

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



## TÍTULO DO TRABALHO:

VARIÁVEIS UTILIZADAS EM ESTUDOS DE ACIDIFICAÇÃO MATRICIAL: CONSTRUÇÃO DE BANCO DE DADOS, ANÁLISE ESTATÍSTICA E POSSIBILIDADES DE PESQUISAS FUTURAS

## AUTORES:

Andresa dos Santos Valente<sup>1</sup>, Emanuele Dutra Valente Duarte<sup>1</sup>, <sup>2</sup>Sérgio Taveira de Camargo Júnior, <sup>2</sup>Rafael Japiassú Leitão, Daniel Nobre Nunes da Silva<sup>1</sup>, Pedro Tupã Pandava Aum<sup>1</sup>

## INSTITUIÇÃO:

<sup>1</sup>Laboratório de Ciência e Engenharia de Petróleo - LCPetro, Faculdade de Engenharia, Universidade Federal do Pará  
Centro de Pesquisas, Desenvolvimento e Inovação Leopoldo Américo Miguez de Mello (CENPES), Petrobras, 21941-598, Rio de Janeiro, Brasil

## VARIÁVEIS UTILIZADAS EM ESTUDOS DE ACIDIFICAÇÃO MATRICIAL: CONSTRUÇÃO DE BANCO DE DADOS, ANÁLISE ESTATÍSTICA E POSSIBILIDADES DE PESQUISAS FUTURAS

### Resumo

A estimulação ácida matricial é uma técnica utilizada na indústria do petróleo com o intuito de aumentar a permeabilidade efetiva das rochas na região próxima ao poço (*near wellbore region*) por meio da injeção de ácido. Em rochas carbonáticas, o ácido dissolve a rocha e forma canais de alta condutividade, conhecidos como *wormholes*. Uma das medidas mais importantes nos experimentos laboratoriais de acidificação, que serve como principal parâmetro para as simulações em escala de campo, é o *Pore Volume to Breakthrough* (PVBT). O PVBT é definido como o volume de ácido necessário para que o canal de dissolução percorra completamente a rocha (através da dissolução da rocha). Neste sentido, pesquisas realizadas em laboratórios com experimentos de acidificação matricial são muito importantes para compreensão de processos de estimulação. Os estudos sobre processos de acidificação determinam o valor de PVBT em função de diferentes condições experimentais, como por exemplo, tipos de ácido, temperatura, tipos de saturação, vazões de injeções e tipos de rochas, sendo que a condição experimental depende da finalidade de cada estudo. Uma questão crítica observada na literatura é que os experimentos são difíceis de comparar devido a serem obtidos em condições distintas. Desta forma, este trabalho tem como objetivo analisar os estudos existentes entre 1996 e 2024 que utilizam acidificação matricial, com o intuito de identificar os tipos de condições experimentais empregados assim como identificar potenciais lacunas de estudo. Para realizar este trabalho, foram reunidos 962 dados originados de artigos e dados experimentais obtidos no Laboratório de Ciência e Engenharia do Petróleo (LCPetro/UFPa) e dados fornecidos pela Petrobras. Os dados foram analisados estatisticamente utilizando os seguintes parâmetros: desvio padrão, mediana, moda, média harmônica e média aritmética. Os resultados mostram que a maioria dos experimentos de acidificação matricial são realizados em calcitas, utilizando água e salmoura como saturação inicial das amostras de rocha. É predominante a utilização do ácido clorídrico (HCl), observado em 74,1% dos experimentos catalogados neste trabalho. Apenas 11,3% dos dados são de estudos que utilizaram óleo como forma de saturação, o que mostra uma área que pode ser mais explorada em trabalhos futuros. Os valores de PVBT variam entre 0,04 e 59,29 indicando uma amplitude significativa. Experimentos de maior PVBT são observados em sistemas de baixa reatividade e em baixas vazões. Este trabalho apresenta um mapeamento sistemático de experimentos de acidificação reportados na literatura, bem como presentes em base de dados do LCPetro e traz insights para realização de novos trabalhos de pesquisa.

Palavras-chave: estimulação ácida matricial, *pore volume to breakthrough*, diferentes condições experimentais.

### Abstract

Matrix acid stimulation is a technique used in the petroleum industry to increase the effective permeability of rocks in the region close to the well (near the wellbore region) through acid injection. In carbonate rocks, acid dissolves the rock and forms high-conductivity channels known as wormholes. One of the most important measurements in laboratory acidification experiments, which serves as the main parameter for field-scale simulations, is the Pore Volume to Breakthrough (PVBT). The PVBT is defined as the volume of acid required for the dissolution channel to completely travel through the rock (by dissolving it). In this sense, researches carried out in laboratories with matrix acidification experiments are very important for understanding stimulation processes. Studies on acidification processes determine the PVBT value depending on different experimental conditions, such as types of acid, temperature, types of saturation, injection flow rates and types of rocks, with the experimental

condition depending on the purpose of each study. A critical issue observed in the literature is that experiments are difficult to compare since they are performed under different conditions. Therefore, this work analyzes existing studies between 1996 and 2024 that use matrix acidification, with the aim of identifying the types of experimental conditions used as well as identifying potential study gaps. To carry out this work, 962 data were gathered from articles and experimental data obtained at the Petroleum Science and Engineering Laboratory (LCPetro/UFPA) and data provided by Petrobras. The data were statistically analyzed using the following parameters: standard deviation, median, mode, harmonic mean and arithmetic mean. The results show that most matrix acidification experiments are carried out on calcites, using water and brine as initial saturation of rock samples. The use of HCl is predominant, observed in 74.1% of the experiments cataloged in this work. Only 11.3% of the data come from studies that used oil as a form of saturation, which shows area research field that can be further explored in future work. PVBT values varies between 0.04 and 59.29 indicating a significant range. Experiments with higher PVBT are observed in low reactivity systems and at low flow rates. This work presents a systematic mapping of acidification experiments reported in the literature, as well as those present in the LCPetro database, and provides insights for carrying out new research work.

Keywords: matrix acid stimulation, pore volume to breakthrough, different experimental conditions.

## **Introdução**

A acidificação matricial de carbonatos é uma técnica utilizada na indústria do petróleo para aumentar a produtividade dos poços petrolíferos (Kalfayan, 2008). Esta técnica consiste na injeção de ácido na formação rochosa, com o intuito de dissolver parte da matriz da rocha e criar canais de fluxo para aumentar a permeabilidade da rocha (Lucas et al., 2023; Neyra et al., 2024). Estes canais são denominados de *wormholes* e proporcionam uma maior circulação de fluidos ao conectar os poros, facilitando a produção de hidrocarbonetos (Glasbergen et al., 2009; Chacon; Pournik, 2022). A eficácia da acidificação matricial está diretamente ligada a um entendimento profundo das características geológicas e petrofísicas da formação, assim como à escolha apropriada dos ácidos e aditivos para otimizar o procedimento (Williams; Gidley; Schechter, 1979; Ali et al., 2016; Sazali et al., 2018).

Neste cenário, o *Pore Volume to Breakthrough* (PVBT) é um fator muito importante. O PVBT é o volume de ácido necessário para que o ácido percorra a rocha (gerando uma reação físico-química) e chegue ao fim, perfurando-a e aumentando a permeabilidade por meio dos *wormholes* (Wan, 2011). Segundo Fredd e Fogler (1999), há um ponto ótimo de injeção, isto é, uma vazão de injeção onde seria gasto o menor volume de ácido possível e formaria um *wormhole* que conectasse os poros da rocha. Isso mostra que dentre os motivos relevantes para o estudar o PVBT, há como encontrar o ponto ótimo de injeção por meio da análise desse valor (Sazali et al., 2018).

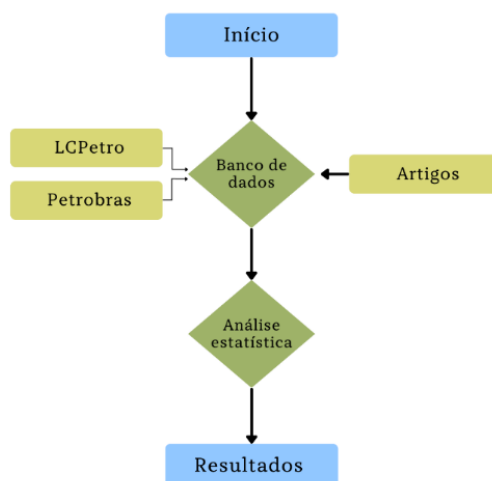
Pesquisas realizadas em laboratórios com experimentos de acidificação matricial são muito importantes pois, por meio dos resultados obtidos com os experimentos, o valor de PVBT pode ser obtido em função de diferentes condições experimentais (Qiu; Khalid; Sultan, 2015; Alameedy et al., 2023). Nestes experimentos, é possível utilizar diferentes tipos de ácido, temperatura, tipos de saturação, diferentes vazões de injeções e diferentes tipos de rochas (Gomaa; Nasr-El-Din, 2011; Mahmoud et al., 2011; Mustafa et al., 2021), sendo que a condição experimental depende da finalidade de cada estudo (Kalfayan, 2008).

Neste trabalho, analisaram-se 962 dados de experimentos de acidificação de rochas realizados entre os anos de 1996 e 2024 com o objetivo de identificar os tipos de condições experimentais empregados nos experimentos de acidificação matricial assim como identificar potenciais lacunas de estudo nesta área. Os dados coletados vieram de artigos disponíveis na literatura e de experimentos realizados pelo Laboratório de Ciência e Engenharia de petróleo (LCPetro/UFGA) e pela empresa de Petróleo Brasileiro S/A (Petrobras). A análise presente neste trabalho contribui para o desenvolvimento da pesquisa de acidificação pois mostra em quais áreas há um déficit experimental e incentiva novas pesquisas para preencher tais lacunas encontradas.

## Metodologia

Este trabalho foi elaborado com base na construção e análise de um banco de dados contendo os principais parâmetros presentes na acidificação de carbonatos. Os dados reunidos foram dispostos em uma planilha do Excel, onde obteve-se um total de 962 linhas e 17 colunas. Nas linhas, foram inseridos os conjuntos de dados com as informações experimentais correspondente a cada valor de PVBT, enquanto nas colunas há parâmetros que representam as condições utilizadas em cada análise (como tipo de rocha, permeabilidade, porosidade, diâmetro e comprimento da amostra, tipo de tratamento ácido, fluido de saturação, temperatura, vazão de injeção) e também seu resultado em valor de PVBT. Destas variáveis (colunas), foram selecionadas 9 (sendo oito representativas das condições de análise e uma coluna com valores de PVBT) para compor o banco de dados final, os quais passaram pelas análises estatísticas. As informações utilizadas na construção do banco de dados são referentes ao experimento de acidificação e englobam o tipo da rocha, propriedades petrofísicas, dimensionamento da rocha, sistema ácido, saturação e condições experimentais, as quais variam de acordo com a finalidade dos experimentos. A análise estatística aplicada neste trabalho foi realizada utilizando o Python no *software* Google Colab. A Figura 1 apresenta o fluxograma sucinto da elaboração deste trabalho.

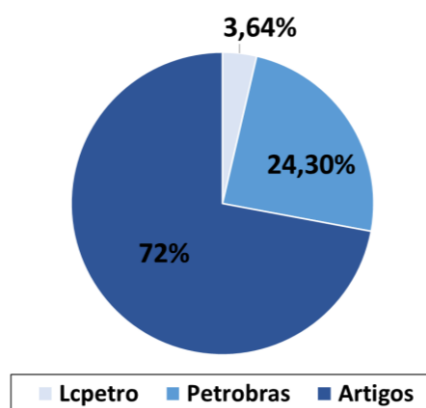
Figura 1 – Fluxograma representativo do desenvolvimento deste estudo.



## Resultados e Discussão

A Figura 2 apresenta a porcentagem de dados que constituem esse trabalho. Observa-se que a maior parte dos dados veio da literatura, sendo todos os dados de trabalhos experimentais obtidos a partir de análises realizadas em experimentos de fluxo (*corefloodings*). Ressalta-se que neste trabalho não estão presentes dados de simulação.

Figura 2: Estratificação da fonte dos dados utilizados neste estudo.



A Tabela 1 contém uma análise estatística dos 962 dados reunidos ao longo desta pesquisa. Nesta tabela, é possível observar a média aritmética, desvio padrão e valores máximo e mínimos das variáveis permeabilidade, porosidade, diâmetro, comprimento, vazão e PVBT, contidas no banco de dados. Os valores de PVBT variam entre 0,04 e 59,29 indicando uma amplitude significativa. Experimentos de maior PVBT são observados em sistemas de baixa reatividade e em baixas vazões.

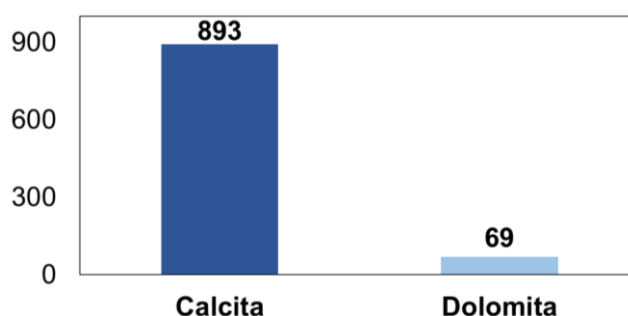
Tabela 1: Análise estatística do banco de dados.

| Parâmetros       | Permeabilidade<br>(mD) | Porosidade<br>(%) | Diâmetro<br>(in) | Comprimento<br>(in) | Vazão<br>(ml/min) | PVBT  |
|------------------|------------------------|-------------------|------------------|---------------------|-------------------|-------|
| Média Aritmética | 66,64                  | 0,16              | 1,48             | 5,25                | 4,35              | 4,11  |
| Desvio Padrão    | 162,19                 | 0,06              | 0,37             | 3,29                | 5,66              | 7,01  |
| Mínimo           | 0,06                   | 0,0033            | 0,8              | 1                   | 0,009             | 0,04  |
| Máximo           | 1951                   | 1,3118            | 4                | 20                  | 60                | 59,29 |
| Mediana          | 10                     | 0,15              | 1,5              | 5,8                 | 2                 | 1,795 |
| Moda             | 1,4                    | 0,15              | 1,5              | 6                   | 1                 | 0,72  |
| Média Harmônica  | --                     | --                | 1,42             | 3,92                | 0,49              | 0,70  |

Em relação às análises de dados categóricos, tem-se as seguintes variáveis: tipo de rocha (calcita ou dolomita), tipo de tratamento ácido (ácido inorgânico, ácido orgânico, quelante, emulsionado ou outro), fluido de saturação (água, salmoura ou óleo) e tipo de fluido utilizado na acidificação (HCl, ácido acético ou ácido metanossulfônico – MSA). A partir da Figura 3, é possível observar que a maioria dos experimentos de acidificação matricial são realizados em calcitas. Isso mostra que há um déficit de

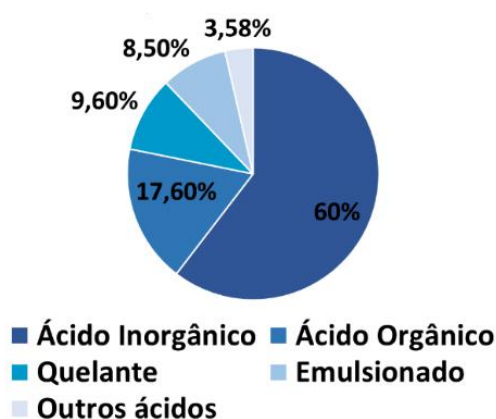
experimentos de estimulação matricial em formações geológicas de dolomita, o que torna os resultados distantes de uma compreensão generalizada dessa técnica em reservatórios que possuem essa formação.

Figura 3: Tipos de rochas identificadas nos estudos que constituem este banco de dados.



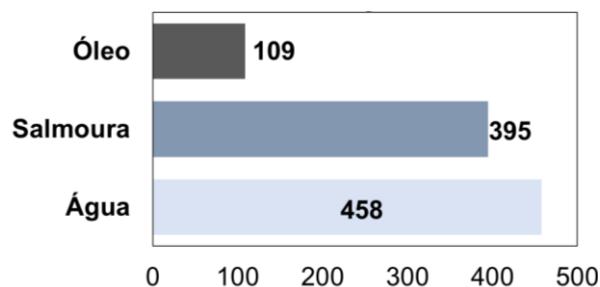
Em relação ao tipo de tratamento utilizado, tem-se que mais da metade dos experimentos realizados utilizam fluidos de natureza química inorgânica, como pode ser visto na Figura 4. Além disso, observou-se que houve trabalhos que utilizaram fluidos diferenciados e formulados pelos pesquisadores em questão, sendo alguns até biodegradáveis. Entretanto, tais dados ainda são escassos em relação aos experimentos que utilizam fluidos inorgânicos, mostrando, assim, uma janela de oportunidade de mais pesquisas com novas formulações de fluidos acidificantes.

Figura 4: Natureza química dos fluidos de acidificação presentes no banco de dados.



Outro fator relevante que foi objeto de análise nesses dados foram os dados de saturação. Sabe-se que nos reservatórios de hidrocarbonetos, há a presença de fluidos como óleo, gás, água e salmoura. Com base nisso, há experimentos que utilizam diferentes formas de saturação da amostra para visualizar que efeito isso tem no PVBT. Dentre os dados contidos no presente banco de dados, observou-se que a maioria dos experimentos se concentra na utilização de água (47,56%) ou salmoura (41,02%) como forma de saturação, enquanto os dados de óleo são poucos, representando em torno de 11,3% dos dados totais, como pode ser observado na Figura 5. Este fato abre margem para pesquisas considerando saturação com óleo e sua influência no PVBT.

Figura 5: Dados de Saturação presentes no banco de dados desenvolvido.



Por fim, houve uma análise dos ácidos mais frequentemente utilizados nos experimentos contidos no banco de dados. Constatou-se que o HCl possui a maior quantidade de análises, isto é, 74,1%, como pode ser observado na Figura 6 e Tabela 2. Tal observação mostra que há poucos estudos que utilizam ácidos diferentes do HCl, mostrando uma oportunidade de pesquisa considerando outros tipos de ácidos.

Figura 6: Quantitativo de ácidos utilizados nas pesquisas que constituem o banco de dados.

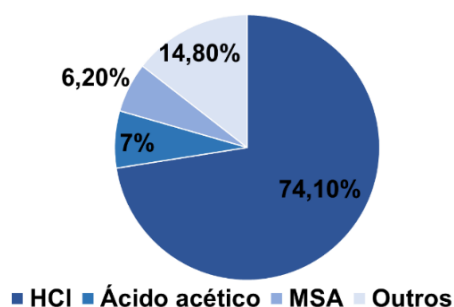


Tabela 2: Dados de ácidos presentes no banco de dados.

| Ácido         | Quantitativo numérico |
|---------------|-----------------------|
| HCl           | 713                   |
| Ácido acético | 68                    |
| MSA           | 60                    |
| Outros        | 121                   |

## Conclusões

Neste trabalho foram analisados 962 dados referentes aos experimentos de acidificação matricial com intuito de mostrar alguns parâmetros estudados entre os anos de 1996 e 2024 e, a partir de uma análise desses dados, verificar a existência de oportunidades de pesquisas futuras na área de acidificação matricial. A seguir resumimos as principais conclusões:

- 1) A maioria dos experimentos de acidificação matricial são realizados em calcitas. Isto demonstra que há uma lacuna em relação ao conhecimento do comportamento da acidificação em rochas dolomíticas pela falta de dados referentes a aplicação desta técnica de estimulação nessas rochas. Essa lacuna mostra que estudos futuros podem se dedicar a analisar os efeitos da acidificação em dolomitas.
- 2) Mais da metade dos experimentos realizados utilizaram fluidos de natureza química inorgânica, sendo que o HCl foi o ácido mais utilizado dentre os 962 dados. Essa observação mostra a oportunidade de pesquisar futuramente não apenas a formulação de outros fluidos de natureza

não inorgânica para acidificar as rochas, como também utilizar fluidos diferentes do HCl para mostrar as vantagens e desvantagens da utilização desses novos fluidos.

- 3) A maioria dos experimentos se concentra na utilização de água ou salmoura como forma de saturação, enquanto os dados de óleo são poucos. Isso mostra que há uma lacuna a ser preenchida em experimentos de saturação à base de óleo, ou seja, há a necessidade de conhecer o comportamento do PVBT em experimentos que utilizam óleo como saturação pois há poucos dados.

Os resultados obtidos demonstram que diferentes lacunas ainda existem com relação a experimentos de acidificação.

### Agradecimentos

Os autores agradecem à Empresa de Petróleo Brasileiro S/A (Petrobras) (PROJETO n° 2019/00154-4) e Pró-Reitoria de Pesquisa e Pós-Graduação (PROPESP) da UFPA pelo auxílio financeiro, e ao Laboratório de Ciência e Engenharia de Petróleo (LCPetro) pela infraestrutura para a realização da presente pesquisa.

### Referências Bibliográficas

ALAMEEDY, Usama; AL-HALEEM, Ayad; AL-SAEDI, A.; KADHIM, H. Hadeel; e KHAN, D. An experimental study of the effects of matrix acidising on the petrophysical characteristics of carbonate formation. **Materials Today: Proceedings**, [s. l.], p. S2214785323020217. ISSN 22147853. DOI 10.1016/j.matpr.2023.04.128.

ALI, Mahmoud; e ZIAUDDIN, Murtaza. Carbonate acidizing: A mechanistic model for wormhole growth in linear and radial flow. **Journal of Petroleum Science and Engineering**, [s. l.], v. 186, p. 106776, mar. 2020. ISSN 09204105. DOI 10.1016/j.petrol.2019.106776.

CHACON, Ofelia Gomez; POURNIK, Maysam. Matrix Acidizing in Carbonate Formations. **Processes**, [s. l.], v. 10, n. 1, p. 174, jan. 2022. ISSN 2227-9717. DOI 10.3390/pr10010174.

FREDD, C. N.; e FOGLER, H. S. Optimum Conditions for Wormhole Formation in Carbonate Porous Media: Influence of Transport and Reaction. **SPE Journal**, [s. l.], v. 4, n. 03, p. 196–205, 1 set. 1999. ISSN 1086-055X, 1930-0220. DOI 10.2118/56995-PA.

GLASBERGEN, Gerard; KALIA, Nitika; e TALBOT, Malcolm. The Optimum Injection Rate for Wormhole Propagation: Myth or Reality? Em: **8th European Formation Damage Conference**, 2009, Scheveningen, The Netherlands. All Days. Scheveningen, The Netherlands: SPE, 27 maio 2009. SPE-121464-MS. DOI 10.2118/121464-MS. Disponível em: <https://onepetro.org/SPEEFDC/proceedings/09EFDC/All-09EFDC/SPE-121464-MS/146305>.

GOMAA, Ahmed M.; NASR-EL-DIN, Hisham A. Effect of Residual Oil Saturation on the Propagation of Regular, Gelled, and In-Situ Gelled Acids inside Carbonate Formations. Em: **SPE European Formation Damage Conference**, 2011, Noordwijk, The Netherlands. All Days. Noordwijk, The Netherlands: SPE, 7 jun. 2011. SPE-143643-MS. DOI 10.2118/143643-MS. Disponível em: <https://onepetro.org/SPEEFDC/proceedings/11EFDC/All-11EFDC/Noordwijk,%20The%20Netherlands/149787>.

KALFAYAN, Leonard. **Production enhancement with acid stimulation**. 2nd ed. Tulsa, Okla: PennWell, 2008. 252 p. ISBN 978-1-59370-156-7.

LUCAS, Cláudio Regis Dos Santos; NEYRA, Jair Rodrigues; ARAÚJO, Elayne Andrade; SILVA, Daniel Nobre Nunes; LIMA, Mateus Alves; RIBEIRO, David Anderson Miranda; AUM, Pedro Tupã Pandava. Carbonate acidizing – A review on influencing parameters of wormholes formation. **Journal of Petroleum Science and Engineering**, [s. l.], v. 220, p. 111168, jan. 2023. ISSN 09204105. DOI 10.1016/j.petrol.2022.111168.



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

MAHMOUD, Mohamed Ahmednasreldin; NASR-EL-DIN, Hisham.; DE WOLF, Corine.; ALEX, Alan. Effect of Reservoir Fluid Type on the Stimulation of Carbonate Cores Using Chelating Agents. Em: **Brasil Offshore**, 2011, Macaé, Brazil. All Days. Macaé, Brazil: SPE, 14 jun. 2011. SPE-143086-MS. DOI 10.2118/143086-MS. Disponível em: <https://onepetro.org/speboec/proceedings/11BOEC/All-11BOEC/Maca%C3%A9,%20Brazil/149654>.

MUSTAFA, Ayyaz; ALZAKI, Taqi; ALJAWAD, Murtada Saleh; SOLLING, Theis; e DVORKIN, Jack. Impact of acid wormhole on the mechanical properties of chalk, limestone, and dolomite: Experimental and modeling studies. **Energy Reports**, [s. l.], v. 8, p. 605–616, nov. 2022. ISSN 23524847. DOI 10.1016/j.egyr.2021.11.249.

NEYRA, Jair Rodrigues; LUCAS, Cláudio Regis Dos Santos; SILVA, Daniel Nobre Nunes Da; CAMARGO JÚNIOR, Sérgio Taveira De; SCHWALBERT, Mateus Palharini; e AUM, Pedro Tupã Pandava. Assessing the impact of oil saturation on wormhole morphology in carbonate acidizing. **Fuel**, [s. l.], v. 358, p. 130097, fev. 2024. ISSN 00162361. DOI 10.1016/j.fuel.2023.130097.

QIU, Xiangdong; KHALID, Muhammad Ali; e SULTAN, Abullah. How to Determine True Acid Diffusion Coefficient to Optimize Formation Damage Treatment? Em: **SPE European Formation Damage Conference and Exhibition**, 2015, Budapest, Hungary. All Days. Budapest, Hungary: SPE, 3 jun. 2015. SPE-174241-MS. DOI 10.2118/174241-MS. Disponível em: <https://onepetro.org/SPEEFDC/proceedings/15EFDC/All-15EFDC/Budapest,%20Hungary/183042>.

SAZALI, Yon Azwa; MISRA, Sanjay; SAZALI, Wan Muhammad Luqman; IBRAHIM, Jamal Mohamad. Evaluation of the Effectiveness of Matrix Stimulation Recipes for High CO<sub>2</sub> Carbonate Reservoirs for Bypassing Formation Damage. Em: **SPE International Conference and Exhibition on Formation Damage Control**, 2018, Lafayette, Louisiana, USA. Day 2 Thu, February 08, 2018. Lafayette, Louisiana, USA: SPE, 7 fev. 2018. D021S008R007. DOI 10.2118/189567-MS. Disponível em: <https://onepetro.org/SPEFD/proceedings/18FD/2-18FD/Lafayette,%20Louisiana,%20USA/214915>.

WAN, Renpu. **Advanced well completion engineering**. 3rd ed ed. Waltham, MA: Gulf Professional Pub, 2011. 715 p. ISBN 978-0-12-385868-9.

WILLIAMS, Bert; GIDLEY, John; SCHECHTER, Robert. Acidizing fundamentals. New York: **Society of Petroleum Engineers**, 1979. 124 p. (Henry L. Doherty Series, 6). ISBN 978-0-89520-205-5.