



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
CAMPUS UNIVERSITÁRIO DE SALINÓPOLIS
FACULDADE DE ENGENHARIA
ENGENHARIA DE EXPLORAÇÃO E PRODUÇÃO DE PETRÓLEO

**ÁCIDOS ESPUMADOS: INFLUÊNCIA DA QUALIDADE DA ESPUMA NA
DIVERGÊNCIA**

Alonso Reis Sacramento¹
Geovanna de Sousa Dias²

RESUMO

O petróleo desempenha um importante papel na matriz energética mundial, pois muitas atividades ainda são dependentes de seus derivados. Por ser uma fonte não renovável, existe uma grande busca por métodos que melhorem a produção de petróleo. A estimulação é um conjunto de técnicas que visam melhorar a produção, como exemplo, temos o fraturamento hidráulico, o fraturamento ácido e a acidificação de matriz. Um dos desafios da acidificação é o posicionamento do ácido, no sentido de deslocar o fluido reativo para as regiões menos permeáveis. Esse processo é chamado de divergência e é realizado criando uma resistência temporária nas regiões de maior permeabilidade, através de mecanismos físicos ou de modificações no fluido decorrentes de processos químicos. As espumas, por exemplo, são utilizadas como agentes de divergência. São geradas a partir da dispersão de um gás injetado em um líquido ou pode ser gerada injetando gás e um surfactante no próprio ácido. A qualidade da espuma é definida como a razão entre o volume de gás e o volume de líquido e gás do sistema espumado. Sendo um dos principais parâmetros para o projeto de fluidos espumados. Este trabalho tem como objetivo estudar a influência da qualidade da espuma no processo de divergência avaliando a variação de pressão e mobilidade. Para isto, utilizou-se a modelagem apresentada em Economides & Nolte (1999), variando-se a qualidade da espuma em três cenários com permeabilidades distintas. Os resultados mostram que com a qualidade da espuma acima de 60% a mobilidade tende a decair e o diferencial de pressão começa a aumentar, com 82% de qualidade a espuma atinge a sua menor mobilidade e o pico maior de diferencial de pressão. Podemos concluir que a qualidade da espuma é um importante parâmetro para a efetividade da divergência e deve ser considerada nos projetos.

Palavras-chave: divergência, espumas, permeabilidade, qualidade de espuma.

¹Graduando do curso de Engenharia de Exploração e Produção de Petróleo. Faculdade de Engenharia, Campus Universitário de Salinópolis, Universidade Federal do Pará. E-mail: alonso.sacramento@outlook.com

²Graduanda do curso de Engenharia de Exploração e Produção de Petróleo. Faculdade de Engenharia, Campus Universitário de Salinópolis, Universidade Federal do Pará. E-mail: geovannadias98@gmail.com

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) aprovado por:

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Pedro Tupã Pandava Aum – UFPA
Orientador

Prof. Dr. José Leão de Luna – UFPA
Membro Interno

Eng. Jair Rodrigues Neyra PPGEQ - UFPA
Membro Externo

Eng. Lorena Cardoso Batista - UNICAMP
Membro Externo

Data de submissão: _____ / _____ / _____

Data de aprovação: _____ / _____ / _____

*Para nossos pais...
Nossos mentores e heróis.*

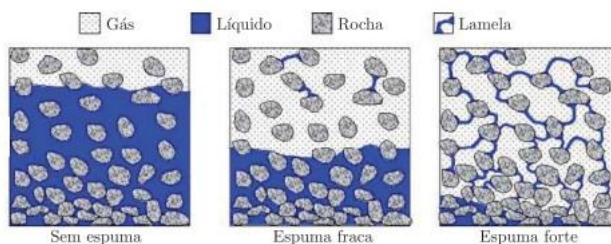
1 INTRODUÇÃO

A acidificação é uma técnica de estimulação empregada para incrementar a produção em poços de petróleo, este efeito é obtido a partir da injeção de ácido na formação rochosa, visando aumentar a permeabilidade da matriz ou remover danos, a fim de obter um deslocamento de fluido mais eficiente (NASCIMENTO, 2018). Quando a acidificação é executada para casos com permeabilidades distintas, o ácido apresenta uma tendência de seguir para os caminhos preferenciais (zonas de maior permeabilidade), tal fato é denominado divergência. Se a zona de interesse a ser acidificada apresentar menor permeabilidade, a utilização de um método capaz de desviar o ácido se faz necessária. Este efeito pode ser alcançado tamponando a área preferencial de fluxo (LI; LI; AND LIN, 2007).

As espumas atuam pelo impedimento físico de canais de alta permeabilidade, melhorando a eficiência de varrido. Assim, a espuma estimula o fluido injetado a transitar em zonas não varridas (FEIJOLI; ROMERO, 2014; a). Existem várias categorias de espuma, a relacionada como fraca é a que resulta em uma baixa redução na mobilidade do gás, a qual possui uma textura grossa, com grandes bolhas. Também existe aquela espuma referida como forte, pois reduz consideravelmente a mobilidade do gás, sendo considerada uma espuma com textura fina, formada por pequenas bolhas. (ZHANG et al, 2009).

A espuma possui um papel significativo na produção de petróleo, sendo uma consequência de uma mistura gás/líquido, relacionado com a fase líquida contínua é a que molha a rocha, a fase gasosa se apresenta de uma forma descontínua em bolhas de gás umedecidas por filmes de líquidos, chamados lamelas. A espuma é gerada a partir da passagem de gás através do surfactante em fase aquosa, para assim gerar uma quantidade de bolhas de gás dentro de um líquido (FARAJZADEH et al, 2012).

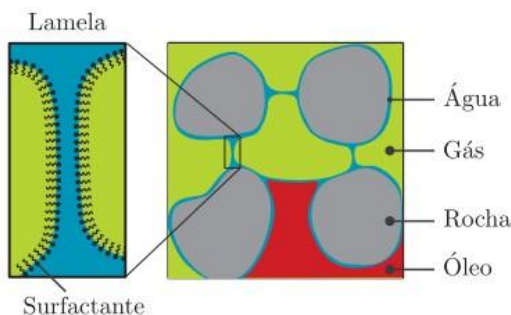
Figura 1: Comportamento da espuma.



Fonte: Dholkawala *et al* (2013)

Os surfactantes são moléculas capazes de reduzir a tensão interfacial das soluções (EVANS; WENNERSTRÖM, 1999), devido a sua estrutura de caráter hidrofílica e hidrofóbica nas extremidades da molécula, fazendo com que o surfactante tenda a ficar localizado na interface entre a solução aquosa e as demais, contribuindo para a estabilidade das lamelas formadas (WANG, 2016).

Figura 2: Lamela e surfactante.



Fonte: Farajzadeh *et al.* (2012)

A bolha colapsa quando o filme líquido adquire uma espessura muito fina, incapaz de sustentar a estrutura da lamela, caracterizando o fenômeno da coalescência (SCHRAMM, 2000). As espumas são definidas pela sua qualidade, a qual é dada pela porcentagem de gás que está contida na espuma (CHAMBERS, 1994). As espumas começam a apresentar interações borbulhantes acima de 52% de sua qualidade, onde abaixo de 52% não há estabilidade. Isso se dá também no oposto, onde, por volta de 96% de qualidade, a espuma inverte para um líquido em solução gasosa (CHAMBERS, 1994). Criando assim um intervalo de interesse de estudo.

Com o intuito de aumentar o fator de recuperação de óleo, diversos métodos especiais de recuperação são estudados, eles visam recuperar a maior fração possível do volume de óleo que se tem originalmente no reservatório, comparada a que seria recuperada utilizando apenas métodos convencionais (FEIJOLI; ROMERO, 2014; a). A injeção de espumas, em reservatórios, é considerada um método de recuperação com uma enorme capacidade de melhorar o fator de recuperação do petróleo. A espuma possibilita controlar a mobilidade do gás injetado, e os efeitos conjugados da alta mobilidade do gás associado com a sua baixa densidade direcionam o fluxo da espuma para áreas com maior permeabilidade (FEIJOLI; ROMERO, 2014; b).

Diversos estudos desenvolvem a modelagem computacional para avaliar o fluxo de espumas no meio poroso. No trabalho de Rômulo Fejoli e Oldritch Romero (2014; a), os autores buscam entender quais os fatores que contribuem para o incremento do fator de recuperação do óleo dado pela utilização do método de injeção de espuma. Os resultados reportados mostram que as

propriedades principais que influem o método de recuperação são a viscosidade do óleo e a concentração de surfactante utilizada durante a geração da espuma, onde é alcançado uma recuperação superior a 30% de óleo (FEIJOLI; ROMERO, 2014; a).

Este trabalho possui o objetivo de estudar a influência da qualidade de uma espuma no processo de divergência, levando em conta a variação da pressão e a mobilidade. Empregando a modelagem proposta por ECONOMIDES & NOLTE (1999) e na definição dada por CHAMBERS, (1994), variamos a qualidade de espuma em três cenários definidos com permeabilidades distintas, posteriormente efetuando suas análises com o intuito de observar a importância da qualidade da espuma para a efetividade da divergência.

2 METODOLOGIA

Para o presente estudo foram criados 3 cenários com permeabilidades distintas. Estes cenários serão definidos como zonas de baixa, média e alta permeabilidade (0,5; 100 e 1000 mD).

- Modelagem matemática e discretização.

Para avaliar o comportamento da espuma foram usadas as seguintes relações matemáticas:

Para a variação de pressão (Δp), usa-se a equação 1 (ECONOMIDES; NOLTE, 1994):

$$\Delta p = \frac{(u_g + u_w)}{k\lambda_{rt}} = \frac{u_w}{(k k_{rw}/u_w)} \quad (1)$$

Em que u_g é o fluxo volumétrico de gás, u_w é o fluxo volumétrico de água, λ_{rt} é a mobilidade total e k_{rw} é a permeabilidade relativa da fase aquosa.

Para a mobilidade total (λ_{rt}), usa-se a equação 2 (ECONOMIDES; NOLTE, 1994):

$$\lambda_{rt} = \frac{k_{rw}(S_w)}{u_w f_w} \quad (2)$$

Em que S_w é a saturação da fase aquosa e f_w é a fração de água na espuma.

Para a fração de volume da água na espuma, usa-se a equação 3 (ECONOMIDES; NOLTE, 1994):

$$f_w = \frac{100 - \Gamma}{100} \quad (3)$$

Em que Γ é a qualidade da espuma.

Para a permeabilidade relativa da fase aquosa, usa-se a equação 4 (CHENG et al., 2000):

$$k_{rw} = 0,2 \left(\frac{S_w - 0,2}{0,6} \right)^{4,2} \quad (4)$$

O objetivo da injeção de espumas antes de acidificações é o tamponamento de zonas preferencias de fluxo, isto é feito reduzindo a permeabilidade relativa da fase aquosa (k_{rw}) através da redução da saturação de água e aumento da saturação de gás; com essa condição satisfeita, o Δp na zona tamponada aumenta, obrigando o fluxo de ácido a percorrer um novo caminho (ECONOMIDES; NOLTE, 1994). A tabela a seguir exhibe os valores utilizados durante a modelagem, que foi realizada variando a qualidade de 52 % a 99% para as permeabilidades de 0,5; 100 e 1000 mD.

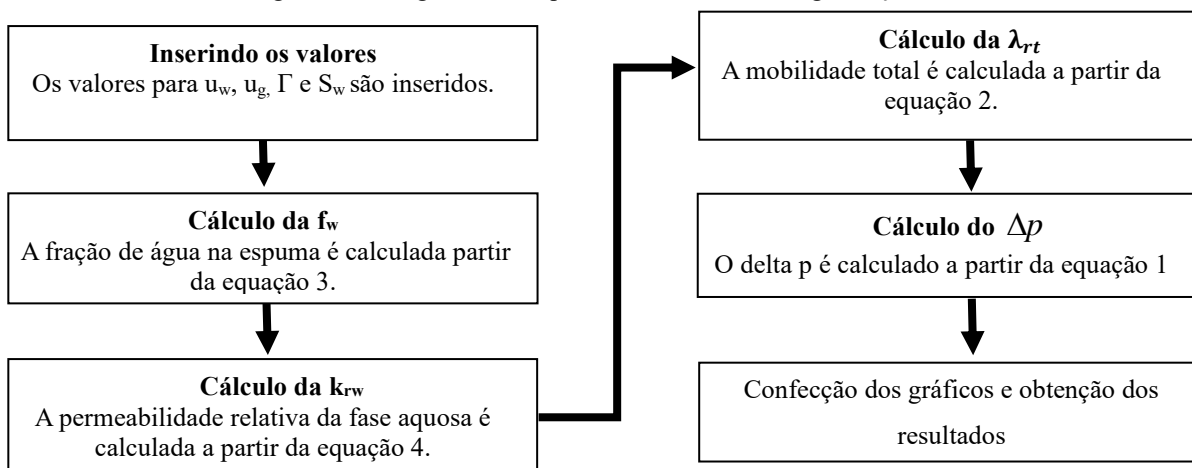
Tabela 1: Valores para modelagem.

	Γ (%)	u_g (m/s)	u_w (m/s)	S_w
1	52	0,002	0,001	0,4
2	57	0,003	0,0009	0,39
3	62	0,004	0,0009	0,38
4	67	0,005	0,0009	0,37
5	72	0,006	0,0009	0,36
6	77	0,007	0,0009	0,35
7	82	0,008	0,0009	0,34
8	87	0,009	0,0009	0,33
9	92	0,01	0,0009	0,32
10	96	0,011	0,0009	0,31
11	99	0,012	0,0009	0,3

Fonte: Modificado de Cheng *et al.* (2000)

A seguir é ilustrado um fluxograma da metodologia, na Figura 3.

Figura 3: Fluxograma da seqüência dos cálculos e organização dos dados.

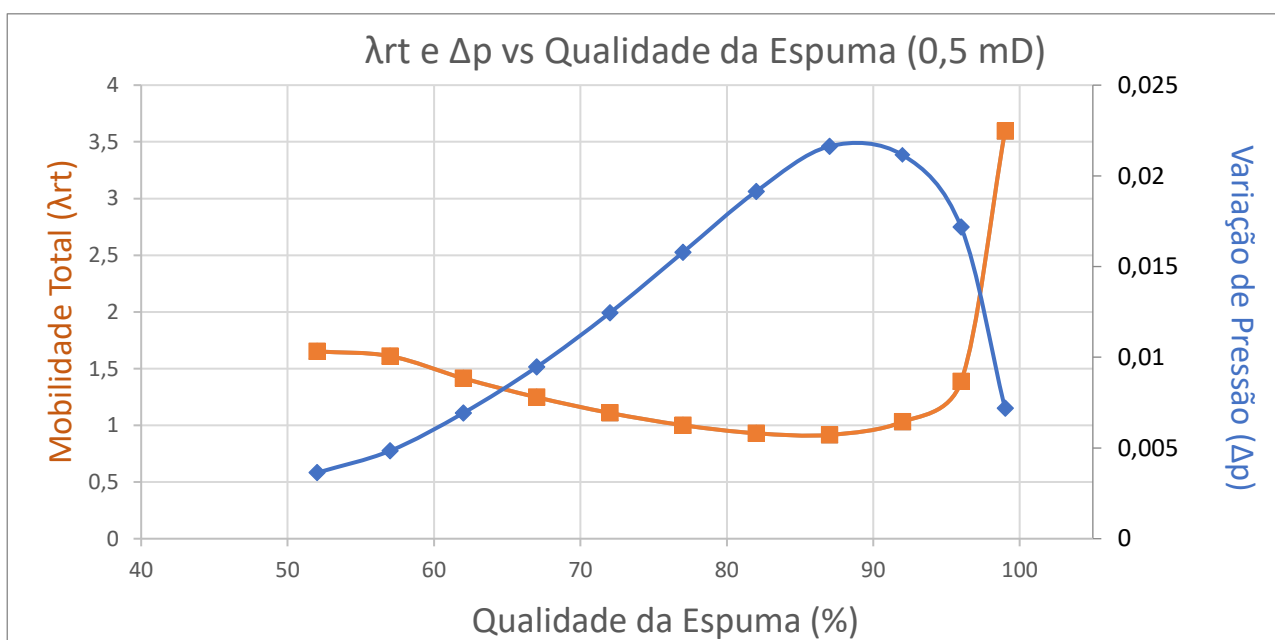


Fonte: O autor.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Primeiramente, as variações da qualidade de espuma proporcionam uma resistência ao fluxo maior entre os 82% e 92%, isso ocorre pois há um aumento da viscosidade nessa faixa de qualidade. As variações de permeabilidade não afetam a mobilidade total, já que esta só depende saturação de água. Os cenários com permeabilidades distintas resultaram em diferenças expressivas no Δp que podem ser visualizadas nas Figuras 3, 4 e 5.

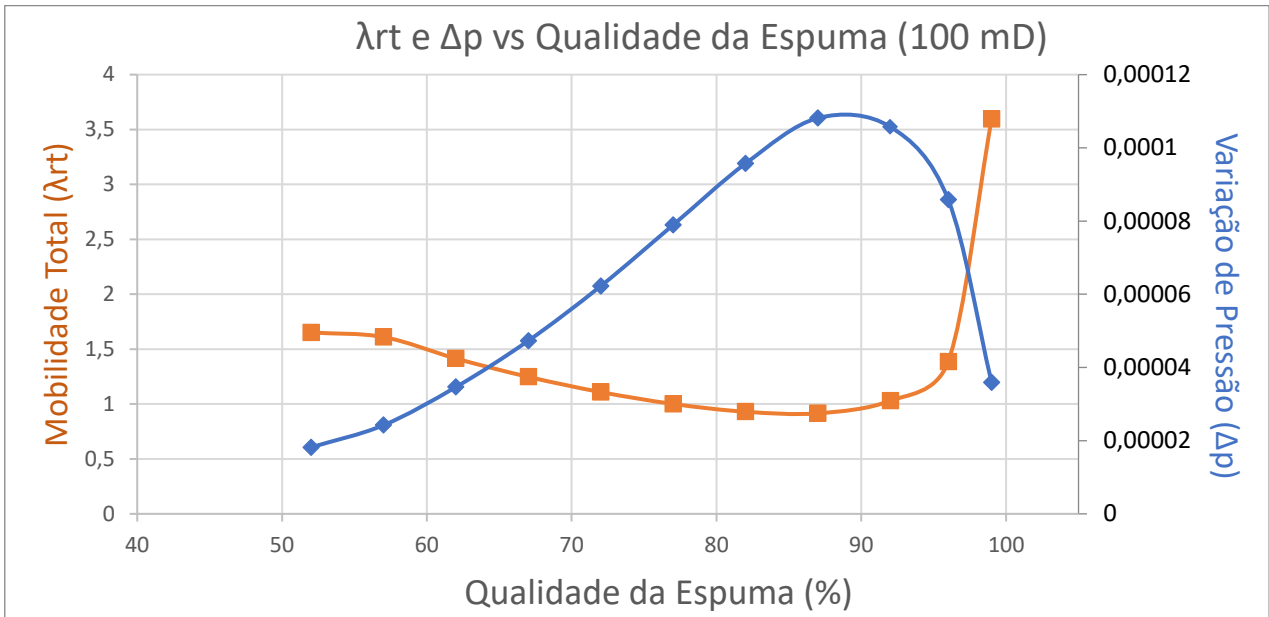
Figura 3: λ_{rt} e Δp vs Qualidade da Espuma (0,5 mD).



Fonte: O autor.

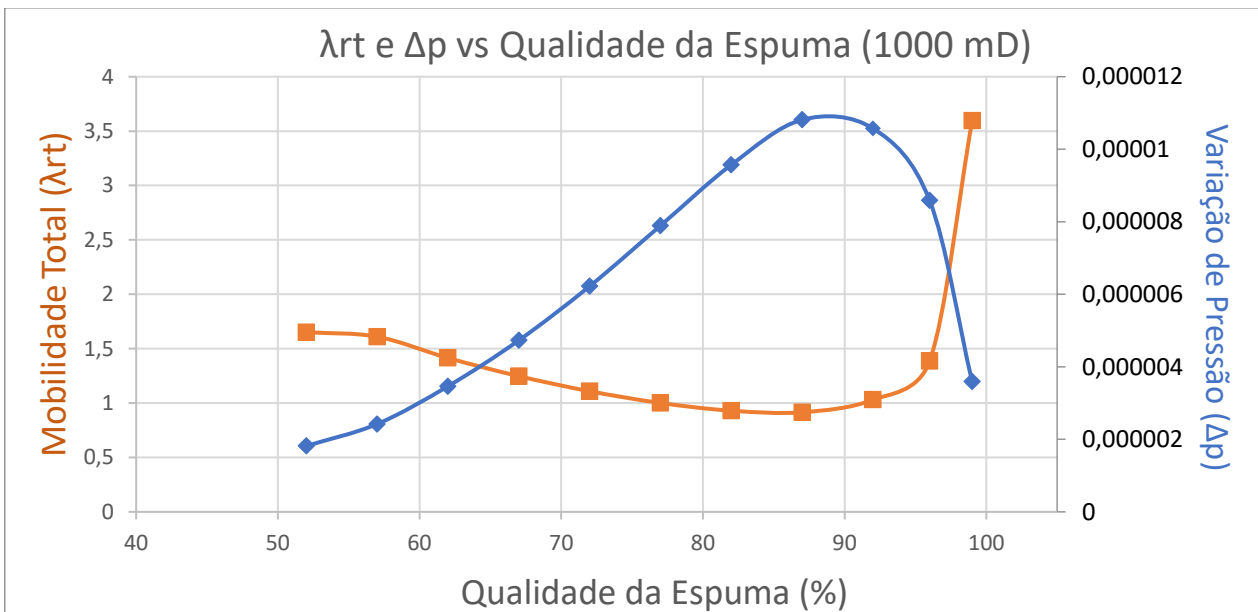
A zona com permeabilidade de 0,5 mD resultou em um pico de variação de pressão de 0,021 psi com aproximadamente 87% de qualidade de espuma, isto significa que com 0,13 de fração de água na espuma (f_w) obtém-se o melhor cenário para o desvio ácido. A zona de 1000 mD é a que tem de um menor Δp para que ocorra o desvio do ácido, pois a permeabilidade é alta ao ponto de não oferecer uma maior resistência ao fluxo.

Figura 4: λ_{rt} e Δp vs Qualidade da Espuma (100 mD).



Fonte: O autor.

Figura 5: λ_{rt} e Δp vs Qualidade da Espuma (1000 mD).



Fonte: O autor.

Apesar de termos patamares de resistência ao fluxo diferentes nas permeabilidades analisadas, podemos observar que os gráficos apresentam um mesmo padrão. Observa-se um ponto ótimo de diferencial de pressão (valor máximo, pois irá bloquear o fluxo nesta região) e um ponto ótimo de mobilidade (valor mínimo, pois será o que irá promover a maior resistência ao fluxo na zona de divergência).

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A utilização das espumas contribui nos desvios durante a acidificação, onde a qualidade da espuma empregada para a recuperação avançada de óleo é um fator que está relacionado com a mobilidade, seu comportamento no meio poroso também é definido por essa qualidade. Com o intuito de aumentar a zona de varrido, é preciso que a espuma tampona as áreas de alta permeabilidade.

Nas variações de qualidade de espuma, os comportamentos de mobilidade total e variação de pressão estão de acordo com os encontrados na literatura. Nos três casos elaborados é possível observar que a permeabilidade e a variação de pressão são inversamente proporcionais. Para todos, indica-se mais o uso de qualidades de espuma próximas ao menor valor de mobilidade total.

REFERÊNCIAS

- CHAMBERS, David J. **Foams: Fundamentals and Applications in the Petroleum Industry**: Foams for Well Stimulation. [S. l.: s. n.], 1994. Disponível em: pubs.acs.org. Acesso em: 17 ago. 2022.
- CHENG, L.; REME, A. B.; SHAN, D.; COOMBE, D. A.; ROSSEN, W. R. Simulating Foam Processes at High and Low Foam Qualities. **SPE - Society of Petroleum Engineers**, [s. l.], 2000.
- ECONOMIDES, Michael; NOLTE, Kenneth. **Reservoir Stimulation**. Third Edition. ed. [S. l.]: WILEY, 1994. 815 p. ISBN 9780471491927.
- EVANS, D. Fennell; WENNERSTRÖM, Håkan. **The Colloidal Domain. Where Physics, Chemistry, Biology, and Technology Meet**. [S. l.: s. n.], 1999.
- FARAJZADEH, R.; Andrianov, A.; Krastev, R.; Hirasaki, G. I.; Rossen, W. R.. **Foam-oil interaction in porous media: Implications for foam assisted enhanced oil recovery**.
- FEIJOLI, Rômulo Fieni; ROMERO, Oldrich Joel. Modelagem computacional de injeção de espumas em reservatório de petróleo. **Latin American Journal of Energy Research**, [s. l.], p. 1-9, 18 set. 2014. (a)
- FEIJOLI, Rômulo Fieni; ROMERO, Oldrich Joel. Utilização de espuma como mecanismo de controle da mobilidade em rochas-reservatório. **Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería**, [s. l.], p. 218-227, 2014. Disponível em: https://www.scipedia.com/public/Romero_Fejoli_2015b. Acesso em: 25 ago. 2022. (b)
- LI, Songyan; LI, Zhaomin; AND LIN, Riyi. Mathematical models for foam-diverted acidizing and their applications. **Pet.Sci**, [s. l.], ed. 5, p. 145 - 152, 22 out. 2007. DOI DOI 10.1007/s12182-008-0022-4. Disponível em: <https://sci-hub.se/10.1007/s12182-008-0022-4>. Acesso em: 14 dez. 2022.
- NASCIMENTO, Rafaela da Conceição. **DESENVOLVIMENTO DE FORMULAÇÕES ORGÂNICAS PARA FLUIDOS DE ACIDIFICAÇÃO DE POÇOS DE PETRÓLEO**. 2018. Tese (Doutorado em Engenharia de Processos Químicos e Bioquímicos) - UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO, [S. l.], 2018. Disponível em: <http://186.202.79.107/download/desenvolvimento-de-formulacoes-organicas-para-fluidos-de-acidificacao-de-pocos-de-petroleo.pdf>. Acesso em: 14 dez. 2022.

SCHRAMM, Laurier L. **Surfactants: Fundamentals and Applications in the Petroleum Industry**. [S. l.: s. n.], 2000.

WANG, Chao; LI, Huazhou Andy. Mixtures under reservoir Stability and mobility of foam generated by gas-solvent/surfactant conditions. **Journal of Natural Gas Science and Engineering**, [S. l.], p. 366-375, 27 jun. 2016.

ZHANG, Z.F.; Freedman, V.L.: Zhong. L.. **Foam transport in porous media: a review**. U.S. Department of Energy PNNL-18918, 2009.

AGRADECIMENTOS

Alonso Sacramento

Gostaria de agradecer primeiramente aos meus pais, Alonso e Cintia, por todo o apoio durante minha vida e por serem minha maior inspiração.

Ao meu irmão Vinícius, por ser o meu maior exemplo acadêmico e por todos os momentos ao meu lado.

A minha avó Adelina, que já se foi, mas que fez tanto por mim ao longo da sua vida.

A minha prima Samiles, por todos os momentos juntos e por colocar em minha vida a Ananda e a Alice.

Aos meus amigos Isabelle, Julianna, Tiago e Vinícius, por serem minha família em Salinas e por estarem em todos os momentos em que mais precisei.

A todos os meus amigos e familiares, por estarem presentes em minha vida.

Aos colegas Esther, Geovanna e Tiago, por auxiliarem na elaboração do trabalho para o congresso e por todos os momentos juntos.

Ao professor Pedro Aum e ao engenheiro Jair Neyra, por toda a orientação e conhecimento repassado na elaboração deste trabalho e ao longo da graduação.

Geovanna Dias

Agradeço principalmente aos meus pais, Auro e Silvia, e à minha irmã, Mônica, por serem minha fortaleza, pelo amor e apoio incondicionais, e por todo esforço que fizeram para me oferecer a possibilidade de fazer escolhas que me trouxessem até o presente momento.

À Universidade Federal do Pará, corpo docente e demais servidores, por oferecerem o apoio e a infraestrutura necessária durante a graduação.

Ao professor Pedro Aum e ao Jair Neyra pela orientação, incentivo, paciência e suporte oferecidos durante a elaboração deste trabalho e durante o curso.

Ao Danilo, por ter se tornado o irmão mais velho que eu não tive. E aos queridos amigos Alonso, Esther, Nathalia e Tiago por serem pessoas com quem eu posso contar sempre.

Aos pequenos Vicente e João Guilherme, por quem eu tenho um amor imensurável, o quais espero que um dia compreendam minha dolorida ausência durante a etapa mais linda de suas vidas.