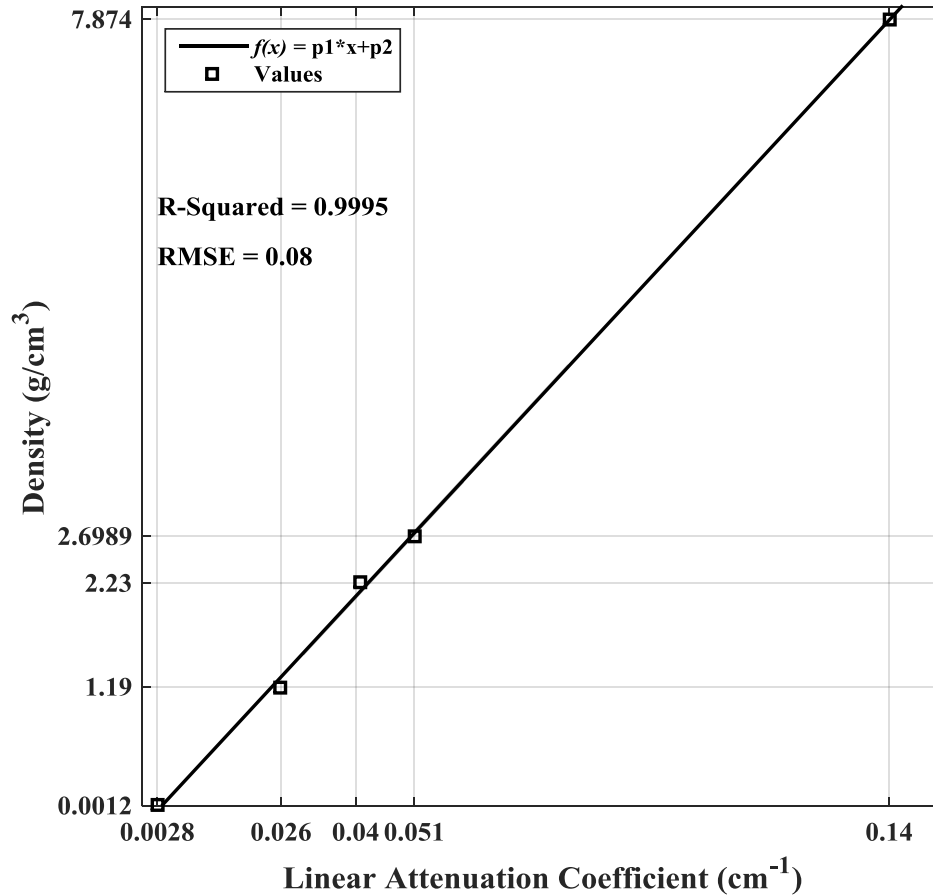
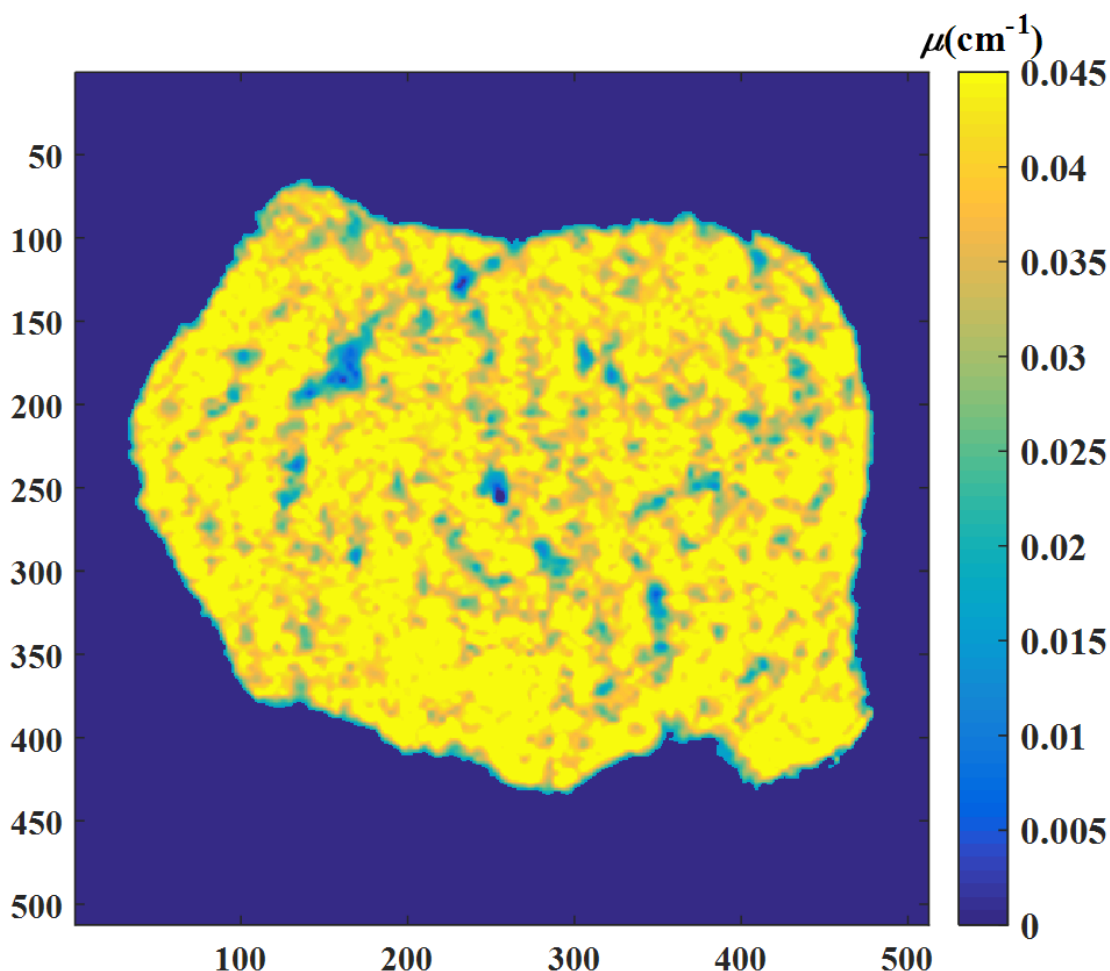


Figura 30: Gráfico do coeficiente de Atenuação Linear x Densidades.



A imagem reconstruída da amostra da rocha ígnea medidas, após sua coleta, é mostrada na Figura 31. O valor do índice da barra de cores representa o coeficiente de atenuação linear (μ (cm-1)). Foi obtida alta resolução espacial na configuração da tomografia com os parâmetros selecionados, como pode ser observado na Figura 31, embora com baixa resolução temporal, exigindo 17,5 horas para obter cada imagem tomográfica. A distribuição da porosidade e permeabilidade podem ser visualizadas na imagem da Figura 31, observando-se pequenas vesículas e as suas interconexões.

Figura 31: Imagem reconstruída da rocha vulcânica mostrando as interconexões entre as vesículas representadas pela cor azul



A partir da curva da correlação densidade x coeficiente de atenuação linear (Fig. 30), diferentes materiais de densidade podem ser avaliados na amostra de rocha. Na análise da composição mineral, algumas partículas com densidade de $2,5 \text{ g/cm}^3$ foram estimadas a partir da imagem reconstruída por inferência à curva apresentada na Fig. 30. As vesícula (em azul) podem ser claramente observados na imagem (Fig. 32), onde a água, os fluidos (solidificados ou no estado líquido) e o gás (ar) podem residir.

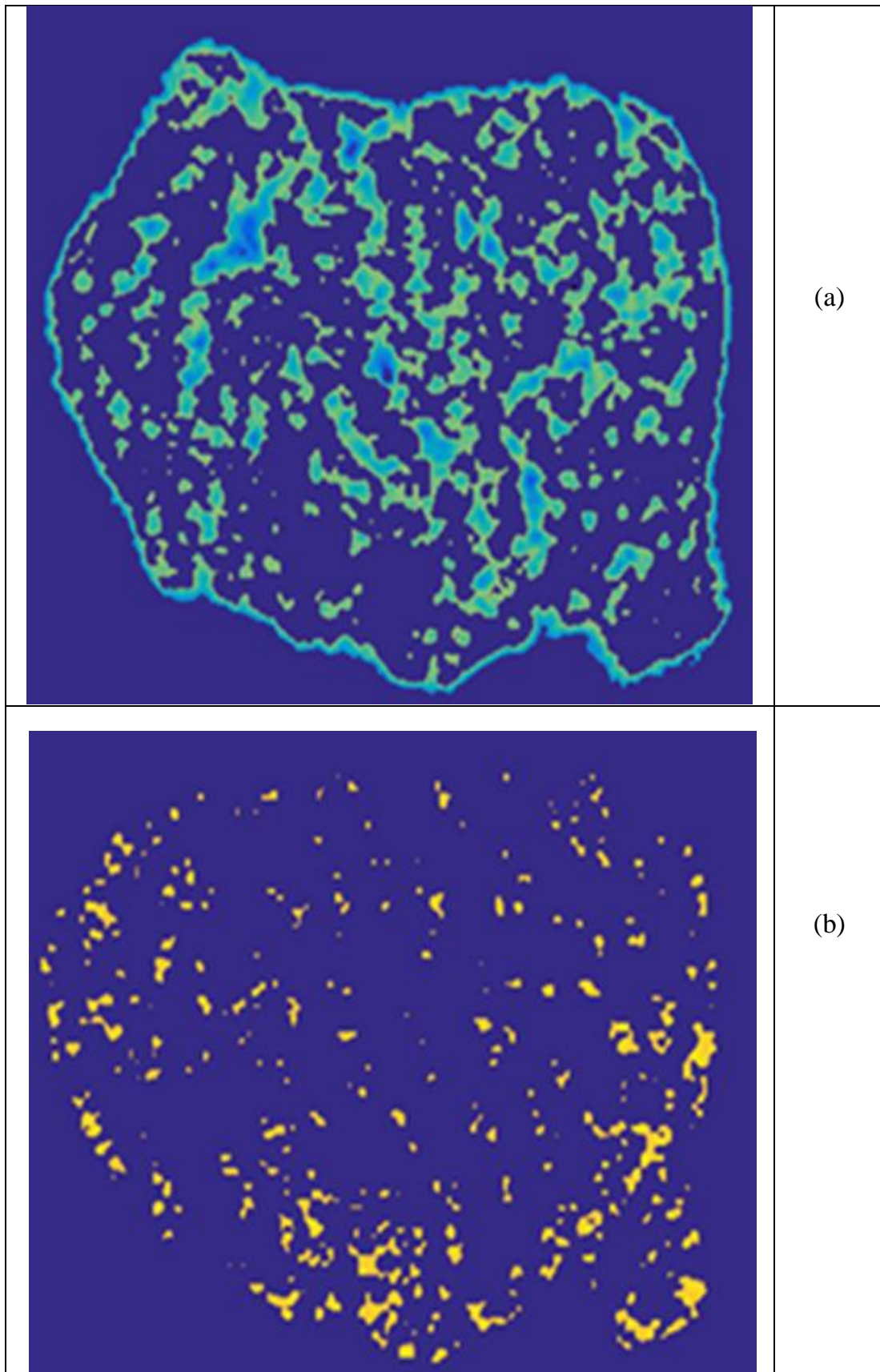
As imagens segmentadas dos minerais de densidade $2,64 \text{ g/cm}^3$ (Fig. 32a) e da vesícula (Fig. 32b) foram obtidas a partir da correlação do coeficiente de atenuação linear x densidade. A porcentagem de cada material foi obtida após a “binarização” da imagem, onde os pixels que pertencem à rocha foram

convertidos em 1 e os que não pertencem à rocha obtiveram o valor de 0. Dessa forma, foi possível atingir os números totais de pixels que pertencem à rocha. Posteriormente, a imagem sem os pixels que representam cada um dos materiais foi "binarizada", individualmente. Portanto, a diferença entre as duas imagens "binarizadas" fornece o número de pixels que representam cada material. Então, a porcentagem de cada material nas imagens foi calculada dividindo essa diferença pelo total número de pixels.

Os valores de densidade apresentados nas Figura 32b para vesículas com contraste azul escuro e com contraste azul claro foram estimados em torno de 0,0 e 1,0 (g/cm³), respectivamente, sugerindo que algumas vesículas são cheios de ar e outros contêm fluidos de densidade em torno de 1,0 g/cm³. A partir das imagens reconstruídas mostradas na Figura 32, pode-se inferir que as vesículas da rocha são apenas uma pequena parte do espaço total da rocha. A porcentagem de espaço vesicular em relação à área total da rocha foi estimada em aproximadamente 32,75% do plano amostrado pela medida tomográfica.

As vesículas e a sua interconectividade na rocha pode ser visto nitidamente nas imagens mostradas na Figuras 32. As vesículas isoladas, vesículas interconectadas, tamanho da garganta da vesícula, geometria da vesícula, conectividade e distribuição das vesículas podem ser observadas claramente. A porosidade é uma característica importante a ser conhecida, no entanto, apenas ela não é suficiente; o conhecimento de como os poros devem ser interconectados para permitir a passagem de fluido e gás através da rocha é essencial. Em outras palavras, a rocha deve ter permeabilidade. A porosidade e permeabilidade são os principais fatores que afetam a qualidade dos reservatórios e escoamento do fluido do interior da rocha.

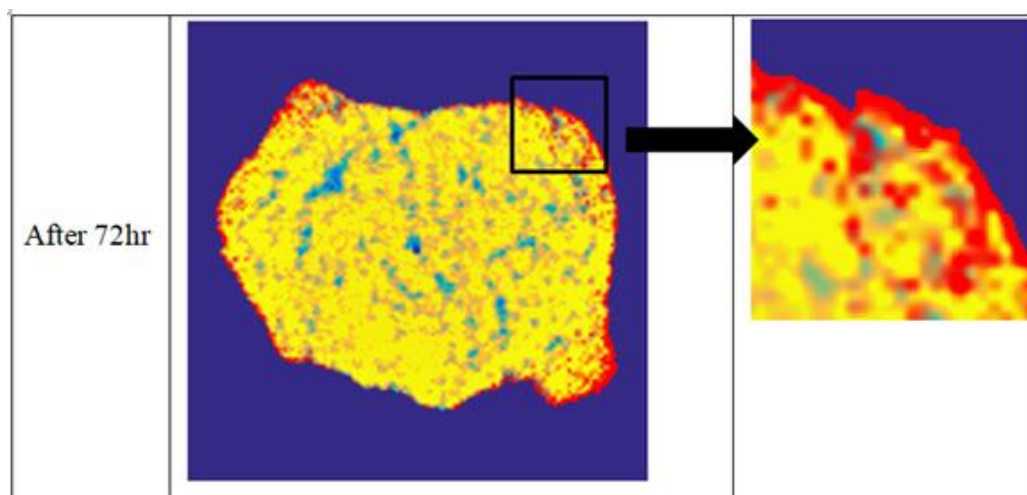
Figura 32: Imagem segmentada das vesículas (a) e de minerais próximos à densidade do Quartzo(b)



5.6 Ensaio de Permeabilidade

Foi realizado um ensaio de permeabilidade para observar o comportamento da infiltração da água no interior da rocha. A Figura 33 mostra a imagem reconstruída da rocha imersa em um recipiente com água por 72 horas. Nessa figura pode-se observar os espaços vazios contendo apenas o ar foi preenchida com água, que se moveu através dos poros interconectados, preenchendo o espaço vesicular com água. No entanto, a difusão da água é muito lenta, portanto, após 72 horas de imersão da rocha na água, praticamente o preenchimento das vesículas vazias com água ocorre apenas perto da borda da rocha. O acompanhamento da passagem da água entre as interconexões das vesículas deve ser realizado mais detalhadamente, por meio de medidas tomográficas em intervalos de tempos maiores até atingir o núcleo da rocha.

Figura 33: Imagem tomográfica da rocha imersa água durante 72 horas. A cor vermelha representa a vesícula preenchida com água e a interconexão entre elas.



5.7 Correlação entre os resultados dos métodos estudados.

Correlacionando as imagens obtidas pelas três técnicas, microscopia óptica, MEV e tomografia industrial de raios gama pode-se corroborar as interpretações das imagens obtidas utilizando um tomógrafo de terceira geração de radiação gama, desenvolvido no IPEN. A metodologia de tomografia industrial de raios gama para caracterização petrográfica de rochas vulcânicas vesiculares

foi desenvolvida pioneiramente neste trabalho, portanto comparar com os resultados obtidos pelas técnicas já consolidadas e convencionalmente utilizadas é de suma importância para validar uma nova metodologia proposta.

Os poros e as suas interconectividades podem ser vistos, claramente, nas Figuras 31, 32b e 34. A imagem da Figura 33 foi reconstruída da mesma amostra da rocha mostrada na Figura 31, porém, a fatia é tomografada à uma altura diferente da rocha. Pode-se observar a distribuição de poros quanto ao seu tamanho, geometria e interconectividade, nessas três figuras. Nota-se, também, que os valores do coeficiente de atenuação linear vão diminuindo das regiões mais periféricas na maioria das vesículas para o núcleo delas. Isso denota que as vesículas estão parcialmente ou totalmente preenchidas, pois o processo de preenchimento começa na sua borda e termina no núcleo (A. Pola *et al.*, 2012). Esta interpretação pode ser confirmada, também, nas imagens obtidas pelas técnicas de microscopia óptica e MEV, conforme apresentadas nas Figuras 34 e 35.

Figura 34: Imagem reconstruída da rocha vulcânica.

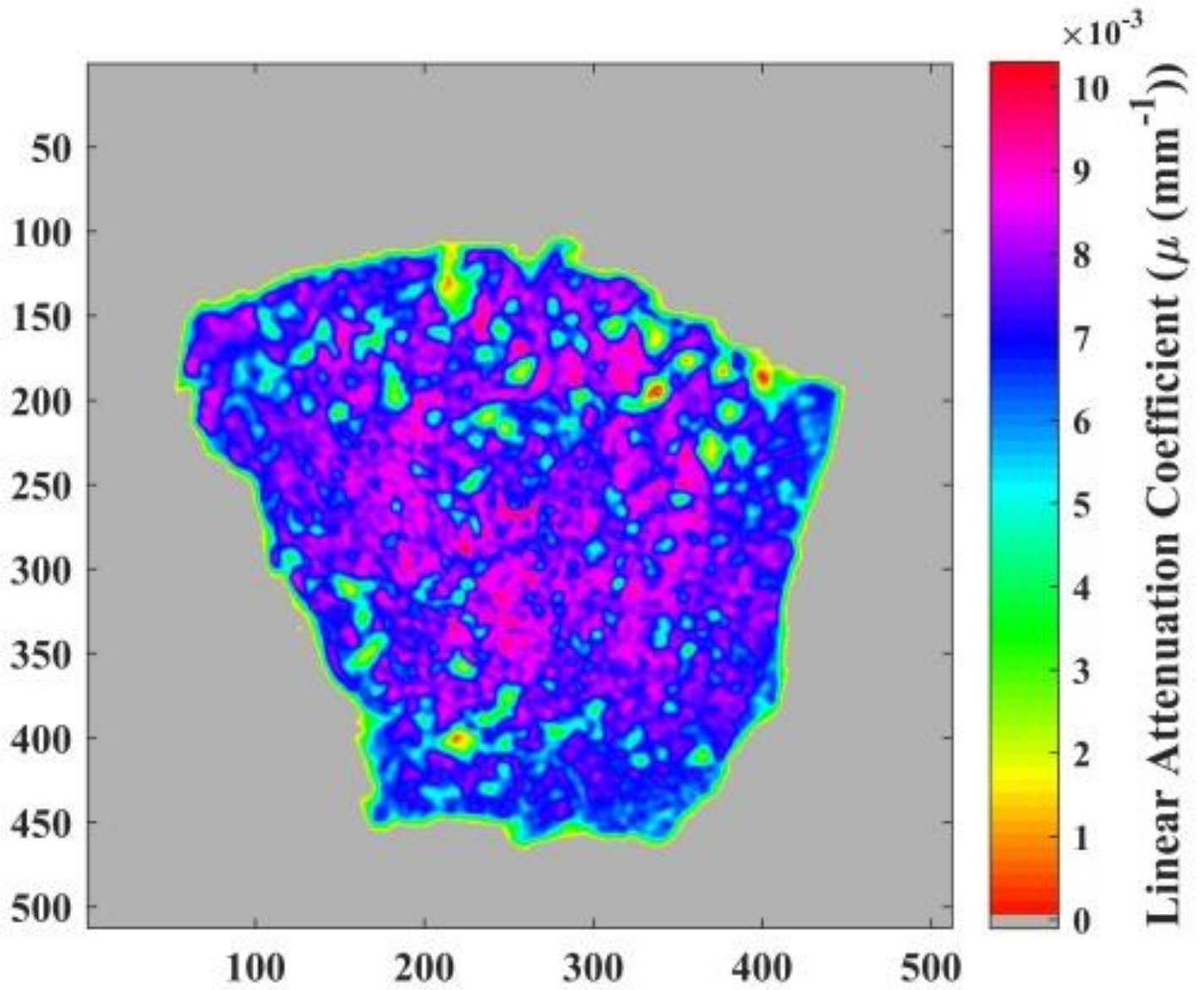


Figura 35: Vesícula parcialmente preenchida vista da imagem do microscópio óptico **(a)** e imagem do MEV indicada pela seta amarela**(b)**.

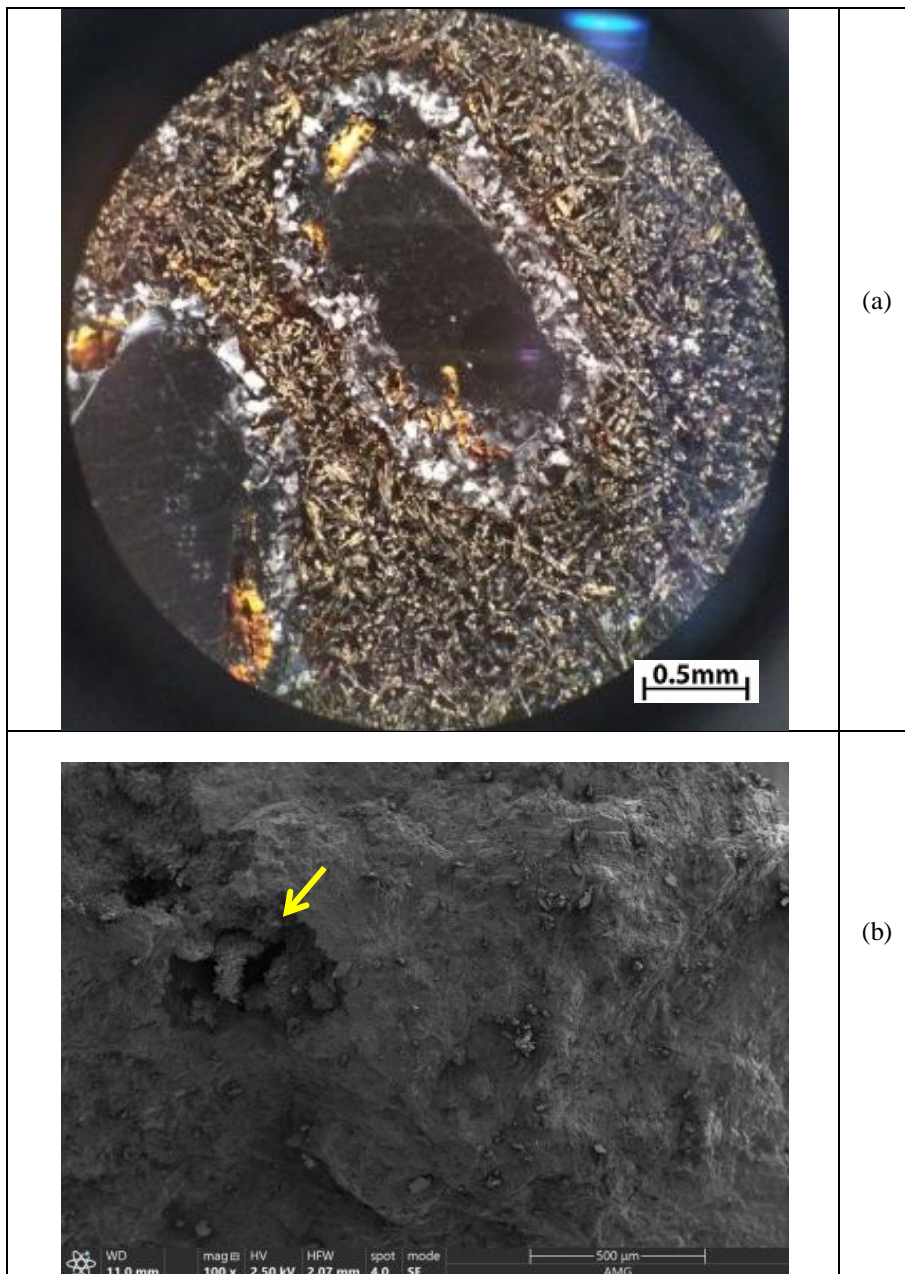
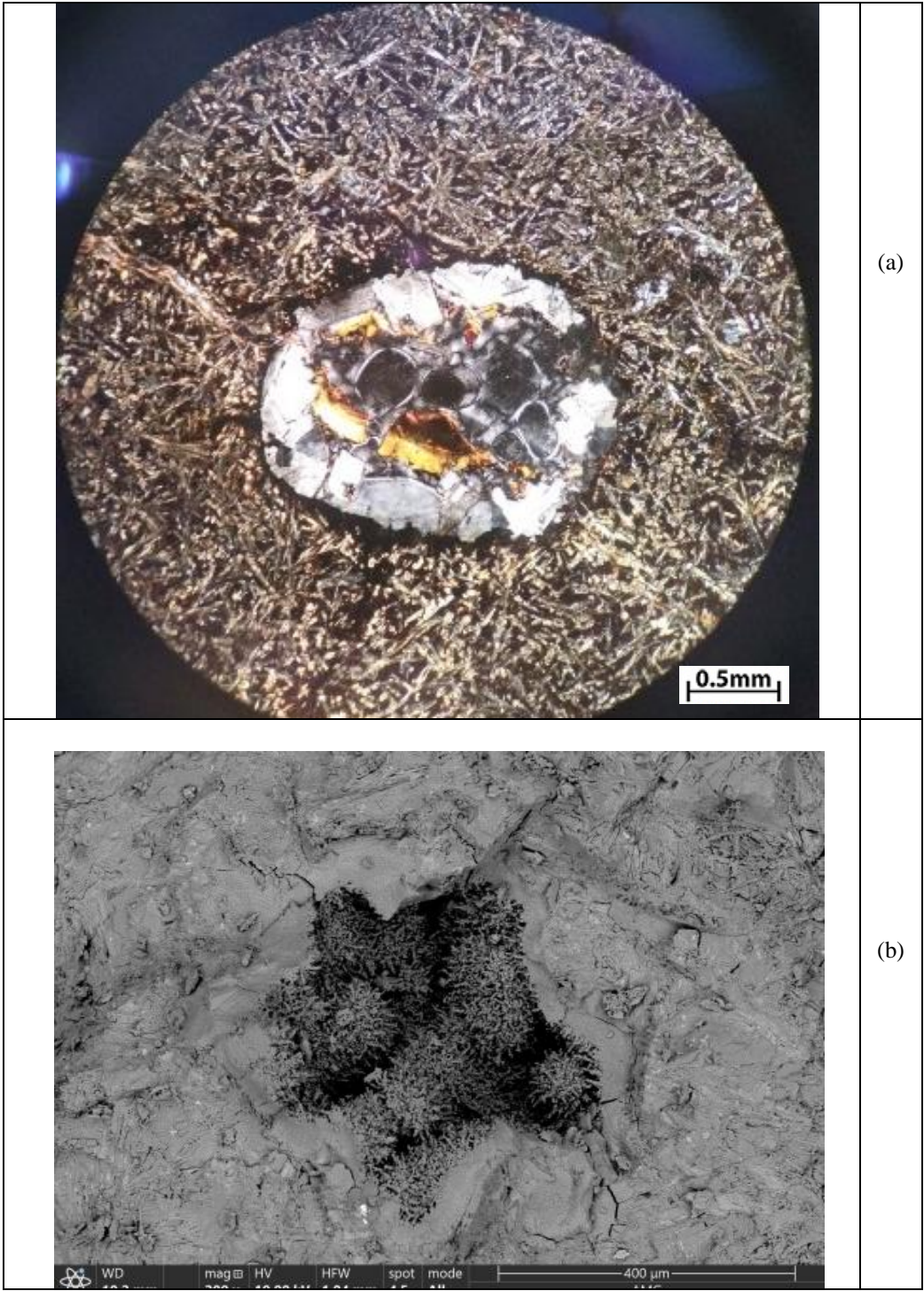


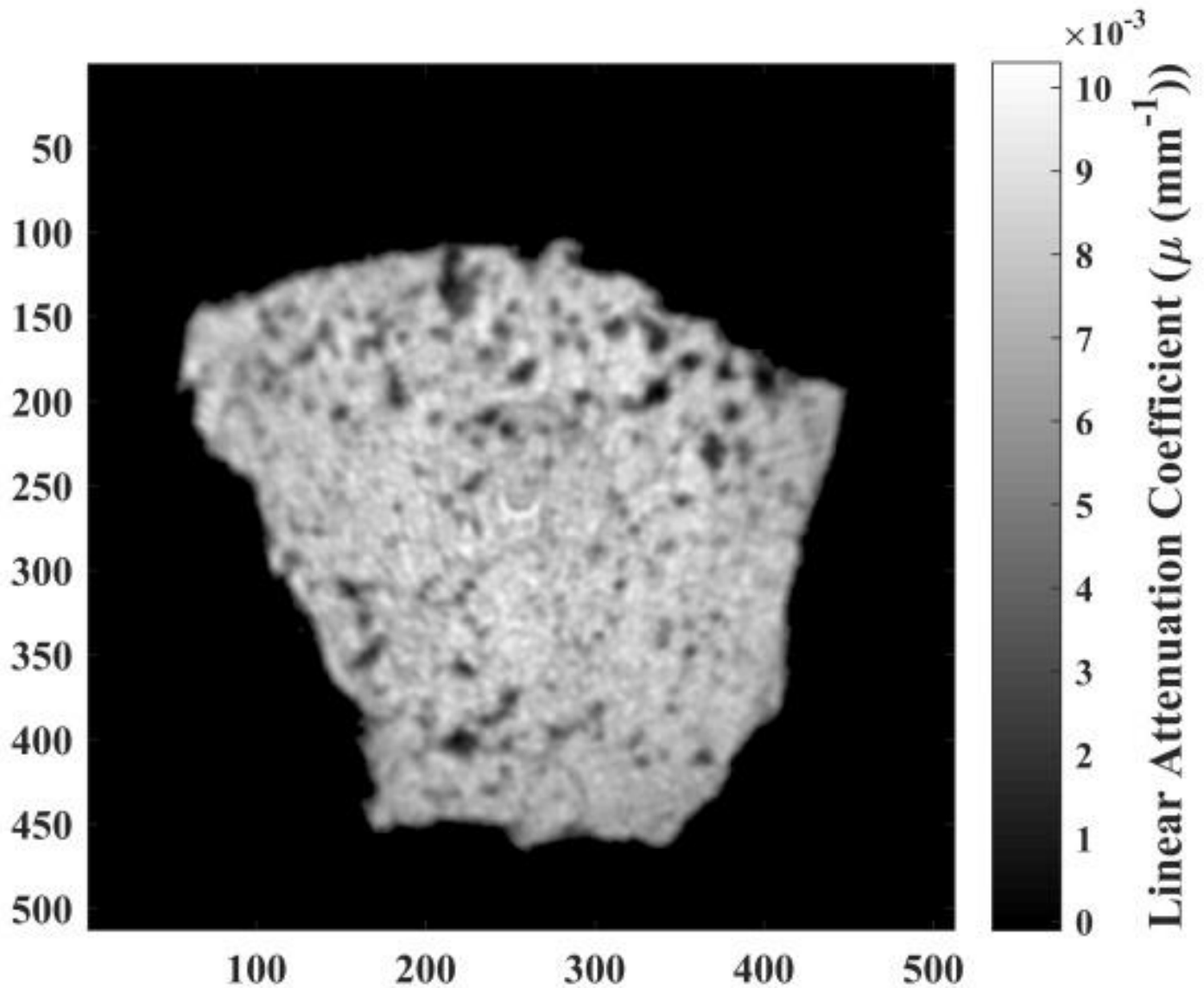
Figura 36: Imagem da vesícula preenchida obtida pela técnica de microscópio óptico (a) e MEV (b)



A imagem tomográfica da Figura 34 foi transformada em escala de cinza a fim de melhorar o contraste da imagem, como ilustrada na Figura 37. Pode-se observar que as vesículas, as suas interconexões e alguns resquícios de conexão entre os poros podem ser vistos com maior evidência. Tais resquícios, observados também nas imagens de microscopia óptica (Figura 35(a)) e MEV (Figura 32 (b)) podem evidenciar um processo de preenchimento das vesículas que ocorreu após a formação da rocha. Observa-se também que algumas vesículas estavam conectadas antes de serem preenchidas.

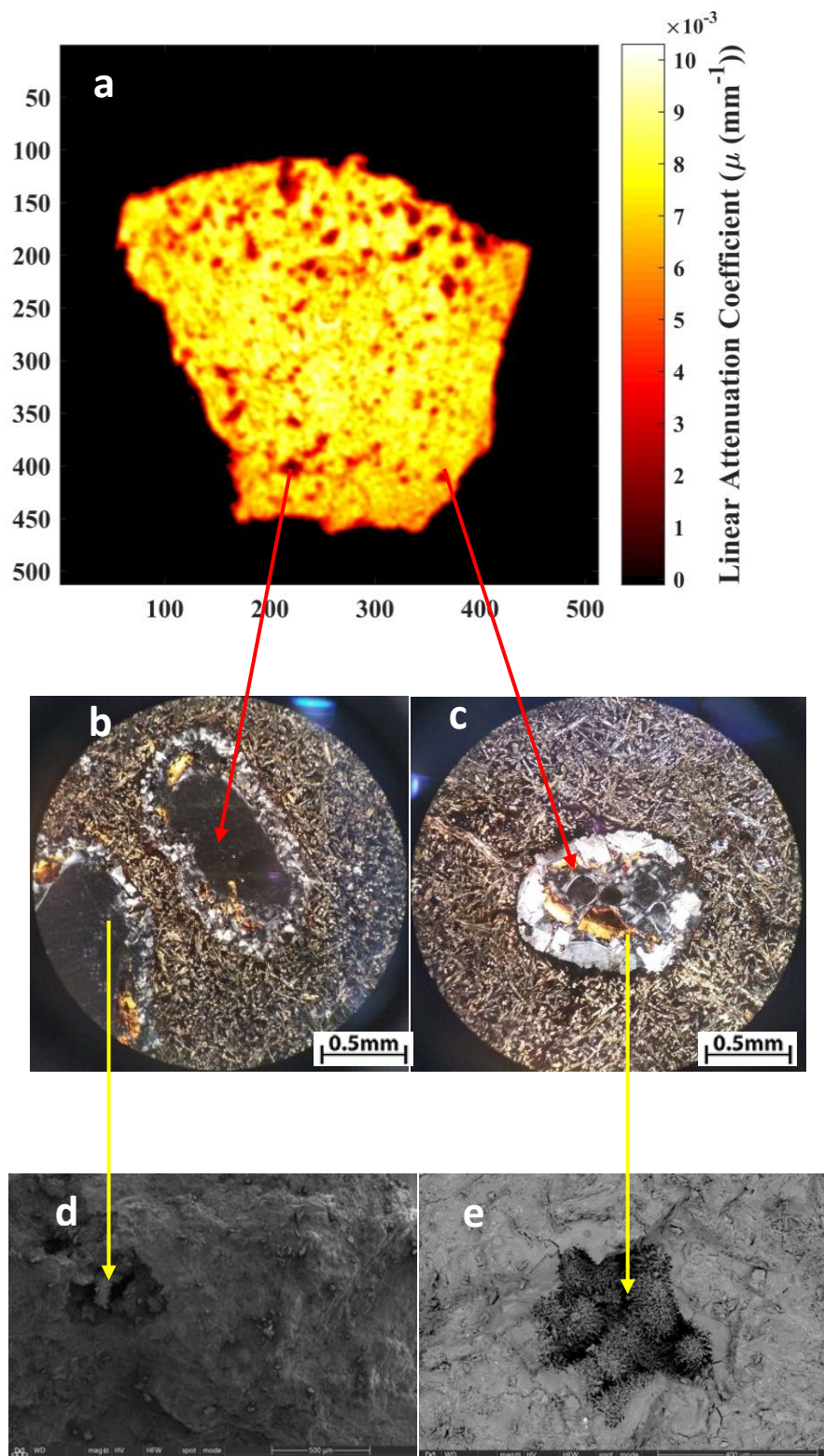
É possível observar alguns microporos e algumas interconexões nas Figura 36, o que favorece a permeabilidade da rocha. A microporosidade também pode estar relacionada ao espaço angular existentes entre os grãos de plagioclásio na matriz da rocha, conforme mostrado na Figura 37.

Figura 37: Imagem reconstruída evidenciando as interconexões entre as vesículas, representadas pela cor preta.



A figura 38, corrobora com os resultados da petrografia, o microscópio de varredura eletrônica e as imagens tomográficas. Nota-se que é possível observar como as vesículas estão parcialmente e totalmente preenchidas nos três métodos de caracterização.

Figura 38 : Correlação entre as imagens do microscópio óptico, o microscópio de varredura eletrônica e a tomografia industrial 3D de radiação gama (a) vesículas preenchidas totalmente e parcialmente ilustradas na imagem tomográfica; (b) vesículas preenchidas parcialmente nas imagens petrográfica e (c) no microscópio de varredura eletrônica (d) vesículas parcialmente preenchidas na imagem petrográfica e (e) no microscópio de varredura eletrônica.



5.8 Discussão sobre os resultados

A fluorescência de raios X foi de fundamental importância na identificação da paragênese mineral através da composição química e não identificadas pela petrografia, . A combinação desses dados forneceram suporte para entender os processos de porosidade primária e secundária.

As imagens obtidas pelas microscopia óptica e MEV permitiram obter imagens da morfologia dos grãos em grandes amplitudes, bem como visualizar o interior das vesículas e a sua forma de preenchimento, parcial ou total. Pode-se visualizar as vesículas parcialmente preenchida por zeolita, totalmente preenchida por zeólita (amígdala), as microfraturas em torno das vesículas e granulometria da matriz. Os poros existentes entre os grãos de plagioclásio, a alteração do plágiooclásio para argila pode preencher os poros e reduzir a permeabilidade da rocha.

Através da petrografia, foi possível estabelecer uma relação textural da rocha, observar a presença de matéria cryptocrystalino e a visualização dos processos de porosidade primária e secundária. Também é possível distinguir o tipo de porosidade na imagem tomográfica e o preenchimento pós-magmático dos poros através da variação do coeficiente de atenuação. Logo, a petrografia auxiliou na validação da técnica da tomografia nesse aspecto.

A presença de minerais secundários, tal como a esmectita nas cavidades dikitaxíticas da matriz cryptocristalinam e a zeólita reduz a porosidade e a permeabilidade da rocha, com uma ocorrência muito comum nas regiões de Guaporé e Vista Alegre do Prata..

Os diferentes tamanhos e geometrias das vesículas são consequências dos longos processos de resfriamento.

A caracterização da rocha pelos métodos convencionais como a fluorescência de raios X e a petrografia validaram a tomografia industrial 3D de radiação gama, que é um método de caracterização pioneiro em geociências. A análise das amostras em tamanho natural e por ser uma técnica não-destrutivo, são vantagens significativas do Tomógrafo Industrial 3D de Radiação Gama.

6 Conclusão

O trabalho é pioneiro no sentido de utilizar a tomografia por radiação gama para caracterizar a rocha vulcânica em tamanho real, cujo propósito de desenvolver uma metodologia para fornecer para fornecer parâmetros petrofísicos para esse litotipo foi iniciado.

A imagem bidimensional da seção da rocha, ilustrando a porosidade, foi obtida experimentalmente pelo tomógrafo por radiação gama. Logo, foi possível descrever o tamanho, a geometria e visualizar a interconectividade entre as vesículas.

Através da obtenção do coeficiente de atenuação linear do fantom, composto por materiais com valores de densidade já conhecidos, foi possível determinar as densidades dos minerais que constituem a rocha.

As propriedades mineralógicas da rocha obtidas pela petrografia e pelo MEV, como a trama mineralógica e a morfologia dos cristais, foram fundamentais para interpretar a imagem da seção tomográfica.

Para estudos futuros, pretende-se:

- Aplicar uma metodologia para injetar fluidos na rocha para estudos de permeabilidade;
- Obter experimentalmente a imagem 3D por meio da tomografia por radiação gama;
- Estudar, por difração de raios X e fluorescência de raios X, os minerais secundários que preenchem as vesículas.

REFERÊNCIAS

- 1 **Aplicações de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e Sistema de Energia Dispersiva (EDS) no Estudo de Gemas: exemplos brasileiros** Lauren da Cunha Duarte, Pedro Luiz Juchem, Gênova Maria Pulz, Tânia Mara Martini de Brum, Nelson Chodur, Antônio Liccardo, Adriane Comin Fischer, Roberta Bonatto Acauan Pesquisas em Geociências, 30 (2): 3-15, set./dez., 2003.
- 2 A Laboratory Manual for X-Ray Powder Diffraction: X-Ray Diffraction Primer, <https://pubs.usgs.gov/of/2001/of01-041/htmldocs/xrpd.htm> (19/03/2021 às 1:53)
- 3 Barreto, C.J.S., de Lima, E.F. & Goldberg, K. Primary vesicles, vesicle-rich segregation structures and recognition of primary and secondary porosities in lava flows from the Paraná igneous province, southern Brazil. *Bulletim of Vulcanology*, April 2017.
- 4 Bellieni G., Comin-Chiaramonti, P., Marques, L.S., Melfi, A.J., Nardy, A.J.R., Papatrechas, C., Piccirillo, E.M., Roisenberg, A., Stolfa, D. 1986. Petrogenetic aspects of acid and basaltic lavas from the Paraná plateau (Brazil): mineralogical and petrochemical relationships. *Journal of Petrology*, 27:915 944.
- 5 Buckland, H. M., Eychenne, J., Rust, A. C., & Cashman, K. V. Relating the physical properties of volcanic rocks to the characteristics of ash generated by experimental abrasion. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 349, 335–350, 2018.
- 6 BAKER, D. R. *et al.* An introduction to the application of X-ray microtomography to the three-dimensional study of igneous rocks. **Lithos**, v. 148, p. 262–276, 2012. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.lithos.2012.06.008>>.
- 7 CNUUDE V. M., J. BOONE, DIERICK M., VAN HOOREBEKE L. , JACOBS P. 3D characterization of sandstone by means of X-ray computed tomography. *Geosphere* 7 (1): 54-61, 2011.
- 8 COLOMBIER, M. *et al.* The evolution of pore connectivity in volcanic rocks. **Earth and Planetary Science Letters**, v. 462, p. 99–109, 2017.
- 9 Corrêa, J. C. Caracterização das propriedades físicas do solo Arenítico da Formação Botucatu – na Região da Cidade de Bofete – SP / João Carlos Corrêa; orientadora Margarida Mizue Hamada. – São Paulo, 2019. 81 p.

10 DE MESQUISTA, CARLOS HENRIQUE; DE SOUSA CARVALHO, DIEGO VERGAÇAS; KIRITA, RODRIGO; VASQUEZ ANTÔNIO S., HAMADA, MARGARIDA MIZUE. Gas-liquid distribution in a bubble column using industrial, gamma-ray computed tomography. *Radiation Physics na Chemistry* v.95, p. 396-400, 2014.

11 DUARTE, LAUREN DA CUNHA et al. Aplicações de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e Sistema de Energia Dispersiva (EDS) no Estudo de Gemas: exemplos brasileiros. **Pesquisas em Geociências**, Porto Alegre, v. 30, n. 2, p. 3-15, dez. 2003. ISSN 1807-9806. Disponível em: <<https://seer.ufrgs.br/PesquisasemGeociencias/article/view/19585>>. Acesso em: 15 ago. 2021. doi:<https://doi.org/10.22456/1807-9806.19585>.

12 DE MESQUITA, C. H.; VELO, A. F.; CARVALHO, D.V.S.; MARTINS, F. F. T.; HAMADA, M. M. Industrial tomography using three different gamma ray. *Flow Measurement and Instrumentation*, v. 47, p. 1-9, 2016.

13 FADERANI, S.; TFIZFIN, U. Discharge and transport of nearly buoyant granular solids in liquids Part I: Tomographic study of the interstitial voidage effects governing flow regimes. *Ind. Chem. Eng. Sci.*, v. 53, n. 3, p. 553-574, 1998.

14 FAROOQUI, M. Y. *et al.* Evaluating volcanic reservoirs. **Oilfield Review**, v. 21, n. 1, p. 36–47, 2009.

15 FRANK, H. T.; GOMES, M. E. B.; FORMOSO, M. L. L. Review of the areal extent and the volume of the Serra Geral Formation, paraná Basin, South America. **Pesquisas em Geociências**, v. 36, n. 1, p. 49–57, 2009.

16 Frank Press, *et al.*, Para entender a terra. Ed. Bookman, Porto Alegre, 2006. 656 p.

17 Geochemical Instrumentation and Analysis: X-Ray Fluorescence (XRF), https://serc.carleton.edu/research_education/geochemsheets/techniques/XRF.html (17/03/2021 às 2021)

18 H. L. Garcia, R. Caracterização e quantificação das fases em ligas de urânio-silício para aplicação como combustível nuclear. 2019. 200f. Tese (Doutorado em Ciências na Área de Tecnologia Nuclear – Materiais), p. 72.

19 J.P. Sertek. Estudo das contaminações provenientes do processo de cominuição de amostras geológicas. 2010. 185f. Dissertação (Mestrado em Mineralogia e Petrologia) – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo,

São Paulo.

20 JERRAM, D. A.; WIDDOWSON, M. The anatomy of Continental Flood Basalt Provinces: geological constraints on the processes and products of flood volcanism. v. 79, p. 385–405, 2005.

21 Jerram, Dougal. Introdução à vulcanologia / Dougal Jerram; [tradução Breno Leirão Waichel]. --São Paulo: Oficina de Textos, 2018.

22 JINGHONG, W. *et al.* Characteristics and controlling factors of fractures in igneous rock reservoirs. **Petroleum Exploration and Development**, v. 38, n. 6, p. 708–715, 2011. Disponível em: <[http://dx.doi.org/10.1016/S1876-3804\(12\)60005-6](http://dx.doi.org/10.1016/S1876-3804(12)60005-6)>.

23 Klein, C.; Dutrow, B. Manual de Ciências dos Minerais. Ed. Bookman, Porto Alegre, 2012, p. 574.

24 L. M. Rossetti, D. Healyb, M. J. Holeb, J. M. Millett, E.F. de Lima, D. A. Jerram, M.M. Rossetti. Evaluating petrophysical properties of volcano-sedimentary sequences: A case study in the Paraná-Etendeka Large Igneous Province, Marine and Petroleum Geology 102 (2019) 638–656.

25 Manual de ciência dos minerais / Cornelis K. Jein, Barbara Dutrow ; tradução e revisão técnica: Rualdo Menegat.- 23. ed.PortoAlegre : Bookman, 2012.

26 Mineral, C. D. T., Bertolino, L. C., & Janeiro, R. De. (2010). *Caracterização Mineralógica de Minérios*. 3(Parte I).

27 MILANI, E.J., ASSINE, M.L. & SOARES, P.C,1993. A seqüência ordovício-siluriana da Bacia do Paraná. Submetido ao Boletim de Geociências da PETROBRÁS

28 MILANI, E. J. *et al.* Bacia do Paraná. **Boletim de Geociências - Petrobras**, n. September 2014, 2007.

29 MILANI, E. J.; RAMOS, V. A. Orogenias Paleozóicas No Domínio Sul-Occidental Do Gondwana E Os Ciclos De Subsidência Da Bacia Do Paraná. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 28, n. 4, p. 473–484, 1998.

30 Palermo, N.; Coelho, M. R. C. Laboratório geológico de processamento de amostras: procedimentos técnicos. p. 5. Sindicato Nacional dos Editores de Livros – Rio de Janeiro: UERJ, Centro de Tecnologia e Ciências, 2009.

- 31** PEYERL, D. O petróleo no Brasil: exploração, capacitação técnica e ensino de geociências (1864-1968) [online]. São Bernardo do Campo, SP: Editora UFABC, 2017, pp. I-XVIII. ISBN 978-85-68576-78-6. <https://doi.org/10.7476/9788568576786>.
- 32** PEYERL, D.; DE MENDONÇA FIGUEIRÔA, S. F. Applied geophysics in Brazil and the development of a national oil industry (1930 - 1960). *History and Technology*, v. 36, n. 1, p. 83–104, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1080/07341512.2020.1765618>>.
- 33** REIS, G. S. *et al.* Formação Serra Geral (Cretáceo da Bacia do Paraná): um análogo para os reservatórios ígneo-básicos da margem continental brasileira. *Pesquisas em Geociências*, v. 41, n. 2, p. 155, 2014.
- 34** Robbin Gill, *et al.*, Rochas e Processos Ígneos. Ed. Bookman, Porto Alegre, 2014. 2 -33 p.
- 35** SHOLLENBERGER, K.A.; TORCZYNSKI, J. Gamma-densitometry tomography of gas holdup spatial distribution in industrial-scale bubble columns. *Chem. Eng. Sci.*, v. 52, n. 11, p. 2037-2047, 1997.
- 36** SCHUTTER, S. R. Hydrocarbon occurrence and exploration in and around igneous rocks. *Geological Society Special Publication*, v. 214, p. 7–33, 2003.
- 37** VELO A.F.; ALVAREZ A. G., CARVALHO D.V.S.; FERNANDEZ V., SOMESSARI S., SPRENGER F. F., HAMADA M.M. AND MESQUITA C.H. A third generation tomography system with fifteen detectors and a gamma-ray source in fan beam geometry simulated by Monte Carlo Method. *Brazilian Journal on Radiation Sciences*, v. **7(2)**, p. **1-10**, **2019**].
- 38** Velo, A. F.; Carvalho, D. V.; Alvarez, G. A.; Hamada, M. M. and Mesquita, C. H. (2017) - Evaluation of iterative algorithms for tomography image reconstruction – A study using a third generation industrial tomography version. *International Nuclear Atlantic Atlantic Conference*, Belo Horizonte, MG.

INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES
Diretoria de Pesquisa, Desenvolvimento e Ensino
Av. Prof. Lineu Prestes, 2242 – Cidade Universitária CEP: 05508-000
Fone/Fax(0XX11) 3133-8908
SÃO PAULO – São Paulo – Brasil
<http://www.ipen.br>

O IPEN é uma Autarquia vinculada à Secretaria de Desenvolvimento, associada à Universidade de São Paulo e gerida técnica e administrativamente pela Comissão Nacional de Energia Nuclear, órgão do Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações.
