

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



TÍTULO DO TRABALHO:

INFLUÊNCIA DA DIMENSÃO DA AMOSTRA DE ROCHA EM EXPERIMENTOS DE ACIDIFICAÇÃO DE CARBONATOS.

AUTORES:

Heitor da Luz Silva¹, Jair Rodrigues Neyra¹, Felipe Pereira de Souza¹, Flávio Bittencourt da Cruz², Mateus Palharini Schwalbert², Pedro Tupã Pandava Aum¹.

INSTITUIÇÃO:

¹ Laboratório de Ciência e Engenharia de Petróleo (LCPetro), Universidade Federal do Pará – Campus Salinópolis. ² Centro de Pesquisas da Petrobrás (CENPES), Petrobras, Rio de Janeiro.

INFLUÊNCIA DA DIMENSÃO DA AMOSTRA DE ROCHA EM EXPERIMENTOS DE ACIDIFICAÇÃO DE CARBONATOS.

Resumo

A acidificação de carbonatos é uma técnica de estimulação de poços utilizada na indústria do petróleo com o objetivo de melhorar a produção. Essa técnica consiste na injeção de uma solução ácida na formação rochosa abaixo da sua pressão de fratura, dissolvendo os minerais contidos no meio poroso e criando canais conhecidos como *wormholes*. Experimentos em laboratório são realizados para compreender quais os melhores parâmetros operacionais para uma acidificação eficiente. No entanto, na literatura, são amplamente reportados experimentos com amostras de diferentes dimensões, não havendo um padrão pré-estabelecido. Dessa forma, compreender como as diferentes dimensões podem influenciar nos resultados de acidificação é fundamental para melhorar a confiabilidade dos experimentos e transpor para as operações no campo. Para investigar essa questão, neste presente trabalho foram realizados dois experimentos em Indiana Limestone com HCl 15 % (m/m), na velocidade intersticial de 0,3 cm/min, utilizando rochas de baixa permeabilidade (<10 mD) com dimensões distintas em relação ao diâmetro e comprimento: 1x2 e 3x6 polegadas, mantendo a razão de aspecto constante. Os experimentos de fluxo reativo são realizados no equipamento conhecido como *coreflooding* (simulador físico de reservatórios), que permite injetar fluidos em amostras de rochas confinadas em altas pressões e temperaturas. A técnica de microtomografia de raios-X é utilizada para visualizar o interior da amostra antes e depois da injeção do ácido, permitindo analisar o caminho percorrido no meio poroso. Os resultados de PVBT (*pore volume to breakthrough*) foram 0,66 e 0,089 para a amostra de 1x2 e 3x6 polegadas, respectivamente, indicando uma redução do PVBT com o aumento das dimensões das amostras. Esses pontos de PVBT apresentaram comportamento semelhante ao previsto pelo PVBTCalc-LCPetro, código que utiliza um modelo mecanicista para previsão do PVBT. A característica do *wormhole* foi semelhante para as duas rochas, apresentando um canal dominante com algumas ramificações em seu entorno. A rocha de maior dimensão possui mais ramificações secundárias do que a de menor dimensão, o que pode ser explicado pelo seu espaço disponível ser maior e sua propagação ter mais opções para se deslocar no meio poroso. Os resultados apresentados neste trabalho auxiliam no entendimento do impacto da importância da amostra em experimentos de acidificação.

Palavras-chave: Acidificação de carbonatos, *wormhole*, PVBT, Microtomografia de raios-X.

Abstract

The acidification of carbonates is a well stimulation technique used in the oil industry to enhance production. This technique involves injecting an acid solution into the rock formation below its fracture pressure, dissolving the minerals in the porous medium, and creating channels known as wormholes. Laboratory experiments are conducted to determine the best operational parameters for efficient acidification. However, several experiments with samples of different dimensions are widely reported in the literature, highlighting the lack of a pre-established standard. Therefore, understanding how different dimensions can influence acidification results is essential to improve the reliability of experiments and to apply the findings to field operations. To investigate this question, the present study conducted two experiments on Indiana Limestone with 15 wt% HCl at an interstitial velocity of 0.3 cm/min, using low permeability rocks (<10 mD) with different dimensions in terms of diameter and length: 1x2 and 3x6 inches, maintaining a constant aspect ratio. The reactive flow experiments were performed using a coreflooding apparatus (physical reservoir simulator), which allows fluids to be injected into the confined porous medium at high pressures and temperatures. X-ray microtomography was used to visualize the sample's interior before and after acid injection, allowing an analysis of the

path taken through the porous medium. The PVBT (pore volume to breakthrough) results were 0.66 and 0.089 for the 1x2 and 3x6 inch samples, respectively, indicating a reduction in PVBT with increased sample dimensions. These PVBT points showed a behavior similar to that predicted by PVBTCalc-LCPetro, a code that uses a mechanistic model for PVBT prediction. The wormhole characteristics were similar for both rocks, displaying a dominant channel with some branching around it. The larger rock sample had more secondary branches than the smaller sample, which can be explained by its larger available space, allowing more propagation options within the porous medium. The results presented in this study aid in understanding the impact of sample size in acidification experiments.

Keywords: Carbonate acidizing, wormhole, PVBT, X-ray microtomography.

Introdução

As rochas carbonáticas são formações geológicas compostas principalmente por minerais carbonáticos, como calcita (CaCO_3) e dolomita ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$). Elas são encontradas em reservatórios petrolíferos ao redor do mundo e desempenham um papel significativo na produção de hidrocarbonetos. As características das rochas carbonáticas, como porosidade, permeabilidade e composição mineralógica e heterogeneidades influenciam diretamente a capacidade dessas rochas em armazenar e produzir hidrocarbonetos (Ahr, 2008; Tavakoli, 2019).

A estimulação compreende um conjunto de ações com o objetivo de contornar ou reverter os danos causados à formação, aumentando a produção ou a injetividade do poço. Os métodos mais comumente empregados de estimulação são o fraturamento hidráulico e a acidificação (Economides; Nolte, 2000). A acidificação de carbonatos consiste na injeção de uma solução ácida na formação do reservatório, com pressão inferior à sua pressão de fratura, dissolvendo os minerais presentes na rocha com o objetivo principal de remover o dano de formação e aumentar a sua permeabilidade, criando canais condutivos (Furtado, 2017; Liu et al, 2020).

Por meio dessa técnica, a dissolução da rocha forma canais condutores conhecidos como buracos de minhoca (*wormholes*). Esses *wormholes* são canais de alta permeabilidade que facilitam o escoamento do óleo presente na rocha para a área desejada (Kalia; Balakotaiah, 2007; Ali; Kalfayan; Montgomery, 2016). Para simular a acidificação em escala de laboratório, experimentos são realizados em amostras de rocha, em formato cilíndrico, chamados de plugues. As dimensões das amostras variam bastante em decorrência da disponibilidade. Isso faz com que os experimentos realizados na literatura sejam difíceis de comparar. Contudo diferenças na geometria podem gerar divergências nos valores de PVBT.

Os efeitos da geometria da amostra na eficiência do *wormhole* foram observados e discutidos por alguns pesquisadores. Buijse (2000) afirmou que a estrutura do *wormhole* e a distribuição do fluido são afetadas pelas dimensões da amostra no experimento de acidificação, embora não tenha uma descrição quantitativa detalhada desse efeito. Bazin (2001) observou que o PVBT diminui à medida que as dimensões da amostra aumentam. De acordo com Dong et al. (2014), quando o diâmetro da amostra aumenta, o volume total de poros da amostra também aumenta. No entanto, se apenas um *wormhole* dominante se formar durante o processo

de acidificação, a quantidade de rocha dissolvida pelo ácido para criar esse *wormhole* será aproximadamente a mesma, independentemente do diâmetro da amostra. Isso implica que o PVBT (*Pore Volume to Breakthrough*) será menor para amostras de maior diâmetro.

Tendo em vista o exposto, este trabalho tem como objetivo avaliar a influência das dimensões da amostra durante o processo de acidificação. Por meio de experimentos laboratoriais, buscou-se entender o comportamento do diferencial de pressão, os resultados de PVBT e a formação do *wormhole* em duas amostras de dimensões distintas, mantendo a mesma razão de aspecto. Assim, este trabalho irá contribuir para o entendimento mais aprofundado do impacto das dimensões das amostras na eficiência do processo de acidificação de carbonatos e a importância de considerar as dimensões das amostras para garantir a aplicabilidade dos dados experimentais em operações de campo.

Metodologia

Neste estudo, foram realizados dois experimentos utilizando amostras de rochas carbonáticas do tipo *Indiana Limestone* com dimensões distintas em relação ao diâmetro e comprimento: 1x2 (IL100) e 3x6 (IL077) polegadas, mantendo a razão de aspecto constante. O ácido utilizado foi o HCl 15 % (m/m), a uma temperatura de 45°C. A amostra IL077 foi injetada com uma vazão de 4,32 ml/min, enquanto a IL100 foi injetada com uma vazão de 0,41 ml/min, mantendo a velocidade intersticial de 0,3 cm/min igual para as duas amostras. Na Tabela 1, é apresentada a comparação de alguns parâmetros das duas amostras.

Tabela 1 – Parâmetros das amostras de rocha estudadas.

Parâmetros	IL077	IL100
Diâmetro (cm)	7,62	2,49
Comprimento (cm)	15,29	5,07
Vazão de injeção (mL)	4,329	0,41
Velocidade intersticial (cm/min)	0,3	0,3
Pressão Confinamento (psi)	1700	1700
Pressão Axial (psi)	1800	1800
Porosidade (%)	15,82	14,14
PVBT	0,66	0,08

O experimento foi realizado no equipamento *coreflooding* (DCI, *coreflood system*) ilustrado na Figura 2, utilizado para conduzir o fluxo reativo. As amostras de rochas foram inseridas no *coreflooding*, uma de cada vez, envolvidas por uma camisa de borracha *Viton* para aplicação da pressão de confinamento e axial, permitindo que o fluido escoe pelo meio poroso. Além disso, este equipamento possui pontos de leitura de diferencial de pressão (DP), o que permite medir a diferença de pressão entre a pressão inicial e a pressão final da rocha, sendo este o principal parâmetro analisado para detectar o ponto de ruptura (*breakthrough*) da amostra.

Após a acidificação, a microtomografia de raios-X (MicroCT) foi utilizada para analisar a formação de *wormholes* e as mudanças na estrutura interna das amostras. As imagens de MicroCT (GE, Microtomógrafo Phoenix v|tomex|s 240) foram analisadas em um tempo de

exposição de 200 ms com a geração de 2800 imagens, utilizando uma voltagem de 170 kV (IL077) ou 120 kV (IL100), corrente de 170 μ A (IL077) ou 100 μ A (IL100) e resolução de 14,00 μ m (IL077) ou 42,00 μ m (IL100).

O cálculo do PVBT é feito considerando a razão entre o volume de ácido gasto para atingir o *breakthrough* ($Vol_{\text{ácido}}$) e o volume poroso (VP) da amostra, conforme apresentado na Equação 1. É importante destacar que há um volume morto presente nas linhas do equipamento, que foi removido do cálculo para garantir resultados mais precisos dos volumes de ácido utilizados.

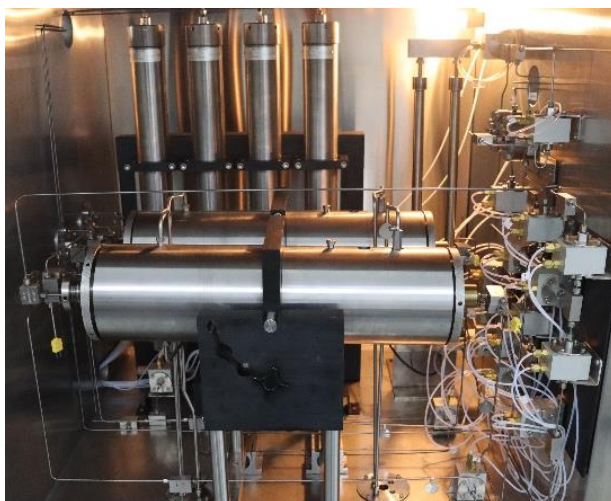


Figura 2 – *Coreflooding* utilizado no experimento,

$$PVBT = \frac{Vol_{\text{ácido}}}{VP} \quad (1)$$

Resultados e Discussão

Na Figura 3, é evidenciado o comportamento dos diferenciais de pressão (DP) normalizados das duas amostras de rocha de dimensões distintas. A linha verde representa o DP da amostra IL100, de dimensões 1x2 polegadas, e a linha azul representa o DP da amostra IL077, com dimensões de 3x6 polegadas.

Nesse sentido, a amostra de maior dimensão (IL077) apresenta um comportamento do DP mais estável e curto. Esse comportamento pode estar relacionado às dimensões da amostra, que parecem favorecer uma dissolução mais uniforme no início do processo de acidificação. A maior dimensão da amostra oferece um volume adicional de rocha para o ácido percorrer, possibilitando uma distribuição mais uniforme do fluido reativo. Esse fenômeno pode facilitar a formação de *wormholes* de maneira mais eficiente, embora sejam necessários estudos adicionais para confirmar essa observação. A maior área superficial e volume de poros nas amostras maiores também podem contribuir para uma propagação mais eficiente do ácido, resultando em uma dissolução mais controlada e menos suscetível a variações locais na resistência interna da rocha. Estudos como o de Dong et al. (2014), que investigam o efeito das dimensões do núcleo no fluxo ácido, reforçam essa análise ao sugerir que amostras de maior diâmetro facilitam a distribuição do ácido e a formação de *wormholes* mais eficientes. Por outro lado, a amostra de menor dimensão (IL100) apresenta um comportamento instável, longo e com

picos do diferencial de pressão, o que indica que há uma resistência interna no meio poroso dessa rocha. Essa resistência interna na amostra de menor dimensão pode ser atribuída à menor área superficial e volume de poros, que limitam a penetração e propagação do ácido, resultando em um comportamento mais instável e perfil longo de decaimento do diferencial de pressão.

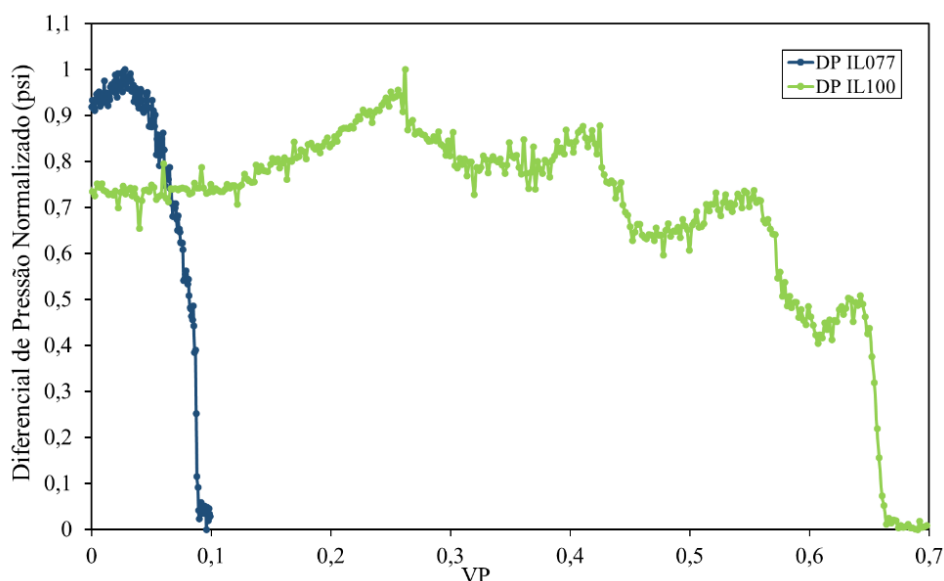


Figura 3 – Análise dos diferenciais de pressão das amostras estudadas.

A Figura 4 representa os resultados do PVBT para as duas amostras, na qual observa-se uma diferença significativa no resultado de PVBT: para a amostra de menor dimensão (IL100) o PVBT foi de 0,66, enquanto para a amostra de maior dimensão (IL077) foi de 0,089.

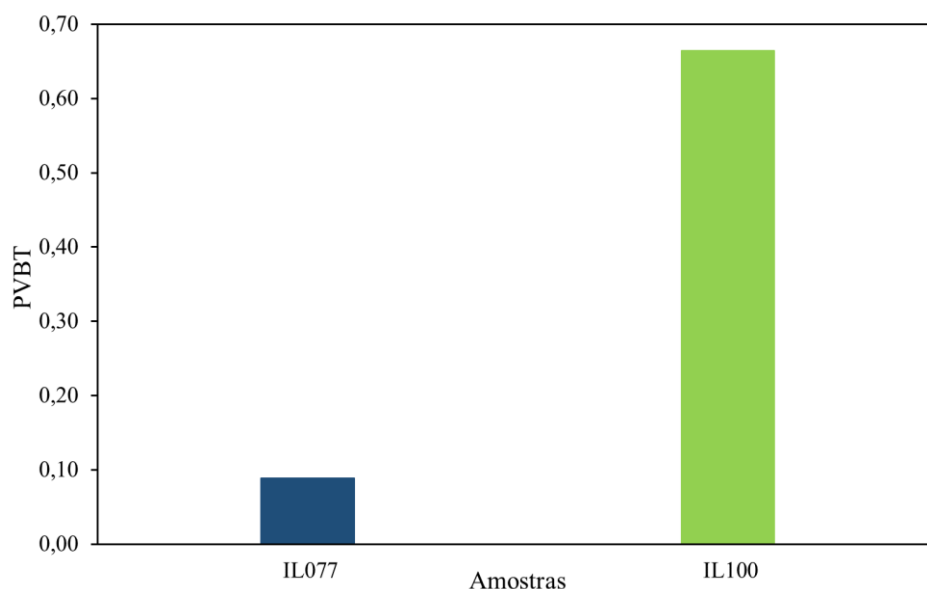


Figura 4 – Resultados de PVBT das amostras analisadas neste estudo.

Esses resultados indicam que o aumento da dimensão da amostra reduz o volume de ácido gasto em relação ao volume poroso da amostra. Ou seja, usando o valor de PVBT da amostra menor como parâmetro para acidificar uma amostra maior, seria necessário 66% do volume

poroso em volume de ácido, no entanto, na realidade apenas 8,9% desse volume é realmente necessário.

A Figura 5 apresenta uma comparação entre as características dos *wormholes* formados nas amostras após o processo de acidificação e a direção do fluxo no meio poroso. Nesse sentido, a amostra IL100 (menor dimensão) apresenta a formação de um canal principal tortuoso, com algumas ramificações pouco contínuas e irregulares ao longo do caminho. Esse padrão sugere que, nessa amostra, a propagação do ácido encontrou maior resistência, resultando nessas características do *wormhole*. Em contrapartida, a amostra IL077 apresenta a formação de um canal principal contínuo e regular, com alguns ramos mais longos e diretos. Ou seja, essa configuração sugere que, nessa amostra, houve uma distribuição mais uniforme do ácido, facilitada pelo maior volume e área superficial, resultando em uma dissolução mais eficiente e direcionada.

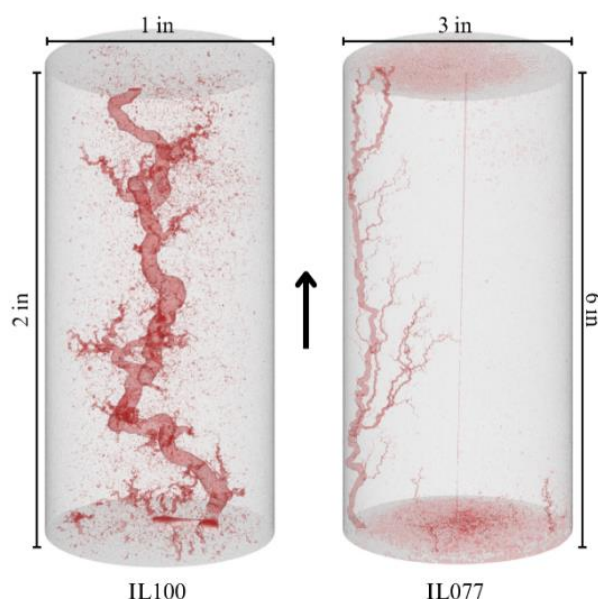


Figura 5 – Comparação da formação dos *wormholes* nas amostras estudadas (imagens fora de escala).

Dessa forma, a formação dos *wormholes* na amostra de maior dimensão indica que, em escala de campo, a acidificação pode ser mais eficaz em rochas maiores, onde o ácido tem mais facilidade para se propagar no meio poroso e formar um fluxo preferencial de maneira mais direta. Portanto, as amostras de maiores dimensões proporcionam uma formação de *wormholes* mais eficiente, enquanto amostras menores resultam em uma formação mais irregular e maior consumo de ácido. De acordo com Dong et al. (2014), quando o diâmetro da amostra aumenta o volume total de poros da amostra torna-se maior. No entanto, se houver apenas um *wormhole* dominante, a quantidade de rocha dissolvida pelo ácido ao criar o *wormhole* será semelhante, independentemente do diâmetro do núcleo. Isso resulta em um PVBT menor para amostras de diâmetro maiores. Os resultados do presente estudo corroboram essas observações, evidenciando que amostras de maiores dimensões apresentam um PVBT menor, sugerindo que o breakthrough ocorre com menor consumo de ácido devido à maior área superficial e volume de poros que permitem uma distribuição mais uniforme e penetração mais eficiente do ácido.

Conclusões

Este trabalho destaca a importância da compreensão do impacto das dimensões de amostras na acidificação de carbonatos. A análise dos resultados de PVBT, comportamento do diferencial de pressão e das características dos *wormholes* formados em amostras de diferentes dimensões revela percepções cruciais para sua aplicação em operações de campo. Dessa forma, foi possível obter as seguintes conclusões:

- Na amostra de dimensão menor (IL100) o PVBT foi maior, refletindo uma dissolução menos eficiente e a formação de *wormholes* mais tortuosos, sugerindo uma resistência interna durante a propagação do ácido;
- Em contraste, a amostra IL077 apresenta um PVBT menor e uma formação de *wormhole* mais linear e contínua em relação ao seu volume. Esse comportamento indica que a acidificação em formações de maior dimensão tende a ser mais eficaz, com uma formação de canais de fluxo preferenciais mais direta e eficiente;
- Os resultados de PVBT são fundamentais para a extrapolação dos resultados de laboratório para operações de campo. Considerando que formações rochosas em escala de campo são maiores que amostras de laboratório, os resultados sugerem que a eficiência do processo de acidificação pode ter uma eficácia mais otimista em operações reais visto que a maior dimensão da amostra resultou em um menor volume de ácido utilizado.

Portanto, este estudo contribui significativamente para a compreensão da influência de diferentes dimensões nos experimentos de acidificação de carbonatos. A compreensão desse processo pode levar a uma melhor confiabilidade dos dados de laboratório e na eficácia das operações de acidificação em campo, resultando em uma produção de óleo mais eficiente e econômica. Além disso, esses resultados destacam a complexidade das interações entre o ácido e a estrutura da rocha durante a acidificação, sugerindo que a eficiência do processo pode ser significativamente influenciada pelas dimensões da amostra e pela formação de *wormholes*.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Laboratório de Ciência e Engenharia de Petróleo (LCPetro) e ao Campus de Salinópolis da UFPA pela infraestrutura. Pelos apoios financeiros da Pró-Reitoria de Extensão (PROEX) da UFPA e da Petróleo Brasileiro S/A (Petrobras, Projeto 2019/00154-4).

Referências Bibliográficas

AHR, W. M. **Geology of carbonate reservoirs**: the identification, description, and characterization of hydrocarbon reservoirs in carbonate rocks. New Jersey: John Wiley & Sons, p. 277, 2008.

ALI, S. A., KALFAYAN, L., & MONTGOMERY, C. **Acid stimulation**. Richardson, Texas, USA: Monograph Series, Society of Petroleum Engineers. 2016. [https://doi.org/10.2118, 9781613994269](https://doi.org/10.2118/9781613994269).

BAZIN, B. From Matrix Acidizing to Acid Fracturing: A Laboratory Evaluation of Acid/Rock Interactions. **SPE Production & Facilities**, v. 16, n. 1, p. 22-29, 2001.

BUIJSE, M. A. Understanding Wormholing Mechanisms Can Improve Acid Treatments in Carbonate Formations. **SPE Production & Operations**, v. 15, n. 3, p. 168-175, 2000. DOI: 10.2118/65068-pa.

Dong, K; Jin, X; Zhu, D; Hill, A D; **The effect of core dimensions on the optimum acid flux in carbonate acidizing**. In: SPE International Conference and Exhibition on Formation Damage Control. SPE, 2014.

ECONOMIDES, M.; NOLTE, K. **Reservoir Stimulation**. Wiley New York, p. 824, 2000.

FURTADO, L. B. Desenvolvimento de inibidores verdes a base de alquifenóis para aplicação em **fluidos de acidificação para poços de petróleo**. 2017. 144 p. Dissertação (Mestrado em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2017.

KALIA, N.; BALAKOTAIAH, V. Modeling and analysis of wormhole formation in reactive dissolution of carbonate rocks. **Chemical Engineering Science**, v. 62, n. 4, p. 919-928, 2007.

Liu, Piyang; Ren, Xiaoxia; Kong, Liang; Yao, Jun; Three-dimensional simulation of acidizing process in carbonate rocks using the Darcy-Forchheimer framework. **Oil & Gas Science and Technology** - Revue d'IFP Energies nouvelles, v. 75, p.48, 2020.

TAVAKOLI, V. **Carbonate reservoir heterogeneity: overcoming the challenges**. Springer Nature, 2019.