

DINÂMICA DA SEDIMENTAÇÃO DE GOTAS FERROMAGNÉTICAS SOB A AÇÃO DE UM CAMPO MAGNÉTICO

Lidia Ramos da Vitória¹, lidia.vitoria@edu.ufes.br
Renato do Nascimento Siqueira², renatons@ifes.edu.br
Lucas Henrique Pagoto Deoclecio², lucas.deoclecio@ifes.edu.br
Edson José Soares¹, edson.soares@ufes.br
Fabio de Assis Ressel Pereira¹, fabio.a.pereira@ufes.br

¹Universidade Federal do Espírito Santo, Avenida Fernando Ferrari, 514, Goiabeiras, Vitória/ES, CEP 29075-910

²Instituto Federal do Espírito Santo, Rodovia BR Norte Km 58, São Mateus, 101 - Litorâneo, ES, 29932-540

Resumo. A dinâmica de gotas, incluindo a sua sedimentação, é um tema de grande relevância para a indústria petrolífera, uma vez que a presença de emulsões impõe desafios significativos às operações. Este trabalho investiga os efeitos da aplicação de um campo magnético externo sobre a ascensão de gotas ferromagnéticas. Para isso, foi implementado um modelo de magnetohidrodinâmica (MHD) no software de código aberto Basilisk. O modelo deste software se baseia na simulação numérica direta (DNS) da dinâmica de interfaces. O estudo analisou como o campo magnético interage com os efeitos inerciais, viscosos e de tensão superficial, afetando tanto a forma quanto a velocidade de ascensão das gotas. Observou-se que a aplicação do campo magnético no mesmo sentido da força gravitacional aumenta a velocidade de sedimentação. Isso ocorre devido à deformação causada pela força magnética, que reduz o coeficiente de arrasto da gota. O efeito oposto é observado quando a direção do campo magnético é perpendicular ao da força gravitacional, no qual o aumento do arrasto e, conseqüente, diminuição da velocidade da gota são observados.

Palavras-chave: dinâmica de gotas, campo magnético, gotas ferromagnéticas, simulação numérica direta, magnetohidrodinâmica.

1. INTRODUÇÃO

A dinâmica de gotas desempenha um papel fundamental em diversos processos da indústria do petróleo, abrangendo desde a recuperação e transporte até o processamento primário. O entendimento desse fenômeno é essencial tanto para a redução da viscosidade em escoamentos multifásicos quanto para a otimização da eficiência de separação durante o tratamento de emulsões.

Nos últimos anos, tem sido demonstrado que a aplicação de campos magnéticos externos pode influenciar significativamente o comportamento de sistemas líquidos imiscíveis, promovendo processos de separação de fases e alterações estruturais nas emulsões. Essa influência decorre de diferentes mecanismos físicos, incluindo interações de energia magnética, convecção termoelectricamente induzida e modulação das forças interfaciais, os quais afetam a microestrutura e a dinâmica das fases envolvidas.

Diversos estudos têm explorado o efeito combinado das forças viscosas, capilares e magnéticas sobre a deformação de gotas de ferrofluido. Guilherme et al. (2023) apresentaram um modelo numérico tridimensional baseado no método *Level Set*, incorporando as forças de Kelvin e de tensão superficial concentradas na interface da gota. Os autores observaram que o número capilar magnético exerce papel determinante na forma da gota, podendo resultar em geometrias circulares ou alongadas conforme a intensidade e direção do campo aplicado.

De modo complementar, Kawabata, Ishida e Imai (2024) utilizaram o Método dos Contornos (*Boundary Integral Method* – BIM) para descrever a deformação interfacial sob escoamento de cisalhamento, considerando a contribuição conjunta da força normal magnética e da tensão superficial. Bhattacharjee, Atta e Chakraborty (2024), por sua vez, combinaram uma análise assintótica de pequenas deformações com simulações numéricas 2D axissimétricas no *software COMSOL Multiphysics*, demonstrando que campos magnéticos intensos podem induzir instabilidades e ruptura das gotas.

Yang et al. (2024) investigaram o acoplamento entre campos elétricos e magnéticos na deformação de gotas de água em óleo, mostrando que, sob determinadas condições, o campo magnético pode suprimir a deformação provocada pelo campo elétrico. Além disso, verificou-se que a configuração espacial do campo magnético é um fator decisivo, pois afeta diretamente o movimento, a coalescência, a evaporação e o escoamento interno das gotas, permitindo o controle ativo de emulsões em aplicações tecnológicas.

Diante dessas evidências, o presente estudo propõe uma investigação numérica detalhada da interação entre o campo magnético e os efeitos inerciais, viscosos e de tensão superficial sobre uma gota ferromagnética em ascensão, empregando simulação numérica direta (DNS) com resolução de interface para elucidar os mecanismos físicos subjacentes à sua deformação e estabilidade.

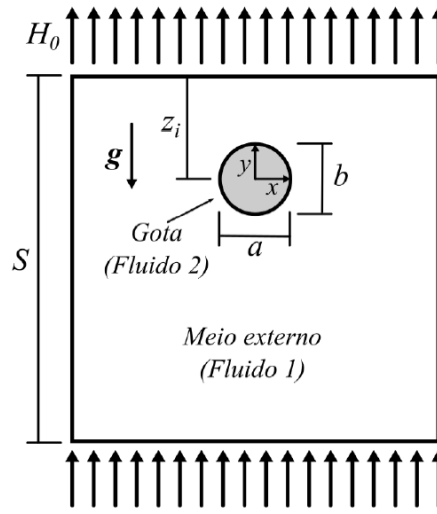
2. METODOLOGIA

Nesta seção, descrevemos a formulação do problema físico, as equações de governo e os números adimensionais relevantes.

2.1. DESCRIÇÃO DO PROBLEMA

A Figura 1 apresenta o domínio computacional para as simulações 2D. O domínio consiste em um quadrado com lado $S = 25D$, onde D é o diâmetro da gota inicialmente esférica. O sistema de coordenadas (x,y) está localizado na posição inicial do centro de massa da gota. A gota parte do repouso de uma distância inicial $z_i = 5D$ em relação à fronteira superior do domínio. A razão de aspecto da gota é dada por b/a . O domínio e a posição inicial da gota são grandes o suficiente para minimizar a influência das fronteiras na dinâmica do escoamento. A condição de não deslizamento para a velocidade e a condição de Neumann para pressão são aplicadas em todas as fronteiras. Um campo magnético constante e uniforme com intensidade H_0 é aplicado nas direções horizontal e vertical.

Figura 1 – Esquema do domínio computacional das simulações 2D



Fonte: Produção do próprio autor.

2.2. MODELAGEM MATEMÁTICA

A modelagem matemática para o escoamento multifásico adota o modelo de um fluido. A interface é rastreada por uma equação de advecção de traçador passivo, f . Os fluidos são tratados como fluidos newtonianos e incompressíveis e as equações de conservação de massa (1), quantidade de movimento (2) e advecção da interface (3) são dados por:

$$\text{div}(u_j) = 0 \quad (1)$$

$$\partial_t u_j + \text{div}(u_j \otimes u_j) = \frac{1}{\rho} [-\text{grad}(p) + \text{div}(2\mu D_{ij})] + a_j \quad (2)$$

$$\partial_t f + u_j \cdot \text{grad}(f) = 0 \quad (3)$$

onde u_j é o vetor velocidade, p é a pressão, μ é a viscosidade média entre as fases, ρ é a massa específica média entre as fases e D_{ij} é o tensor deformação. Aqui, a é a aceleração, a qual contém a aceleração gravitacional, g , a aceleração devido à força de tensão superficial, a_σ , e a aceleração devido a força magnética, a_m . As duas últimas são concentradas na interface. Aqui, $a_{\sigma,j} = \sigma \kappa n_j \delta_S / \rho$, onde σ é o coeficiente de tensão superficial, κ é a curvatura da interface, n_j é o vetor normal unitário a interface e δ_S é o delta de Dirac. A aceleração magnética (força de Kelvin) é $a_{m,j} = \mu_0 \chi H_j \cdot \text{grad}(H_j)$, onde μ_0 é a permeabilidade do vácuo, χ é a suscetibilidade do material da gota e H_j é o vetor campo magnético. Como H_j é irrotacional, podemos escrever $H_j = \text{grad}(\psi)$, onde ψ é o potencial do campo magnético, o qual é determinado pela equação de Maxwell (e Gauss): $\text{div}((1 + \chi) \text{grad}(\psi)) = 0$.

A viscosidade é dada por média harmônica, enquanto a massa específica é dada por média aritmética, ambas ponderadas pela fração volumétrica.

2.2.1. Parâmetros adimensionais

Os seguintes parâmetros adimensionais foram empregados para descrever o problema estudado: $\eta_r = \frac{\eta_2}{\eta_1}$; $\rho_r = \frac{\rho_2}{\rho_1}$; $Ar = \frac{\sqrt{\rho_1 |\Delta \rho| g D^3}}{\eta_1}$; $Bo = \frac{|\Delta \rho| g D^2}{\sigma}$; $Mg = \frac{|\Delta \rho| g}{\mu_0 \chi H_0^2}$.

A razão de viscosidade, η_r , representação a razão entre os efeitos viscosos das duas fases, a razão de massa específica, ρ_r , representa os efeitos da massa específica das duas fases, o número de Arquimedes, Ar , representa a razão entre as forças de empuxo e viscosas, o número de Bond, Bo , representação a razão entre as forças de empuxo e superficiais e o número gravitacional-magnético, Mg , representa a razão entre as forças de empuxo e magnéticas. Nas simulações realizadas, as razões de viscosidade e massa específica são constantes e iguais a 0,10 e 1,25, respectivamente. Ar , Bo e Mg assumiram valores de 1, 5 e 25.

2.3 ABORDAGEM NUMÉRICA

As simulações numéricas foram realizadas com o *software* de código aberto Basilisk. O programa emprega uma malha adaptativa dinâmica (Popinet, 2015) e tem demonstrado precisão e eficiência na resolução de escoamentos dominados por efeitos da tensão superficial (Popinet, 2009). No presente trabalho, a malha adapta-se dinamicamente com base no gradiente da fração volumétrica, do campo de velocidade e do potencial magnético. As equações são discretizadas no espaço com precisão de segunda ordem através do esquema de Bell-Collella-Glaz (1989). A discretização do domínio é baseada em malha cartesiana adaptativa utilizando uma estrutura de árvore octree (Popinet, 2015).

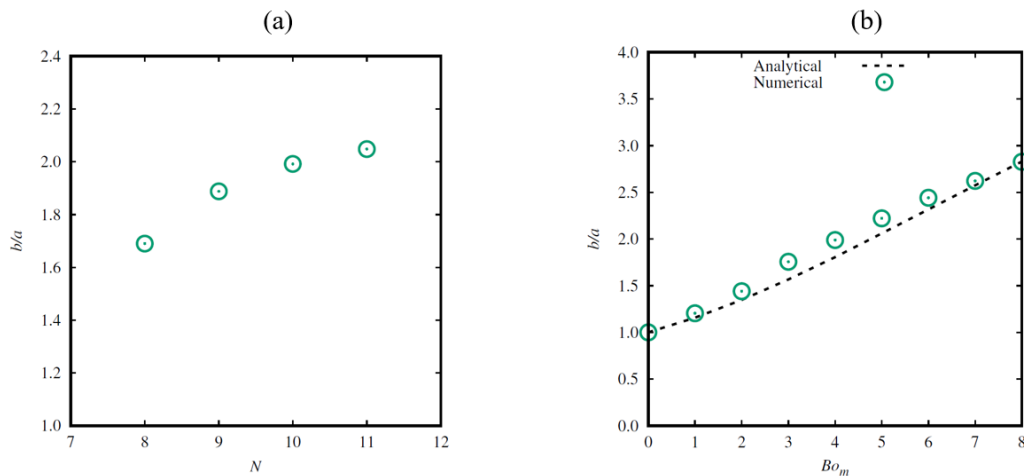
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta seção, apresentamos e discutimos os resultados obtidos. Iniciamos com a validação do código numérico e, em seguida, apresentamos os efeitos de Ar , Bo , Mg e da direção do campo magnético.

3.1 VALIDAÇÃO DO CÓDIGO NUMÉRICO

Para a validação do código numérico, nós reproduzimos a solução analítica de Afkhami et al. (2010) para a razão de aspectos de gotas suspensas em um fluido viscoso sob a ação de um campo magnético uniforme. Primeiramente, realizamos um teste para verificar a dependência da solução em relação a malha. A Figura 2(a) apresenta a razão de aspecto b/a das gotas para os diferentes níveis de refino máximo da malha para as simulações 2D. A figura traz os resultados para um número de Bond magnético, $Bo_m = \mu_0 H_0^2 / (\sigma D)$, igual a 4. O tamanho da célula é dado por $\Delta x = S/2^N$, onde S é o tamanho do domínio e N é o nível de refino. O nível $N = 6$ é empregado como nível de refino mínimo para todas as simulações. A variação da razão de aspecto para os níveis de refino máximo 10 e 11 é pequena, no entanto, o aumento do custo computacional é substancial. Assim, o nível de refino 10 será empregado nas simulações. A Figura 2(b) apresenta a solução analítica de Afkhami et al. (2010) (linha tracejada) e o nosso resultado numérico (pontos) para a razão de aspecto de gotas em equilíbrio em função de Bo_m . Para reproduzir as razões de aspecto previstas por Afkhami et al. (2010), simulações da Figura 2(b) são axissimétricas. O resultado analítico é bem reproduzido, com erro médio de aproximadamente 6 %.

Figura 2 – Razão de aspecto, b/a , de gotas ferrofluidas sob a ação de um campo magnético uniforme em função (a) do nível de refinamento de malha, L , e (b) do número de Bond magnético, Bo_m

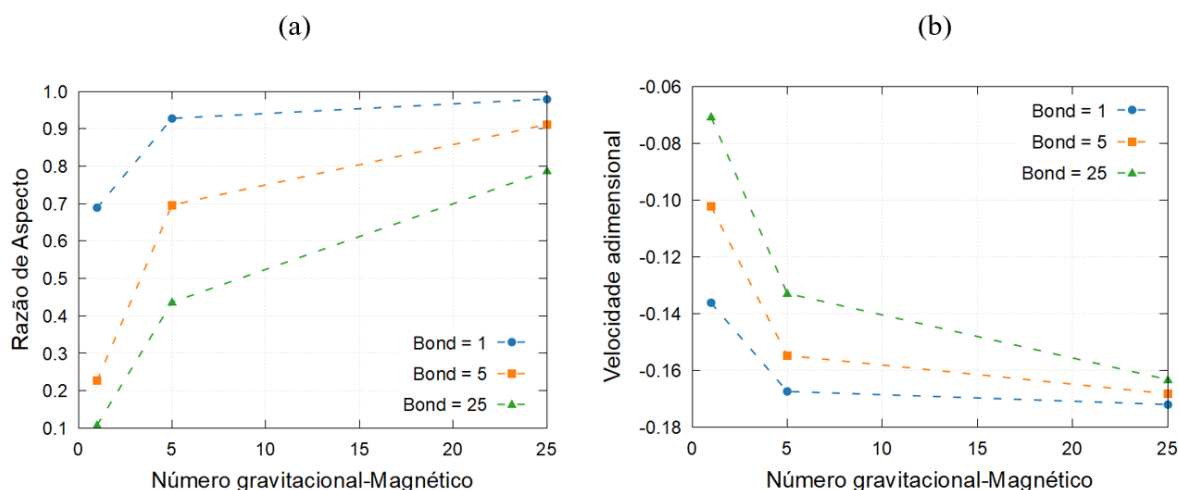


Fonte: Produção do próprio autor.

3.2 SEDIMENTAÇÃO DE GOTAS EM UM CAMPO MAGNÉTICO HORIZONTAL

A Figura 3(a) mostra a razão de aspecto, b/a , de gotas em função de Mg para diferentes valores de Bo e $Ar = 1$ com um campo magnético imposto horizontalmente. É possível observar uma tendência da razão de aspecto diminuir (a gota ficar oblata) com a diminuição de Mg e com o aumento de Bo . Na direção imposta do campo magnético, a força de Kelvin tende a esticar a gota na direção perpendicular a da gravidade, reduzindo a sua razão de aspecto. Além disso, o aumento de Bo reduz os efeitos da tensão superficial em relação ao empuxo. Como a força de empuxo é a mesma para todas as gotas neste trabalho, a redução de Bo , ou, equivalentemente, dos efeitos da tensão superficial, levam a gota a ser mais facilmente deformada pelas outras forças que dominam o escoamento. Assim, o aumento de Bo permite que o efeito magnético leve a gota a menores razões de aspecto. O efeito da razão de aspecto se reflete na velocidade de sedimentação das gotas, como ilustrado na Figura 3(b). A magnitude da velocidade terminal tende a diminuir, uma vez que o coeficiente de arrasto da gota aumenta com a redução de Mg e o aumento de Bo . Como resultado, o efeito do campo magnético horizontal em um separador gravitacional tende a reduzir a taxa de separação de gotas.

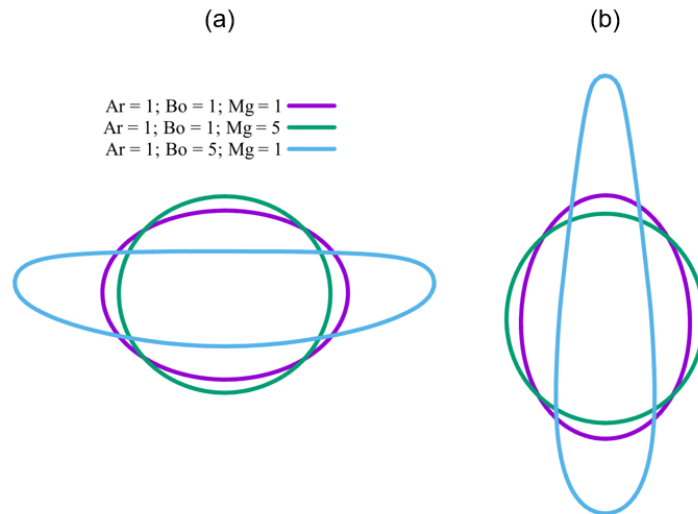
Figura 3 – (a) Razão de aspecto e (b) velocidade de sedimentação de gota em função de Mg para diferentes valores de Bo , com o campo magnético horizontal e $Ar = 1$



Fonte: Produção do próprio autor.

A Figura 4 exibe o formato da gota para diferentes valores de Mg e Bo (campo (a) horizontal e (b) vertical). É possível observar a diminuição de b/a com a diminuição de Mg e o aumento de Bo (Fig. 4(a)).

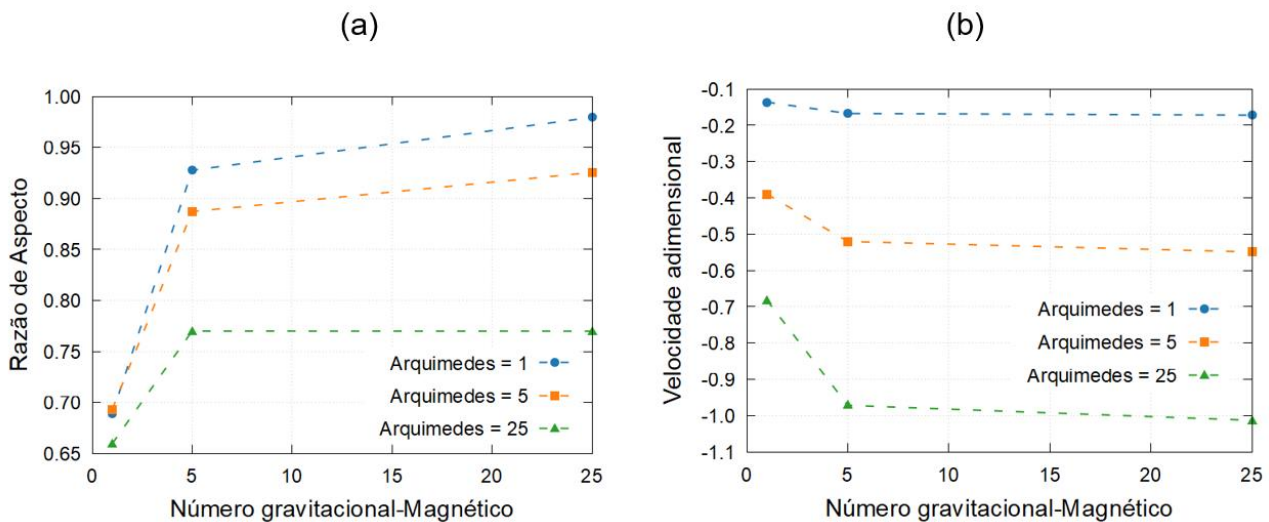
Figura 4 – Formato de gota para diferentes valores de Mg e Bo e ($Ar = 1$) com a imposição de um campo magnético (a) horizontal e (b) vertical



Fonte: Produção do próprio autor.

A Figura 5(a) exibe a razão de aspecto de gotas em função de Mg para diferentes valores de Ar . A razão de aspecto das gotas tende a diminuir com o aumento de Ar . Isso ocorre devido aos efeitos inerciais, os quais também tendem a tornar a gota oblata devido à pressão dinâmica. No entanto, um aumento Ar aumenta a velocidade terminal da gota. Isso ocorre devido à redução dos efeitos viscosos (em relação ao empuxo, que é constante), o que facilita a sedimentação da gota, como exemplificado na Figura 5(b).

Figura 5 – (a) Razão de aspecto e (b) velocidade de sedimentação de gota em função de Mg para diferentes valores de Ar , com o campo magnético horizontal e $Bo = 1$

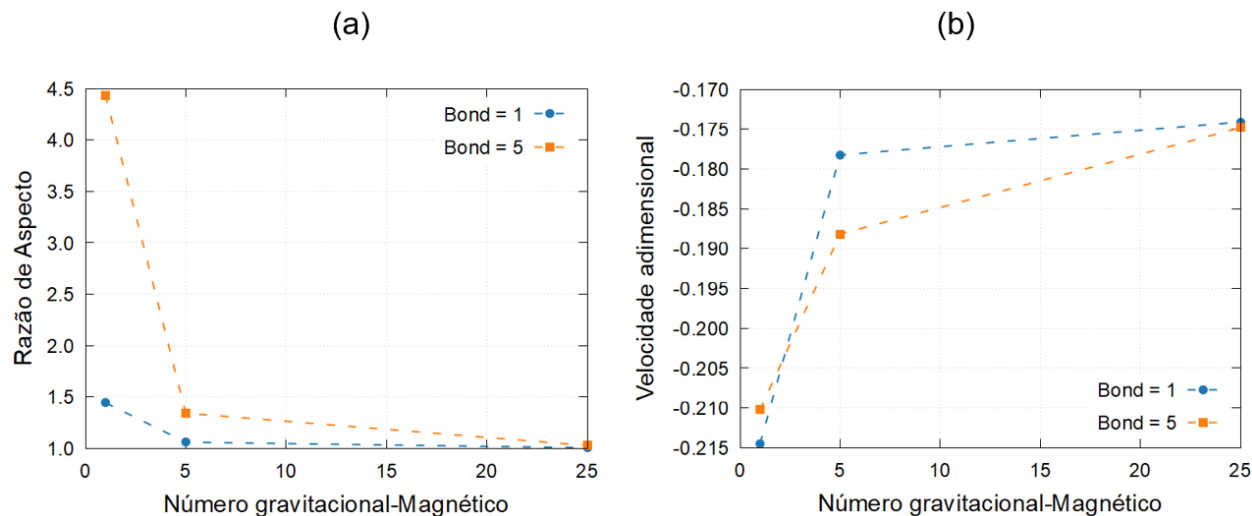


Fonte: Produção do próprio autor.

3.3 SEDIMENTAÇÃO DE GOTAS EM UM CAMPO MAGNÉTICO VERTICAL

A Figura 6(a) apresenta a razão de aspecto de gotas em função de Mg para um campo magnético vertical e diferentes valores de Bo . Diferentemente do campo magnético horizontal, aqui o campo magnético tende a tornar a gota prolata (aumentar a razão de aspecto). Esse efeito é mais uma vez intensificado com o aumento de Bo , uma vez que a deformabilidade da gota é maior. Como resultado, a velocidade de sedimentação das gotas aumenta (Figura 6 (b)), devido à redução do coeficiente de arrasto. Assim, o aumento da intensidade do campo magnético vertical tende a aumentar a taxa de sedimentação, facilitando a separação das fases. O efeito do campo magnético vertical no formato de gota é observado na Figura 4(b), na qual a gota se torna mais prolata com a diminuição de Mg e aumento de Bo .

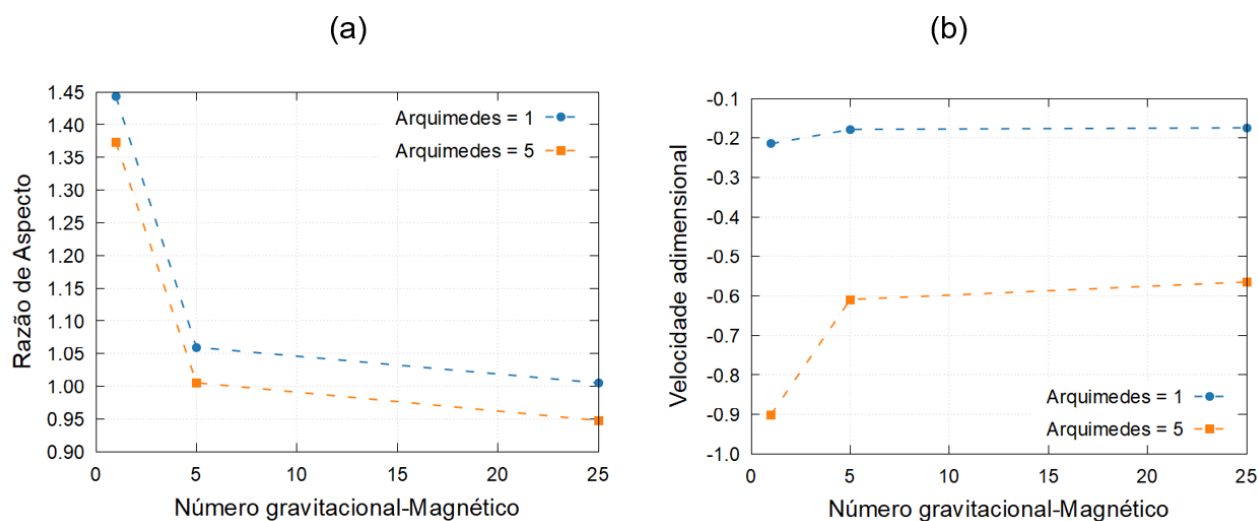
Figura 6 – (a) Razão de aspecto e (b) velocidade de sedimentação de gota em função de Mg para diferentes valores de Bo , com o campo magnético vertical e $Ar = 1$



Fonte: Produção do próprio autor.

Para o campo magnético vertical, a deformação causada pelos efeitos magnético e inerciais são opostas. As Figura 7(a) e Figura 7(b) exibem a razão de aspecto e velocidade de sedimentação de gotas em função de Mg e diferentes valores de Ar . Aqui, observa-se que a redução da razão de aspecto com a redução de Mg é minimizada pelo aumento de Ar . No entanto, a velocidade terminal é maximizada com o aumento de Ar e da intensidade do campo magnético.

Figura 7 – (a) Razão de aspecto e (b) velocidade de sedimentação de gota em função de Mg para diferentes valores de Ar , com o campo magnético vertical e $Bo = 1$



Fonte: Produção do próprio autor.

4. CONCLUSÕES

Neste trabalho, investigamos o efeito da intensidade e da direção do campo magnético na sedimentação de gotas de material ferrofluido. Quando o campo magnético é imposto na direção horizontal, o aumento da intensidade do campo tende a tornar a gota mais oblata, aumentando o coeficiente de arrasto e reduzindo a sua velocidade de sedimentação. O efeito oposto é obtido quando o campo magnético é imposto na direção vertical, o que torna a gota prolata. Ademais, a redução dos efeitos de tensão superficial intensifica os efeitos magnéticos na forma da gota. Sugestões de trabalhos futuros incluem a inclusão dos efeitos da força magnética de Lorentz em conjunto com a força de Kelvin e a inclusão de efeitos não-newtonianos.

5. REFERÊNCIAS

- AFKHAMI, S. A.; TYLER, A. J.; RENARDY, Y.; RENARDY, M.; PIERRE, T. S.; WOODWARD, R. C.; RIFFLE, J. S. Deformation of a hydrophobic ferrofluid droplet suspended in a viscous medium under uniform magnetic fields. **Journal of Fluid Mechanics**, 663, p. 358-384, 2010.
- BANERJEE, U.; SHYAM, S.; MITRA, S. K. Magnetic control of water droplet impact onto ferrofluid lubricated surfaces. **Langmuir**, v. 39, n. 11, p. 4049-4059, 2023.
- Bhattacharjee, D.; Atta, A.; Chakraborty, S. Magnetic field-mediated ferrofluid droplet deformation in extensional flow. **Physics of Fluids**, 36 (9): 092020,, 2024.
- CHEN, H.; DONG, T.; DUAN, X.; SONG, C. On-Demand Coalescence of Ferromagnetic Droplets in Microchannels Using an Oscillating Magnetic Field. **Langmuir**. v. 40, n. 41, p. 21898-21905, 2024.
- GUILHERME, A. L.; SIQUEIRA, I. R.; CUNHA, L. H. P.; THOMPSON, R. L.; OLIVEIRA, T. F. Ferrofluid droplets in planar extensional flows: Droplet shape and magnetization reveal novel rheological signatures of ferrofluid emulsions. **Phys. Rev. Fluids**, 8, 063601, 2023.
- HUANG, Y.; KE, Z. ; LI, Z. ; GAO, Y. ; TANG, Z. ; ZHANG, Y. A non-uniform magnetic field coupled lattice Boltzmann model and its application on the wetting dynamics of a ferrofluid droplet under gravity effects. **Comput. Math. Appl.**, v143, p. 73-93, 2023.
- HUANG, J.; HAN, T.; ZHANG, J.; NI, M. Numerical Simulation of Maximum Spreading of an Impacting Ferrofluid Droplet under a Vertical Magnetic Field. **Langmuir**, v. 40, n. 40, p. 20859-20871, 2024.
- KAWABATA, Y.; ISHIDA, S.; IMAI, Y. Deformation and breakup of a ferrofluid droplet in shear flow under magnetic field. **Physics of Fluids**, v. 36, n. 3, 2024.
- PIMENTA, P., REBOUÇAS, R., & OLIVEIRA, T. Magnetic field effects on the surfactant concentration over ferrofluid droplet surfaces in shear flows. **Journal of Colloid and Interface Science**, v. 662, p. 438-445, 2024.
- POPINET, S. An accurate adaptive solver for surface-tension-driven interfacial flows. **Journal of Computational Physics**, 228, p. 5838–5866, 2009.
- POPINET, S. A quadtree-adaptive multigrid solver for the serre–green–naghdi equations. **Journal of Computational Physics**, 302, p. 336–358, 2015.
- POPINET, S. (2018) Numerical Models of Surface Tension. **Annual Review of Fluid Mechanics**, 50, p. 49 – 75, 2018.
- YANG, D., ZHONG, H., LI, M., LU, X., CHENG, X., HE, L, (2024) Study on droplet deformation characteristics under coupled electric and magnetic fields. **Chemical Engineering Research and Design**, 208, p. 648-655, 2024.

4. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à CAPES, FAPES e a Petrobras pelo suporte financeiro. Ao LabTecMec-UFES por patrocinar o evento.

5. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

Os autores são os únicos responsáveis pelas informações incluídas neste trabalho.