Encontro Nacional do Programa de Formação de Recursos Humanos da ANP - 2026

CARACTERIZAÇÃO TERMO-HIDRO-MECÂNICA DE BASALTO PARA ARMAZENAMENTO DE CARBONO: DA ANÁLISE LABORATORIAL À VIABILIDADE DE UM PROJETO PILOTO NA BACIA DO PARANÁ

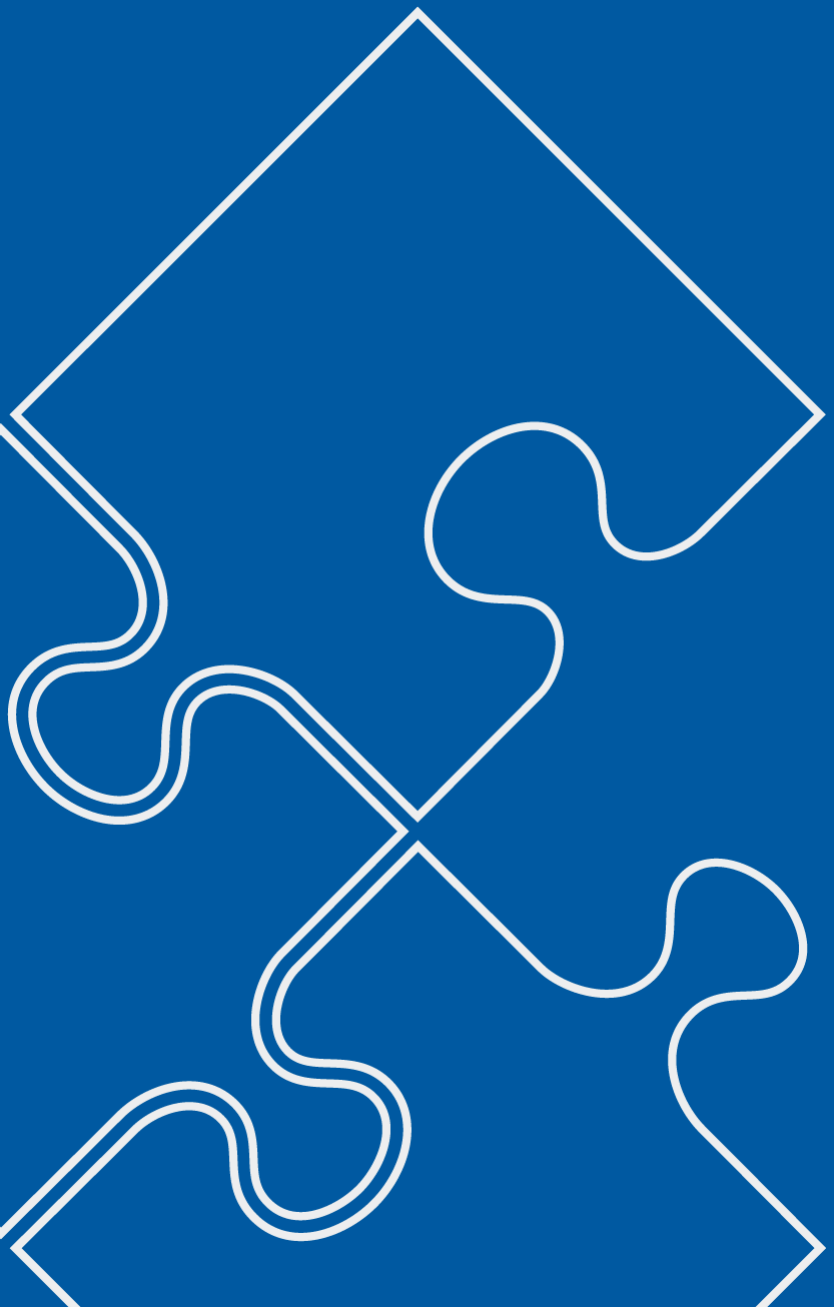
Valentina Alzate Rubio; Colombo Celso Gaeta Tassinari; Ismael Himar Falcon-Suarez

PRH-33.1

Tipo de bolsa: Doutorado

Universidade de São Paulo (USP)

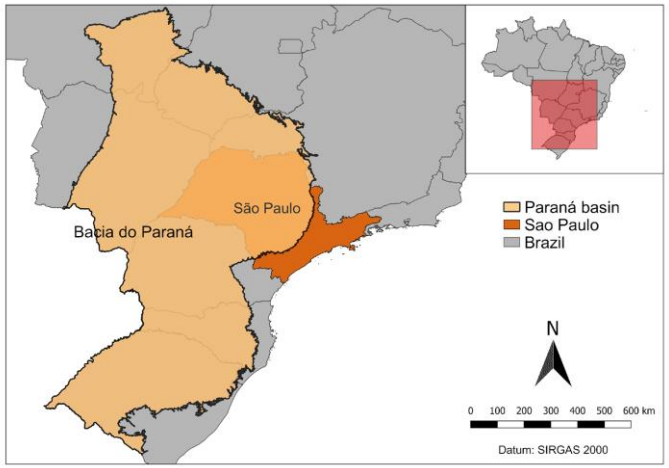
Gestão:

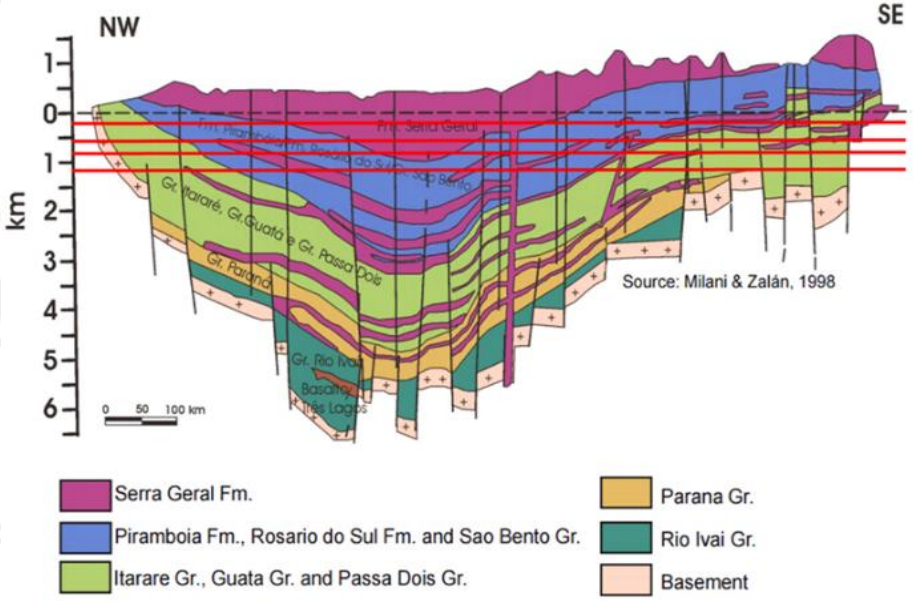


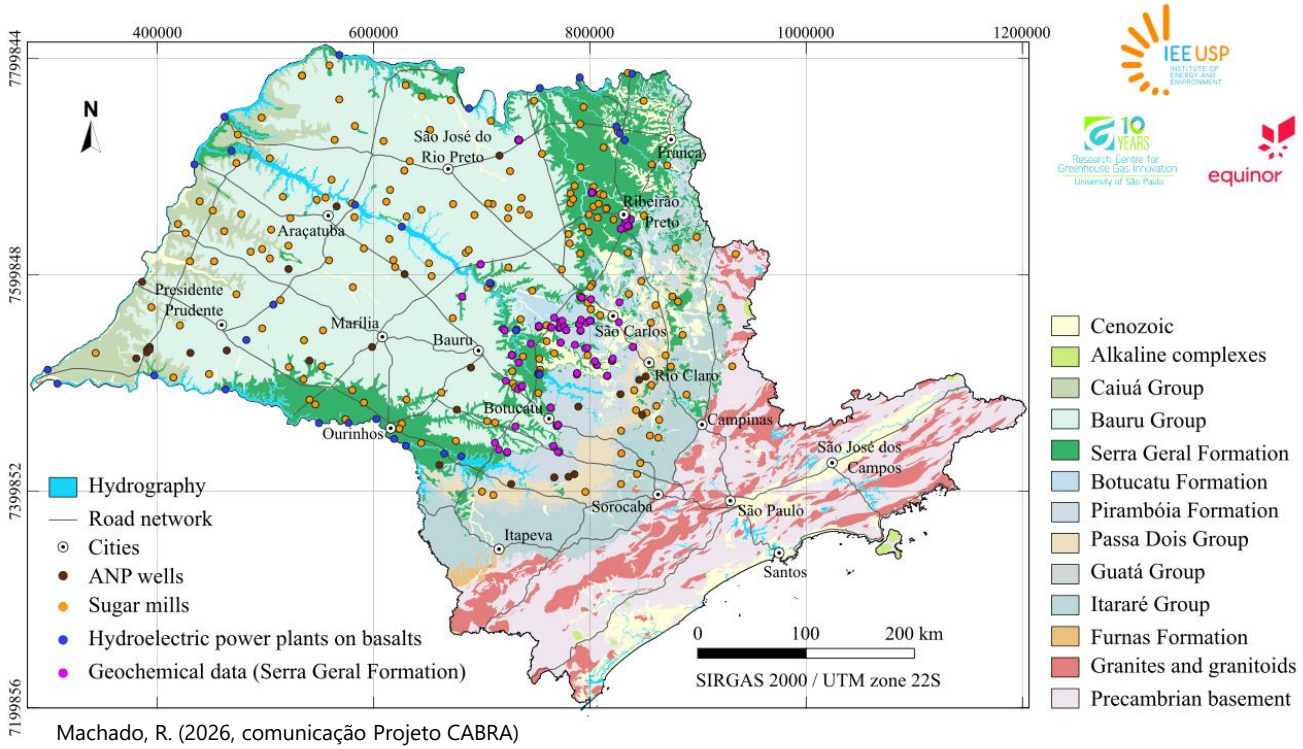
#1

Armazenamento de Carbono e os basaltos da Bacia do Paraná

Potencial geológico e fontes emissoras

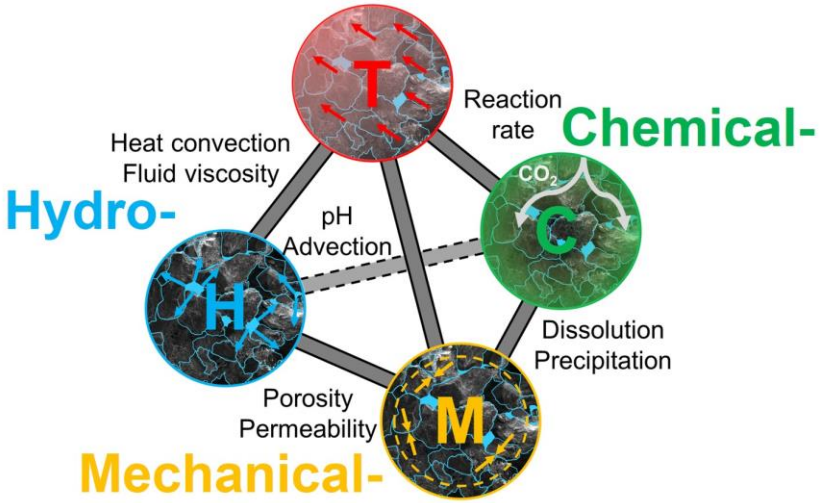




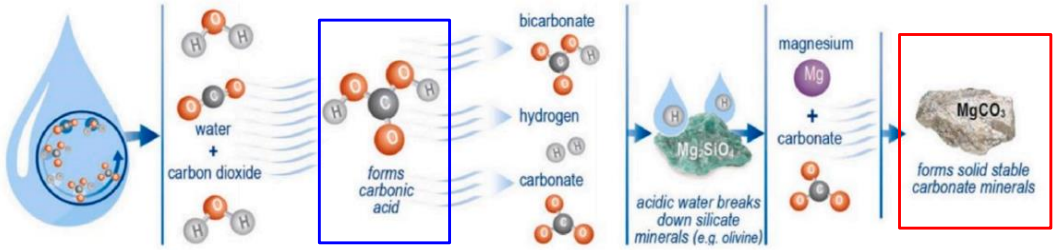


Machado, R. (2026, comunicação Projeto CABRA)

Armazenamento de carbono em basaltos



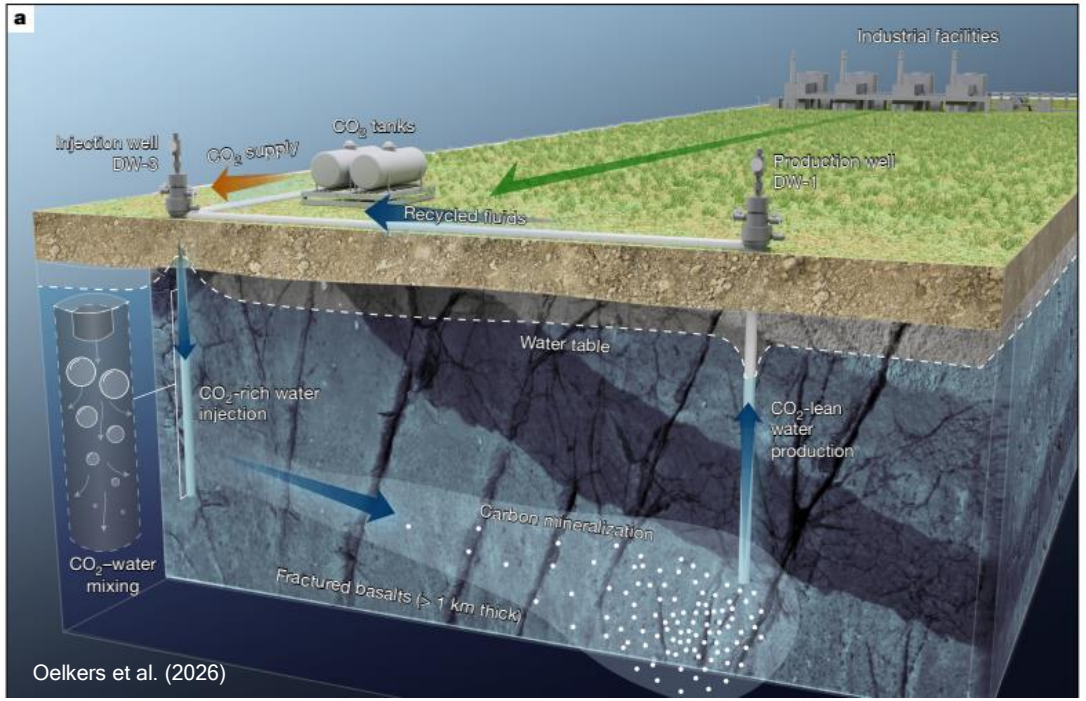
https://rockmechanics.cee.illinois.edu/research/thermo-hydro-mechanical-coupling/



Sandalow et al., 2021

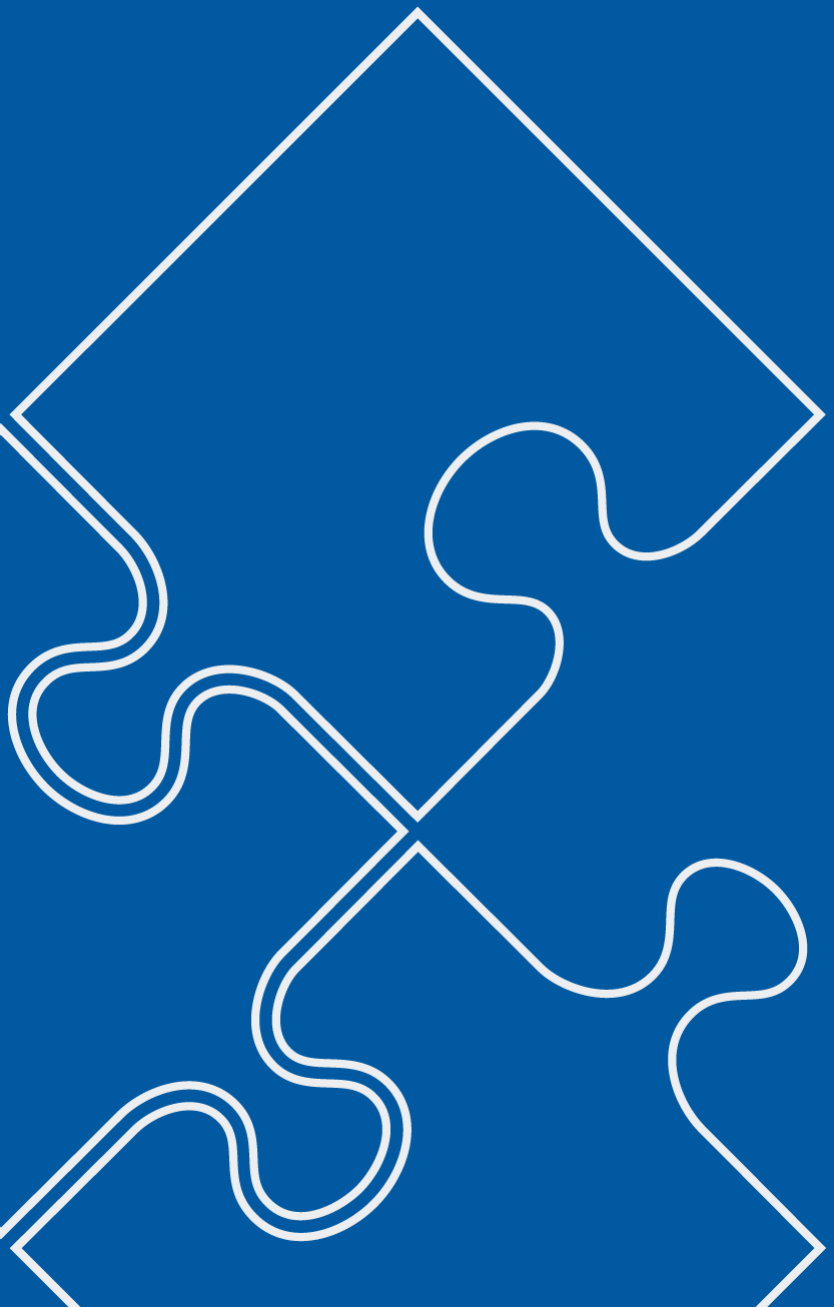
Otimizar o pH do fluido de injeção é essencial

Quelantes e tampões



Oelkers et al. (2026)

- Fechamento de fraturas por estresse
- Bloqueio por precipitação mineral
- Reativação de fraturas



#2

Objetivos e Metodologia da pesquisa

Objetivos

Objetivo

Avaliar o potencial de armazenamento de carbono dos basaltos da bacia do Paraná a escala de reservatório: abordagem do acoplamento termo-hidro-mecânico

Contexto

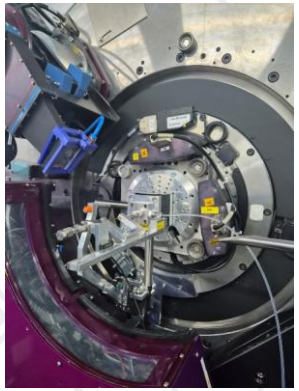
Necessidade de mitigação e neutralização das emissões das grandes indústrias envolvidas no crescimento e desenvolvimento do país

Objetivos específicos

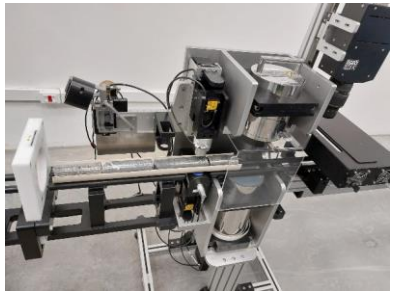
- Avaliar o efeito de diferentes composições de fluidos de injeção na interação rocha-fluido
  - Geologia-Geoquímica
- Determinar a Permeabilidade e porosidade dos tipos de basalto antes e depois da interação com os fluidos sob pressões de reservatório.
  - Geomecânica

Métodos

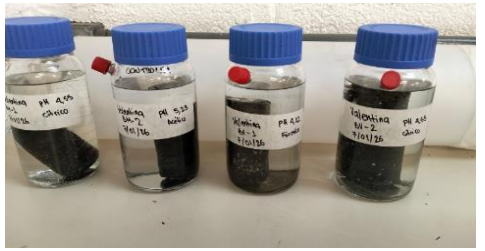
- Mineralogia e Geoquímica
  - Análises de difração de raios X - DRX
    - LNLS - Sírius
      - Paineira beamline



  - Petrografia
    - Divisão científica de Tecnologia de Petróleo, Gás Natural e Bioenergia
      - Laboratório de ensaios não destrutivos - LABEND



        - Multi-scan core logger
  - Experimentos de dissolução
    - Divisão científica de Tecnologia de Petróleo, Gás Natural e Bioenergia
      - Laboratório de biogás da Usina de Produção de Bioenergia



Todas as análises e medidas foram realizadas antes e depois dos experimentos de dissolução.

Métodos

Petrofísica e Geomecânica

Propriedades elásticas e acústicas do basalto

Medições de permeabilidade e espaço poroso

National Oceanography Centre

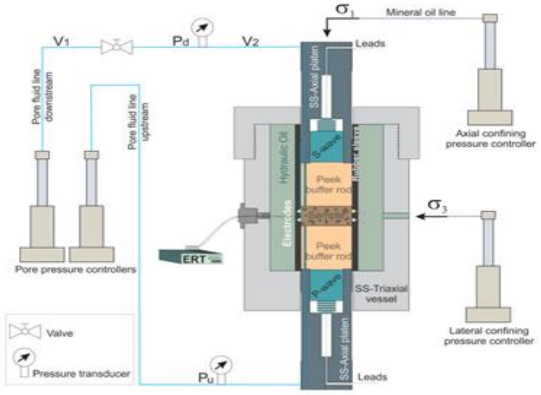
Rock Physics and Geoacoustics laboratory

LNLS - Sírius

Mogno Beamline – 4D nano-CT
AVIZO Software

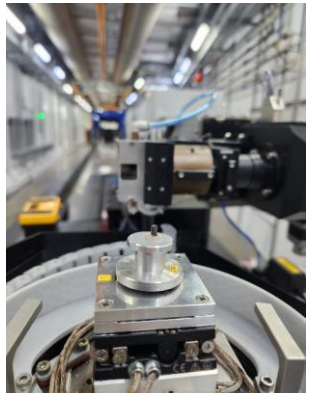


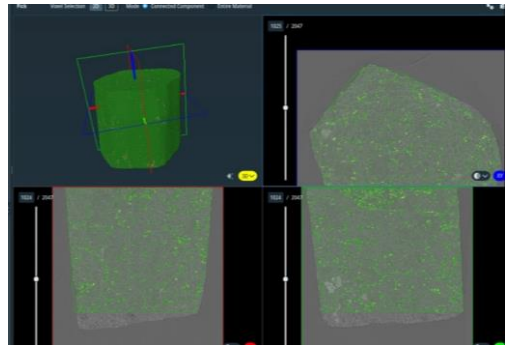


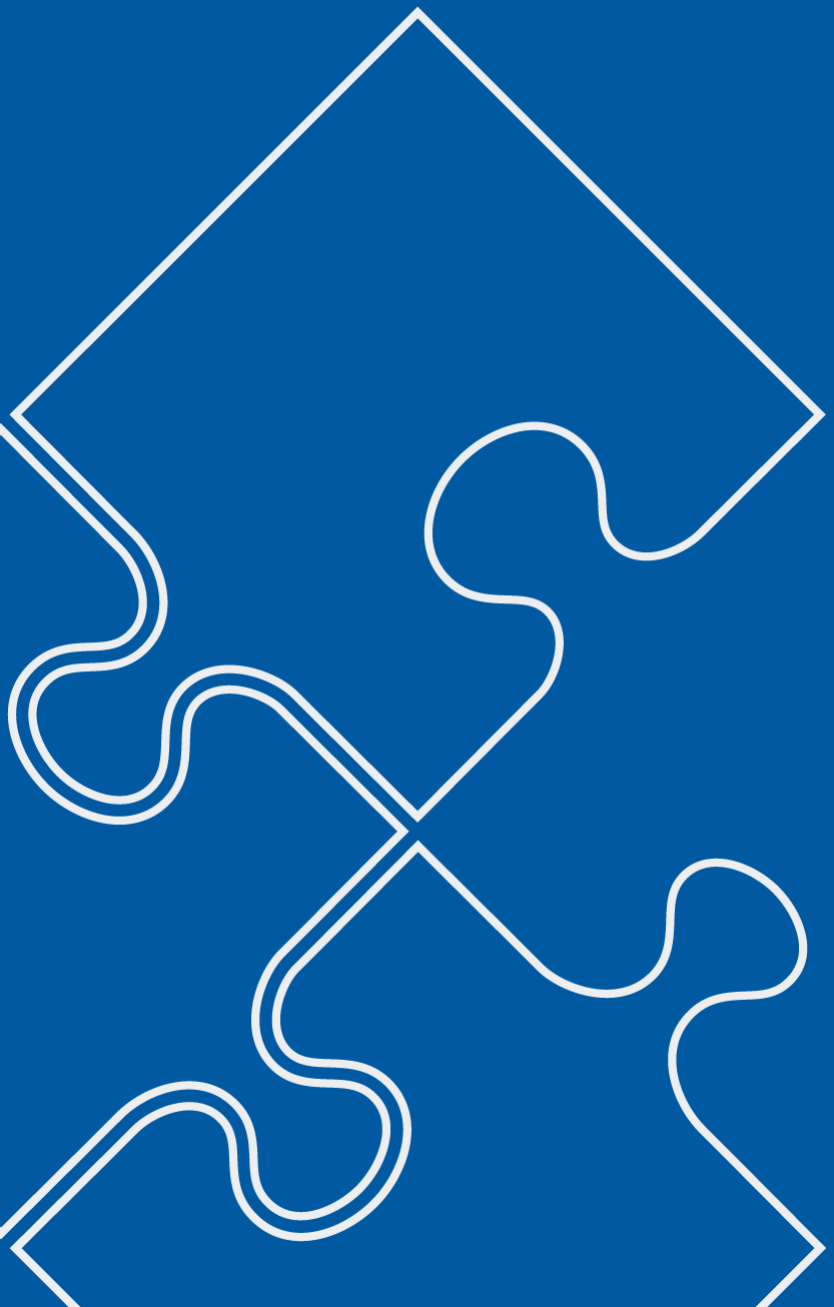


Falcon-Suarez et al. (2020)





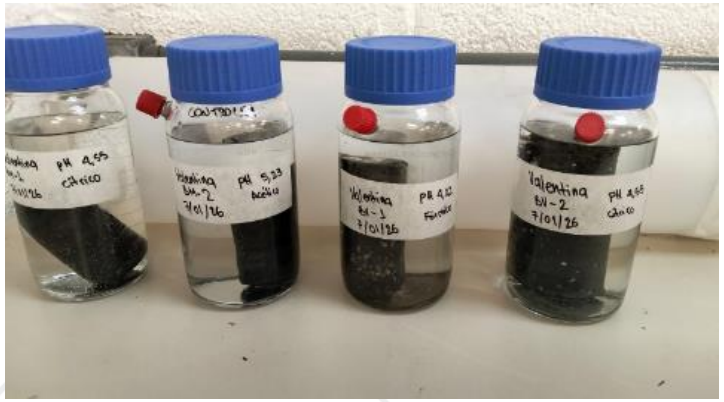




#3

Resultados

Dissolução tipo Batch – ICP OES





Amostra	Ca (mg/L)	Cr (mg/L)	Fe (mg/L)	Mg (mg/L)	Ni (mg/L)	pH inicial	pH final
Limite de quantificação	0,01	0,02	0,04	0,01	0,003		
BM-1 cítrico	153	<LQ	437	40,7	<LQ	4.55	5.66
BM-2 acético	251	<LQ	<LQ	9,96	<LQ	5.23	5.35
BV-1 fórmico	1006	<LQ	<LQ	26,4	<LQ	4.02	4.11
BV-2 cítrico	814	<LQ	391	110	0,81	4.53	7.17
Branco	1,33	<LQ	<LQ	0,19	<LQ		

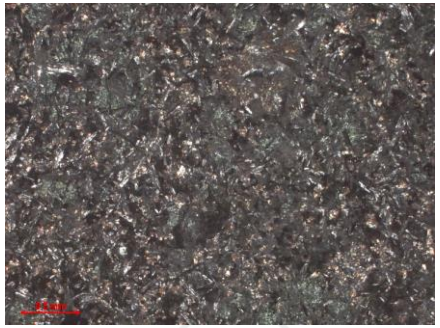
Fluidos com bicarbonato +

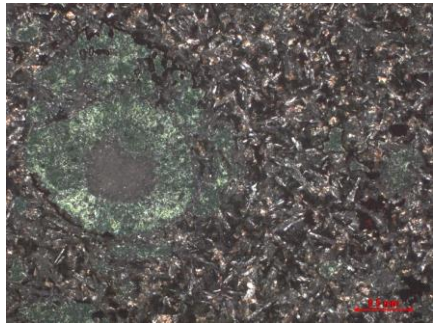
Ácido acético pH 5,23
Ácido cítrico pH 4,53
Ácido fórmico pH 4,02

Após 12 dias de reação, a amostra BV-2 apresentou precipitados brancos.

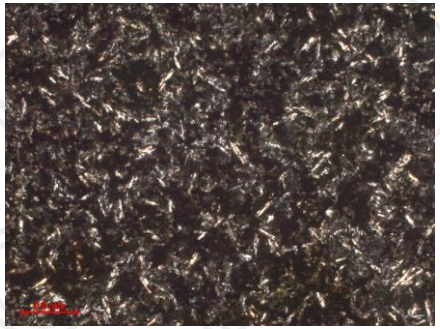
Mineralogia

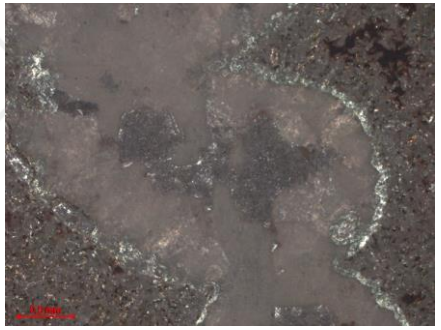
Pre-dissolução





Pós-dissolução



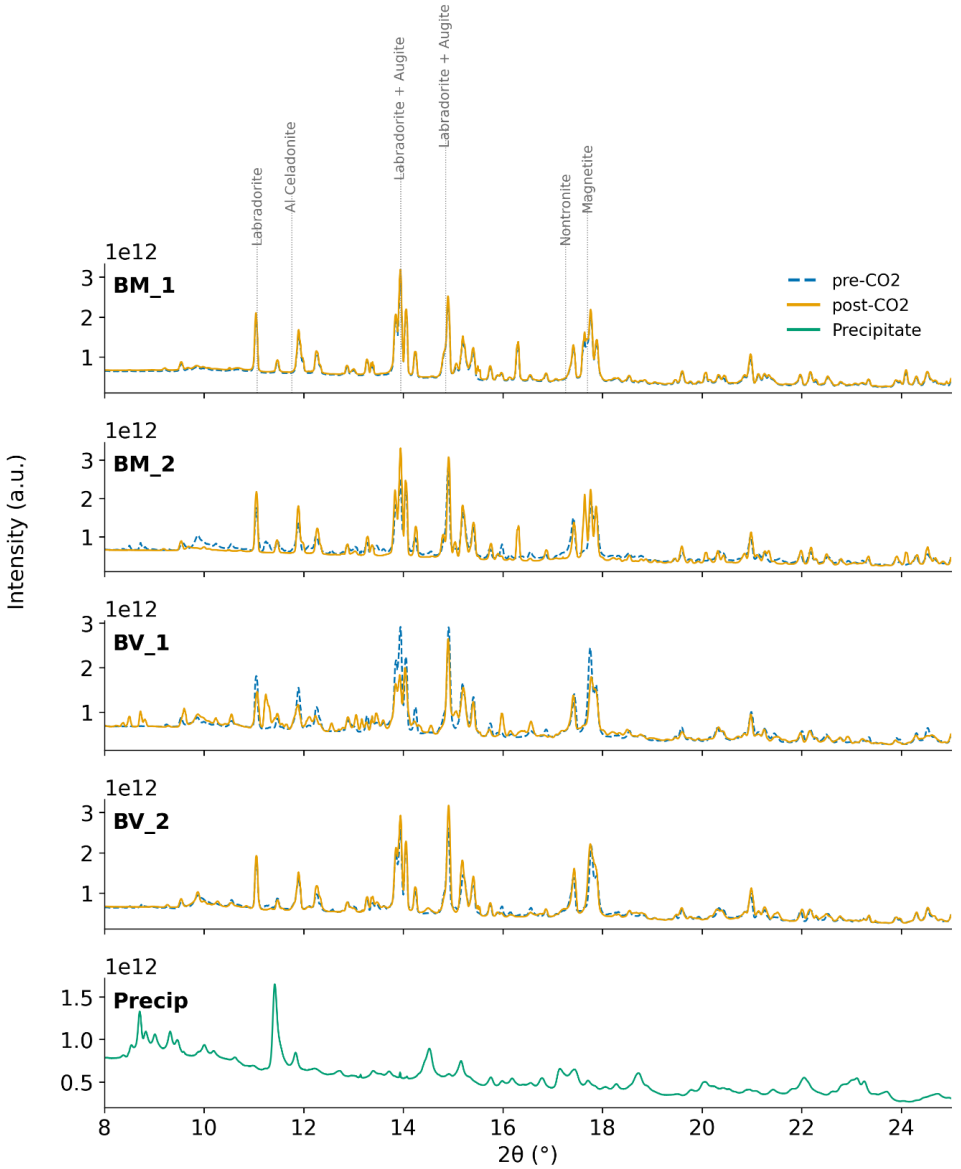


Os basaltos apresentam uma matriz hipocristalina com textura porfirítica.

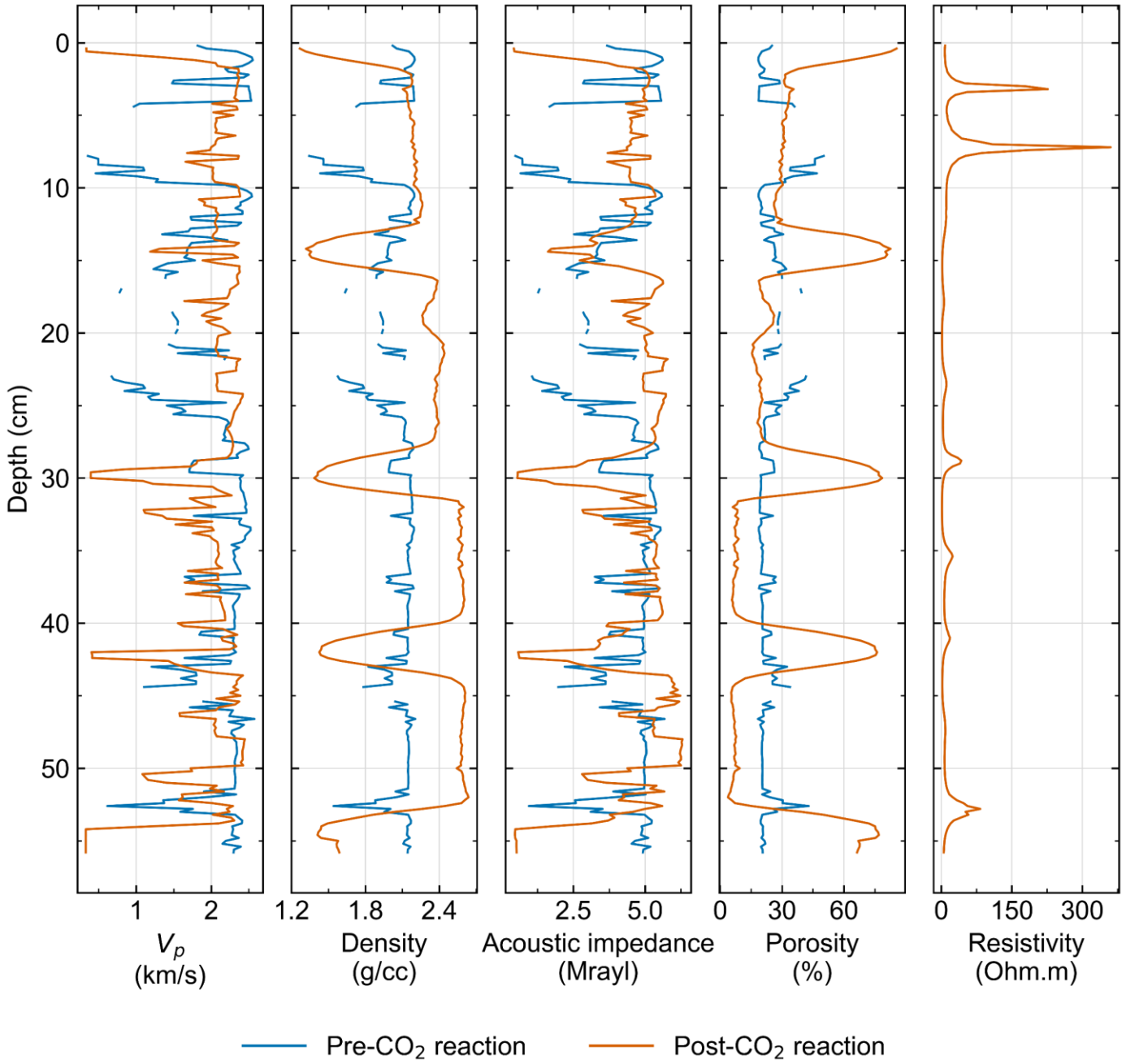
Labradorita 26-39%

Augita 22-31%

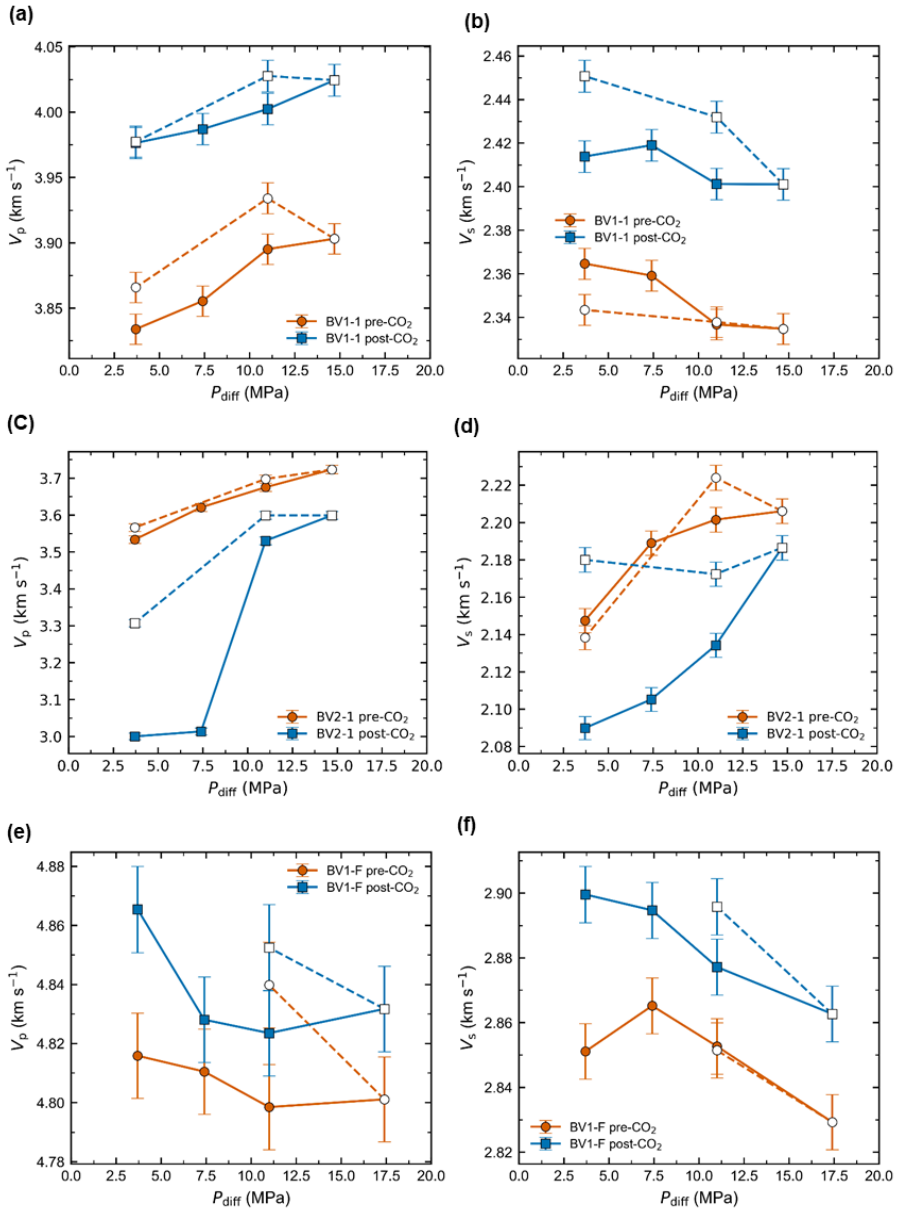
Celadonita 10-15%



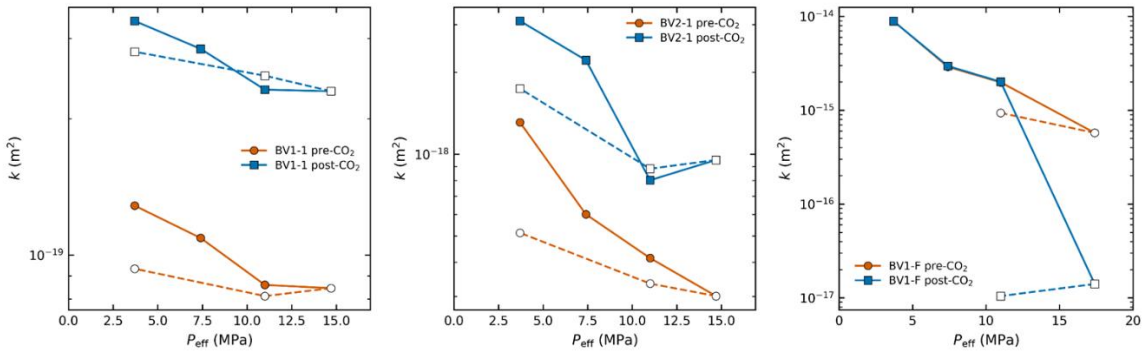
Petrofísica



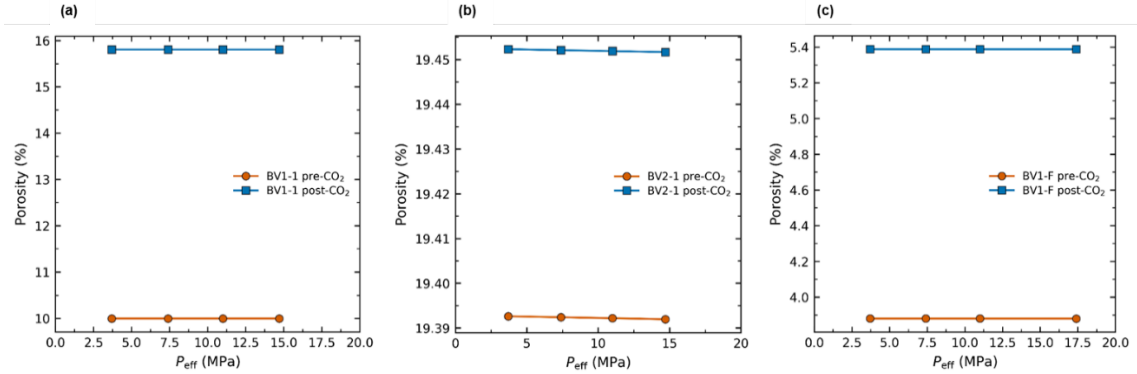
Propriedades elásticas e hidráulicas



Variações das velocidades das ondas P e S com o aumento da pressão efetiva nas amostras BV-1 e BV-2. Ciclo de carregamento (linha contínua) e ciclo de descarregamento (linha tracejada) para condições anteriores e posteriores à exposição a salmoura rica em CO_2

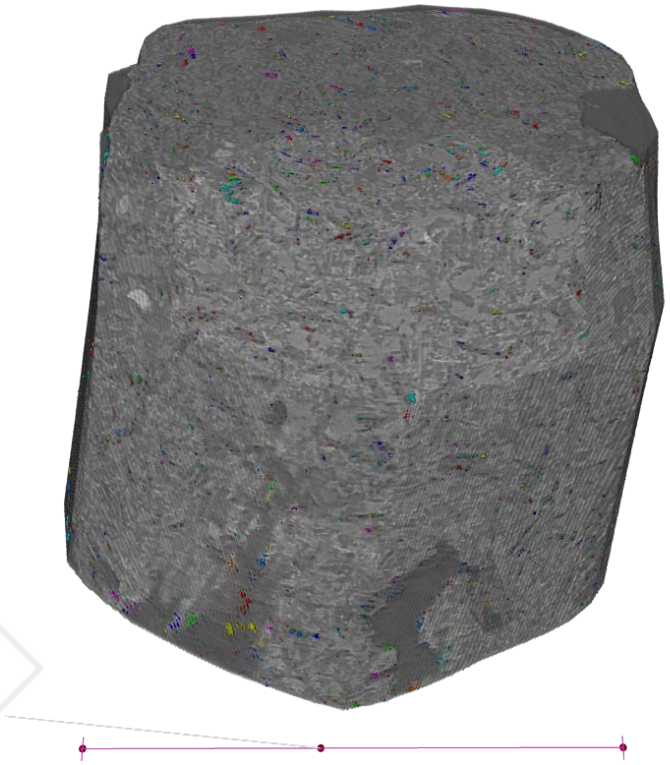


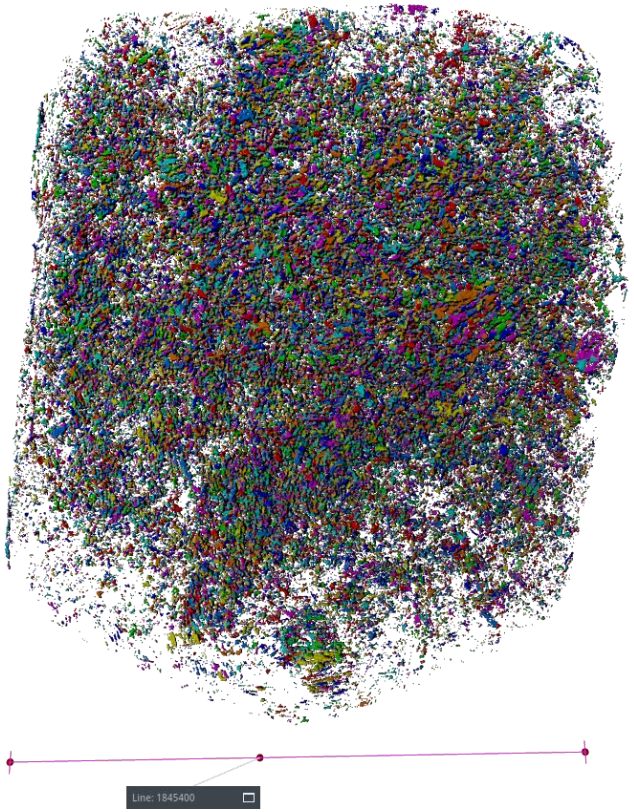
Permeabilidade em diferentes pressões efetivas e os correspondentes ciclos de carregamento (linha contínua) e descarregamento (linha tracejada) para as amostras BV-1 e BV2-1. A permeabilidade diminui à medida que a pressão aplicada aumenta, até que o carregamento é removido e ela começa a aumentar novamente, sem retornar ao valor inicial.



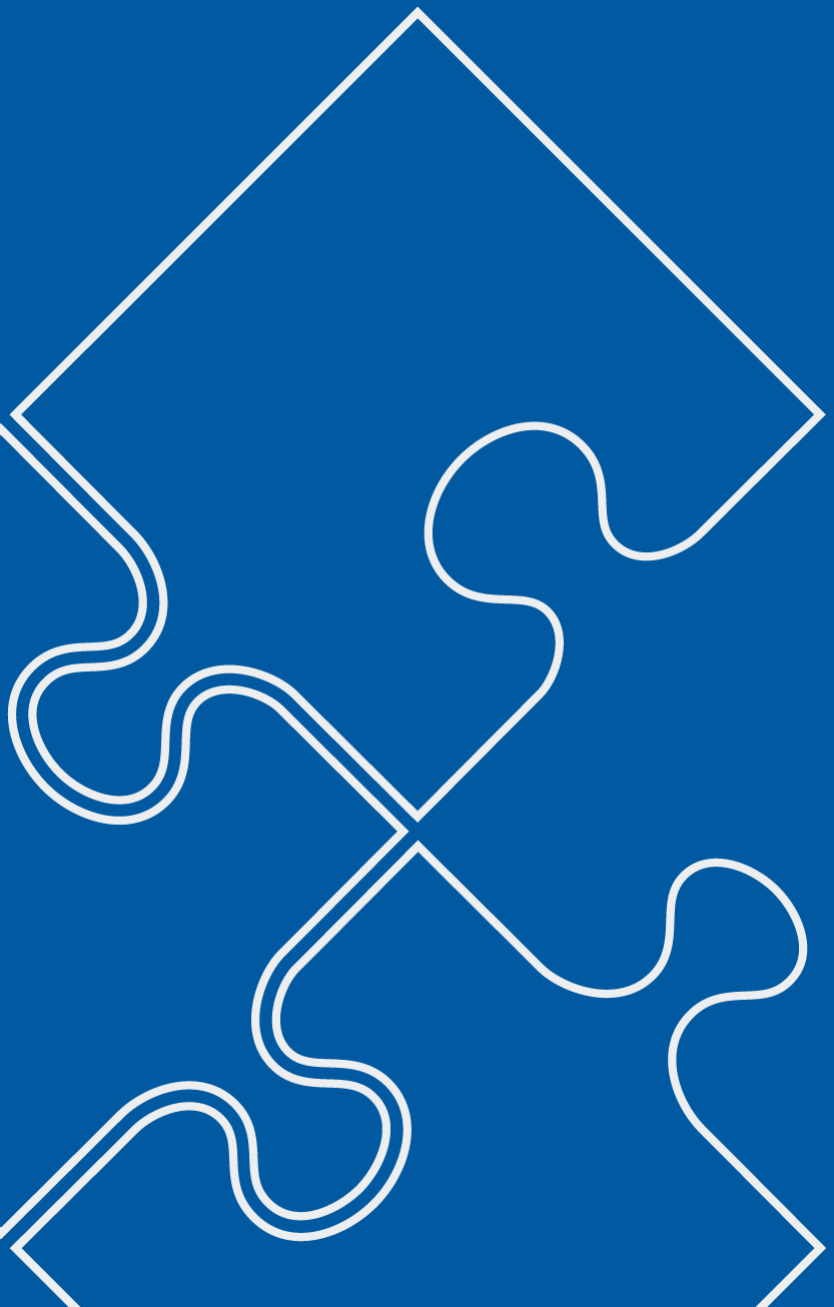
Variação da porosidade com a pressão efetiva para as amostras BV1-1, BV2-1 e BV1-F

Nano-porosidade





Pore Volume Fraction	Label Volume	Mask Volume	Label Voxel Count	Mask Voxel Count
0.00519094 →0.51%	2.73E+16	5.26E+18	13144937	2532286121



#4

Considerações finais

Lixiviação elementar e mobilização de metais

Fluidos ácido-orgânicos mobilizam cátions formadores de carbonato (Ca, Mg) e também metais traço como o Fe. O ácido cítrico liberou substancialmente mais Fe (391–437 mg/L) do que os ácidos fórmico ou acético, consistente com sua afinidade quelante pelo Fe^{3+}. Essas concentrações, muito acima dos valores de referência para água subterrânea, confirmam que a mobilização de metais é um mecanismo dependente da espécie ácida e relevante para avaliações de risco. Contudo, por se tratar de experimentos em bancada sob condições ácidas concentradas e aceleradas, esses resultados não devem ser extrapolados diretamente para o risco de contaminação em escala de reservatório.

Controles mineralógicos sobre a dissolução

Evidências mineralógicas de microveios preenchidos por celadonita e amígdalas dominadas por alteração indicam que os caminhos de intemperismo se concentram ao longo de superfícies minerais secundárias pré-existentes e fases que revestem os poros, em vez de um ataque uniforme à matriz primária. Isso sugere que a distribuição do preenchimento por zeólita e celadonita exerce um controle de primeira ordem sobre onde a dissolução, e a eventual carbonatação subsequente, se concentra espacialmente dentro da fácies vesicular.

Implicações da porosidade para o armazenamento

A diferença de 3-5% na porosidade entre as fácies vesicular e maciça controla diretamente o volume poroso disponível para a dissolução de CO_2 e o aprisionamento residual próximo ao poço, com os horizontes vesiculares atuando provavelmente como caminhos preferenciais de fluxo e intervalos de armazenamento durante a injeção. A histereses da permeabilidade sugere que ciclos de injeção poderiam reduzir não-recuperávelmente a transmisividade do basalto ao invés de retornar ao seu estado hidráulico original.

Próximos passos

- Análise termogravimétrica em amostras reagidas.
- Processamento de imagens no software Avizo de mais 4 amostras.

Referencias

ADELINET, M.; FORTIN, J.; SCHUBNEL, A.; GUÉGUEN, Y. Deformation modes in an Icelandic basalt: from brittle failure to localized deformation bands. **Journal of Volcanology and Geothermal Research**, v. 255, p. 15–25, 2013. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2013.01.011.

BACHU, Stefan; GUNTER, W. D.; PERKINS, E. H. Aquifer disposal of CO2: Hydrodynamic and mineral trapping. Energy Conversion and Management, [S. l.], v. 35, n. 4, p. 269–279, 1994. DOI: 10.1016/0196-8904(94)90060-4.

BETLEM, P.; ROSENQVIST, M. P.; MILLETT, J.; GRIFFITHS, L.; FILINA, I.; PARK, J.; PLANKE, S.; SENGER, K.; SKURTVEIT, E. Fluid flow behaviour in vesicular basalt samples from the Skoll High, Vøring Margin. **Geomechanics and Geophysics for Geo-Energy and Geo-Resources**, v. 12, n. 1, p. 7, 2026. DOI: https://doi.org/10.1007/s40948-025-01080-9.

CALLOW, Ben; FALCON-SUAREZ, Ismael; AHMED, Sharif; MATTER, Juerg. Assessing the carbon sequestration potential of basalt using X-ray micro-CT and rock mechanics. **International Journal of Greenhouse Gas Control**, [S. l.], v. 70, p. 146–156, 2018. DOI: 10.1016/j.ijggc.2017.12.008. Disponível em: https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1750583617306345.

CAO, Xiaomin; LI, Qi; XU, Liang; TAN, Yongsheng. Experiments of CO2-Basalt-Fluid Interactions and Micromechanical Alterations: Implications for Carbon Mineralization. **Energy and Fuels**, [S. l.], v. 38, n. 7, p. 6205–6214, 2024. DOI: 10.1021/acs.energyfuels.4c00202. Disponível em: https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acs.energyfuels.4c00202.

CLARK, Deirdre E.; OELKERS, Eric H.; GUNNARSSON, Ingvi; SIGFÚSSON, Bergur; SNÆBJÖRNSDÓTTIR, Sandra Ó.; ARADÓTTIR, Edda S.; GÍSLASON, Sigurður R. CarbFix2: CO2 and H2S mineralization during 3.5 years of continuous injection into basaltic rocks at more than 250 °C. **Geochimica et Cosmochimica Acta**, [S. l.], v. 279, p. 45–66, 2020. DOI: 10.1016/j.gca.2020.03.039. Disponível em: https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0016703720302106.

FALCON-SUAREZ, I.; BAYRAKCI, G.; MINSHULL, T. A.; NORTH, L. J.; BEST, A. I.; ROUMÉJON, S. Elastic and electrical properties and permeability of serpentinites from Atlantis Massif, Mid-Atlantic Ridge. **Geophysical Journal International**, v. 211, n. 2, p. 686–699, 2017. DOI: https://doi.org/10.1093/GJI/GGX341.

FALCON-SUAREZ, I. H.; NORTH, L.; CALLOW, B.; BAYRAKCI, G.; BULL, J.; BEST, A. Experimental assessment of the stress-sensitivity of combined elastic and electrical anisotropy in shallow reservoir sandstones. **Geophysics**, v. 85, n. 5, p. MR271–MR283, 2020. DOI: https://doi.org/10.1190/geo2019-0612.1.

HEAP, M. J.; VIOLAY, M. E. S. The mechanical behaviour and failure modes of volcanic rocks: a review. **Bulletin of Volcanology**, v. 83, n. 5, p. 33, 2021. DOI: https://doi.org/10.1007/s00445-021-01447-2.

GISLASON, Sigurdur R.; ARNÓRSSON, Stefán. Dissolution of primary basaltic minerals in natural waters: saturation state and kinetics. **Chemical Geology**, [S. l.], v. 105, n. 1–3, p. 117–135, 1993. DOI: 10.1016/0009-2541(93)90122-Y. Disponível em: https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/000925419390122Y.

GISLASON, Sigurdur Reynir et al. Mineral sequestration of carbon dioxide in basalt: A pre-injection overview of the CarbFix project. **International Journal of Greenhouse Gas Control**, [S. l.], v. 4, n. 3, p. 537–545, 2010. DOI: 10.1016/j.ijggc.2009.11.013. Disponível em: https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1750583609001698.

GONG, D. G.; QU, Z. Q.; GUO, T. K.; TIAN, Y.; TIAN, K. H. Variation rules of fracture initiation pressure and fracture starting point of hydraulic fracture in radial well. **Journal of Petroleum Science and Engineering**, [S. l.], v. 140, p. 41–56, 2016. DOI: 10.1016/j.petrol.2016.01.006.

HEAP, M. J.; XU, T.; CHEN, C. The influence of porosity and vesicle size on the brittle strength of volcanic rocks and magma. **Bulletin of Volcanology**, v. 76, n. 9, p. 856, 2014. DOI: https://doi.org/10.1007/s00445-014-0856-0.

Agradecimentos

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

Os autores agradecem o apoio financeiro do Programa de Formação de Recursos Humanos da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis - PRH-ANP, gerido pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), Brasil. Processo n° 2025/19066-9.

Agradecemos o apoio e financiamento da Equinor Brasil ("Projeto CABRA") e o apoio da ANP (Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis do Brasil) por meio da regulamentação da taxa de P&D - Número de referência do projeto 25720-4.

Agradecemos o apoio do National Oceanography Centre (NOC), Reino Unido, pelo acesso ao Laboratório de Física de Rochas e Geoacústica.

Esta pesquisa utilizou instalações do Laboratório Nacional de Luz Síncrotron (LNLS), do Centro Nacional de Pesquisa em Energia e Materiais (CNPEM), uma Organização Social supervisionada pelo Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações (MCTI). A equipe das linhas de luz MOGNO e PAINEIRA é reconhecida pela assistência durante os experimentos das propostas 20252866 e 20261308.

prh anp 33/USP

Valentina Alzate Rubio

Dados para contato

rubiovalentina@usp.br

https://www.linkedin.com/in/valentina-alzate-rubio-7246371a9/



prh anp

anp | Gestão: FAPESP