



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENERGIA NUCLEAR
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE ENERGIA

BRUNO FELIPE DE CARVALHO

**CARACTERIZAÇÃO PETROFÍSICA DE ROCHAS ÍGNEAS DA FAIXA COSTEIRA
DA BACIA DE PERNAMBUCO: APLICAÇÃO AO ARMAZENAMENTO
GEOLÓGICO DE CO₂**

RECIFE
2025



CARACTERIZAÇÃO E SIMULAÇÃO DE RESERVATÓRIOS, ENERGIAS RENOVÁVEIS
E BIOTECNOLOGIA AMBIENTAL

Apoio



Gestão



Autor: _____
Bruno Felipe de Carvalho

**CARACTERIZAÇÃO PETROFÍSICA DE ROCHAS ÍGNEAS DA FAIXA COSTEIRA
DA BACIA DE PERNAMBUCO: APLICAÇÃO AO ARMAZENAMENTO
GEOLÓGICO DE CO₂**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia de Energia da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Energia.

Orientador: _____

Prof. Dr. Antonio Celso Dantas Antonino

Universidade Federal de Pernambuco

Coorientador: _____

Prof. Dr. José Antonio Barbosa

Universidade Federal de Pernambuco

Recife

2025

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do programa de geração automática do SIB/UFPE

Carvalho, Bruno Felipe de.

Caracterização petrofísica de rochas ígneas da faixa costeira da Bacia de Pernambuco: aplicação ao armazenamento geológico de CO₂ / Bruno Felipe de Carvalho. - Recife, 2025.

61 : il., tab.

Orientador(a): Antonio Celso Dantas Antonino

Coorientador(a): José Antonio Barbosa

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, Engenharia de Energia - Bacharelado, 2025.

Inclui referências.

1. Microtomografia de raios X. 2. Rochas vulcânicas. 3. Mineralização de CO₂. 4. Armazenamento geológico. 5. Propriedades petrofísicas. 6. Bacia de Pernambuco. I. Antonino, Antonio Celso Dantas. (Orientação). II. Barbosa, José Antonio. (Coorientação). IV. Título.

620 CDD (22.ed.)

BRUNO FELIPE DE CARVALHO

**CARACTERIZAÇÃO PETROFÍSICA DE ROCHAS ÍGNEAS DA FAIXA COSTEIRA
DA BACIA DE PERNAMBUCO: APLICAÇÃO AO ARMAZENAMENTO
GEOLÓGICO DE CO₂**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Curso de Engenharia de
Energia da Universidade Federal de
Pernambuco, como requisito parcial para
obtenção do título de Bacharel em
Engenharia de Energia.

Aprovado em: 11/08/2025

BANCA EXAMINADORA

MSc. Aline Macrina da Silva
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dr. Alexandre Carlos Araújo da Costa
Universidade Federal de Pernambuco

AGRADECIMENTOS

Nada disso seria possível sem meus pais, Uarles e Priscilla, que sempre acreditaram em mim e abdicaram de muito para que eu chegasse aqui. Obrigado por me darem forças nessa jornada, por todo o esforço e compreensão nesses anos, por serem meu apoio e minha base. A distância e o tempo longe valeram a pena.

À minha irmã, Lara, por quem eu tento ser minha melhor versão, obrigado por todos os finais de semana de descontração, mesmo depois de semanas sem nos vermos.

Aos meus tios, tias e avós que ainda estão aqui, e *in memoriam* a Uelminton e Terezinha. Sei o quanto todos sempre torceram e me apoiaram, e finalmente posso dizer que consegui terminar para orgulhar vocês.

Aos meus irmãos de coração, Arthur, Décio, Gustavo e João, um obrigado por, mesmo longe, ainda sempre acharmos uma forma de rir juntos.

Ao meu padrinho, Uranilson, por ser meu segundo pai e minha referência dentro da sala de aula. Espero um dia ser um porta-voz de conhecimento tão bom quanto você.

Seria impossível agradecer nominalmente a todos que participaram de minha vida universitária, mas não seria justo não citar quem foi tão importante nessa longa jornada. À Letícia e Maxchiela, junto de Arthur, que estiveram comigo em todos os momentos da Área II até a transferência interna. À Luana, por todos os puxões de orelha, pelo companheirismo e por nossa amizade, mesmo diante de diversas situações, passamos e passaremos por muita coisa. À Emilly e Anny, quem eu tenho muito carinho por serem minhas primeiras amigas. À Júlia, por ter me acolhido e me incentivado a viver novas experiências. A Erick, Lucas Paes, Rafael e Welison, por serem os caras. Aos que não citei, mas sabem que estiveram comigo, guardo todos no coração e agradeço profundamente.

À Giovanna, por todo carinho e amor. Obrigado por toda a compreensão nos momentos difíceis e por ser meu refúgio quando mais precisei. E a Theo, por ser meu companheirinho de filmes de sexta à noite. Aprender sobre todas as espécies de dinossauros e provar as mais diferentes culinárias têm muito valor.

À Liz, a caçula da família, por todos os nossos momentos juntos. Cuidei e cuidarei por toda a vida de você.

Aos meus orientadores, Antonio Antonino e José Antonio Barbosa, que confiaram em mim e me ajudaram bastante no decorrer dos últimos 3 anos. Trabalhar com eles foi fundamental para meu crescimento.

Ao LTCRX, onde pude me desenvolver como pesquisador e me encontrar no meio acadêmico. Em especial a Daniel e Raquel, como sempre digo, meus mestres. Obrigado pelo senso crítico, por me apoiarem, por acreditarem que eu poderia fazer melhor sempre e por serem imprescindíveis em todas as conquistas que tive. Minhas viagens, prêmios e artigos, saíram com ajuda deles. Às visitantes que viraram parte de lá, Aline e Victória, obrigado por todo apoio acadêmico e por me ensinarem tanto desse mundo.

À Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis – ANP e à Financiadora de Estudos e Projetos – FINEP, por meio do Programa de Formação de Recursos Humanos da ANP para o Setor de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis – PRH-ANP/FINEP, pelo apoio financeiro, suportado com recursos provenientes do investimento de empresas petrolíferas qualificadas na Cláusula de P, D&I da Resolução ANP Nº 50/2015. Em particular ao PRH 48.1 “Caracterização e Simulação de Reservatórios, Energias renováveis e Biotecnologia Ambiental” (PROCESSO ANP Nº 48610.201019/2019-38), do Departamento de Energia Nuclear do Centro de Tecnologia e Geociências da UFPE, pelo apoio financeiro.

A todos que contribuíram, de forma direta ou indireta, com esse trabalho e todo meu crescimento pessoal e profissional, muito obrigado!

“São demônios, os que destroem o poder bravo da humanidade [...]”. (CHICO SCIENCE, Monólogo ao Pé do Ouvido, 1994).

RESUMO

A transição para uma economia de baixo carbono requer um maior avanço na redução das emissões, sobretudo frente à continuidade do uso de hidrocarbonetos nas próximas décadas. O armazenamento geológico de CO₂ baseado no mecanismo de mineralização em rochas vulcânicas apresenta vantagens em termos de custo e segurança em relação a outros meios geológicos. Este trabalho investigou rochas da Suíte Magmática Ipojuca, na Bacia de Pernambuco, uma região estratégica pela proximidade de fontes emissoras de CO₂. O estudo focou em três litologias: traquitos, traquiandesitos e basaltos, e se baseou em análises petrofísicas e de Microtomografia de raios X (μ CT). Os traquitos apresentaram os melhores valores de porosidade, e todas as litologias apresentaram valores de permeabilidade menores que 0,01 mD. As amostras de basalto apresentaram maior teor de minerais ricos em Fe e Mg, como a olivina, essenciais ao processo de mineralização do Carbono. As análises de rocha digital permitiram investigar aspectos do tipo de porosidade das rochas, incluindo a microporosidade. O estudo mostrou que basaltos e traquiandesitos apresentam matriz maciça e dominância de microporosidade, enquanto traquitos alterados apresentam porosidade associada a dissolução de fenocristais milimétricos a centimétricos. O estudo permitiu avaliar propriedades de reservatório dessas rochas que podem auxiliar futuros projetos voltados para o armazenamento de CO₂ na faixa costeira da bacia.

Palavras-chave: microtomografia de raios X; rochas vulcânicas; mineralização de CO₂; armazenamento geológico; propriedades petrofísicas; Bacia de Pernambuco.

ABSTRACT

The transition to a low-carbon economy demands further progress in emission reduction, especially considering the continued use of hydrocarbons in the coming decades. Geological CO₂ storage through mineralization in volcanic rocks offers advantages in terms of cost and safety compared to other geological media. This study investigated rocks from the Ipojuca Magmatic Suite, located in the Pernambuco Basin— a strategic region due to its proximity to CO₂ emission sources. The research focused on three lithologies: trachyte, trachyandesite, and basalt, based on petrophysical analyses and X-ray Microtomography (μCT). Trachytes exhibited the highest porosity values, while all lithologies presented permeability values lower than 0.01 mD. Basalt samples showed a higher content of Fe- and Mg-rich minerals, such as olivine, which are essential to the carbon mineralization process. Digital rock analysis enabled investigation of the pore types, including microporosity. The study revealed that basalts and trachyandesites generally present a massive matrix and dominance of microporosity, while altered trachytes show porosity associated with the dissolution of millimeter- to centimeter-scale phenocrysts. This work enabled the evaluation of reservoir properties of these rocks, contributing to future projects aimed at CO₂ storage along the coastal zone of the basin.

Keywords: X-ray microtomography; volcanic rocks; CO₂ mineralization; geological storage; petrophysical properties; Pernambuco Basin.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 –	Mapa com localização das usinas emissoras de CO ₂ e ocorrência de rochas vulcânicas na Bacia de Pernambuco	18
Figura 2 –	Diagrama Total-Álcali x Sílica de com a comparação de propriedades de rochas da SMI e rochas que foram utilizadas para projetos pilotos de GCS na Europa e na América do Norte. Setas amarelas indicam fraturas preenchidas nas amostras de a) basalto, b) traquiandesito e c) traquito.	20
Figura 3 –	Comparação do aprisionamento de CO ₂ ao longo do tempo entre rochas sedimentares (a) e vulcânicas (b)	23
Figura 4 –	Fluxograma da Metodologia	30
Figura 5 –	Afloramentos de rochas vulcânicas na zona costeira da Bacia de Pernambuco, onde foram realizadas as coletas	31
Figura 6 –	Bloco de Basalto e Plugue de Traquito	32
Figura 7 –	DCI <i>Helium Porosimeter</i>	35
Figura 8 –	Painel principal do Porosímetro	36
Figura 9 –	DCI <i>Steady State Gas Permeameter</i>	36
Figura 10 –	Janela de controle manual do Permeâmetro	37
Figura 11 –	Tomógrafo Nikon XT H 225 ST	38
Figura 12 –	Interface do VGStudio Max 3.4 com as vistas, histograma e a ferramenta de porosidade na aba <i>Analysis</i>	40
Figura 13 –	Figura 13 - Lâmina petrográfica das rochas traquíticas. A-B) Aspecto do traquito porfirítico contendo fenocristais de sanidina e quartzo (nicóis paralelos e cruzados). Seta vermelha – poro formado por dissolução da matriz; seta azul – fenocristais de sanidina; seta amarela – amígdalas parcialmente dissolvidas. C-D) Detalhe de uma amígdala parcialmente preenchida com calcita, óxido de ferro e cimento de quartzo. Seta verde – magnetita. Qtz – cristal de quartzo; Ofe – óxido de ferro. E-F) Matriz afanítica de traquiandesito com cristais finos dispersos de quartzo e	42

- magnetita. Seta verde – óxido de ferro; seta azul – fenocristais de sanidina. G-H) Detalhe de um cristal de sanidina (San) e um cristal de quartzo mostrando uma zona de absorção. Seta verde – cristais de magnetita.
- Figura 14 – Lâmina petrográfica analisada de Traquiandesitos. A) e B) Fenocristais de sanidina imersos em uma matriz muito fina. C) e D) Detalhe para a geminação carlsbar característica da série dos feldspatos potássicos. Seta verde indica a ocorrência de agregados de minerais opacos. E) e F) Micrólitos de feldspato potássico (seta azul) e agregado de minerais opacos (seta verde). G) e H) Detalhe da mineralogia da matriz da rocha. Ela é formada por micrólitos de sanidina, quartzo e agregados de minerais opacos. 43
- Figura 15 – Lâmina petrográfica analisada de Basaltos. A) e B) Fenocristal anédrico de olivina com pelúcias de percolação de óxido de ferro. Os cristais de plagioclásio definem uma textura de foliação magmática. Minerais opacos estão presentes na amostra (seta verde). C) e D) Fenocristal anédrico de plagioclásio com bordas de reação e minerais opacos (seta verde). E) e F) Agregado de minerais opacos. G) e H) Matriz é composta por cristais de piroxênio (seta verde) e minerais opacos (setas vermelha e azul). 44
- Figura 16 – Comparação entre imagens dos traquitos. A) 150 kV e B) 120 kV. Na figura B), encontra-se pontos segmentados como poros próximos à borda com resolução muito pequena, como superestimação de porosidade, detalhe não encontrado em A). 46
- Figura 17 – Comparação entre escaneamentos dos basaltos. A) Tensão de 220 kV. Verifica-se uma ampliação exacerbada da imagem, com uma distinção difícil de tons de cinza no interior da amostra. Em B), com tensão de 150 kV, encontra-se uma imagem mais limpa, a presença de fratura e de minerais em diferentes tons de cinza 47

Figura 18 –	Volumes 3D das amostras BC-TQ-01, 02 e 03 após realização de análise de porosidade, com poros maiores indicados em vermelho, e menores em tons de azul	49
Figura 19 –	BC-TQ-02 com e sem análise de porosidade pelo eixo XY, com setas indicando onde a segmentação definiu áreas de poro (azul) e áreas preenchidas (amarela) da fratura	49
Figura 20 –	BC-TQ-02 com e sem análise de porosidade pelo eixo YZ, com setas rosas indicando preenchimento das fraturas	50
Figura 21 –	BC-TQ-02 com análise de porosidade. A posição dos <i>slices</i> indica os planos onde foram realizadas as análises mostradas nas Figuras 19 e 20.	51
Figura 22 –	<i>Slices</i> da amostra BC-TA-03, com setas descrevendo minerais menores (amarelas) e maiores (azuis)	52
Figura 23 –	<i>Slices</i> da amostra BC-TA-03, com setas descrevendo poros (vermelhas) e fraturas (verdes)	52
Figura 24 –	<i>Slices</i> da amostra BC-BA-S-02. As setas amarelas indicam minerais mais densos, e as setas verdes indicam a presença de uma fratura planar.	53

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Lista de amostras preparadas	32
Tabela 2 – Parâmetros de escaneamento utilizados em cada grupo de amostras: tensão, corrente, resolução e filtro	38
Tabela 3 – Amostras de Traquitos (TQ), Traquiandesitos (TA) e Basaltos (BA), e suas respectivas medições e resultados de porosimetria e permeamtria a gás.	46
Tabela 4 – Resultados de porosidade via software	48
Tabela 5 – Quantificação porosa via classe de poros	49

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	14
1.1 OBJETIVO GERAL	15
1.1.1 Objetivos Específicos	15
2 REVISÃO DE LITERATURA E HIPÓTESE DE TRABALHO	16
2.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	16
2.1.1 Suíte Magmática Ipojuca.....	17
2.2 GEOLOGICAL CARBON STORAGE (GCS)	20
2.2.1 Mineralização Geológica de CO ₂	22
2.3 RADIAÇÕES IONIZANTES E SUAS APLICAÇÕES	24
2.3.1 Microtomografia de Raios X	26
2.4 ROCHA DIGITAL.....	28
3 METODOLOGIA.....	29
3.1 COLETA E PREPARAÇÃO DE AMOSTRAS	30
3.2 ANÁLISE PETROGRÁFICA.....	32
3.3 ANÁLISE PETROFÍSICA	33
3.4 MICROTOMOGRAFIA DE RAIOS X.....	37
3.5 PROCESSAMENTO E ANÁLISE DIGITAL DE IMAGENS	39
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	40
4.1 CARACTERIZAÇÃO PETROGRÁFICA.....	40
4.2 PARÂMETROS PETROFÍSICOS	45
4.3 ANÁLISE DE ROCHA DIGITAL	45
5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	53

1 INTRODUÇÃO

Um dos maiores desafios atuais, em termos de desenvolvimento energético é garantir, de forma sustentável, o suprimento da demanda de energia. Apesar do avanço no uso de fontes renováveis, a utilização de combustíveis derivados de hidrocarbonetos se manterá durante várias décadas, e por este motivo é crucial atuar no sentido de mitigar as emissões causadas por esses combustíveis. Dessa forma, os principais temas tratados pela academia e pela indústria são a Captura e o Armazenamento geológico de Carbono (*Geological Carbon Storage - GCS*), que representa uma forma segura e economicamente viável de reduzir as emissões causadas pela produção e uso de hidrocarbonetos e biocombustíveis (Cao et al., 2020; Friedmann et al., 2006). O GCS já representa uma tecnologia conhecida e é executada por meio da injeção do gás diluído em água, ou na forma supercrítica, em aquíferos salinos, cavernas artificiais em rochas salinas e em reservatórios depletados (McGrail et al., 2006). Além destas opções uma nova tecnologia para retenção de CO₂ em meio geológico tem sido testada e consiste na injeção do gás em rochas vulcânicas máficas. Estas apresentam a possibilidade de reter o CO₂ por meio da incorporação do carbono na estrutura de minerais neoformados (Wang et al., 2022). A injeção do CO₂ modifica os valores de pH da água de formação e promove a dissolução de alguns minerais e a liberação de íons (Ca²⁺, Mg²⁺ e Fe²⁺), que reagem com o íon de carbonato para formar minerais carbonáticos (calcita, dolomita, siderita) (Raza et al., 2022; Kelemen et al., 2019). Dessa forma, estudos em todo o mundo vêm sendo feito em torno da viabilidade e potencial de rochas ígneas que permitam a aplicação desta técnica em locais onde a localização das fontes emissoras e das rochas torna a opção pela mineralização economicamente viável (Xiong et al., 2017). A caracterização das rochas envolve estudos de petrofísica, efeitos reativos, química e mineralogia (Callow et al., 2018; Lisabeth et al., 2017).

Neste contexto, o presente estudo buscou contribuir para o entendimento do potencial da Bacia de Pernambuco, onde, existem rochas ígneas vulcânicas e intrusivas intercaladas com rochas sedimentares (Nascimento et al., 2004; Nascimento; Souza, 2003) na mesma região onde estão localizados grandes

complexos industriais, como o Complexo Industrial-Portuário de Suape, que inclui a segunda maior usina de energia de Pernambuco, e uma das maiores termelétricas a gás do Brasil, em funcionamento. Diante disso, com a localização destes empreendimentos, que são grandes emissores de dióxido de carbono, e das rochas ígneas da SMI, se torna importante a realização de estudos de caracterização das rochas, de suas propriedades reativas o que servirá de base para a realização de futuros projetos de armazenamento de CO₂ nesta região.

O estudo se baseou na descrição de características básicas das rochas, assim como a análise petrográfica baseada em seções delgadas de amostras das litologias selecionadas, a execução de ensaios de porosimetria e permeamtria experimental, e a análise de características físicas, texturais e petrofísicas de amostras por meio de imagens de Microtomografia Computadorizada de Raios X (μ CT). O estudo de imagens de μ CT foi conduzido a partir de modelos de rocha digital das amostras escaneadas em um equipamento de tomografia industrial. A análise por meio de μ CT tem como base o princípio das radiações ionizantes, e o estudo de rocha digital integrado as análises experimentais permitiu contribuir para o entendimento de aspectos petrofísicos das rochas escolhidas para o estudo.

1.1 OBJETIVO GERAL

Avaliar o potencial de rochas vulcânicas da Suíte Magmática Ipojuca, aflorantes na Bacia de Pernambuco, para o armazenamento geológico de CO₂ por mineralização, com foco em três litotipos representativos – traquito, basalto e traquiandesito – por meio da caracterização petrofísica e estrutural utilizando microtomografia de raios X e ensaios de petrofísica básica.

1.1.1 Objetivos Específicos

- Avaliar os principais litotipos vulcânicos da Suíte Magmática Ipojuca com potencial para o sequestro mineral de CO₂;
- Realizar a caracterização petrográfica dos litotipos selecionados;
- Caracterizar as propriedades petrofísicas relevantes desses litotipos, como porosidade e permeabilidade a partir de testes experimentais;

- Avaliar a morfologia, distribuição e conectividade da rede porosa presente nos litotipos selecionados a partir do uso de microtomografia de raios X;

2 REVISÃO DE LITERATURA E HIPÓTESE DE TRABALHO

A compreensão dos processos físicos, químicos e estruturais envolvidos no sequestro geológico de dióxido de carbono exige uma base teórica multidisciplinar. Este capítulo apresenta os principais conceitos necessários para contextualizar a investigação proposta, abordando desde os fundamentos do armazenamento de CO₂ em formações geológicas até as propriedades petrofísicas das rochas que influenciam a retenção e movimentação de fluidos. Também são discutidas técnicas modernas de caracterização de materiais por imagem, como a microtomografia de raios X, utilizadas para a análise não destrutiva da microestrutura e da conectividade porosa em rochas vulcânicas.

2.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A Bacia de Pernambuco constitui uma bacia sedimentar do tipo marginal atlântica, situada no nordeste do Brasil, e está associada ao processo de abertura do Oceano Atlântico Sul durante o Cretáceo. Sua evolução geológica é marcada por eventos de *rifting* e posterior subsidência térmica, que permitiram a deposição de sedimentos e a ocorrência de eventos magmáticos ao longo de sua história (Maia et al., 2012). Na região emersa da bacia, em especial na faixa costeira do estado de Pernambuco, são encontrados diversos afloramentos de rochas ígneas que representam intrusões e derrames subaéreos, cuja origem está relacionada a um evento magmático de idade Albiana que afetou a atual faixa costeira da bacia (Nascimento et al., 2004; Buarque et al., 2016). Estas rochas compõem a Suíte Magmática Ipojuca – SMI (Lima Filho, 1998, Nascimento, 2003).

As rochas de natureza vulcânica são formadas a partir do resfriamento e solidificação de magmas extrusivos, que alcançam a superfície terrestre durante erupções. Devido ao rápido resfriamento, essas rochas apresentam textura afanítica, com cristais de pequeno tamanho, e frequentemente exibem estruturas como

vesículas, fluxo e fragmentação (Best, 2003). O magmatismo também pode criar estruturas intrusivas compostas por rochas de natureza félsicas ou máficas, dependendo da composição do magma e da interação deste com rochas preexistentes na crosta (Fred; Heinonen; Heikkilä, 2019). Intrusões mais rasas, associadas ao vulcanismo da superfície produzem soleiras, diques e outros tipos de estruturas (Drymoni et al., 2024).

Na faixa costeira da Bacia de Pernambuco as rochas da SMI foram encontradas em afloramentos e a a partir de poços perfurados na região. Trata-se de uma área de interesse não apenas geológico, mas também estratégico do ponto de vista energético, devido à sua proximidade com centros industriais emissores de CO₂ (Nunes, 2017).

2.1.1 Suíte Magmática Ipojuca

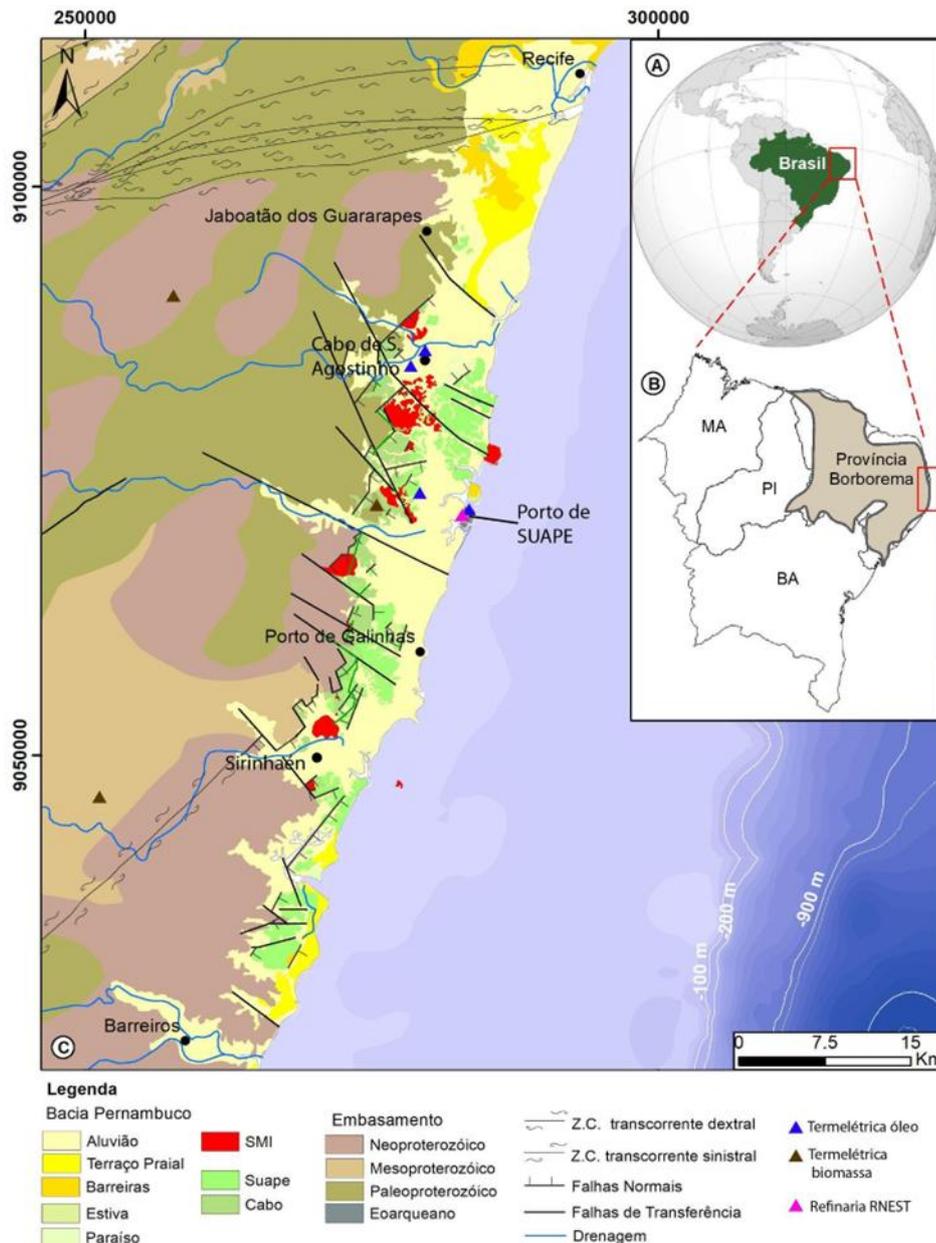
A SMI é composta por rochas vulcânicas e subvulcânicas com composição variando de máfica a félsica. As principais litologias reconhecidas incluem basaltos, traquiandesitos, traquitos e seus equivalentes subvulcânicos. Essas rochas ocorrem sob a forma de derrames, soleiras e diques, frequentemente apresentando estruturas típicas de resfriamento, como juntas colunares, vesiculação e, em alguns casos, amígdalas preenchidas por minerais como quartzo, calcita e óxidos (Nascimento et al., 2004; Barbosa et al., 2014). Alterações hidrotermais e processos de intemperismo também são recorrentes, formando microfraturas, substituições minerais e porosidade secundária (Correia Filho et al., 2024) – características que impactam diretamente suas propriedades petrofísicas e seu potencial como reservatórios geológicos (Gunnarsson et al., 2018).

Do ponto de vista composicional, as rochas ígneas podem ser classificadas em máficas, intermediárias e félsicas, conforme a proporção de sílica e minerais ferro-magnesianos. Basaltos representam o grupo máfico, com predominância de plagioclásio e piroxênio; traquitos e traquiandesitos pertencem às classes intermediárias e félsicas, com presença marcante de feldspatos alcalinos e minerais acessórios como óxidos de ferro e apatita (Winter, 2010).

A relevância da SMI para estudos voltados ao armazenamento geológico de CO₂ é reforçada por sua localização estratégica na faixa costeira da Bacia de Pernambuco. Esta região abriga o Complexo Industrial-Portuário de SUAPE (CIP

SUAPE), um dos principais polos industriais do Nordeste brasileiro, que concentra diversas fontes estacionárias de emissão de CO₂. Entre os empreendimentos de destaque estão a Refinaria Abreu e Lima (RNEST), termelétricas à biomassa e a óleo, vistos na Figura 1.

Figura 1 - Mapa com localização das usinas emissoras de CO₂ e ocorrência de rochas vulcânicas na Bacia de Pernambuco



Fonte: Adaptado de Nascimento et al. (2003).

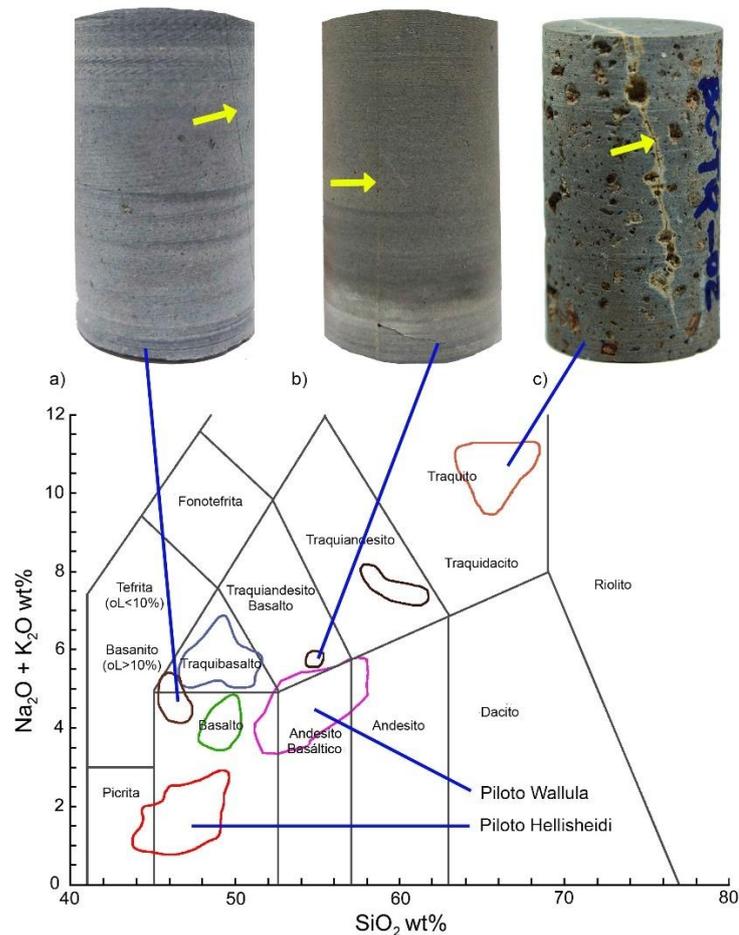
Além do impacto ambiental, a possibilidade de implementar projetos de GCS por mineralização na região apresenta um efeito positivo sobre a matriz energética local

e nacional. A adoção dessa tecnologia pode reduzir significativamente a pegada de carbono associada à geração termoeétrica e às atividades petroquímicas, ao mesmo tempo em que fomenta a inovação tecnológica e o desenvolvimento de uma economia de baixo carbono (Gunnarsson et al., 2018; Snæbjörnsdóttir et al., 2020; Chan et al., 2016). O posicionamento geográfico da SMI, em proximidade com essas fontes emissoras, pode resultar em economia logística relevante, tornando viável a implementação de projetos de GCS com menor custo de transporte do CO₂ capturado (Correia Filho et al., 2024).

Estudos anteriores já descreveram as propriedades geológicas e a idade da SMI, o que auxilia na avaliação de um possível potencial para mineralização, dado seu conteúdo favorável de minerais máficos, como olivina e piroxênios, além de estruturas porosas induzidas por fraturamento e alteração superficial e diagenética (Buarque et al., 2016; Barbosa et al., 2014). A integração entre o potencial geológico da SMI e o perfil industrial da região configura uma oportunidade estratégica para transformar a Bacia de Pernambuco em um polo de referência nacional em projetos de descarbonização, contribuindo tanto para o cumprimento das metas climáticas quanto para a diversificação do setor energético com base em soluções sustentáveis (Correia Filho et al., 2024).

Além disso, a utilização de rochas vulcânicas como reservatórios de CO₂ se alinha com abordagens já consolidadas internacionalmente, como os projetos CarbFix na Islândia e Wallula nos Estados Unidos, que demonstraram a viabilidade técnica e econômica da mineralização de CO₂ em litologias máficas (Snæbjörnsdóttir et al., 2020; White et al., 2020). A avaliação preliminar das formações da SMI indica que estas apresentam características geológicas que podem ser viáveis para o processo de mineralização (Fig. 2), quando comparadas a rochas que já mostraram resultados importantes a partir de projetos pilotos desenvolvidos na Europa e América do norte (Gislason et al., 2018; Snæbjörnsdóttir et al., 2020).

Figura 2 - Diagrama Total-Álcali x Sílica de com a comparação de propriedades de rochas da SMI e rochas que foram utilizadas para projetos pilotos de GCS na Europa e na América do Norte. Setas amarelas indicam fraturas preenchidas nas amostras de a) basalto, b) traquiandesito e c) traquito.



Fonte: Adaptado de Carvalho et al. (2022).

Assim, a avaliação de rochas da SMI em relação em relação ao seu eventual potencial para uso como meio de armazenamento de CO_2 motivou esta pesquisa que buscou contribuir para o esforço de avanço da transição energética na região e para as metas de mitigação das mudanças climáticas para as quais o Brasil pretende contribuir de forma expressiva.

2.2 GEOLOGICAL CARBON STORAGE (GCS)

A intensificação das emissões de dióxido de carbono (CO_2) e seus impactos no aquecimento global tornam imperativa a adoção de tecnologias eficazes de mitigação climática. Entre as estratégias emergentes, destaca-se o *Geological Carbon Storage*, ou Armazenamento Geológico de Carbono, uma solução

promissora para reter CO₂ de maneira segura, profunda e por tempo geológico. Esta técnica tem sido reconhecida como uma das principais ferramentas para a transição energética e descarbonização de setores industriais intensivos em carbono, como o de geração termoelétrica e o refino de combustíveis fósseis (Tomić et al., 2018).

O GCS compreende um conjunto de etapas: captura, compressão, transporte, injeção e monitoramento do CO₂ em formações geológicas adequadas, como aquíferos salinos profundos, reservatórios de petróleo e gás exauridos, cavernas em sal e, mais recentemente, rochas vulcânicas máficas (Cao et al., 2020). Durante a última década, o método de mineralização geológica do CO₂ tem ganhado destaque como mecanismo adicional de segurança, uma vez que transforma o gás em minerais carbonáticos estáveis, como calcita, dolomita e siderita (Raza et al., 2022; Kelemen et al., 2020).

Os aquíferos salinos são considerados os reservatórios com maior capacidade estimada de armazenamento global, devido à sua ampla distribuição e espessura, além de não competirem com o uso humano da água. O CO₂ é injetado tipicamente a profundidades superiores a 800 m, onde se encontra em estado supercrítico, formando uma pluma que interage com a salmoura presente no meio poroso (Prasad et al., 2023). O armazenamento ocorre por múltiplos mecanismos, como aprisionamento estrutural, capilar, por dissolução e mineralização lenta, o que exige a presença de rochas selantes competentes para evitar vazamentos (Cao et al., 2020; Ajayi et al., 2019). Estudos como os de Bashir et al. (2024) e Khandoozi et al. (2023) apontam que, em formações siliciclásticas pouco reativas, o aprisionamento mineral pode levar centenas ou milhares de anos para se consolidar.

Nos reservatórios de petróleo e gás depletados, a viabilidade do armazenamento de CO₂ se baseia no histórico comprovado de confinamento de fluidos por milhões de anos, o que assegura a integridade estrutural desses sistemas ao longo de escalas de tempo geológicas (Ajayi et al., 2019). Além disso, essas estruturas frequentemente já dispõem de infraestrutura instalada, o que reduz custos operacionais associados à injeção e ao monitoramento do gás (*National Academies of Sciences*, 2019). Nesses ambientes, o armazenamento pode ser conjugado ao uso do CO₂ para a recuperação avançada de petróleo — técnica conhecida como EOR (*Enhanced Oil Recovery*). Essa abordagem integra o conceito de CCUS (*Carbon Capture, Utilization and Storage*), permitindo simultaneamente a recuperação de óleo residual e o sequestro de parte do gás (IPCC, 2005). No

entanto, estima-se que apenas cerca de 30% do CO₂ injetado permaneça retido de forma permanente, sendo o restante produzido junto ao petróleo e reinjetado ao longo do processo (IPCC, 2005; *National Academies of Sciences*, 2019; Ajayi et al., 2019).

As cavernas salinas, sejam naturais ou artificiais, representam uma alternativa menos comum, mas vantajosa do ponto de vista da vedação, já que os sais possuem elevada plasticidade e baixa permeabilidade. Contudo, o alto custo de escavação e o risco de instabilidades estruturais tornam essa alternativa economicamente viável apenas em contextos específicos, como armazenamento estratégico ou modular de CO₂ (Goulart et al., 2020; Bérest et al., 2019).

Por fim, formações vulcânicas máficas, como basaltos, vêm sendo estudadas pelo seu potencial de promover a mineralização rápida do CO₂, um mecanismo que aprisiona o carbono em minerais carbonáticos estáveis (como calcita, magnesita e siderita). Projetos-piloto como o CarbFix, na Islândia, demonstraram que até 70% do CO₂ injetado em formações basálticas pode ser mineralizado em apenas dois anos (Gunnarsson et al., 2018; Kelemen et al., 2020). De forma semelhante, o projeto Wallula, nos EUA, comprovou o sequestro mineral de CO₂ em condições reais de operação industrial (White et al., 2020). Esse tipo de reservatório tem sido considerado promissor para o armazenamento permanente, com vantagens adicionais em segurança e menor necessidade de monitoramento contínuo (Gunnarsson et al., 2018; Kelemen et al., 2020).

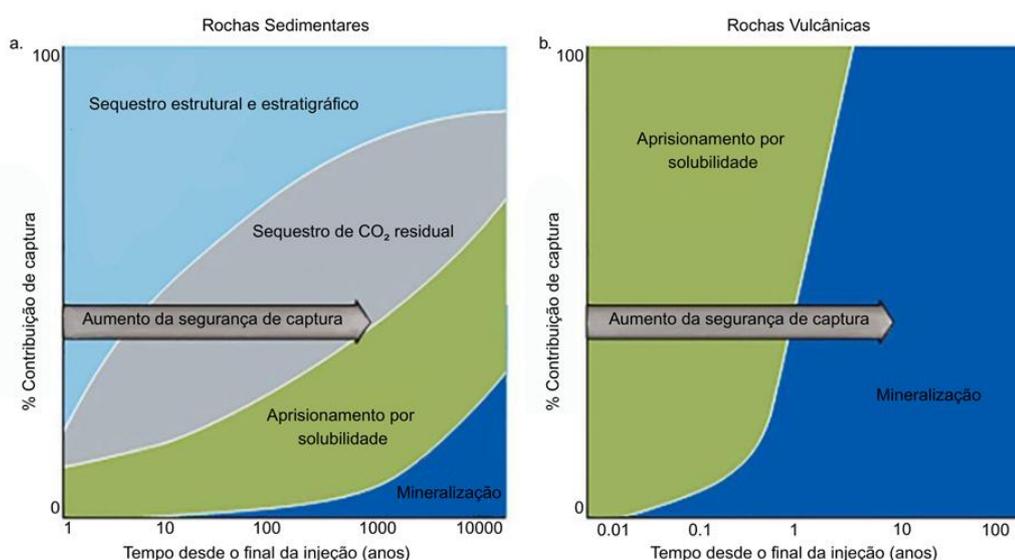
2.2.1 Mineralização Geológica de CO₂

A partir do momento em que o dióxido de carbono é armazenado em um meio geológico poroso, como reservatórios de rochas, ele passa a interagir quimicamente com os minerais presentes tanto no reservatório quanto na rocha selante responsável pelo confinamento do gás (Gysi; Stefánsson, 2012). Em formações sedimentares, como os arenitos profundos, o CO₂ é geralmente injetado na forma supercrítica. Nesses ambientes, os mecanismos predominantes de retenção incluem a armadilha estrutural ou estratigráfica, a dissolução do CO₂ na salmoura e, de forma mais segura e permanente, a mineralização (Benson & Cole, 2008; Raza et al., 2022).

Diferente dos métodos tradicionais de armazenamento em reservatórios geológicos por armadilha física ou dissolução em salmouras, a mineralização consiste na conversão química do CO_2 em minerais carbonáticos estáveis, promovendo o armazenamento permanente do carbono (Kelemen et al., 2019; Snæbjörnsdóttir et al., 2020). Assim, transformam permanentemente o gás em minerais carbonáticos estáveis — como calcita (CaCO_3), magnesita (MgCO_3), siderita (FeCO_3) e dolomita ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$) — por meio da interação do CO_2 dissolvido com minerais portadores de cátions divalentes (Ca^{2+} , Mg^{2+} e Fe^{2+}) (Kelemen et al., 2020; Cao et al., 2020). Esse mecanismo reduz os riscos de migração e vazamentos que podem ocorrer em métodos de armazenamento convencionais, oferecendo uma forma potencialmente mais segura de sequestro a longo prazo (Gislason et al., 2010; Raza et al., 2022).

O processo pode ocorrer naturalmente, mas o foco atual da pesquisa é em sua aceleração por meio da injeção controlada de CO_2 em rochas máficas e ultramáficas, (Fig. 3), como basaltos e peridotitos. Essas rochas são compostas por minerais como olivina, piroxênio e serpentina, que apresentam alta reatividade a partir da variação de pH produzida pela ação do CO_2 dissolvido (Snæbjörnsdóttir et al., 2020; Gysi & Stefánsson, 2012).

Figura 3 - Comparação do aprisionamento de CO_2 ao longo do tempo entre rochas sedimentares (a) e vulcânicas (b)



Fonte: Adaptado de Raza et al. (2020).

O projeto CarbFix, na Islândia, é um dos casos mais emblemáticos de aplicação em campo da tecnologia de sequestro mineral. Desenvolvido em basaltos altamente reativos, o projeto demonstrou que mais de 70% do CO₂ injetado foi convertido em carbonatos estáveis em menos de dois anos, evidenciando a rapidez e eficiência do processo (Gunnarsson et al., 2018; Gíslason et al., 2018). Outro exemplo relevante é o piloto Wallula, nos Estados Unidos, que utilizou basaltos da Formação Columbia para testar a viabilidade da mineralização em condições geológicas distintas. O projeto demonstrou a capacidade de retenção do CO₂ por meio de reações com minerais portadores de cátions divalentes, ainda que com desafios operacionais relacionados à injetividade e monitoramento (McGrail et al., 2017). Essas experiências, associadas a iniciativas em países como China e Índia, consolidam o uso de rochas máficas como alvos estratégicos para o armazenamento permanente de carbono, sobretudo quando localizadas em regiões próximas a fontes estacionárias de emissão (Ali et al., 2022; Raza et al., 2022).

Além da composição mineralógica, outros fatores condicionantes do sucesso da mineralização incluem a porosidade, permeabilidade, disponibilidade hídrica, temperatura e proximidade a fontes de emissão de CO₂. Estudos como os de Callow et al. (2018) e Snæbjörnsdóttir et al. (2020) reforçam a importância da integração entre conhecimento geológico, geoquímico e petrofísico para avaliar a viabilidade técnica do armazenamento por mineralização.

Com isso, a mineralização geológica de CO₂ se destaca como uma abordagem promissora para o sequestro permanente de carbono, sendo particularmente atrativa em contextos em que há disponibilidade de litologias máficas, infraestrutura acessível e grandes fontes emissores nas proximidades (Ali et al., 2022; Raza et al., 2022).

2.3 RADIAÇÕES IONIZANTES E SUAS APLICAÇÕES

Radiações ionizantes são formas de energia emitidas por átomos instáveis que possuem capacidade de ionizar a matéria, ou seja, remover elétrons de átomos e moléculas, gerando íons. Isso as diferencia das radiações não ionizantes, que não possuem energia suficiente para causar tais modificações. Os principais tipos de radiações ionizantes incluem partículas alfa (α), partículas beta (β), nêutrons e fótons de alta energia, como os raios gama (γ) e os raios X (Tauhata et al., 2003). As

aplicações dessas radiações nas ciências da Terra e dos materiais têm crescido significativamente nas últimas décadas, especialmente por sua capacidade de penetrar materiais sólidos e revelar propriedades internas sem causar destruição física significativa da amostra (Turner, 2007; Tauhata et al., 2013).

Do ponto de vista físico, a interação da radiação ionizante com a matéria depende de três mecanismos principais: o efeito fotoelétrico, o espalhamento Compton e a produção de pares (Turner, 2007). O efeito fotoelétrico ocorre predominantemente em baixas energias e em elementos com alto número atômico, resultando na completa absorção do fóton incidente por um elétron ligado, que é ejetado da camada eletrônica (Tauhata et al, 2003). O espalhamento Compton, por sua vez, é predominante em energias intermediárias, típicas de aplicações em geociências, e ocorre quando um fóton colide com um elétron livre ou fracamente ligado, perdendo parte de sua energia e mudando de direção. Já a produção de pares só é observada em energias superiores a 1,022 MeV, e consiste na conversão do fóton em um par elétron-pósitron na presença de um núcleo atômico (Bushberg et al., 2012).

Esses processos de interação são a base do funcionamento de diversos sistemas de detecção e imageamento, pois a intensidade da radiação remanescente após atravessar a amostra revela informações sobre sua densidade e composição química (Tauhata et al, 2003). Essa atenuação pode ser descrita pela lei de Beer-Lambert, onde a intensidade do feixe decresce exponencialmente com a espessura do material e o coeficiente de atenuação linear, que por sua vez depende da densidade e número atômico do material (Bushberg et al., 2012).

Esses mecanismos de interação fundamentam o princípio de funcionamento dos sistemas de imageamento por radiação (Tauhata et al, 2003). A absorção e o espalhamento modulam a intensidade do feixe emergente, que é captada por detectores e transformada em projeções radiográficas bidimensionais. A partir dessas projeções, algoritmos de reconstrução matemática possibilitam a geração de imagens tridimensionais de alta resolução, como no caso da microtomografia de raios X (Cnudde & Boone, 2013). Essa técnica permite a caracterização detalhada da microestrutura interna de rochas, revelando porosidade, conectividade, orientação e morfologia dos poros, além de permitir estimativas quantitativas de propriedades petrofísicas relevantes para estudos de reservatórios e fluxos em meios porosos (Wellington & Vinegar, 1987; Ferreira et al., 2018; Costa et al., 2018).

As aplicações geocientíficas das radiações ionizantes são amplas. A espectroscopia por fluorescência de raios X, por exemplo, permite a determinação da composição elementar de rochas e solos por meio da emissão de radiação característica, sendo amplamente adotada em estudos geoquímicos (Pires et al., 2010). Por sua vez, a difração de raios X é empregada na identificação de fases cristalinas, possibilitando a análise mineralógica detalhada de materiais geológicos (Turner, 2007; Wicander & Monroe, 2009). Em muitas dessas aplicações, os raios X são preferidos pela sua alta capacidade de penetração e controle instrumental, especialmente em equipamentos de bancada (Cnudde & Boone, 2013; Fonseca et al., 2019).

Em todos esses campos, sua utilidade está associada à possibilidade de investigar propriedades internas sem comprometer a integridade física das amostras (Vila Nova, 2020; Ribeiro, 2021).

2.3.1 Microtomografia de Raios X

A microtomografia computadorizada de raios X (μ CT) é uma técnica de imageamento tridimensional baseada na atenuação diferencial da radiação ionizante ao atravessar uma amostra, sendo capaz de gerar representações volumétricas do interior dos materiais com resolução micrométrica (Vieira et al., 2021; Zandomeneghi et al., 2010). Trata-se de uma modalidade tomográfica de alta precisão e não destrutiva, amplamente empregada na caracterização interna de materiais geológicos, especialmente no estudo de porosidade, conectividade, fraturas e textura de rochas (Maire; Withers, 2014; Liu et al., 2023).

O princípio de funcionamento da μ CT baseia-se na atenuação diferencial dos raios X ao atravessarem a amostra. Essa atenuação é governada principalmente por dois fenômenos físicos: o efeito fotoelétrico e o espalhamento Compton (Turner, 2007; Bushberg et al., 2012). O processo de aquisição envolve a rotação da amostra em torno de seu eixo, enquanto uma fonte de raios X emite feixes colimados que a atravessam em diferentes ângulos (Baruchel et al., 2000). As projeções bidimensionais geradas são captadas por um detector digital e processadas por algoritmos de reconstrução, como a retroprojeção filtrada ou métodos iterativos, resultando em um volume tridimensional composto por voxels — elementos de

volume cujo valor corresponde ao coeficiente de atenuação da radiação em cada ponto, o que está diretamente relacionado à densidade eletrônica do material (Zandomeneghi et al., 2010; Cnudde & Boone, 2013).

A qualidade da imagem reconstruída depende de diversos fatores, incluindo a resolução espacial, o contraste entre as fases, o ruído do detector, e a presença de artefatos como *beam hardening* ou *ring artifacts*. A escolha dos parâmetros de aquisição é, portanto, fundamental: para rochas pequenas e de densidade intermediária, tensões entre 60 e 150 kV e correntes de até 200 μA são usuais. Já amostras maiores e mais densas, como basaltos, requerem tensões mais elevadas, entre 160 e 240 kV, geralmente associadas a correntes mais baixas, para evitar superaquecimento da fonte (Du Plessis et al., 2017). O uso de filtros metálicos — como cobre, estanho ou alumínio — é essencial para remover fótons de baixa energia, que poderiam gerar artefatos e distorções. O filtro de cobre, em particular, tem sido eficaz para amostras geológicas por melhorar o contraste entre poros e matriz mineral, favorecendo a segmentação (Du Plessis et al., 2017; Liu et al., 2023).

Em estudos geocientíficos, a μCT tem se consolidado como uma ferramenta fundamental para a análise quantitativa da petrofísica digital (Liu et al., 2023). Os volumes reconstruídos passam por processos de pré-processamento, como filtragem e normalização, e, em seguida, segmentação — realizada por limiarização de histogramas ou técnicas de aprendizado de máquina — com o intuito de isolar poros, matriz mineral e minerais secundários (Callow et al., 2018; Becker et al., 2019). A partir disso, quantifica-se porosidade total e conectada, tortuosidade, fator de forma, anisotropia e conectividade da rede porosa (Zandomeneghi et al., 2010; Liu et al., 2023).

A configuração espacial dos poros pode ser afetada por processos secundários, como alteração hidrotermal, compactação e diagênese, resultando em significativa redução da porosidade efetiva (Vieira et al., 2021; Liu et al., 2023). Em basaltos alterados, por exemplo, a mineralização secundária tende a preencher preferencialmente os vesículos primários, reduzindo a permeabilidade ao ponto de torná-los potenciais selantes em vez de reservatórios (Liu et al., 2023).

Além disso, a μCT permite distinguir feições relacionadas a processos vulcânicos, como vesicularidade e anisotropia textural, sendo aplicada para interpretar estilos eruptivos, mecanismos de desgasificação e dinâmica de conduítes magmáticos (Polacci et al., 2006; Zandomeneghi et al., 2010). A combinação de μCT

com análise morfométrica 3D tem sido fundamental para o entendimento da conectividade dos poros em piroclastos, além de fornecer modelos geométricos para simulações numéricas de fluxo e transporte (Andrä et al., 2013; Vieira et al., 2021).

Por fim, o uso de μ CT tem se mostrado crucial para a construção de modelos digitais de rochas (digital rocks), que são empregados em simulações computacionais baseadas em volumes finitos ou elementos finitos, permitindo investigar propriedades como permeabilidade, difusividade e reatividade geoquímica em ambientes porosos complexos (Vieira et al., 2021; Liu et al., 2023; Zandomenighi et al., 2010).

2.4 ROCHA DIGITAL

A rocha digital, ou digital rock physics (DRP), é uma abordagem computacional para caracterização petrofísica de amostras geológicas baseada em modelos tridimensionais digitais obtidos a partir de técnicas de imageamento, como a microtomografia computadorizada de raios X (Zandomenighi et al., 2010). Essa metodologia permite analisar propriedades físicas como porosidade, permeabilidade e também produzir simulações numéricas a partir dos modelos criados diretamente a partir das imagens, para o estudo de aspectos como difusividade e permeabilidade, eliminando a necessidade de testes destrutivos e possibilitando estudos sob diferentes condições e cenários. Este campo tem ganhado destaque não apenas por seu caráter não destrutivo e resolução submicrométrica, mas também por permitir investigações multiescalares integradas a modelos físico-numéricos avançados (Vieira et al., 2021; Becker et al., 2019).

A construção do modelo de rocha digital inicia-se pela aquisição de imagens tomográficas, que capturam a variação do coeficiente de atenuação linear dos materiais internos. Após a reconstrução volumétrica, realiza-se o pré-processamento para redução de ruídos e correção de artefatos, por meio de filtros do tipo *non-local means*, *median* ou *edge detectors* (Purswani et al., 2020). Esse processo garante a qualidade visual e metrológica da imagem antes de seu fracionamento em fases constituintes.

Uma vez segmentado, o volume digital pode ser convertido em uma matriz de voxels rotulados, permitindo a quantificação de propriedades morfológicas e estruturais. Parâmetros como porosidade total e porosidade conectada são extraídos

por meio da contagem de voxels pertencentes à fase porosa, enquanto a conectividade e a tortuosidade da rede de poros são determinadas com base em métricas de anisotropia e fator de forma (Zandomeneghi et al., 2010; Vieira et al., 2021; Becker et al., 2019). O volume segmentado também pode ser convertido em malhas para simulações por métodos numéricos, como Lattice Boltzmann, *pore-network modeling* ou elementos finitos (Dong; Blunt, 2009; Liu et al., 2023).

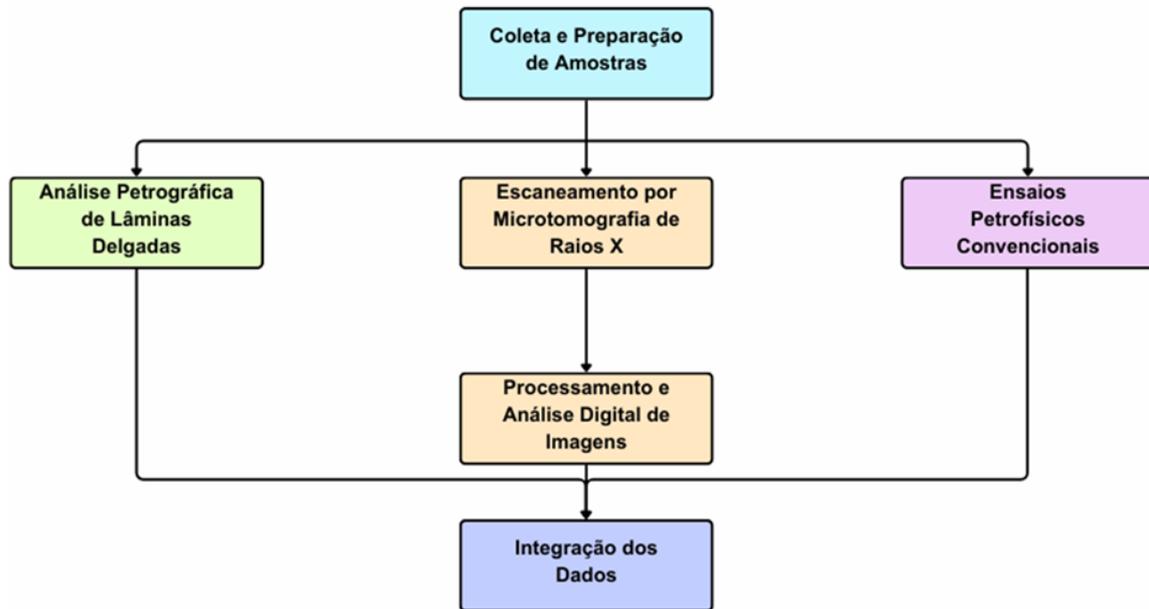
Apesar de suas vantagens, a rocha digital enfrenta limitações associadas à resolução espacial dos equipamentos de μ CT. Poros com diâmetro inferior ao voxel não são detectáveis, o que pode comprometer a estimativa da porosidade total ou do comportamento hidráulico, especialmente em rochas de matriz compacta ou fortemente alteradas (Vieira et al., 2021). Técnicas multiescalares, que combinam imagens em diferentes resoluções, têm sido propostas como solução para capturar desde os macroporos até nanoporos não visíveis na resolução convencional (Papadopoulos et al., 2009). Em rochas vulcânicas, por exemplo, a distribuição de vesículas primárias e secundárias, sua conectividade e grau de preenchimento por minerais de alteração, influenciam significativamente as propriedades de transporte (Vieira et al., 2021).

O uso de μ CT e DRP na caracterização de rochas tem potencial não apenas em aplicações em reservatórios não convencionais, mas também em estudos de processos diagenéticos, modelagem de aprisionamento de CO_2 e caracterização de rochas para engenharia ambiental (Becker et al., 2019; Sun et al., 2023).

3 METODOLOGIA

O desenvolvimento desta pesquisa foi dividido em cinco etapas principais, que envolveram atividades de campo, preparação das amostras em laboratório, análises físicas, imageamento 3D e caracterização petrográfica a partir de microscopia de luz transmitida. A Figura 4 exibe um fluxograma das atividades.

Figura 4 - Fluxograma da Metodologia

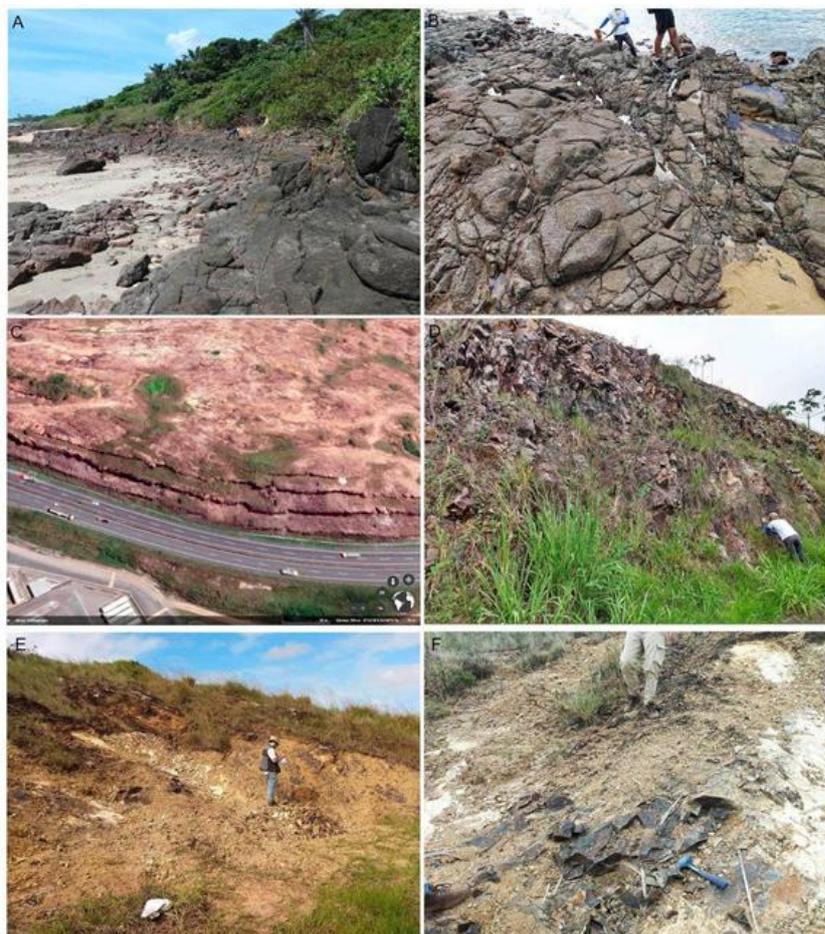


Fonte: O autor (2025).

3.1 COLETA E PREPARAÇÃO DE AMOSTRAS

A etapa inicial consistiu na seleção de afloramentos representativos de três litotipos vulcânicos máficos a intermediários. Foram coletadas e preparadas amostras de três tipos de rochas: (A-B) traquitos na Praia de Itapuama, (C-D) traquiandesitos às margens da rodovia PE-60, nas proximidades de Cabo de Santo Agostinho, e (E-F) basaltos também ao longo da PE-60, próximo ao município de Sirinhaém, indicadas na figura 5.

Figura 5 - Afloramentos de rochas vulcânicas na zona costeira da Bacia de Pernambuco, onde foram realizadas as coletas



Fonte: Carvalho et al. (2022).

Posteriormente, os blocos de rocha foram levados para o Laboratório de Preparação de Amostras e Laminação do Departamento de Geologia (DGEO) da UFPE, para serem cortados. Em seguida foram extraídos plugues de 1,5 polegada de diâmetro, conforme mostrado na Figura 6, padronizados para os ensaios petrofísicos e imageamento por microtomografia. Após a extração, os plugues foram faceados e polidos, para que pudessem ser analisados nos equipamentos de porosimetria e permeamtria.

Figura 6 - Bloco de Basalto e Plugue de Traquito



Fonte: O autor (2025).

Com os plugues devidamente extraídos, as amostras foram levadas para uma estufa, onde permaneceram por 24h a 80° C, para a retirada de umidade, para reduzir a produção de artefatos (Vila Nova, 2020). As amostras foram medidas e pesadas em triplicata, a fim de reduzir erros. Ao todo foram preparadas 19 amostras, conforme mostrado na Tabela 1:

Tabela 1 – Lista de amostras preparadas

Amostra	Litotipo
BC-TQ-01	Traquito
BC-TQ-02	Traquito
BC-TQ-03	Traquito
BC-TQ-04	Traquito
BC-TQ-05	Traquito
BC-TQ-06	Traquito
BC-TQ-07	Traquito
BC-TQ-08	Traquito
BC-TQ-09	Traquito
BC-TA-01	Traquiandesito
BC-TA-02	Traquiandesito
BC-TA-03	Traquiandesito
BC-TA-04	Traquiandesito
BC-TA-05	Traquiandesito
BC-TA-06	Traquiandesito
BC-BA-S-01	Basalto
BC-BA-S-02	Basalto
BC-BA-S-03	Basalto
BC-BA-R-03	Basalto

Fonte: O autor (2025).

3.2 ANÁLISE PETROGRÁFICA

A caracterização petrográfica consiste na descrição microscópica das rochas, por meio da análise de lâminas delgadas sob luz polarizada, permitindo a

identificação de minerais, texturas e microestruturas que revelam os processos petrogenéticos e a história evolutiva das rochas ígneas e metamórficas. Essa abordagem é essencial para a classificação litológica e avaliação de propriedades físicas e químicas de interesse em estudos de reservatórios, geotecnia e mineralização (Becker et al., 2019).

No contexto de rochas vulcânicas, a petrografia permite reconhecer texturas, além de identificar minerais essenciais. Essas feições texturais influenciam diretamente a conectividade dos poros, a permeabilidade e a reatividade mineral, sendo, portanto, parâmetros cruciais na análise do potencial de armazenamento geológico de CO₂ (Zandomeneghi et al., 2010).

A identificação de fases minerais portadoras de cátions reativos, como olivina, augita e magnetita, é relevante para a avaliação da reatividade geoquímica da rocha, especialmente em processos de carbonatação mineral. A presença de microfraturas, zonas de alteração hidrotermal e orientação preferencial dos minerais pode indicar caminhos preferenciais de fluxo e áreas mais suscetíveis à percolação de fluidos (Vieira et al., 2021).

A caracterização mineralógica e textural das amostras foi realizada por meio da análise petrográfica de lâminas delgadas em microscópio de luz transmitida polarizada. Esta etapa teve como objetivo identificar os minerais constituintes das rochas, descrever suas texturas e observar feições associadas a alterações tardias e microfraturas.

As observações foram realizadas em microscópio petrográfico Zeiss Axioscope 5, equipado com câmera digital Axiocam 305 color de 5 megapixels, que possibilitou registro em alta resolução das feições observadas. A caracterização mineral permitiu identificar os constituintes primários e secundários das rochas, além de reconhecer microfraturas associadas a processos de alteração pós-magmáticos.

3.3 ANÁLISE PETROFÍSICA

A Petrofísica Experimental compreende um conjunto de métodos experimentais voltados à quantificação direta das propriedades físicas das rochas, como porosidade e permeabilidade. Tais propriedades são fundamentais para a compreensão do comportamento do fluxo de fluidos em meios porosos, sendo

amplamente aplicadas em estudos de reservatórios geológicos e em projetos de armazenamento de carbono (Tiab & Donaldson, 2015).

A porosidade total é comumente determinada por métodos de expansão gasosa, utilizando gases inertes como o hélio, que por sua baixa viscosidade e alta difusividade consegue acessar microporos com maior eficácia. Este método, aplicado em porosímetros específicos, fornece uma estimativa precisa do volume de poros em relação ao volume total da amostra (Wang et al., 2023). A permeabilidade absoluta, por sua vez, pode ser obtida por meio de permeômetros a gás, empregando-se hélio ou nitrogênio sob gradientes de pressão controlados, conforme os princípios da Lei de Darcy. A literatura destaca que o uso do hélio tende a superestimar a permeabilidade devido ao efeito de deslizamento em meios porosos muito finos, conhecido como efeito Klinkenberg, sendo necessária sua correção para a obtenção de valores precisos (Wang et al., 2023).

A porosidade é definida como a fração do volume total de um material que é ocupada por vazios, e representa uma das propriedades petrofísicas mais relevantes na avaliação do potencial de rochas como reservatórios geológicos. Segundo a classificação proposta pela União Internacional de Química Pura e Aplicada (IUPAC), os poros podem ser divididos em três faixas de tamanho: microporos (diâmetro < 2 nm), mesoporos (2–50 nm) e macroporos (diâmetro > 50 nm). Essa classificação é amplamente utilizada em estudos de adsorção de gases, caracterização de materiais porosos e modelagem de transporte em rochas. Em amostras geológicas, os macroporos geralmente correspondem a vesículas, fraturas e vugs visíveis por microtomografia, enquanto os microporos e mesoporos estão associados a poros intergranulares ou resultantes de alterações mineralógicas e podem exigir técnicas complementares para sua detecção (Rouquerol et al., 1994). A porosidade pode ainda ser classificada como primária, quando formada durante a solidificação ou deposição da rocha, ou secundária, quando resultante de processos posteriores, como dissolução, fraturamento ou alteração hidrotermal (Rouquerol et al., 1994). A distinção entre porosidade conectada e isolada é igualmente importante, uma vez que apenas os poros interligados contribuem efetivamente para o escoamento de fluidos (Tiab & Donaldson, 2015).

Os ensaios petrofísicos foram realizados com o objetivo de quantificar diretamente as propriedades físicas das amostras rochosas, incluindo porosidade total, permeabilidade absoluta e densidade aparente. Para isso, foram utilizados dois

equipamentos de bancada com controle digital e registro automático de dados, um porosímetro e um permeâmetro.

Para a Petrofísica Convencional, foram selecionados 14 plugues com diâmetro de 1,5 polegadas e comprimentos variados. Os plugues representam cilindros com as extremidades cortadas de forma perpendicular ao eixo do corpo, que são polidas.

A porosidade total das amostras foi determinada por meio de um Porosímetro a Gás Hélio (DCI *Helium Porosimeter*), visto na figura 7. Este equipamento opera com base no princípio da expansão gasosa controlada, utilizando dois volumes conhecidos — um de referência e outro contendo a amostra — e o registro das variações de pressão. A partir desses dados, o sistema calcula o volume de poros da amostra, subtraindo o volume de grãos do volume total inserido pelo operador. O porosímetro é equipado com válvulas de isolamento, transdutor de pressão de alta precisão, termopar e espaçadores cilíndricos que garantem o ajuste do volume interno.

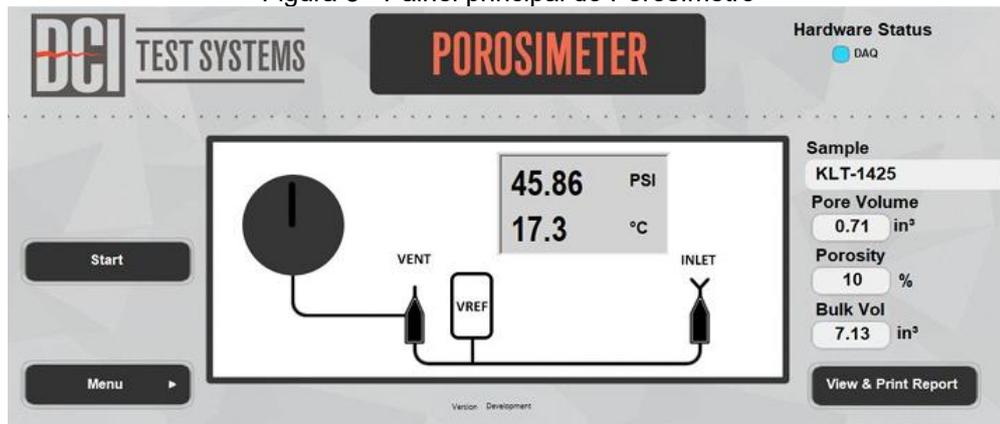
Figura 7 - DCI *Helium Porosimeter*



Fonte: DCI (2021).

A operação do sistema é feita por meio de software proprietário, com o painel mostrado na figura 8, o qual orienta o operador nas etapas de pressurização, estabilização e aquisição de dados. Os resultados de porosidade e volume de poros são gravados automaticamente em arquivos de log e relatórios gerados pelo sistema.

Figura 8 - Painel principal do Porosímetro



Fonte: DCI (2021).

A permeabilidade absoluta foi obtida utilizando-se um Permeômetro a Gás DCI (*Steady State Gas Permeameter*). O equipamento, na figura 9, opera em regime estacionário, pressurizando a amostra axialmente com um gás (neste caso, nitrogênio) e medindo a vazão e a diferença de pressão entre as extremidades do plugue durante o ensaio. A montagem é feita em célula de confinamento, com controle de pressão de poro e pressão confinante, e utiliza-se uma vedação com camisa de viton. O sistema possui transdutores de pressão, sensores de temperatura e medidores de vazão que operam conforme o fluxo automatizado de medição.

Figura 9 - DCI Steady State Gas Permeameter

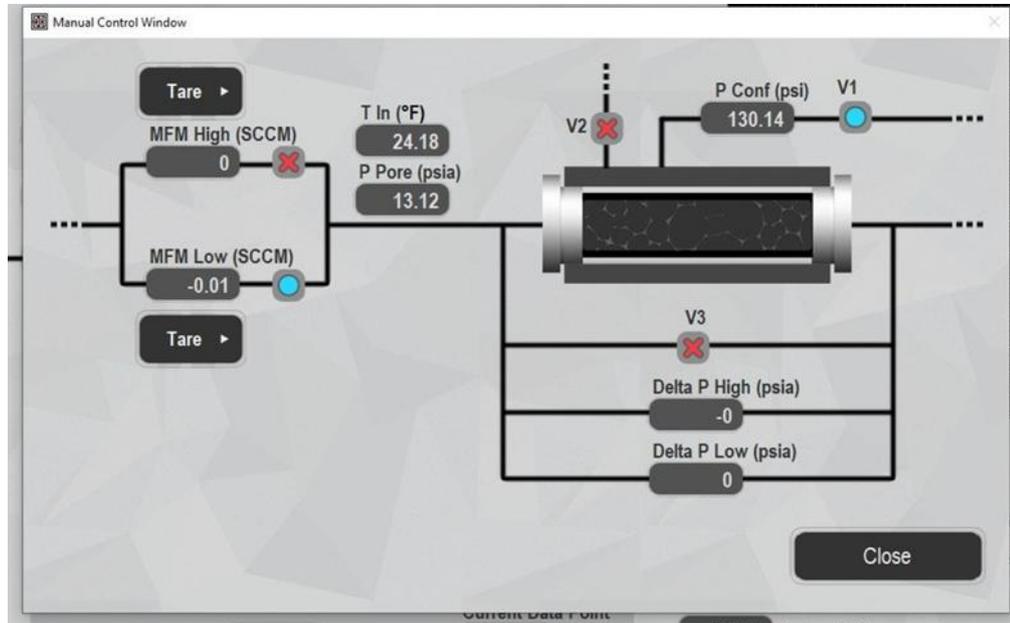


Fonte: DCI (2021).

Os dados são adquiridos por *software* dedicado (Fig. 10), que permite a realização de testes de ponto único ou multiponto com correção de Klinkenberg. O procedimento segue as etapas de carregamento da amostra, entrada de parâmetros,

pressurização controlada e aquisição automatizada, com geração de relatórios em formato digital ao final de cada ensaio.

Figura 10 - Janela de controle manual do Permeômetro



Fonte: DCI (2021).

3.4 MICROTOMOGRAFIA DE RAIOS X

Os plugues selecionados foram escaneados por microtomografia computadorizada de raios X, utilizando o equipamento Nikon XT H 225 ST, do Laboratório de Tomografia Computadorizada de Raios X (LTC-RX) do Departamento de Energia Nuclear (DEN) da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE). As aquisições foram realizadas com resoluções espaciais entre 40 μm e 15 μm — a depender da máxima ampliação geométrica permitida pela amostra — por voxel, o que permitiu captar as principais estruturas porosas e mineralógicas internas das amostras. Os volumes de imagem 3D foram analisados com base na abordagem de rocha digital. A reconstrução de um modelo volumétrico (3D) da amostra e a seleção de uma região de interesse (ROI) com cerca de 60 mm de altura foi realizada utilizando os softwares CT Pro 3D XT 3.1.3 e CT Agent XT 3.1.3 da Nikon Metrology.

Figura 11 - Tomógrafo Nikon XT H 225 ST



Fonte: O autor (2025).

Durante o escaneamento, foram adotados dois padrões de parâmetros para os traquitos, e para traquiandesitos e basaltos, para entender qual padrão deveria ser seguido em todo o espaço amostral (Du Plessis et al., 2017). Na tabela a seguir, verificam-se os parâmetros adotados:

Tabela 2 - Parâmetros de escaneamento utilizados em cada grupo de amostras: tensão, corrente, resolução e filtro

Parâmetros	Traquitos		Traquiandesitos / Basaltos	
	1º Padrão	2º Padrão	1º Padrão	2º Padrão
Tensão (kV)	150	120	150	220
Corrente (μ A)	180	500	180	200
Resolução (μ m)	40	25	40	15
Filtro físico (mm)	Cu - 0.5	Cu - 0.5	Cu - 0.5	Sn - 1

Fonte: O autor (2025).

Outros parâmetros comuns utilizados em todas as amostras foram: tempo de integração de 500ms por projeção, 1 frame por projeção e obtenção de 3016 projeções, com um passo angular de aproximadamente $0,12^\circ$.

Uma amostra de cada litotipo foi selecionada para o duplo escaneamento, a fim de verificar qual o procedimento seria o mais adequado. Pela quantidade total de

amostras e sua representatividade, após a escolha dos critérios, o pós processamento das imagens foi aplicado para 4 amostras totais: três traquitos (BC-TQ-01, BC-TQ-02 e BC-TQ-03), um traquiandesito (BC-TA-03) e um basalto (BC-BA-S-02).

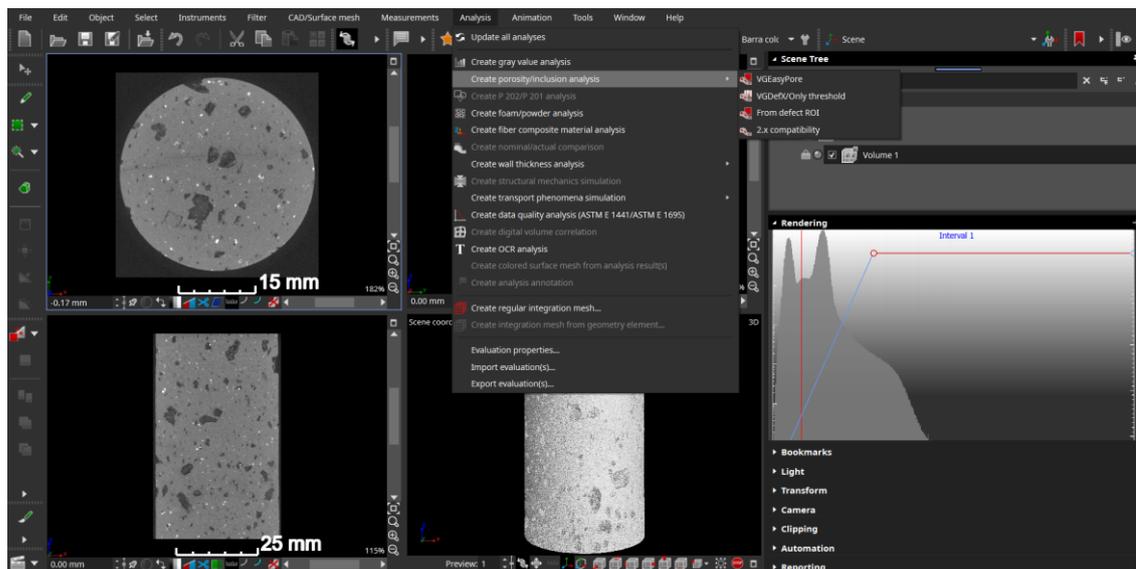
3.5 PROCESSAMENTO E ANÁLISE DIGITAL DE IMAGENS

Após a aquisição dos volumes tomográficos, as imagens foram processadas no software VGStudio Max 3.4. A primeira etapa consistiu na segmentação da fase porosa, realizada por meio da ferramenta de determinação automática de superfície (*Automatic Surface Determination*), baseada no histograma de tons de cinza das imagens (16-bit). Essa ferramenta define um valor limiar de contraste entre a matriz mineral e os poros, separando as fases de interesse com precisão. A segmentação foi aplicada diretamente sobre os *slíces* tomográficos, possibilitando a distinção entre poros conectados, isolados e matriz sólida com base na atenuação diferencial dos raios X.

Com a segmentação realizada, foi definida uma Região de Interesse (ROI), criada manualmente para isolar um subvolume interno da amostra e evitar a inclusão do ar externo como parte da porosidade. Essa delimitação espacial foi essencial para garantir a consistência dos cálculos e minimizar a ocorrência de artefatos ou superestimções. A ROI serviu de base para todas as análises subsequentes de porosidade e defeitos.

A seguir, foi aplicada a análise de defeitos (*Porosity from Defect ROI*), visto na figura 12, que calculou o volume total de poros dentro da ROI, distinguindo poros conectados e isolados, além de fornecer parâmetros como área superficial dos poros, distribuição de tamanhos, esfericidade, fator de forma e grau de conectividade. A partir desses dados, foi possível interpretar a qualidade petrofísica das amostras com base na geometria e distribuição da rede porosa. A análise de um volume menor do que o dado original permite excluir poros que estão na superfície da amostra, e considerar a rede porosa do sub-volume recortado.

Figura 12 - Interface do VGStudio Max 3.4 com as vistas, histograma e a ferramenta de porosidade na aba *Analysis*



Fonte: O autor (2025).

Adicionalmente, foram utilizadas ferramentas de visualização tridimensional para reconstruir digitalmente a rede porosa segmentada, permitindo avaliar de forma qualitativa a conectividade estrutural.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A caracterização petrográfica e petrofísica das rochas da Suíte Magmática Ipojuca (SMI) permitiu estabelecer comparações com litotipos já testados em projetos-piloto de armazenamento mineral de CO₂, como os conduzidos em Wallula (EUA) e Hellisheidi (Islândia).

4.1 CARACTERIZAÇÃO PETROGRÁFICA

A análise petrográfica das amostras permitiu caracterizar em detalhe os litotipos estudados, revelando variações texturais, mineralógicas e estruturais com implicações diretas na porosidade e conectividade interna das rochas.

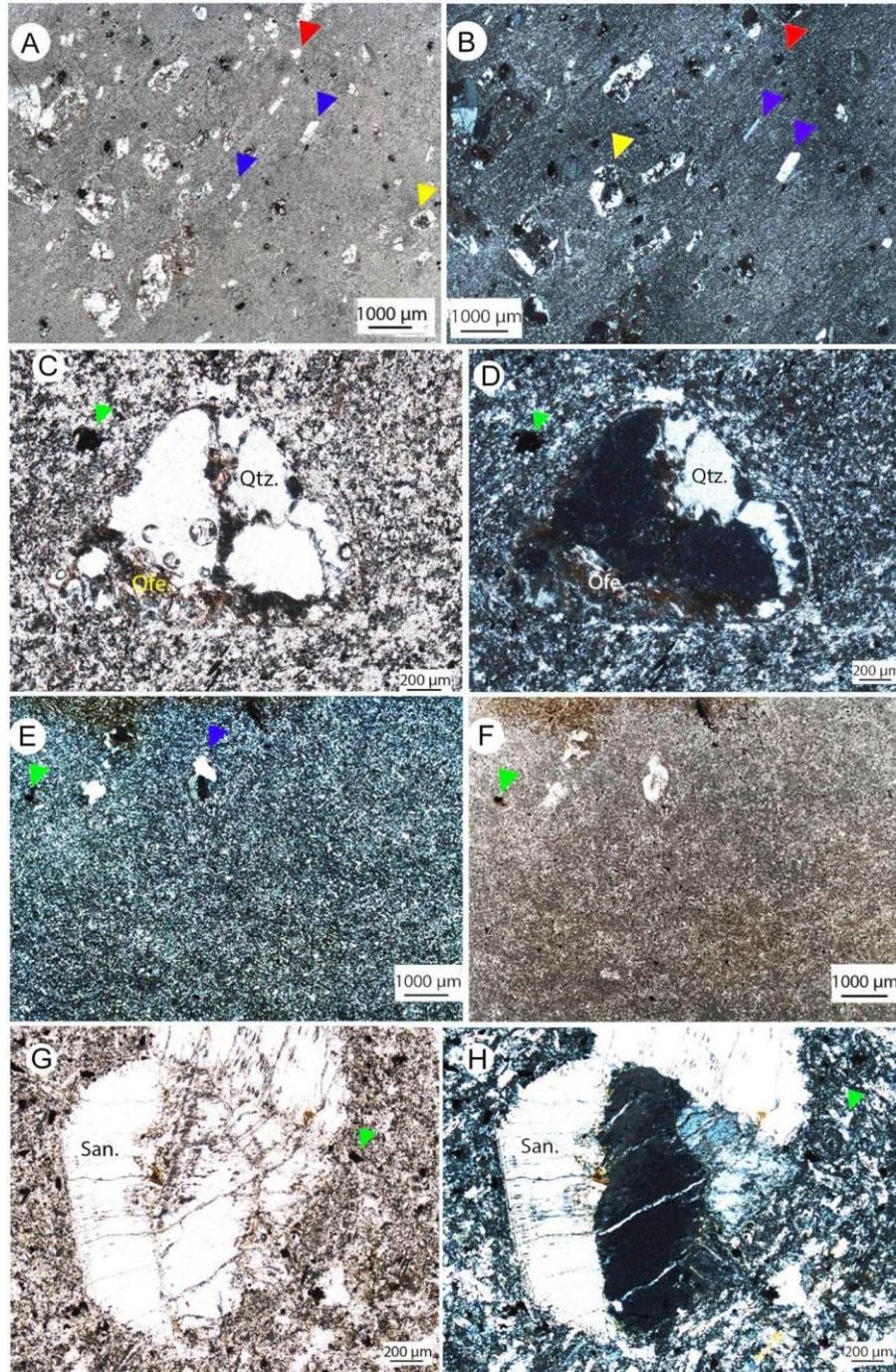
Analisando a Figura 13, os traquitos porfiríticos apresentam fenocristais de sanidina (seta azul), quartzo (Qtz) dispostos em matriz microcristalina afanítica e

poros formados pela dissolução da matriz (seta vermelha). A textura porfírica é caracterizada pela presença de cristais maiores (fenocristais) embutidos em uma matriz de granulação mais fina, enquanto o alinhamento preferencial dos fenocristais caracteriza uma textura de fluxo. A matriz contém cristais finos de feldspato, minerais opacos como magnetita (seta verde), e material amorfo ou vítreo. As amígdalas, parcialmente preenchidas por calcita, óxidos de ferro (Ofe) e cimento de quartzo, são frequentes. A porosidade observada é atribuída à dissolução tardia de sanidinas (San) e ao esvaziamento parcial das amígdalas (seta amarela), originando vugs e poros moldiciais. Também foram identificadas porosidades de substituição, associadas à alteração dos feldspatos para minerais argilosos, resultando em poros em peneira (sieve pores) (Correia et al., 2024; Carvalho et al., 2022).

Nos traquiandesitos, a matriz é afanítica e compacta, composta por micrólitos de feldspato, quartzo e magnetita, vistos na figura 14. Esses litotipos são marcados pela ausência de amígdalas e porosidade primária visível, porém evidenciam microfraturas preenchidas por óxidos de ferro e calcita. Microporos foram observados junto às bordas de fenocristais parcialmente dissolvidos e em zonas de alteração hidrotermal. Fenocristais de sanidina e quartzo são esparsos e apresentam bordas corroídas, indicando reações com o magma hospedeiro durante a cristalização. A presença de microporosidade (setas verdes) na matriz foi associada à percolação tardia de fluidos por fraturas finas e zonas reativas (Carvalho et al., 2022).

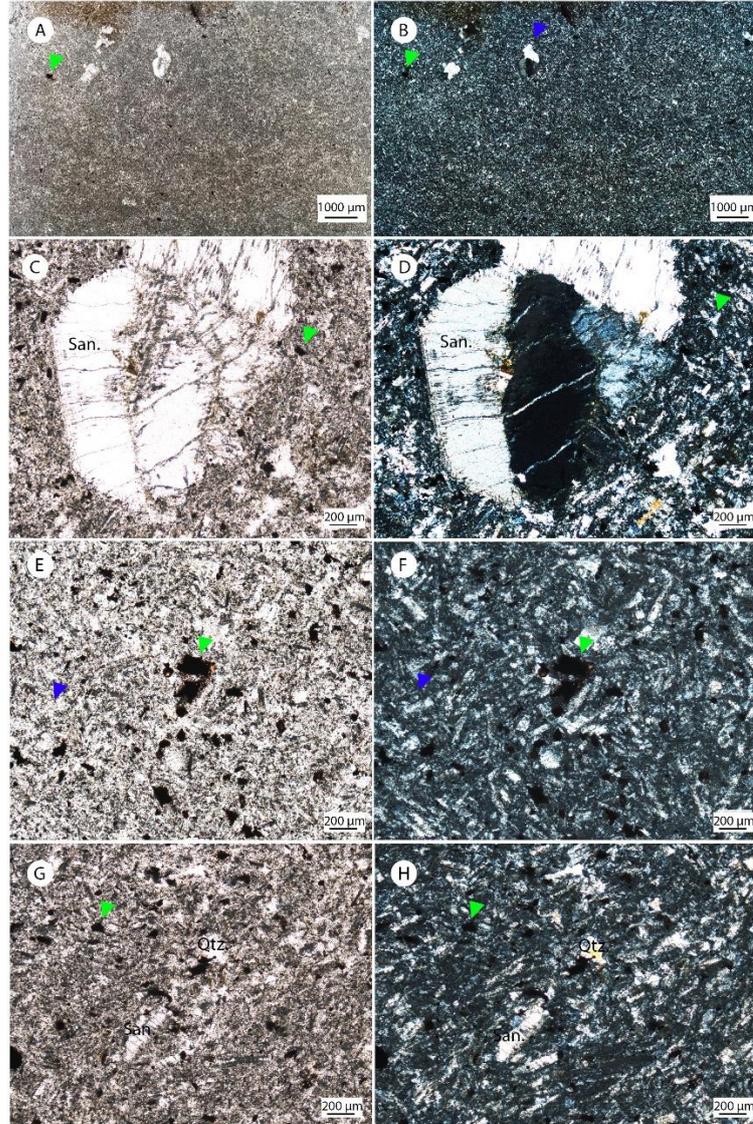
As amostras de basalto exibem matriz predominantemente afanítica, composta por cristais finos de plagioclásio, com fenocristais esparsos de plagioclásio e olivina, de acordo com a figura 15. A porosidade é limitada, sendo principalmente do tipo vesicular isolada ou preenchida por minerais secundários (A e B). Esta feição indica resfriamento rápido e ausência significativa de conectividade porosa visível, o que restringe a capacidade de armazenamento de fluidos a poros intergranulares ou à presença de microfraturas (Gunnarsson et al., 2018; Silva, 2025).

Figura 13 - Lâmina petrográfica das rochas traquíticas. A-B) Aspecto do traquito porfirítico contendo fenocristais de sanidina e quartzo (nicóis paralelos e cruzados). Seta vermelha – poro formado por dissolução da matriz; seta azul – fenocristais de sanidina; seta amarela – amígdalas parcialmente dissolvidas. C-D) Detalhe de uma amígdala parcialmente preenchida com calcita, óxido de ferro e cimento de quartzo. Seta verde – magnetita. Qtz – cristal de quartzo; Ofc – óxido de ferro. E-F) Matriz afanítica de traquiandesito com cristais finos dispersos de quartzo e magnetita. Seta verde – óxido de ferro; seta azul – fenocristais de sanidina. G-H) Detalhe de um cristal de sanidina (San) e um cristal de quartzo mostrando uma zona de absorção. Seta verde – cristais de magnetita.



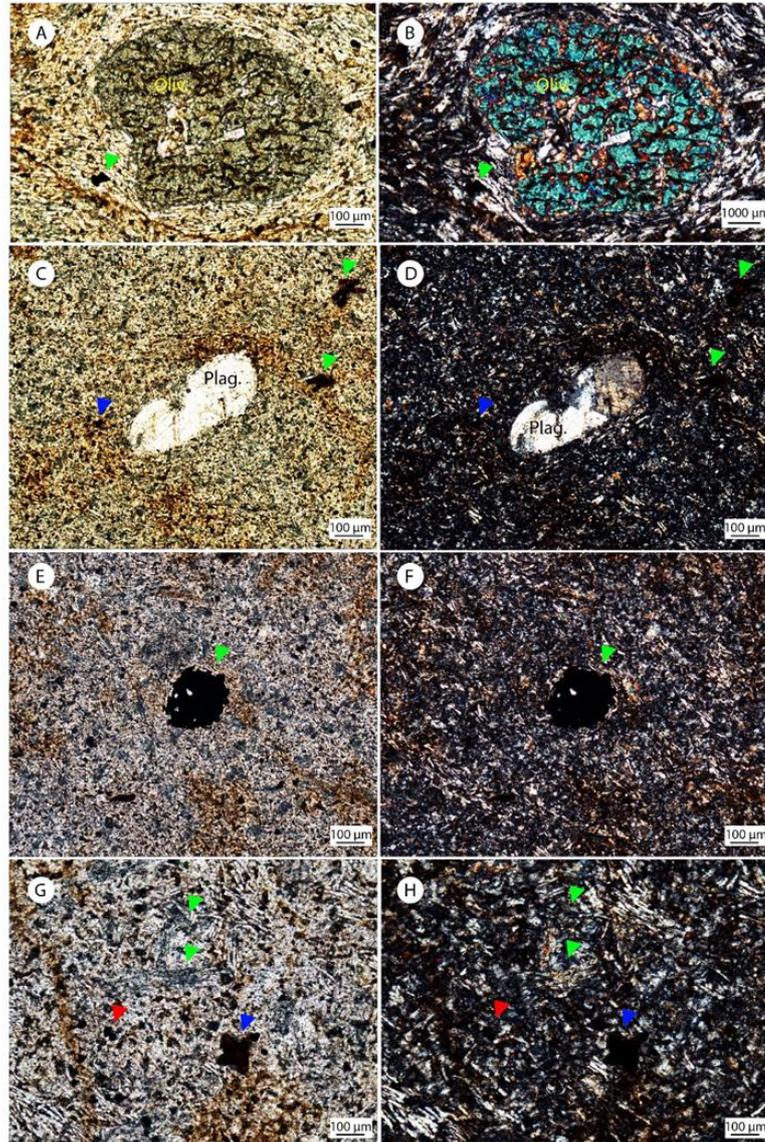
Fonte: Carvalho et al. (2022).

Figura 14 - Lâmina petrográfica analisada de Traquiandesitos. A) e B) Fenocristais de sanidina imersos em uma matriz muito fina. C) e D) Detalhe para a geminação carlsbar característica da série dos feldspatos potássicos. Seta verde indica a ocorrência de agregados de minerais opacos. E) e F) Micrólitos de feldspato potássico (seta azul) e agregado de minerais opacos (seta verde). G) e H) Detalhe da mineralogia da matriz da rocha. Ela é formada por micrólitos de sanidina, quartzo e agregados de minerais opacos.



Fonte: O autor. (2025).

Figura 15 - Lâmina petrográfica analisada de Basaltos. A) e B) Fenocristal anédrico de olivina com películas de percolação de óxido de ferro. Os cristais de plagioclásio definem uma textura de foliação magmática. Minerais opacos estão presentes na amostra (seta verde). C) e D) Fenocristal anédrico de plagioclásio com bordas de reação e minerais opacos (seta verde). E) e F) Agregado de minerais opacos. G) e H) Matriz é composta por cristais de piroxênio (seta verde) e minerais opacos (setas vermelha e azul).



Fonte: O autor. (2025).

A partir das análises petrográficas, observou-se que os traquitos porfíricos possuem maior potencial de porosidade secundária, favorecida pela presença de amígdalas, dissoluções tardias e fraturamento natural (Correia Filho et al., 2024). As observações em lâmina delgada e a identificação de poros moldiciais, vugs e fraturas preenchidas por minerais secundários corroboram esse comportamento (Carvalho et al., 2022).

4.2 PARÂMETROS PETROFÍSICOS

As medidas de cada amostra, juntamente dos valores obtidos pelos equipamentos petrofísicos estão dispostos na tabela a seguir:

Tabela 3 – Amostras de Traquitos (TQ), Traquiandesitos (TA) e Basaltos (BA), e suas respectivas medições e resultados de porosimetria e permeamtria a gás.

Amostra	Comprimento (in)	Diâmetro (in)	Porosidade (%)	Permeabilidade (mD)
BC-TQ-01	2,78	1,49	13,72	<0,01
BC-TQ-02	2,69	1,5	14,75	0,01
BC-TQ-03	2,82	1,5	15,05	<0,01
BC-TQ-04	2,28	1,5	14,8	<0,01
BC-TQ-05	1,37	1,46	9,81	<0,01
BC-TQ-06	3,12	1,51	11,87	<0,01
BC-TQ-08	2,75	1,51	12,57	<0,01
BC-TQ-09	1,87	1,51	11,92	<0,01
BC-TA-01	3,5	1,51	1,46	<0,01
BC-TA-02	1,49	1,51	1,47	<0,01
BC-TA-03	2,72	1,51	4,2	<0,01
BC-TA-06	3,15	1,51	5,12	<0,01
BC-BA-S-02	3,18	1,51	0,29	<0,01
BC-BA-S-03	1,82	1,51	1,05	<0,01

Fonte: O autor (2025).

A análise petrofísica revelou que os traquitos porfiríticos apresentaram boa porosidade, variando entre cerca de 10% e 15%, valor que pode estar relacionado à presença de amígdalas e à atuação de processos de alteração diagenética tardia, que geraram vugs de pequenas dimensões (Correia et al., 2024). Os traquiandesitos apresentaram porosidades entre 1,5% e 5%, entretanto, os valores mais altos foram observados em amostras com fraturas. Os basaltos apresentaram valores de porosidade semelhantes aos dos traquiandesitos, mas sem fraturamento evidente, endossando assim os valores mais baixos. Em relação à permeabilidade, os valores mensurados foram iguais ou inferiores a 0,01 mD em todas as amostras, o que indica uma permeabilidade de matriz muito baixa. (Carvalho et al., 2022).

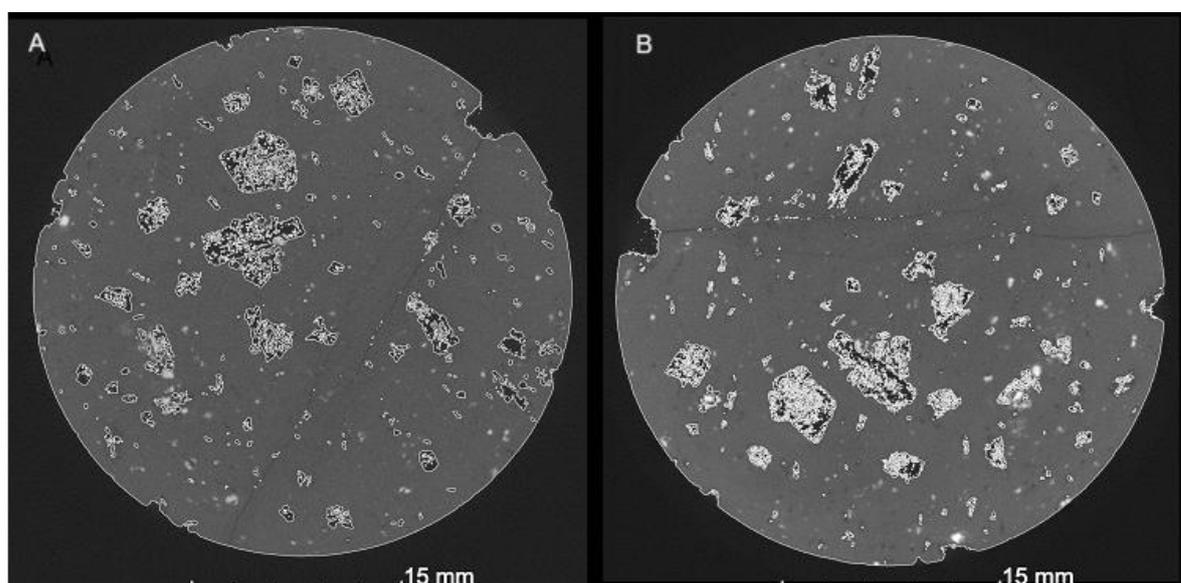
4.3 ANÁLISE DE ROCHA DIGITAL

Essa análise consiste no tratamento e segmentação das imagens, além da aplicação de ferramentas computacionais para cálculo de porosidade, volume poroso, tamanho médio de poro e visualização 3D. Como visto na metodologia, dois

padrões de escaneamento foram aplicados para determinar o modelo a ser utilizado, sendo o 1º padrão o escolhido.

Com isso, as imagens geradas para os traquitos tiveram qualidade equivalentes, visualizado na figura 15. Entretanto, com a aplicação de uma tensão menor, observou-se a presença discreta de alguns artefatos. A produção de um feixe com menor energia, o segundo padrão permite uma visualização melhor da dissolução dos poros em comparação com a matriz rochosa, entretanto isso dificulta a definição de materiais alterados nas bordas dos poros. Esse efeito pode ser observado a partir da identificação de ruído durante a segmentação entre poros e matriz. Diante disso, o primeiro padrão foi adotado para os traquitos, pois mesmo com uma resolução maior, se mostrou mais eficaz para o tratamento deste efeito específico (Du Plessis et al., 2017; Carvalho et al., 2023).

Figura 16 - Comparação entre imagens dos traquitos. A) 150 kV e B) 120 kV. Na figura B), encontra-se pontos segmentados como poros próximos à borda com resolução muito pequena, como superestimação de porosidade, detalhe não encontrado em A)

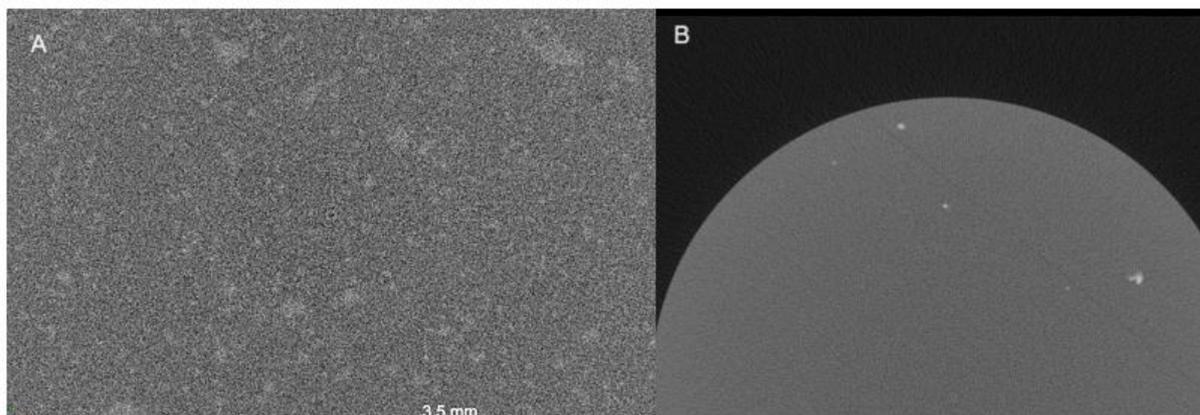


Fonte: O autor (2025).

Para os litotipos traquiandesitos e basaltos, os padrões tiveram divergências muito maiores, encontrados (Fig. 16). O uso de diferentes parâmetros permitiu observar variações acentuadas nas imagens geradas. A imagem de menor resolução, que foi produzida para avaliar a presença de microporos, microfaturas e minerais mais densos, apresentou muito ruído, o que impediu a extração de resultados confiáveis. Enquanto a imagem de maior resolução das mesmas

amostras de traquito, permitiram, mesmo que ainda com a presença de artefatos causados pelo *Beam Hardening*, melhores resultados (Du Plessis et al., 2017).

Figura 17 - Comparação entre escaneamentos dos basaltos. A) Tensão de 220 kV. Verifica-se uma ampliação exacerbada da imagem, com uma distinção difícil de tons de cinza no interior da amostra. Em B), com tensão de 150 kV, encontra-se uma imagem mais limpa, a presença de fratura e de minerais em diferentes tons de cinza



Fonte: O autor (2025).

Na figura 16, verifica-se que a ampliação da imagem com menor resolução ($15\ \mu\text{m}$), causa uma distorção e a geração de artefatos no escaneamento que foi feito com 220 kV. Já na imagem ampliada manualmente após a aquisição com 150 kV, e uma resolução maior ($40\ \mu\text{m}$), foi possível obter um maior contraste entre os minerais presentes na amostra, além da presença de uma microfratura.

O procedimento com melhor resultado foi adotado para o escaneamento de todas as amostras (parâmetros do 1º padrão). Para os traquitos, seguiu-se a metodologia de aplicar a análise de defeitos para o cálculo da porosidade. Os valores de porosidade encontrados para cada amostra foram:

Tabela 4 – Resultados de porosidade via *software*

Amostra	Porosidade (%)
BC-TQ-01	5,58
BC-TQ-02	6,19
BC-TQ-03	5,62

Fonte: O autor (2025).

Conforme esperado, verificou-se algumas diferenças entre os resultados de porosimetria encontrados pelos ensaios experimentais e pela μ TC, entretanto, estas diferenças foram pequenas o que demonstra a importância da análise de imagens. Conforme a compreensão do limite de resolução das imagens que podem ser obtidas para o tamanho da amostra escaneada, entende-se que o menor valor a ser alcançado de poro consiste em um voxel de $40 \times 40 \times 40 \mu\text{m}$. Ou seja, a quantificação dos poros pode ser bem descrita diante da combinação das duas técnicas utilizadas (Vieira et al., 2021). A partir do volume de poros calculado com as imagens de μ TC, é possível sugerir que a porosidade está dividida em um percentual de macroporos e outro de micro e mesoporos (Rouquerol et al., 1994), conforme mostrado na Tabela 5.

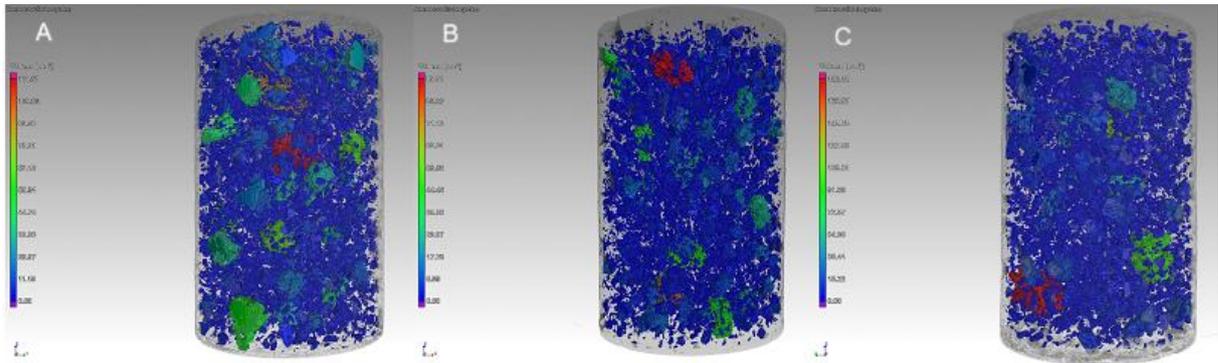
Tabela 5 - Quantificação porosa via classe de poros

Amostra	Macroporos (%)	Micro/Mesoporos (%)
BC-TQ-01	5,58	8,14
BC-TQ-02	6,19	8,56
BC-TQ-03	5,62	9,43

Fonte: O autor (2025).

A partir da quantificação e classificação da porosidade encontrada nas amostras, pode-se visualizar o comportamento padrão com a disposição porosa na Figura 17. Observa-se, de acordo com a escala, e ao longo do perfil, a disposição e formato de poros semelhantes, além de uma nuvem porosa representativa, formada por poros encontrados no limite mínimo da análise, de 1 voxel, em azul.

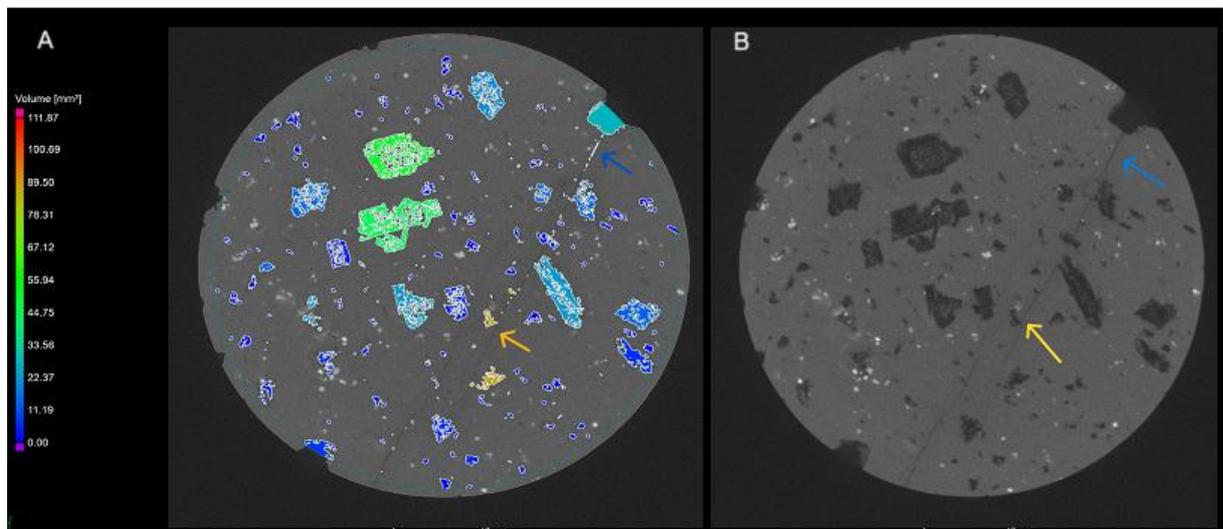
Figura 18 - Volumes 3D das amostras BC-TQ-01, 02 e 03 após realização de análise de porosidade, com poros maiores indicados em vermelho, e menores em tons de azul



Fonte: O autor (2025).

A amostra BC-TQ-02 possui uma nuance em relação às demais, uma fratura que se estende ao seu comprimento, mas aparenta uma percolação de fluido, preenchendo-a. Através da μ TC, foi possível verificar o comportamento ao longo da amostra da fratura. Na figura 18, visualizando o mesmo corte com e sem análise, esse comportamento pode ser discutido. Na parte superior da amostra, a fratura já se encontra visível, mas percebe-se que durante a segmentação parte de sua estrutura não foi considerada como poro (seta amarela). Apenas em áreas muito próximas a outros poros externos a aplicação conseguiu incluir partes da fratura como porosidade (seta azul).

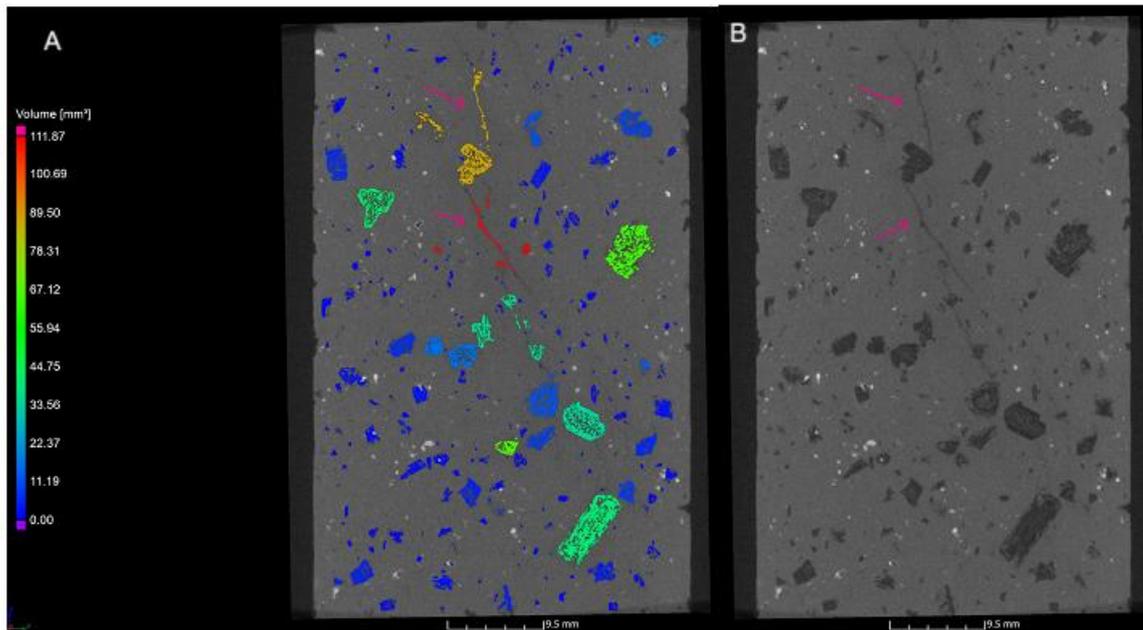
Figura 19 - BC-TQ-02 com e sem análise de porosidade pelo eixo XY, com setas indicando onde a segmentação definiu áreas de poro (azul) e áreas preenchidas (amarela) da fratura



Fonte: O autor (2025).

A análise do comprimento da fratura (Fig. 20), permite determinar que a fratura está conectada a outros poros (setas rosas), o que indica uma possível interconectividade. Este aspecto foi observado em outras amostras e sugere que o fraturamento é essencial para o potencial de permeabilidade das rochas estudadas (Carvalho et al., 2022; Correia Filho et al., 2024).

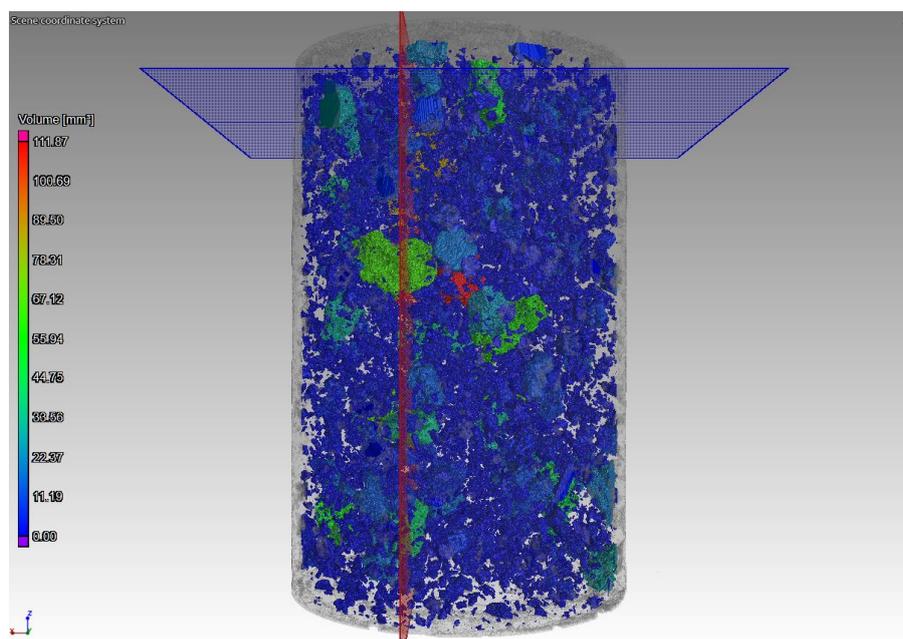
Figura 20 - BC-TQ-02 com e sem análise de porosidade pelo eixo YZ, com setas rosas indicando preenchimento das fraturas



Fonte: O autor (2025).

Os *slices* utilizados são mostrados na Figura 21, e mostram os pontos utilizados para visualização 2D e como se comportam no volume 3D.

Figura 21 - BC-TQ-02 com análise de porosidade. A posição dos *slices* indica os planos onde foram realizadas as análises mostradas nas Figuras 19 e 20.



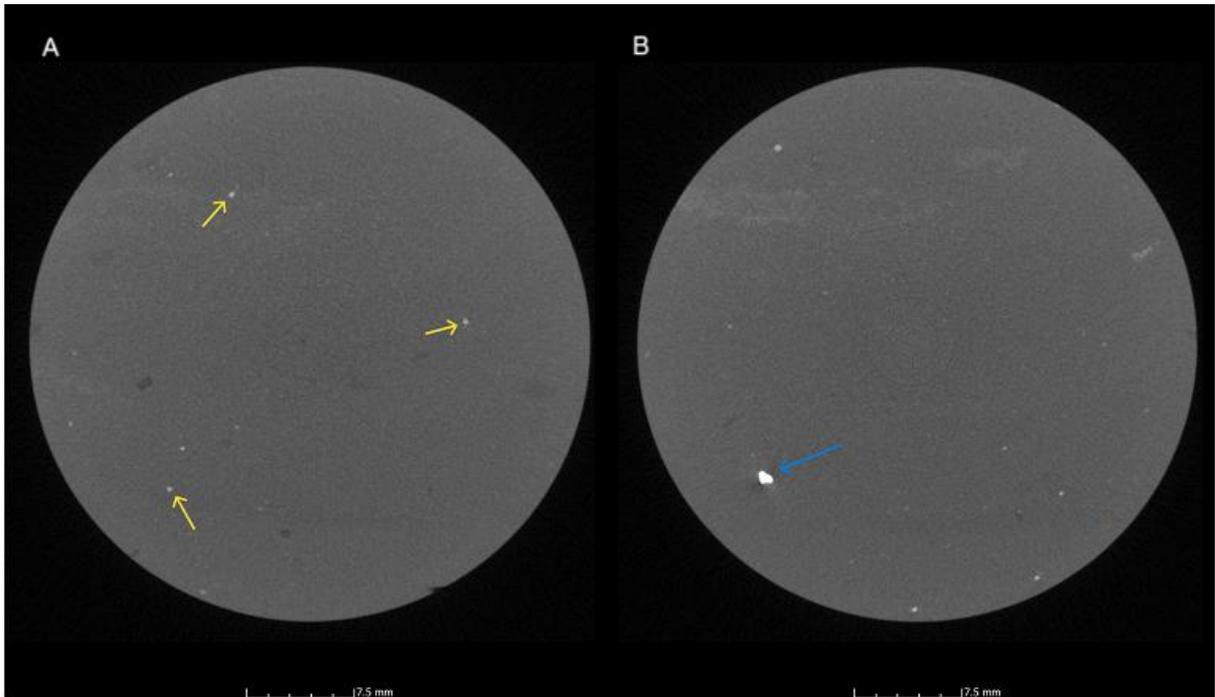
Fonte: O autor (2025).

Comparando os resultados da análise visual das imagens dos traquitos, é possível inferir que existe uma distribuição similar dos poros nas amostras. Este efeito possivelmente se deve a origem da porosidade, herdada da distribuição de cristais porfiríticos da textura da rocha que foram alterados. O estudo de alguns plugues representativos sugere que as fraturas de pequena escala são importantes para a conexão entre os poros isolados na matriz (Liu et al., 2023).

Não foi possível realizar a análise de porosidade das amostras de traquiandesitos e basaltos por meio da abordagem de rocha digital. Devido a densidade das amostras, e a dominância de microporosidade a segmentação dos poros por meio do histograma apresenta enorme desafio. Entretanto, pode-se observar nas imagens da Figura 2, a presença tanto de minerais, quanto de microporos formados por bolhas de gás que ficaram dentro do magma resfriado, quanto de fraturas (Carvalho et al., 2022).

Na Figura 21, nota-se a presença de pequenos cristais de feldspato, quartzo e magnetita, indicados pelas setas amarelas, e a presença de cristais de silicatos que apresentam uma forma retangular e que são maiores (Carvalho et al., 2022).

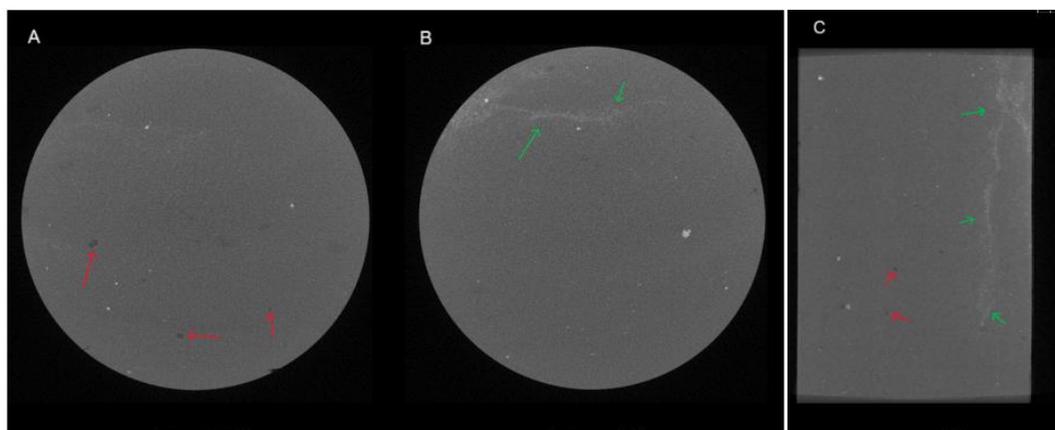
Figura 22 - *Slices* da amostra BC-TA-03, com setas descrevendo minerais menores (amarelas) e maiores (azuis)



Fonte: O autor (2025).

Em outras imagens (*slices*) da mesma amostra (Fig. 21), mostradas na Figura 22 é possível notar pequenas zonas escuras, identificadas como poros potenciais (setas vermelhas). Além disso, na região a imagem mostra uma fratura, feição planar de geometria irregular. No caso destas rochas, as fraturas podem ser de deformação após sua solidificação ou de resfriamento, visto que os afloramentos contêm disjunções colunares e pequenas fraturas de resfriamento (Liu et al., 2023; Becker et al., 2019).

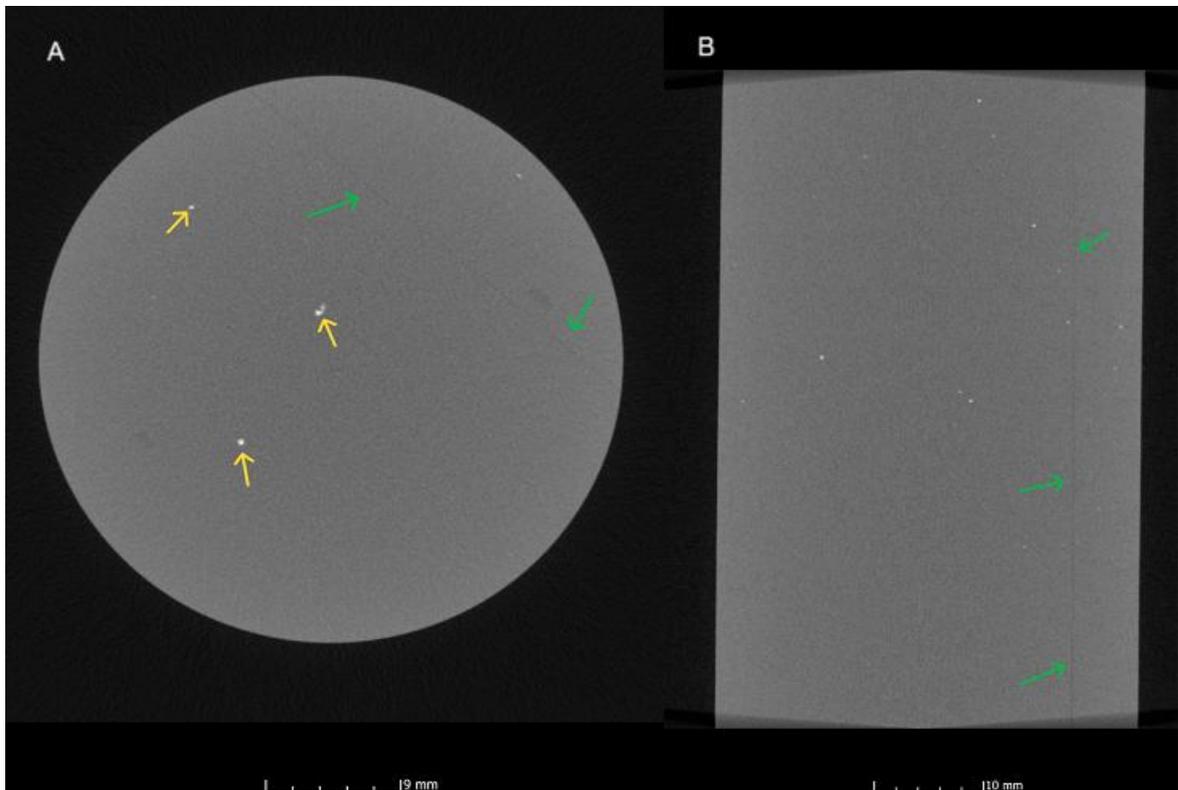
Figura 23 - *Slices* da amostra BC-TA-03, com setas descrevendo poros (vermelhas) e fraturas (verdes)



Fonte: O autor (2025).

A imagem do plugue de basalto (Fig. 23) mostra a presença de finos cristais de minerais com alta densidade, demonstrando juntamente à análise de petrografia, que são possíveis fenocristais de magnetita (setas amarelas). Nesta imagem a fratura é indicada com uma seta verde. A presença de fraturas em tom mais escuro, indica seu preenchimento tardio, não preenchida por óxidos ou carbonatos desde sua formação, enquanto fraturas de resfriamento, geralmente formadas durante a solidificação do magma, são sistemáticas e relacionadas à contração térmica. (Liu et al., 2023; Silva et al., 2025).

Figura 24 - *Slices* da amostra BC-BA-S-02. As setas amarelas indicam minerais mais densos, e as setas verdes indicam a presença de uma fratura planar.



Fonte: O autor (2025).

5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

O presente trabalho teve como objetivo principal avaliar o potencial de rochas vulcânicas da Suíte Magmática Ipojuca, aflorantes na Bacia de Pernambuco, para o armazenamento geológico de CO₂ por mineralização. A partir da caracterização

petrográfica, petrofísica e microestrutural de três litotipos — traquito, basalto e traquiandesito — foi possível atingir todos os objetivos propostos. As análises realizadas permitiram identificar as características texturais e mineralógicas relevantes, mensurar parâmetros como porosidade e permeabilidade, e avaliar a conectividade da rede porosa via microtomografia de raios X. Os resultados demonstram que as rochas estudadas, especialmente os traquitos fraturados, possuem atributos compatíveis com os requisitos para o sequestro mineral de carbono, indicando a viabilidade preliminar da aplicação da técnica na região estudada.

As rochas vulcânicas de composição máfica a intermediária da SMI, aflorantes na faixa costeira da Bacia de Pernambuco, apresentam características físico-químicas e texturais que as qualificam como candidatas promissoras para projetos de sequestro geológico de CO₂ por mineralização. A comparação com os litotipos utilizados em projetos-piloto bem-sucedidos, como Wallula (EUA) e Hellisheidi (Islândia), sugere que estas rochas possuem potencial para os efeitos de mineralização.

As análises petrográficas revelaram que os traquitos porfiríticos possuem pouca porosidade primária, mas possuem porosidade secundária criada pela dissolução de minerais, e também criada pela formação de fraturas criadas pelo resfriamento e por deformação mecânica tardia. Em contrapartida, traquiandesitos e basaltos apresentaram baixa porosidade primária, e pouca porosidade secundária limitada à presença de pequenas fraturas e microporos gerados por alterações locais da matriz.

Os ensaios petrofísicos demonstraram que os traquitos são os litotipos mais porosos, e que os traquiandesitos e basaltos apresentaram porosidades muito baixa. Os ensaios de permeabilidade mostraram que todos os litotipos apresentam baixa conectividade entre os poros.

As análises digitais de rocha, por sua vez, ofereceram informações complementares sobre porosidade e a conectividade interna dos poros. A concordância entre os valores de porosidade digital e convencional nas amostras de traquito confirma a robustez do modelo e valida o uso de μ CT como ferramenta de apoio à caracterização petrofísica. Os valores de porosidade obtidos por essa técnica coincidiram com os intervalos detectados por porosimetria a gás, dentro das limitações impostas pela resolução do voxel. Para amostras em que não foi possível

realizar a aplicação de análises de porosidade, o estudo de μ CT permitiu ainda a identificação de minerais e fraturas.

A observação dos afloramentos indicou que as estruturas frágeis — como fraturas e falhas — representam os principais componentes do sistema de permeabilidade e que estas serão importantes para o fluxo de fluídos nestas rochas.

Em síntese, os resultados obtidos demonstram que as rochas da SMI, especialmente os traquitos fraturados, apresentam condições favoráveis ao armazenamento mineral de CO_2 . No entanto, para que se possa avançar na avaliação da viabilidade técnica e econômica de projetos de CCS na região, são necessários estudos adicionais, incluindo simulações de transporte reativo, ensaios de percolação em escala piloto e caracterização de longo prazo da estabilidade geoquímica do sistema. A partir disso, recomenda-se a continuidade das investigações com foco em simulações acopladas de fluxo e reatividade geoquímica, capazes de prever a evolução da porosidade e da mineralogia ao longo do tempo em condições representativas de campo. Ensaio em laboratório com injeção de CO_2 em amostras saturadas, além de modelagens hidromecânicas que incorporem os efeitos de fraturas e falhas, podem aprimorar a previsibilidade do desempenho do sistema de armazenamento. Adicionalmente, a integração com dados sísmicos, perfis geofísicos e modelos geomecânicos regionais será fundamental para a seleção de áreas-alvo e para o dimensionamento de projetos-piloto em escala real. A abordagem interdisciplinar entre geologia, engenharia de reservatórios e modelagem numérica será decisiva para consolidar a viabilidade técnica e econômica do sequestro mineral de carbono na Bacia de Pernambuco.

REFERÊNCIAS

- AJAYI, T. et al. A review of CO₂ storage in geological formations emphasizing modeling, monitoring and capacity estimation & approaches. **Petroleum Science**, v. 16, p. 1028-1063, 2019.
- ALI, Muhammad; JHA, Nilesh Kumar; PAL, Nilanjan; et al. Recent advances in carbon dioxide geological storage, experimental procedures, influencing parameters, and future outlook. *Earth-Science Reviews*, v. 225, 2022.
- ANDRÄ, H., Combaret, N., Dvorkin, J., Glatt, E., Han, J., Kabel, M., et al. Digital rock physics benchmarks — Part I: Imaging and segmentation. **Computers & Geosciences**, 50, 25–32, 2013.
- BARBOSA, José Antonio; FERNANDA MAIA, Maria; LIMA FILHO, Mário; *et al.* **Adapted from extended abstract prepared in conjunction with poster presentation at AAPG 2014 Annual Convention and Exhibition.** [s.l.]: AAPG, 2014.
- BARUCHEL, J., Cloetens, P., Härtwig, J., Ludwig, W., Mancini, L., Pernot, P., and Schlenker, M., 2000b, Phase imaging using highly coherent X-rays: Radiography, tomography, diffraction topography: **Journal of Synchrotron Radiation**, v. 7, p. 196–201. 2000.
- BASHIR, A. et al. Comprehensive review of CO₂ geological storage: Exploring principles, mechanisms, and prospects. **Earth-Science Reviews**, v. 249, p. 104672, 2024.
- BECKER, S. et al. Pore-structure evolution during sintering of porous glass investigated by in situ X-ray microtomography. **Journal of the American Ceramic Society**, v. 102, n. 6, p. 3370–3379, 2019
- BENSON, S. M.; COLE, D. R. CO₂ Sequestration in Deep Sedimentary Formations. **Elements**, v. 4, n. 5, p. 325–331, out. 2008.
- BÉREST, P. et al. Review and analysis of historical leakages from storage salt cavern wells. **Oil & Gas Science and Technology**, v.74, p. 1-23, 2019.
- BEST, Myron G. *Igneous and Metamorphic Petrology*. 2. ed. Malden, MA: Blackwell Science, 2003. xxi, 729 p. ISBN 1-4051-0588-7
- BUARQUE, Bruno V.; BARBOSA, José A.; MAGALHÃES, José R.G.; *et al.* Post-rift volcanic structures of the Pernambuco Plateau, northeastern Brazil. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 70, p. 251–267, 2016.
- BUSHBERG, Jerrold T.; SEIBERT, J. Anthony; LEIDHOLDT JR., Edwin M.; BOONE, John M. *The Essential Physics of Medical Imaging*. 3. ed. Philadelphia, PA: Lippincott Williams & Wilkins, 2012.

CAO, Cheng; LIU, Hejuan; HOU, Zhengmeng; *et al.* A review of CO₂ storage in view of safety and cost-effectiveness. **Energies**, v. 13, n. 3, 2020.

CHICO SCIENCE & NAÇÃO ZUMBI. **Monólogo ao pé do ouvido**. In: Da lama ao caos [CD]. Recife: Chaos, 1994.

COSTA, L. F.; ANTONINO, A. C. D.; HECK, R. J.; COUTINHO, A. P.; VASCONCELOS, T. C. MACHADO, C. B. X-ray computed microtomography in the evaluation of the porous system of soils, **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.22, n.4, p. 249-254, 2018.

CALLOW, Ben; FALCON-SUAREZ, Ismael; AHMED, Sharif; *et al.* Assessing the carbon sequestration potential of basalt using X-ray micro-CT and rock mechanics. **International Journal of Greenhouse Gas Control**, v. 70, p. 146–156, 2018.

CARVALHO, B. et al. Petrophysical properties of Volcanic Rocks from the Pernambuco Basin -Potential for CO₂ sequestration through mineralization. In: 11^o Congresso Brasileiro de Petróleo e Gás, Belém, **Boletim de Resumos**, p. 1-8, 2022.

CARVALHO, B. et al. Microtomographic Characterization of Porosity Formed by alteration phases in Trachyte Rocks: Application to non-conventional Geological Reservoirs. In: **6th InterPore**, Campinas, São Paulo, 2023.

CNUDDE, V.; BOONE, M.N. High-resolution X-ray computed tomography in geosciences: A review of the current technology and applications, **Earth-Science Reviews**, v. 123, p. 1-17, 2013.

CORREIA FILHO, O. J. et al. Volcanic weathered crust reservoir analog: Insights from fault-controlled fracture permeability in the trachytic rocks of the Pernambuco Basin, NE Brazil. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 148, p. 105140, 2024.

DRYMONI, K. et al. Dyke to sill deflection in the shallow heterogeneous crust during glacier retreat: Part II. **Bulletin of Volcanology**, v. 86, n. 43, 2024.

DONG, H.; BLUNT, M. J. Pore-network extraction from micro-computerized-tomography images. **Physical Review E**, v. 80, n. 3, p. 036307, 2009

DU PLESSIS, A. et al. Laboratory X-ray micro-computed tomography: A user guideline for biological, biomedical and bioengineering applications. **bioRxiv**, 2017.

FRED, O.; HEINONEN, J.; HEIKKILÄ, M. Tracing the styles of mafic–felsic magma interaction: A case study of crustal assimilation and magma mixing. **Bulletin of the Geological Society of Finland**, v. 91, n. 1, p. 5–33, 2019.

FRIEDMANN, S. Julio; DOOLEY, James J.; HELD, Hermann; *et al.* The low cost of geological assessment for underground CO₂ storage: Policy and economic implications. **Energy Conversion and Management**, v. 47, n. 13–14, p. 1894–1901, 2006.

GÍSLASON, S. R. et al. A brief history of CarbFix: Challenges and victories of the project's pilot phase. **Energy Procedia**, v. 146, p. 103–114, 2018.

GÍSLASON, S. R. et al. Mineral sequestration of carbon dioxide in basalt: A pre-injection overview of the CarbFix project. **International Journal of Greenhouse Gas Control**, v. 4, n. 3, p. 537-545, 2010.

GOULART, Mariana Barbero Ribeiro; COSTA, Pedro Vassalo Maia da; COSTA, Alvaro Maia da; *et al.* Technology readiness assessment of ultra-deep Salt caverns for carbon capture and storage in Brazil. **International Journal of Greenhouse Gas Control**, v. 99, 2020.

GUNNARSSON, I. et al. The rapid and cost-effective capture and subsurface mineral storage of carbon and sulfur at the CarbFix2 site. **International Journal of Greenhouse Gas Control**, v. 79, p. 117-126, 2018.

GYSI, A. & STEFÁNSSON, A. CO₂–water–basalt interaction. Low temperature experiments and implications for CO₂ sequestration into basalts. **Geochimica et Cosmochimica Acta**, 81, 129–152, 2012.

KELEMEN, Peter B.; MCQUEEN, Noah; WILCOX, Jennifer; *et al.* Engineered carbon mineralization in ultramafic rocks for CO₂ removal from air: Review and new insights. **Chemical Geology**, v. 550, 2020.

KELEMEN, Peter; BENSON, Sally M.; PILORGÉ, Hélène; *et al.* An Overview of the Status and Challenges of CO₂ Storage in Minerals and Geological Formations. **Frontiers in Climate**, v. 1, 2019.

KHANDOOZI, S. et al. A critical review of CO₂ mineral trapping in sedimentary reservoirs—from theory to application: Pertinent parameters, acceleration methods and evaluation workflow. **Earth-Science Reviews**, p. 104515, 2023.

LISABETH, H. P.; ZHU, W.; KELEMEN, P. B.; *et al.* Experimental evidence for chemo-mechanical coupling during carbon mineralization in ultramafic rocks. **Earth and Planetary Science Letters**, v. 474, p. 355–367, 2017.

LIU, C., BUONO, G., SHAN, X., et al. X-ray computed microtomography revealing the effects of volcanic, alteration, and burial processes on the pore structure of rocks from unconventional reservoirs (Songliao Basin, NE China). **Micron**, 226, 211781, 2023.

MAIA, Maria; MAIA, Barroso; BARBOSA, José Antonio; *et al.* **CARACTERÍSTICAS PETROGRÁFICAS E GEOQUÍMICAS DAS FORMAÇÕES SILICICLÁSTICAS (APTIANO-ALBIANO) DA BACIA DE PERNAMBUCO, NE DO BRASIL.** [s.l.: s.n.], 2012.

MAIRE, E.; WITHERS, P. J. Quantitative X-ray tomography. **International Materials Reviews**, v. 59, n. 1, p. 1–43, 2014.

MCGRAIL, B.P., Schaef, H.T., Ho, A.M., Chien, Y.-J., Dooley, J.J., Davidson, C.L., 2006. Potential for carbon dioxide sequestration in flood basalts. **J. Geophys. Res. Solid Earth** **111**, 2006.

MCGRAIL, B. P. et al. Wallula basalt pilot demonstration project: post-injection results and conclusions. **Energy Procedia**, v. 114, p. 5783-5790, 2017.

NASCIMENTO, Marcos Antonio Leite do; SÉRGIO DE SOUZA, Zorano; FERREIRA LIMA FILHO, Mário; *et al.* **RELAÇÕES ESTRATIGRÁFICAS DA PROVÍNCIA MAGMÁTICA DO CABO, BACIA DE PERNAMBUCO, NORDESTE DO BRASIL.** [s.l.: s.n.], 2004.

NASCIMENTO, Marcos Antonio Leite do; SOUZA, Zorano Sérgio de. **GEOLOGIA, GEOCRONOLOGIA, GEOQUÍMICA E PETROGÊNESE DAS ROCHAS ÍGNEAS CRETÁCIAS DA PROVÍNCIA MAGMÁTICA DO CABO E SUAS RELAÇÕES COM AS UNIDADES SEDIMENTARES DA BACIA DE PERNAMBUCO (NE DO BRASIL).** [s.l.: s.n.], 2003.

NATIONAL ACADEMIES OF SCIENCES, ENGINEERING, AND MEDICINE. Negative Emissions Technologies and Reliable Sequestration: A Research Agenda. Washington, D.C.: **The National Academies Press**, 2019.

NUNES, L. S. d. E. S. **Avaliação do impacto de emissões de fontes de poluentes atmosféricos sobre a qualidade do ar: Estudo de caso no Porto de Suape-PE**, 2017.

PAPADOPOULOS, A., WHITMORE, A. P., WHITE, R. P., MOONEY, S. J., & BIRD, N. R. A. Combining spatial resolutions in the multiscale analysis of soil pore-size distributions. **Vadose Zone Journal**, 8(1), 227–232, 2009

PIRES, A. C. B. Aplicação de radiações ionizantes na análise de minerais e rochas: uma abordagem didática. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 40, n. 1, 2018.

POLACCI, M., BAKER, D. R., MANCINI, L., TROMBA, G., & ZANINI, F. Three-dimensional investigation of volcanic textures by X-ray microtomography and implications for conduit processes. **Geophysical Research Letters**, 33(13), L13312, 2006.

PRASAD, S. K. et al. A review of the supercritical CO₂ fluid applications for improved oil and gas production and associated carbon storage. **Journal of CO₂ Utilization**, v. 72, p. 102479, 2023.

PURSWANI, Prakash; KARPYN, Zuleima T.; ENAB, Khaled; XUE, Yuan; HUANG, Xiaolei. Evaluation of image segmentation techniques for image-based rock property estimation. **Journal of Petroleum Science and Engineering**, v. 195, art. n. 107890, 2020.

RAZA, Arshad; GLATZ, Guenther; GHOLAMI, Raoof; *et al.* Carbon mineralization and geological storage of CO₂ in basalt: Mechanisms and technical challenges. **Earth-Science Reviews**, v. 229, p. 104036, 2022.

ROUQUEROL, F. et al. Recommendations for the characterization of porous solids. **Pure and Applied Chemistry**, v. 66, n. 8, p. 1739–1758, 1994.

SILVA, A.M.; **POTENCIAL DE ARMAZENAMENTO DE CO₂ VIA MECANISMO DE MINERALIZAÇÃO EM ROCHAS VULCÂNICAS DA FAIXA COSTEIRA DA BACIA**, Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Geociências, 2025.

SNÆBJÖRNSDÓTTIR, Sandra; WIESE, Frauke; FRIDRIKSSON, Thrainn; *et al.* CO₂ storage potential of basaltic rocks in Iceland and the oceanic Ridges. *In: Energy Procedia*. [s.l.]: Elsevier Ltd, 2014, v. 63, p. 4585–4600.

SUN, L. et al. Review on multiscale CO₂ mineralization and geological storage: mechanisms, characterization, modeling, applications and perspectives. **Energy & Fuels**, v. 37, n. 19, p. 14512-14537, 2023.

TAUHATA, L.; SALATI, I. P. A.; DI PRINZIO, R.; DI PRINZIO, A. **Radioproteção e Dosimetria: Fundamentos**. 5ª revisão. Rio de Janeiro, IRD/CDTN, 2003

TIAB, Djebbar; DONALDSON, Erle C. **Petrophysics: Theory and Practice of Measuring Reservoir Rock and Fluid Transport Properties**. 4. ed. Amsterdam: Elsevier – Gulf Professional Publishing, 2015.

TOMIĆ, Lola; KAROVIĆ MARIČIĆ, Vesna; DANILOVIĆ, Dušan; *et al.* **CRITERIA FOR CO₂ STORAGE IN GEOLOGICAL FORMATIONS**. [s.l.: s.n.], 2018.

TURNER, J. E. **Atoms, Radiation, and Radiation Protection**, ed.3, WILEY-VCH, 2007.

VIEIRA, L. DEBATIN; MOREIRA, A. C.; MANTOVANI, I. F.; HONORATO, A. R.; PRADO, O. F.; BECKER, M.; FERNANDES, C. P.; WAICHEL, B. L. The influence of secondary processes on the porosity of volcanic rocks: A multiscale analysis using 3D X-ray microtomography. **Applied Radiation and Isotopes**, v. 172, 2021.

VILA NOVA, A. A. Quantificação da Porosidade em Rochas Calcárias por meio de Tomografia Computadorizada de Raios X e de Raios Gama. **Dissertação (Mestrado)** – Universidade Federal de Pernambuco. DEN. Programa de Pós-graduação em Tecnologias Energéticas e Nucleares, 2020.

WANG, J. et al. CO₂ storage in carbonate rocks: an experimental and geochemical modeling study. **J. Geochem. Explor.** 234, 2022.

WANG, J. et al. Reactivity and dissolution characteristics of naturally altered basalt in CO₂-rich brine: Implications for CO₂ mineralization. **ACS omega**, v. 9, n. 4, p. 4429-4438, 2024.

WELLINGTON, S. L., VINEGAR, H. J.: X-ray computerized tomography. *Journal of Petroleum Technology* 39, 885-898 (1987).

WHITE, S. K. et al. 2020. Quantification of CO₂ mineralization at the Wallula basalt pilot project. **Environmental Science & Technology**, v. 54, n. 22, p. 14609-14616, 2020.

WICANDER, R.; MONROE, J. S. **Essentials of geology**. 5. ed. Belmont: Brooks/Cole, Cengage Learning, 2009.

WINTER, J. D. **Principles of igneous and metamorphic petrology**. 2. ed. Upper Saddle River: Pearson Education, 2010.

XIONG, Y. et al. CO₂ mineral trapping in fractured basalt. **International Journal of Greenhouse Gas Control**, v. 62, p. 160–172, 2017.

ZANDOMENEGHI, Diddle; VOLTOLINI, Matteo; MANCINI, Lucia; BRUN, Flavio; DREOSSI, Daniele; POLACCI, Mauro. Quantitative analysis of X-ray microtomography images of geomaterials: Application to volcanic rocks. **Geosphere**, v. 6, n. 6, p. 793–804, 2010.