

12º CONGRESSO BRASILEIRO DE PESQUISA E DESENVOLVIMENTO EM PETRÓLEO E GÁS



TÍTULO DO TRABALHO:

SIMULAÇÃO NUMÉRICA 3D DA ACIDIFICAÇÃO DE CARBONATOS

AUTORES:

Nathalia Almeida Braga^{1,2}, Pedro Tupã Pandava Aum^{1,2}, Bruno José Vicente³

INSTITUIÇÃO:

¹Laboratório de Ciência e Engenharia de Petróleo, Campus Salinópolis, Universidade Federal do Pará (LCPETRO/UFPA)

²Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal do Pará (PPGEQ/UFPA)

³Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro (LENEP/UENF)

SIMULAÇÃO NUMÉRICA 3D DA ACIDIFICAÇÃO DE CARBONATOS**Resumo**

No contexto de formações carbonáticas, a acidificação matricial é aplicada como uma técnica de estimulação com o objetivo de criar canais de alta permeabilidade, referidos nesse cenário como *wormholes*, a partir da reação de uma solução ácida com a rocha. A formação de *wormholes* e sua morfologia são uma consequência da relação entre a taxa de reação e o transporte do ácido, isso dá origem aos padrões de dissolução. Apesar de simulações numéricas bidimensionais apresentarem boa compatibilidade com resultados experimentais, a formação de *wormholes* é um fenômeno de natureza tridimensional, com influência direta no volume final de ácido gasto. Desse modo, o presente trabalho tem o objetivo de reproduzir a formação dos padrões de dissolução citados por meio de simulações computacionais 3D e representar graficamente o volume de ácido gasto em cada regime. Assim, é simulada a acidificação de uma amostra de calcita com a injeção de ácido clorídrico em diferentes vazões, modelada por um sistema de equações diferenciais parciais, composta pela equação de advecção-difusão-reação para o ácido e acoplamento pressão-velocidade pelas equações de Navier-Stokes, com expressões analíticas para os parâmetros em escala de poro, o modelo é resolvido pelo método de volumes finitos. O volume de ácido gasto, representado pelo número de PVBT, é expresso em gráfico como função da velocidade intersticial. As simulações realizadas reproduziram com sucesso os padrões de dissolução observados experimentalmente para as diferentes velocidades de injeção. Menores valores de PVBT são observados na região de intermediária de velocidade, com predominância do padrão de dissolução do tipo *wormhole* dominante. Além disso, o aspecto tridimensional da formação de *wormholes* é demonstrado, com o surgimento de canais secundários distribuídos pela área da face de injeção e de ramificações se estendendo por todas as direções. Sendo assim, o trabalho destaca a importância do avanço em estudos de simulação 3D, de forma a representar realisticamente o comportamento do fluxo reativo.

Palavras-chave: acidificação de carbonatos, simulação 3D, modelagem numérica.

Abstract

In the context of carbonate formations, matrix acidizing is applied as a stimulation technique with the aim of creating high-permeability channels, referred to in this scenario as wormholes, through the reaction of an acidic solution with the rock. The formation and morphology of wormholes are a consequence of the relationship between the reaction rate and the transport of acid, giving rise to the dissolution patterns. Although two-dimensional numerical simulations show good compatibility with experimental results, wormhole formation is a three-dimensional phenomenon that directly influences the final volume of acid consumed. Therefore, this work aims to reproduce the formation of the mentioned dissolution patterns through 3D computational simulations and graphically represent the volume of acid consumed in each regime. Thus, the acidification of a calcite sample is simulated by injecting hydrochloric acid at different flow rates, modeled by a system of partial differential equations, composed of the advection-diffusion-reaction equation for the acid and pressure-velocity coupling by the Navier-Stokes equations, with analytical expressions for pore-scale parameters. The model is solved using the finite volume method. The volume of acid consumed, represented by the PVBT number, is plotted as a function of interstitial velocity. The simulations successfully reproduced the dissolution patterns observed experimentally for different injection velocities. Lower PVBT values are observed in the intermediate velocity region, with the predominance of the dominant wormhole dissolution pattern. Additionally, the three-dimensional aspect of wormhole formation is demonstrated, with the emergence of secondary channels distributed across the injection face area and branches extending in all directions. Thus, the study highlights the importance of advancing 3D simulation studies to realistically represent reactive flow behavior.

Keywords: carbonate acidizing, 3D simulation, numerical modeling.

Introdução

Técnicas de estimulação são aplicadas a poços de petróleo como forma de melhorar a produtividade. Em formações carbonáticas, devido à sua alta reatividade com alguns tipos de ácido, a acidificação matricial é amplamente utilizada, com o objetivo de criar canais de alta permeabilidade, denominados *wormholes* (Ghommam et al., 2015). Nesse processo, a relação entre taxa de reação e transporte de massa determina o progresso e efetividade da acidificação, impactando diretamente no volume de ácido necessário para o *breakthrough*, definido como o momento em que o ácido atinge a profundidade de interesse ou atravessa uma amostra em testes laboratoriais. Uma forma de quantificar esse gasto de ácido é através da avaliação do *pore volume to breakthrough* (PVBT), uma razão adimensional entre o volume de ácido injetado até que o canal de dissolução alcance a saída do plugue (*breakthrough*) e o volume poroso total da amostra. Maheshwari e Balakotaiah (2013) descrevem a presença de cinco padrões de dissolução característicos: a dissolução de face, *wormhole* cônico, *wormhole* dominante, *wormhole* ramificado e dissolução uniforme.

Os trabalhos de Hoefner e Fogler (1988) e Maheshwari e Balakotaiah (2013) explicam que, para um mesmo sistema, a variação da vazão de injeção pode mudar completamente a morfologia das estruturas que o ácido cria na rocha, pois os mecanismos de transporte de massa são afetados. Em baixas vazões, a reação predomina sobre o transporte, fazendo com que toda a área em contato com o ácido seja consumida por igual, nesse processo, o fluido avança lentamente e há alto gasto para o *breakthrough*, configurando a dissolução de face. A mudança da dissolução de face para o padrão cônico acontece quando a vazão se torna suficiente para transportar o ácido para o interior da rocha de forma mais significativa, a maior parte da dissolução ainda acontece próximo ao ponto de injeção por ser uma reação rápida, assim, há uma limitação na quantidade de ácido disponível para reagir ao longo do meio e formar um canal. Quando as magnitudes da taxa de reação e transporte de massa se equilibram, tem-se o padrão de *wormhole* dominante, no qual o ácido flui ao longo do canal que domina o escoamento e a reação resultante tem o efeito de propagar esse *wormhole* até o *breakthrough* – a alta eficiência dessa relação entre os fenômenos governantes culmina em um ponto de menor PVBT, por isso é referido como ponto ótimo. Aumentar a vazão além do ponto ótimo gera uma quantidade crescente de ramificações nos *wormholes* que se formam, provocado pelo maior volume de fluido sendo injetado, assim, o ganho de porosidade no padrão ramificado passa a diminuir, enquanto o PVBT cresce. A formação de *wormholes* mais uma vez cessa em altas vazões, quando o volume de ácido é alto o bastante para preencher o meio poroso, sem tomar caminhos preferenciais, ao passo que o tempo de residência não é suficiente para aumentar de forma significativa a porosidade, visto que nesse cenário o transporte predomina sobre a reação, desse modo, o padrão uniforme é caracterizado pela baixa eficiência e alto PVBT. Simulações numéricas bidimensionais do processo de acidificação já foram descritas na literatura com boa compatibilidade com o fenômeno real (Panga; Ziauddin; Balakotaiah, 2005). Contudo, *wormholes* são estruturas tridimensionais, cuja forma depende das particularidades do meio poroso, afetando o resultado de PVBT, de forma que, simulações bidimensionais podem não capturar os fenômenos envolvidos no problema real. Um outro ponto relevante da modelagem do escoamento reativo é que durante o processo de dissolução, o meio poroso é deteriorado. Assim, a medida que o *wormhole* é gerado o escoamento passa a ser predominantemente em meio livre, uma vez que o fluxo está predominantemente passando pelo canal. Desta forma, a utilização da Lei de Darcy para descrever o comportamento da pressão, no meio poroso acidificado, pode não ser completamente satisfatória. Sendo assim, o presente trabalho foca na simulação 3D da acidificação de carbonatos, utilizando a formulação de Darcy-Brinkman-Stokes (DBS). O principal objetivo é analisar os padrões de dissolução obtidos e gerar curvas de PVBT comparativas com o caso 2D. O sistema de equações é resolvido com o método de volumes finitos, em solver desenvolvido no OpenFOAM.

Metodologia

O modelo implementado, resumido na Tabela 1, é baseado nas modelagens propostas em Bousquet-Melou et al. (2002), Panga, Ziauddin e Balakotaiah (2005) e Akanni, Nasr-El-Din e Gusain (2017). O sistema de equações (1) a (10), mostrado na Tabela 1, considera a injeção de ácido clorídrico em uma amostra de calcita pura, com as hipóteses simplificadoras de fluxo monofásico, isotérmico e incompressível.

Tabela 1 – Sistema de equações do modelo desenvolvido.

Equações implementadas	
$\frac{1}{\varepsilon} \left(\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \nabla \cdot \left(\frac{1}{\varepsilon} \mathbf{u} \mathbf{u} \right) \right) = - \frac{\nabla p}{\rho_f} + \frac{v}{\varepsilon} \nabla^2 \mathbf{u} + v \mathbf{K}^{-1} \mathbf{u}$	(1)
$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \nabla \cdot \mathbf{u} = 0$	(2)
$\frac{\partial \varepsilon C_f}{\partial t} + \nabla \cdot (\mathbf{u} C_f) = \nabla \cdot (\varepsilon \mathbf{D}_e \cdot \nabla C_f) - a_v \frac{k_c k_s}{k_c + k_s} C_f$	(3)
$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} = \frac{a_v \alpha}{\rho_s} \frac{k_c k_s}{k_c + k_s} \rho_f C_f$	(4)
$\frac{\mathbf{K}}{\mathbf{K}_0} = \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} \right)^{b_1} \left[\frac{(1 - \varepsilon_0)}{(1 - \varepsilon)} \right]^{b_2}$	(5)
$\frac{r_p}{r_{p0}} = \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} \right)^{b_3} \left[\frac{(1 - \varepsilon_0)}{(1 - \varepsilon)} \right]^{b_4}$	(6)
$\frac{a_v}{a_{v0}} = \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} \right)^{b_5} \left[\frac{(1 - \varepsilon_0)}{(1 - \varepsilon)} \right]^{b_6}$	(7)
$Sh = \frac{2k_c r_p}{D_m} = Sh_\infty + 0,7 \left(\frac{2 \ \mathbf{u}\ r_p}{v} \right)^{1/2} \left(\frac{v}{D_m} \right)^{1/3}$	(8)
$De_X = \alpha_{os} D_m + \frac{2\lambda_X \ \mathbf{u}\ r_p}{\varepsilon}$	(9)
$De_T = \alpha_{os} D_m + \frac{2\lambda_T \ \mathbf{u}\ r_p}{\varepsilon}$	(10)

Onde: ε é a porosidade da rocha, $\mathbf{u}$ é o vetor de velocidade, t é o tempo, p é a pressão, ρ_f é a densidade do fluido, v é a viscosidade cinemática do fluido, $\mathbf{K}$ é o tensor de permeabilidade, C_f é a concentração da espécie ácida, $\mathbf{D}_e$ é o tensor de dispersão, k_c é o coeficiente de transferência de massa, k_s é a constante da taxa de reação, a_v é a área superficial específica por unidade de volume, α é o poder de dissolução do ácido, ρ_s é a densidade da rocha, as constantes b_1 a b_6 alteram a correlação para os parâmetros correspondentes, r_p é o raio do poro, D_m é a difusividade molecular, Sh_∞ é o número de Sherwood assintótico e os parâmetros α_{os} , λ_X e λ_T são constantes relacionadas com a estrutura do meio poroso.

O acoplamento pressão-velocidade derivado das equações (1) e (2) é resolvido pelo algoritmo PISO (do inglês, *Pressure-Implicit with Splitting of Operators*), descrito em Issa (1986). O último termo da equação (1) é incluído como termo fonte. O transporte da espécie ácida é modelado por uma equação de advecção-difusão-reação, Equação (3). A evolução da porosidade é representada na equação (4). Alguns parâmetros presentes nas Equações Diferenciais Parciais (EDPS) de (1)-(4) são derivados de expressões analíticas em escala de poro, sendo que os expoentes das equações (5)-(7) são ajustáveis para representar diferentes correlações, em que o subscrito “0” denota o valor da variável no tempo inicial.

O coeficiente de transferência de massa é derivado da relação para o número de Sherwood apresentada na equação (8), na qual os termos entre parênteses indicam o número de Reynolds no poro e o número de Schmidt, respectivamente. Os coeficientes do tensor de dispersão são classificados em longitudinal e transversal, dados pelas equações (9) e (10), respectivamente. Os valores para os parâmetros descritos utilizados nas simulações foram baseados no trabalho de Liu et al. (2020) e são mostrados na Tabela 2.

O domínio construído é um paralelepípedo de dimensões 0,05 m x 0,02 m x 0,02 m, com 100 células na direção x e 40 células nas direções y e z, totalizando 160 mil células. A malha é totalmente estruturada e ortogonal. A porosidade é atribuída a cada célula por meio de uma distribuição uniforme, com média 20% e variação de $\pm 15\%$. As simulações são inicializadas com uma concentração fixa C_{f0} na face de entrada, o ácido é injetado à vazão constante e a pressão é mantida em zero na face de saída. Não há fluxo pelas faces laterais, com a consideração de que a velocidade é nula nesses contornos.

Para gerar a curva de PVBT, variou-se a velocidade de entrada para cada simulação, mantendo todos os outros parâmetros fixos, de forma a avaliar apenas a influência do transporte de massa e sua relação com a taxa de reação para a formação dos padrões de dissolução. Um conjunto de simulações 2D com os mesmos parâmetros também foi realizado para fins de comparação.

Tabela 2 – Valores e unidades dos parâmetros utilizados.

Parâmetro	Valor	Parâmetro	Valor	Parâmetro	Valor
C_{f0}	22%	D_m	$3,6 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$	b_1	18
v	$1 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$	λ_x	0,5	b_2	12
ρ_f	1000 kg/m ³	λ_T	0,1	b_3	3
ρ_s	2710 kg/m ³	α_{os}	0,5	b_4	0
k_s	0,002 m/s	K_0	$9,87 \cdot 10^{-16} \text{ m}^2$	b_5	-1
α	1,37	a_0	5000 m ⁻¹	b_6	-1
Sh_∞	3,66	r_0	$1 \cdot 10^{-6} \text{ m}$		

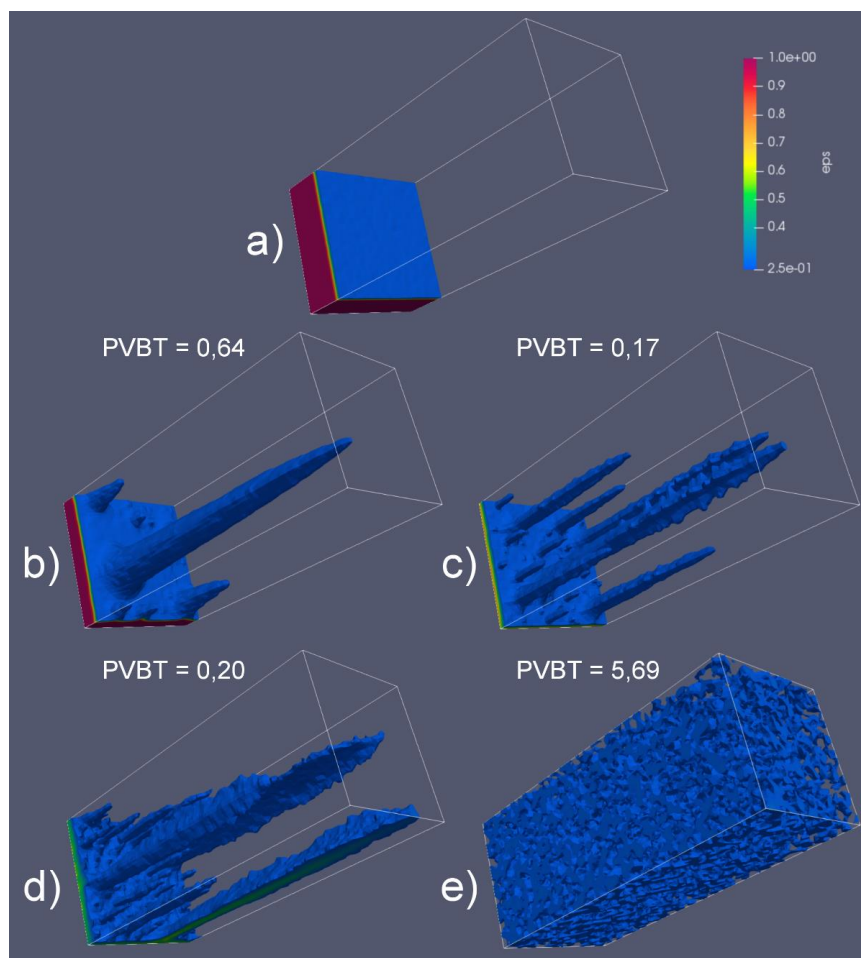
Resultados e Discussão

A Figura 1 mostra os padrões de dissolução gerados a partir das simulações, visualizados pelo campo de porosidade no tempo final, com seus respectivos valores de PVBT. Para o padrão de dissolução de face, presente na Figura 1(a), não é apresentado um PVBT associado, pois exige um alto tempo computacional para que o ácido atravesse o domínio, assim, não é possível calcular o PVBT para este caso.

O padrão cônico pode ser observado na figura 1(b), onde a alta dissolução na região de entrada do plugue até a formação de um largo caminho preferencial que atinja a face de saída requer um alto tempo de injeção e, por consequência, elevado volume de ácido. Nesse caso, a maior parte da dissolução acontece no início do domínio, o que é explicado pela magnitude do transporte de massa, que ainda não consegue compensar a taxa de reação; porém comparado ao caso da dissolução de face, onde a taxa de reação domina e a entrada do plugue é igualmente consumida, o transporte é suficiente para gerar um canal de fluxo principal. O caso de menor PVBT é marcado pelo surgimento do *wormhole* dominante, visto na figura 1(c), com canais pouco ramificados e com menor variação em seu raio em comparação com o *wormhole* cônico, sinalizando o ponto em que o transporte e a reação se equilibram. É notável também a formação de diversos *wormholes* distribuídos pela área de injeção, surgindo simultaneamente até que um dos canais se torne dominante, o que leva à diminuição do fluxo nos *wormholes* menos desenvolvidos. O PVBT volta a crescer à medida que os *wormholes* tendem a ramificar, o padrão visto na figura 1(d) apresenta canais irregulares devido às ramificações que se desenvolvem em todas as

direções, chegando até a parede lateral do domínio, e menor aumento da porosidade, pois o transporte de ácido que gera essas ramificações também limita o progresso da reação.

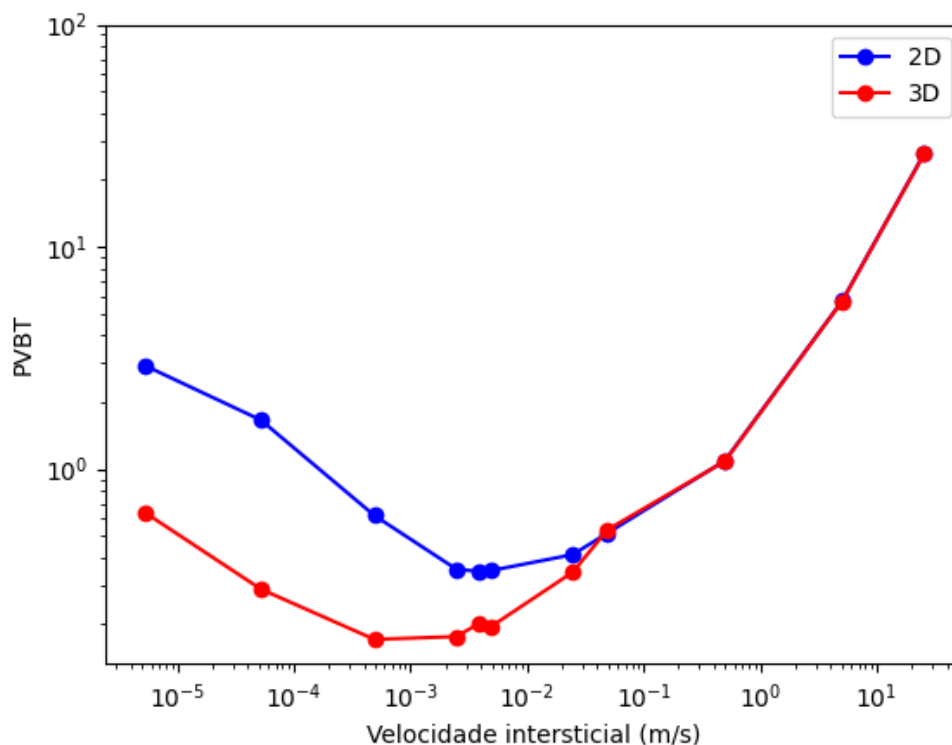
Figura 1 – Padrões de dissolução obtidos das simulações em 3D.



Esse efeito é mais proeminente na figura 1(e), com o padrão uniforme, no qual ocorre o preenchimento quase completo do meio poroso, porém a porosidade não sofre aumento significativo, nesse caso, altos volumes de ácido são injetados em pouco tempo (alto PVBT), com predominância do transporte de massa sobre a reação.

As curvas de PVBT completas dos casos simulados são apresentadas na Figura 2. Em vazões baixas a intermediárias, observa-se que a curva 2D tende a superestimar o PVBT quando comparado ao caso 3D, explicado pela grande influência do meio no processo de formação dos *wormholes*. Ao passo que em altas vazões, região na qual o transporte advectivo domina e não há mais grande dependência da morfologia do meio poroso devido à ausência de *wormholes* no padrão uniforme, as curvas 2D e 3D coincidem.

Figura 2 – Curvas de PVBT 2D e 3D simuladas neste estudo.



Conclusões

O solver desenvolvido para OpenFOAM utilizando a modelagem descrita representou efetivamente as relações entre transporte de massa e taxa de reação, gerando todo o conjunto de padrões de dissolução descritos na literatura e as respectivas curvas de PVBT. Observou-se uma diferença significativa entre os casos 2D e 3D, especialmente em regimes altamente dependentes da estrutura do meio, percebidos em vazões baixas e intermediárias. Nestes cenários a área onde ocorre a dissolução e os caminhos gerados durante a formação de *wormholes* ditam a morfologia dos padrões resultantes e, por consequência, alteram o valor de PVBT. Por outro lado, para regimes governados pelo transporte de massa, observado em altas vazões, não houve diferenças significativas para os casos 2D e 3D, mostrando uma independência da quantidade de dimensões quando a mesma geometria é considerada. Desse modo, destaca-se a importância de se realizar simulações tridimensionais na análise da formação de *wormholes*, assim como na determinação das condições para o ponto ótimo de injeção, em especial quando a simulação tem o propósito de considerar as complexidades e heterogeneidades de carbonatos reais.

Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer à CAPES e PROPESP/UFPA pelo suporte financeiro para a realização da pesquisa e concessão da bolsa de mestrado e à Infraestrutura do Laboratório de Ciência e Engenharia de Petróleo (LCPetro).

Referências Bibliográficas

AKANNI, O. O.; NASR-EL-DIN, H. A.; GUSAIN, D. A Computational Navier-Stokes Fluid-Dynamics-Simulation Study of Wormhole Propagation in Carbonate-Matrix Acidizing and Analysis of Factors Influencing the Dissolution Process. **SPE Journal**, v. 22, n. 06, p. 2049–2066, 4 out. 2017.

BOUSQUET-MELOU, P.; GOYEAU, B.; QUINTARD, M.; FICHOT, F.; GOBIN, D. Average momentum equation for interdendritic flow in a solidifying columnar mushy zone. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 45, n. 17, p. 3651–3665, 1 ago. 2002.

GHOMMEM, M.; ZHAO, W.; DYER, S.; QIU, X.; BRADY, D. Carbonate acidizing: Modeling, analysis, and characterization of wormhole formation and propagation. **Journal of Petroleum Science and Engineering**, v. 131, p. 18–33, jul. 2015.

HOEFNER, M. L.; FOGLER, H. S. Pore evolution and channel formation during flow and reaction in porous media. **AIChE Journal**, v. 34, n. 1, p. 45–54, 1 jan. 1988.

ISSA, R. I. Solution of the implicitly discretised fluid flow equations by operator-splitting. **Journal of Computational Physics**, v. 62, n. 1, p. 40–65, jan. 1986.

LIU, P.; REN, X.; KONG, L.; YAO, J. Three-dimensional simulation of acidizing process in carbonate rocks using the Darcy–Forchheimer framework. **Oil & gas science and technology**, v. 75, p. 48–48, 1 jan. 2020.

MAHESHWARI, P.; BALAKOTAIAH, V. Comparison of Carbonate HCl Acidizing Experiments With 3D Simulations. **SPE Production & Operations**, v. 28, n. 04, p. 402–413, 4 set. 2013.

PANGA, M.; ZIAUDDIN, M.; BALAKOTAIAH, V. Two-scale continuum model for simulation of wormholes in carbonate acidization. **AIChE Journal**, v. 51, n. 12, p. 3231–3248, 6 set. 2005.