Gestão:

Reunião de Acompanhamento
e Avaliação - RAA 2026

INSTABILIDADE VISCOSA DE ESCOAMENTOS TRIDIMENSIONAIS EM UMA CÉLULA DE HELE-SHAW

Bruno Jorge Macedo dos Santos[1] • Rafael M. Oliveira[2]

[1]Doutorando e bolsista PRH-ANP 10.1 • [2]Orientador

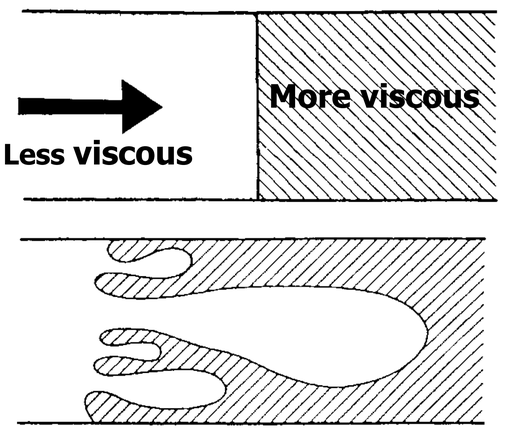
Departamento de Engenharia Mecânica, PUC-Rio — Rio de Janeiro, RJ

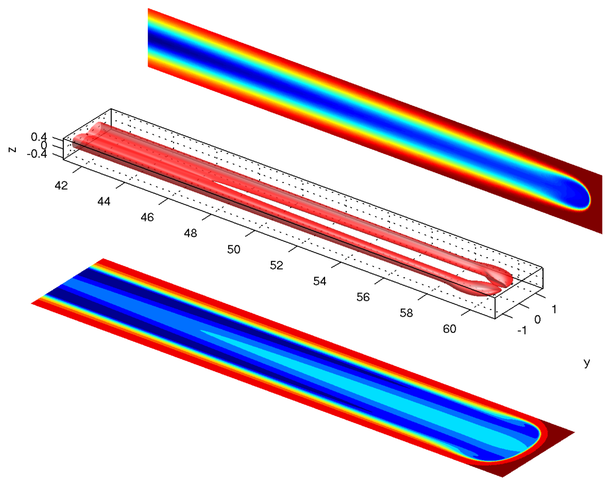
bruno-jorge1@hotmail.com.br • rmo@puc-rio.br

MOTIVAÇÃO, E OBJETIVO(S)

Deslocamentos miscíveis em uma célula de Hele-Shaw podem gerar dedos viscosos e reduzir a eficiência de varrido. A mistura pode ser mais viscosa que os fluidos puros, produzindo um perfil não monotônico de viscosidade (NMVP).

Objetivo: avaliar como a inércia e o perfil de viscosidade afetam o crescimento, a propagação e a bifurcação interna dos dedos.





MODELO E MÉTODO NUMÉRICO

Simulações 3D de dois fluidos miscíveis entre placas paralelas, com densidade constante e viscosidade variável.

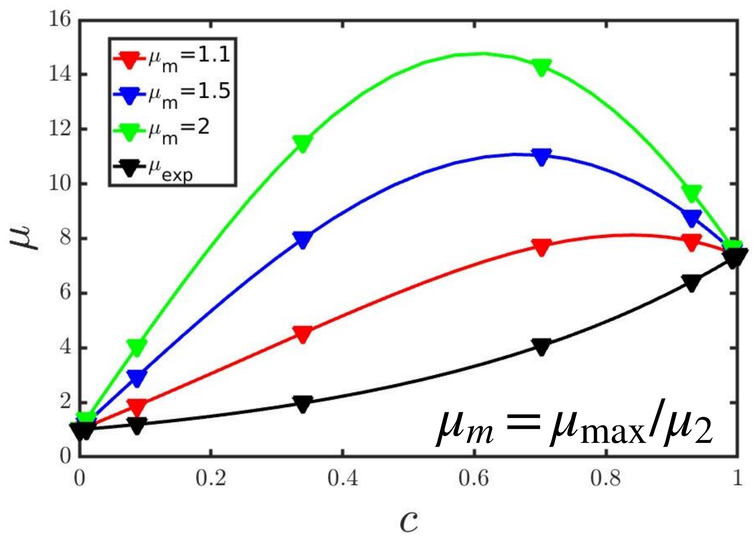
$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0$$

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla)\mathbf{u} = \frac{1}{Re}\left\{\nabla \cdot \left[\mu(c)\left(\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T\right)\right] - \nabla p\right\}$$

$$\frac{\partial c}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla c = \frac{1}{Pe}\nabla^2 c$$

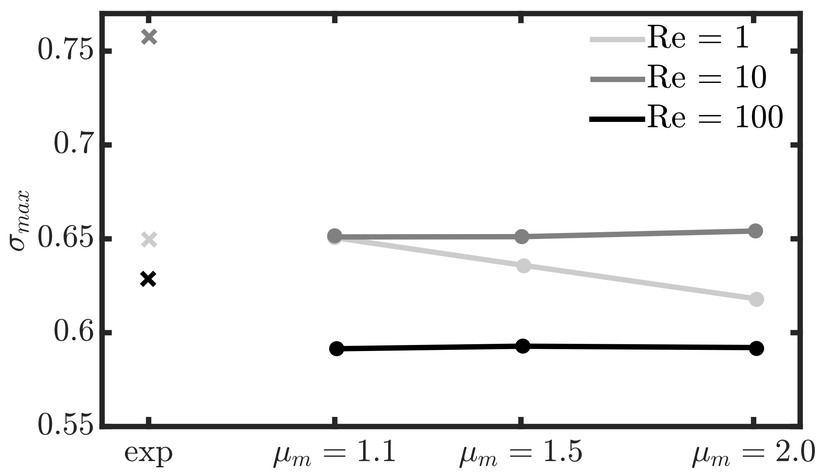
Parâmetros de controle:

$$Re = \frac{\rho U b}{\mu_1} \qquad Pe = \frac{Ub}{D} \qquad M = \ln\left(\frac{\mu_2}{\mu_1}\right)$$



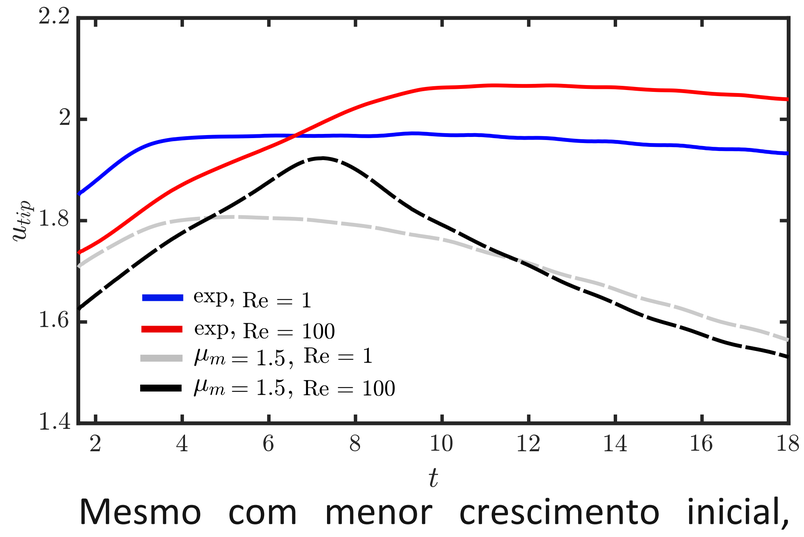
RESULTADOS OBTIDOS: $Pe = 2000,\ M = 3, Re = 1, 10\ e\ 100$

Crescimento linear



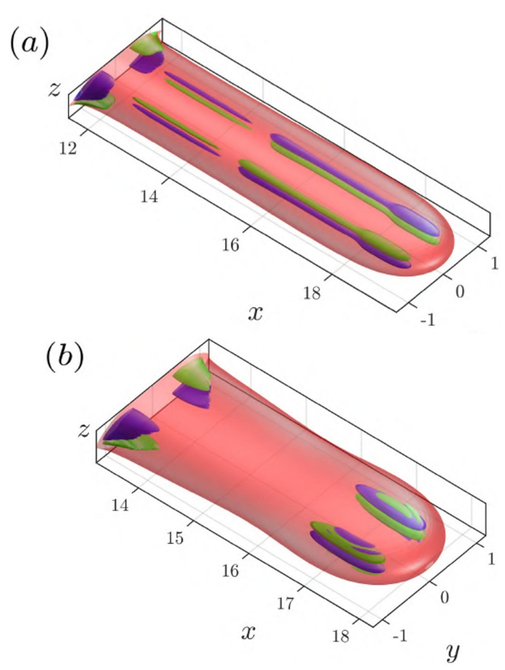
A inércia tem efeito não monotônico: a taxa máxima cresce de $Re = 1$ para 10 e cai em $Re = 100$.

Propagação não linear

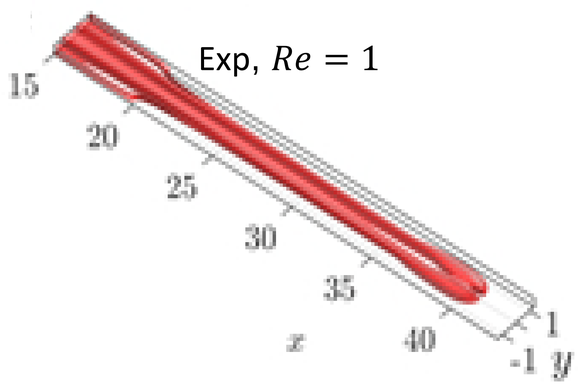


Mesmo com menor crescimento inicial, Re=100 pode elevar a velocidade da ponta no regime não linear.

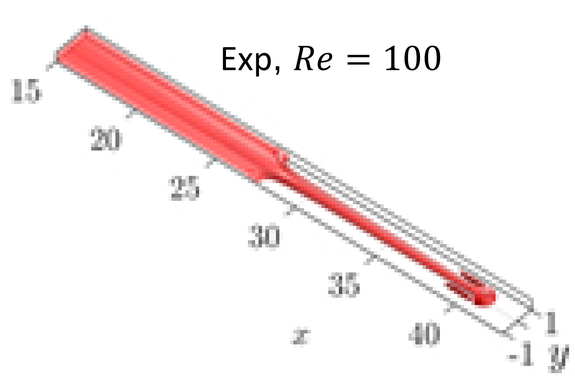
Quadrupolos de vorticidade



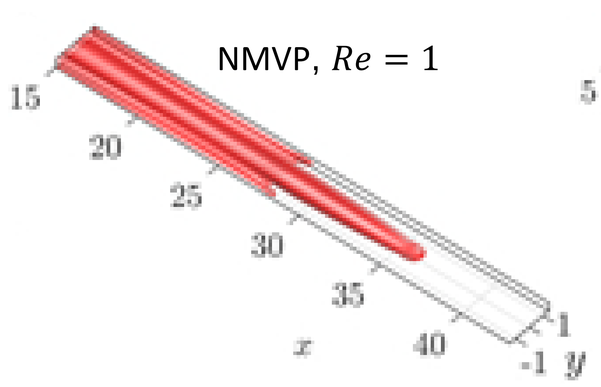
Exp, $Re = 1$



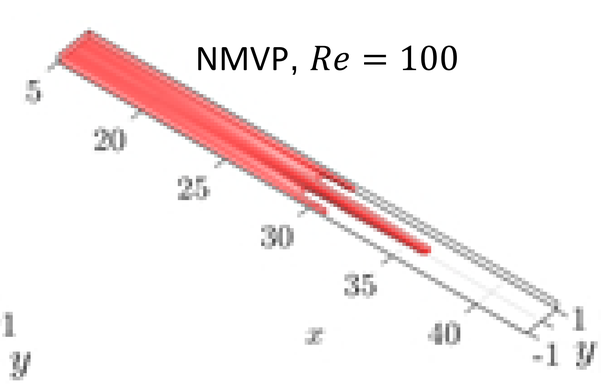
Exp, $Re = 100$



NMVP, $Re = 1$



NMVP, $Re = 100$



Re elevado estreita os dedos e intensifica os reversos no NMVP. Vórtices contrarrotativos no NMVP retardam a bifurcação interna.

APLICAÇÃO NO SETOR DE PETRÓLEO E ENERGIA

Os resultados podem orientar o controle de mobilidade e a seleção de fluidos e condições de injeção para melhorar o varrido na recuperação avançada de petróleo. No armazenamento de CO_2, a extensão do modelo com diferenças de densidade e empuxo permite estudar a mistura convectiva na salmoura.

AGRADECIMENTOS

PRH-ANP 10.1; FAPESP (2025/03709-8); CNPq (409195/2023-5); CAPES; LNCC/Santos Dumont (Interfaces 238195).

REFERÊNCIAS

[1] Santos, B. J. M.; Anjos, P. H. A.; Oliveira, R. M. J. Fluid Mech., manuscrito submetido.
[2] Oliveira, R. M.; Meiburg, E. Phys. Rev. Lett. 118, 124502 (2017).
[3] Manickam, O.; Homsy, G. M. Phys. Fluids 6, 95–107 (1994).