

Efeito da Saturação na Evolução Temporal das Propriedades Petrofísicas durante a Dissolução de Carbonatos

Supervisor: Jair Rodrigues Neyra (LNLS/CNPEM)

Unidade: Grupo MOGNO, Laboratório Nacional de Luz Síncrotron

Introdução

O fluxo reativo em meios porosos geológicos é um fenômeno que ocorre em aplicações de acidificação de carbonatos, armazenamento geológico de CO₂ e hidrogênio, remediação de aquíferos e energia geotérmica (Moghadasi et al., 2023; Hoefner and Fogler, 1985). O fluxo reativo nesse meio poroso, altera a estrutura porosa e pode ser influenciado por vários fatores, como propriedades petrofísicas, pressão, temperatura, sistema ácido, mineralogia da rocha e saturação da rocha (Lucas et al., 2023).

Apesar dos avanços experimentais nessa área, algumas questões continuam abertas na literatura, particularmente a respeito da dinâmica do fluido reativo na sua propagação no meio poroso, principalmente sobre a influência das propriedades petrofísicas na escala de poro e a interação com a presença de outros fluidos no meio durante a propagação do fluxo reativo (Gong et al., 2024; Shukla et al., 2006).

Nesse contexto, a tomografia de raios-X resolvida no tempo (tomografia 4D) em alta resolução permite acompanhar a evolução morfológica do meio poroso durante o experimento e compreender o efeito da saturação nos padrões de dissolução para cada tipo de ácido na escala de poro.

Estado da Arte

Jora et al. (2021) realizaram experimentos de dissolução estática em amostras de rocha de 1 x 1 cm, investigando a taxa de dissolução e a área superficial externa disponível para o consumo de ácido ao longo do tempo, comparando dois tipos de ácido: clorídrico (HCl) e acético (HAc). As técnicas de microtomografia computadorizada de raios-X (micro-CT) e ressonância magnética nuclear (RMN) foram utilizadas para analisar a estrutura morfológica da amostra. Os resultados mostram que a reatividade depende das propriedades petrofísicas, da composição mineralógica e do tipo de ácido usado. Ficou evidente que os ácidos atacam a amostra de maneiras morfológicamente distintas ao longo da dissolução. O HCl leva a uma redução radial mais homogênea, enquanto o HAc não reduz a amostra significativamente de forma radial, mas exibe um padrão de dissolução mais rugoso. As análises de RMN revelaram mudanças no tempo de relaxação T₂, indicando modificações na estrutura interna da amostra. Porém, essas alterações internas dos poros não foram visualizadas no micro-CT, e os autores sugerem que isso ocorre devido às limitações da resolução da imagem.

Serra et al. (2026) realizaram experimentos de dissolução estática em amostras de estromatólito da Lagoa Salgada, onde há três fácies com estruturas porosas distintas entre si. Os resultados

mostraram que a mineralogia possui um impacto importante na reatividade, porém a heterogeneidade microestrutural e texturais, particularmente a geometria, o tamanho e a conectividade dos poros, influenciam mais na cinética de dissolução.

Além disso, uma questão importante é como a presença de fluidos de saturação na amostra pode influenciar a difusão e reatividade do ácido. Já foi demonstrado que ocorrem alterações na borda da amostra, no entanto, com imagens de alta resolução, será possível confirmar se essas alterações também se estendem à estrutura interna da rocha.

Objetivos

O principal objetivo é identificar as alterações morfológicas internas e externas na amostra de rocha durante a dissolução estática ao longo do tempo, avaliando a influência da saturação da amostra sob diferentes tipos de ataque ácido. Os objetivos específicos são:

- Avaliar a evolução temporal das propriedades petrofísicas da amostra, como porosidade, permeabilidade e área superficial externa durante a dissolução estática;
- Analisar a influência da saturação (ar, água, óleo e salmoura) na taxa de dissolução da amostra;
- Avaliar os padrões de dissolução para dois tipos de ácido (clorídrico e acético), representando sistemas orgânico e inorgânico;
- Comparar a perda de volume da amostra obtida por análise digital com a perda de massa obtida teoricamente por estequiometria da dissolução.

Metodologia

Foram realizados experimentos de dissolução estática na linha de luz MOGNO, nos quais a amostra foi submersa em ácido e foram realizadas aquisições de tomografias 4D. As amostras utilizadas são cilíndricas de Indiana Limestone (99% calcita) de 2 x 2 mm com diferentes saturações: ar, água, óleo mineral e salmoura. Dois tipos de ácido foram utilizados HCl e HAc que apresentam padrões de dissolução distintos. A saturação da amostra foi realizada com o fluido de interesse no dessecador sob vácuo por 24 horas e armazenada submersa no mesmo fluido. A aquisição foi realizada na nanoestação com lente de 5x, tempo de exposição de 100 ms e 180° de rotação, com uma resolução próxima de 1 μm .

O aluno vinculado a esse plano de trabalho estará focado na análise de imagens desses dados de tomografia 4D. As etapas para análise consistem em: reconstruir as imagens, encontrando os melhores parâmetros de reconstrução; registrar as imagens; segmentar rocha e poro; quantificar a taxa de dissolução a partir da perda temporal de volume de rocha; correlacionar com os modelos estequiométricos; avaliar as alterações de porosidade, permeabilidade e área superficial externa disponível; avaliar a estrutura porosa interna.

Cronograma

Mês 1 - Início do projeto e alinhamento: Discussão do plano de trabalho, revisão da literatura sobre taxa de dissolução em fluxo reativo e familiarização com o procedimento experimental já realizado e com a linha de luz MOGNO.

Meses 2 a 3 - Ferramentas de reconstrução e análise de imagem: Aprendizado das ferramentas utilizadas no fluxo de processamento: Interface de reconstrução da MOGNO, Avizo e Python.

Meses 4 a 6 - Reconstrução e pré-processamento: Seleção dos melhores parâmetros de reconstrução para reduzir artefatos, melhorar o contraste e viabilizar a segmentação. Primeiro contato com o software Avizo para a segmentação. Preparar e entregar o relatório parcial.

Meses 7 a 10 - Análise das Tomografias 4D: Utilizar o Avizo juntamente com Python para análises das tomografias 4D: registro, segmentação e quantificação. Determinar taxas de dissolução e comparar com modelos estequiométricos.

Meses 11 a 12 - Relatório final e participação no CEC: Interpretação dos resultados e elaboração do relatório final, planejamento de publicação científica e participação no Congresso de Estudantes do CNPEM (CEC).

Referências

GONG, Wenbo et al. Dynamic characterization of residual oil during long-term waterflooding experiments in heterogeneous porous structures. **Fuel**, v. 356, p. 129567, 2024.

HOEFNER, M. L.; FOGLER, H. S. Effective matrix acidizing in carbonates using microemulsions. **Chem. Eng. Prog.;(United States)**, v. 81, n. 5, 1985.

JORA, Manazael Zuliani et al. Static acid dissolution of carbonate outcrops investigated by ¹H NMR and X-ray tomography. **Journal of Petroleum Science and Engineering**, v. 207, p. 109124, 2021.

LUCAS, Cláudio Regis dos Santos et al. Carbonate acidizing-A review on influencing parameters of wormholes formation. **Journal of Petroleum Science and Engineering**, v. 220, p. 111168, 2023.

MOGHADASI, Ramin et al. Pore-scale characterization of residual gas remobilization in CO₂ geological storage. **Advances in Water Resources**, v. 179, p. 104499, 2023.

SERRA, Vitor Felipe Hage et al. Acid Dissolution of Magnesian-Calcite Stromatolites from Lagoa Salgada: An Experimental Evaluation Using X-ray Microtomography. **ACS Omega**, 2026.

SHUKLA, Suneet; ZHU, Ding; HILL, A. D. The effect of phase saturation conditions on wormhole propagation in carbonate acidizing. **Spe Journal**, v. 11, n. 03, p. 273-281, 2006.