

# 11º CONGRESSO BRASILEIRO DE PESQUISA E DESENVOLVIMENTO EM PETRÓLEO E GÁS



## TÍTULO DO TRABALHO:

Ácidos espumados: Influência da qualidade da espuma na divergência

## AUTORES:

Tiago Lisboa Campos<sup>1</sup>, Alonso Reis Sacramento<sup>1</sup>, Geovanna de Souza Dias<sup>1</sup>, Jair Rodrigues Neyra<sup>2</sup>, Pedro Tupã Pandava Aum<sup>2</sup>

## INSTITUIÇÃO:

[lisboacmps@gmail.com](mailto:lisboacmps@gmail.com), 1 Engenharia de Exploração e Produção de Petróleo, Campus Salinópolis, Universidade Federal do Pará,  
2 Laboratório de Ciência e Engenharia de Petróleo, Campus Salinópolis, Universidade Federal do Pará

## **Ácidos espumados: Influência da qualidade da espuma na divergência**

### **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.

### **Abstract**

Oil plays an important role in the world's energy matrix, as many activities still depend on its derivatives. Because it is a non-renewable source, there is a great search for methods to improve oil production. Stimulation is a set of techniques to improve the oil production, such as hydraulic fracturing, acid fracturing, and matrix acidification. One of the challenges of acidizing is positioning the acid, in the sense of moving the reactive fluid to the less permeable regions. This process is called divergence and is accomplished by creating a temporary resistance in the regions of higher permeability through physical mechanisms or modifications in the fluid due to chemical processes. Foams, for example, are used as divergence agents. They are generated from the dispersion of a gas injected into a liquid or can be generated by injecting gas and a surfactant into the acid itself. The foam quality is defined as the ratio of the volume of gas to the volume of liquid and gas in the foamed system. It is one of the main parameters for the design of foamed fluids. This work aims to study the influence of foam quality on the divergence process by evaluating pressure variation and mobility. For this, the modeling presented in Economides & Nolte (1999) was used, varying the foam quality in three scenarios with different permeabilities. The results show that with foam quality above 60%, the mobility tends to decrease, and the pressure differential starts to increase. With 82% quality, the foam reaches its lowest mobility and the highest peak of pressure differential. Therefore, we can conclude that foam quality is an important parameter for the effectiveness of divergence and should be considered in the designs.

Keywords: divergence, foams, permeability, foam quality.

## Introdução

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). Os métodos especiais podem ser químicos, térmicos, miscíveis, dentre outros. Um dos métodos químicos, que vem sendo bastante estudado, é a injeção de espumas (LIMA, 2021).

A espuma possui um papel significativo na produção de petróleo, sendo uma consequência de uma mistura gás/líquido, relacionado com a fase líquida contínua e a que molha a rocha, enquanto na fase gasosa está preparada de uma forma descontínua em bolha de gás úmidas por filmes de líquidos, chamados lamelas. A espuma é gerada quando se adiciona um surfactante em uma fase aquosa e passando um gás no surfactante e assim gerar uma quantidade de bolhas de gás dentro de um líquido (FARAJZADEH et al, 2012), as espumas são definidas pela sua qualidade, onde essa é dada pela porcentagem de gás que está contida na espuma (CHAMBERS, 1994).

Existem várias categorias de espuma, a relacionada como fraca é a que resulta em uma baixa redução na mobilidade do gás, sendo que possui uma textura grossa com grandes bolhas. Também tem aquela espuma referida como forte, pois reduz completamente a mobilidade do gás, sendo considerada uma espuma com textura fina formada por pequenas bolhas. (ZHANG et al, 2009).

As espumas começam a apresentar interações borbulhantes acima de 52% de sua qualidade, onde abaixo de 52% não estabilidade, isso se dá também no oposto onde aos 96% de qualidade a espuma inverte para um líquido em emulsão gasosa (CHAMBERS, 1994). Assim criando um intervalo de interesse de estudo.

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 o direcionam o fluxo da espuma para áreas com maior permeabilidade (FEIJOLI; ROMERO, 2014; b). As espumas atuam pelo impedimento físico de canais de alta permeabilidade, bem como aumentando a viscosidade da água de injeção, de forma a melhorar a eficiência de varrido. Assim, a espuma estimula o fluido injetado a transitar em zonas não varridas (FEIJOLI; ROMERO, 2014; a).

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 compreender quais são os parâmetros técnicos que potencializam o aumento do fator de recuperação do óleo quando a injeção de espuma é utilizada. O resultado reportados, mostram que os principais parâmetros atuantes para o método de recuperação são a viscosidade do óleo e a concentração de “surfactante para geração da espuma onde é alcançado uma recuperação superior a 30 % de óleo (FEIJOLI; ROMERO, 2014; a).

Outra aplicação interessante da espuma, é na divergência do fluxo, especialmente em operações e acidificação. A divergência, consiste em posicionar o ácido nas regiões que mais precisam de tratamento, as regiões de baixa permeabilidade. Neste contexto, este trabalho possui o objetivo de estudar como a influência da qualidade de uma espuma no processo de divergência, levando em conta a variação da pressão e a mobilidade. Com base na modelagem proposta no ECONOMIDES & NOLTE

(1999) e na definição dada por CHAMBERS, (1994), variando a qualidade em três cenários e assim realizar a análise destes com o intuito de observar a importância da qualidade da espuma para a efetividade da divergência.

## Metodologia

Para o presente estudo foram criados 3 cenários com permeabilidades distintas. Estes cenários serão definidos como zonas de baixa, média e alta permeabilidade (1/2, 100 e 1000 mD).

- Modelagem matemática e discretização.

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

Para a variação de pressão ( $\Delta p$ ) utilizou-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,  $\lambda_{rt}$  é a mobilidade total e  $k_{rw}$  é a permeabilidade relativa da fase aquosa.

Para a mobilidade total ( $\lambda_{rt}$ ) é usada 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 é usada a equação 3 (ECONOMIDES; NOLTE, 1994):

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

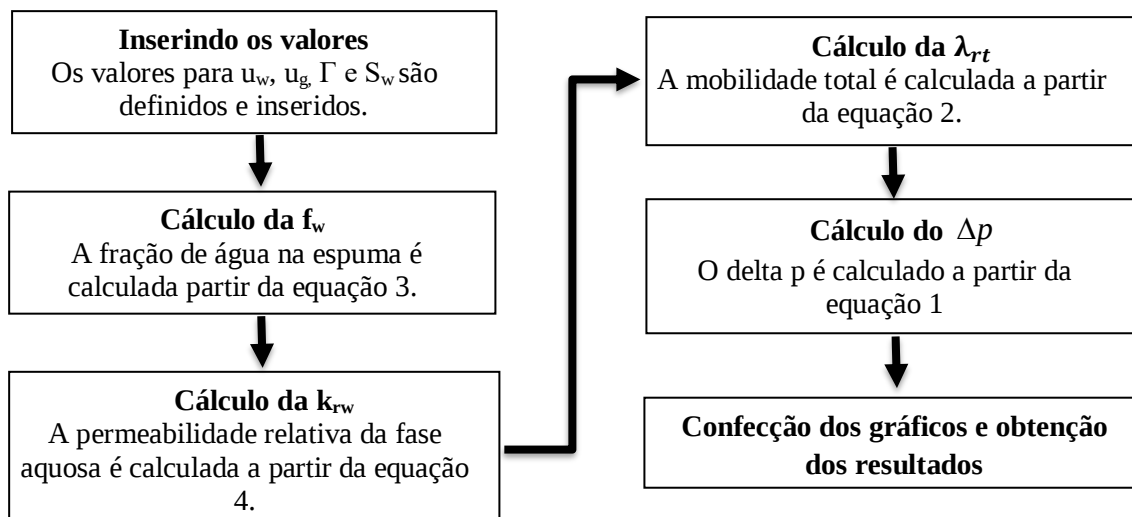
Em que  $\Gamma$  é a qualidade da espuma.

Para a permeabilidade relativa da fase aquosa é usada 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 preferências 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  $\Delta p$  na zona tamponada aumenta obrigando o fluxo de ácido a percorrer um novo caminho (ECONOMIDES; NOLTE, 1994). A seguir é ilustrado um fluxograma da metodologia, na Figura 1.

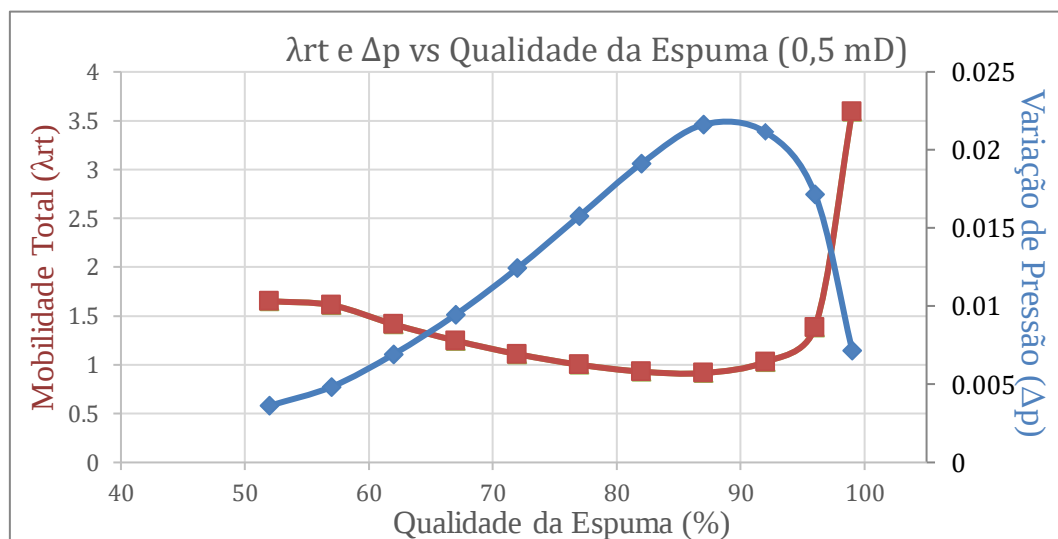
Figura 1- Fluxograma da sequência dos cálculos e organização dos dados.



Fonte: O autor.

## Resultados e Discussão

Primeiramente, as variações da qualidade de espuma proporcionam uma resistência ao fluxo maior entre os 82% e 92%, isso ocorre pois se há um aumento da viscosidade nessa faixa de qualidade. As variações de permeabilidade não afetam a mobilidade total já que está só depende saturação de água. Os cenários com permeabilidades distintas resultaram em diferenças expressivas no  $\Delta p$  que podem ser visualizadas nas Figuras 2, 3 e 4.

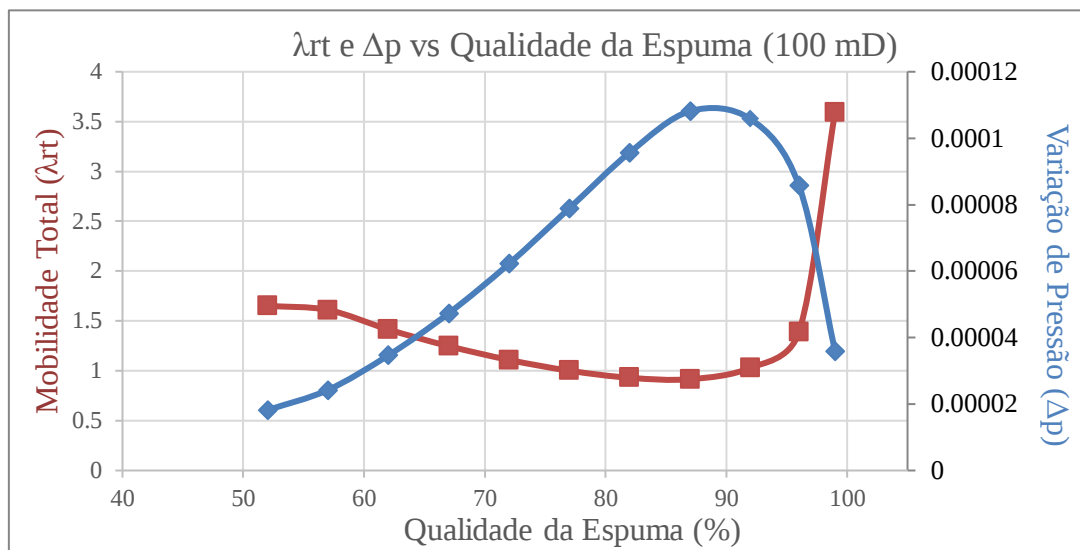
Figura 2 -  $\lambda_{rt}$  e  $\Delta p$  vs Qualidade da Espuma (0,5 mD).

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 ( $f_w$ ) se tem o melhor cenário para o desvio ácido. A zona de 1000 mD é a que tem de um

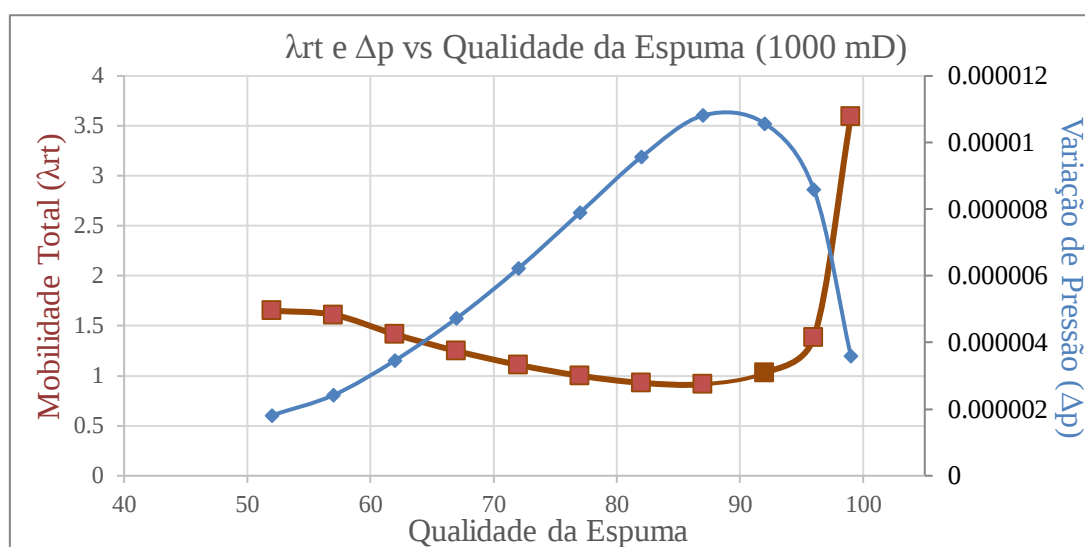
menor  $\Delta p$  para que ocorra o desvio do ácido pois a permeabilidade é alta ao ponto de não oferecer uma maior resistência ao fluxo.

Figura 3 -  $\lambda_{rt}$  e  $\Delta p$  vs Qualidade da Espuma (100 mD).



Fonte: O autor.

Figura 4 -  $\lambda_{rt}$  e  $\Delta p$  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).

## **Conclusões**

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 e o comportamento da espuma no meio poroso 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. Nos 3 casos elaborados é possível observar que permeabilidade e a variação de pressão são inversamente proporcionais, nos de alta permeabilidade é mais indicado o uso de qualidades de espuma próximas ao menor valor de mobilidade total.

Para qualidades acima de 92%, as espumas são mais fracas, em razão do colapso das espumas ao serem submetidas à altas pressões capilares. Com o uso para casos em que a viscosidade ou o controle de perda de fluido for prioridade. Porém se a preocupação for com a sensibilidade da formação, ou com o refluxo de fluidos, seu uso não é indicado, pelo fato de reduzir o volume de gás e aumentar o volume de fluido.

## **Agradecimentos**

Primeiramente, gostaríamos de agradecer primeiramente a Deus, em seguida a nossas famílias pelo apoio dado até aqui, aos nossos orientadores mestrandos Jair Rodrigues Neyra e ao Prof. Pedro Tupã Pandava Aum pelo auxílio prestado neste desafio. Também gostaríamos de agradecer pelas pessoas que direta ou indiretamente nos ajudaram na conclusão deste.

Este trabalho foi elaborado como atividade da disciplina de Acidificação de Poços (2022.2), ministrada na Universidade Federal do Pará.

## Referências Bibliográficas

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.

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](https://www.scipedia.com/public/Romero_Fejoli_2015b). Acesso em: 25 ago. 2022. (b)

LIMA, Tomaz Mello. **FOAM ASSISTED WATER ALTERNATING GAS - FAWAG: UM POTENCIAL MÉTODO DE RECUPERAÇÃO AVANÇADA PARA APLICAÇÃO NO PRÉ-SAL BRASILEIRO**. 2021. 67 p. Trabalho de conclusao de curso (Graduação) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, [S. l.], 2021.

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