

Modelagem e Simulação da Viscosidade Efetiva de Ferrofluidos

Carlos R. S. Araujo¹

Departamento de Física - ICEX - UFF, Volta Redonda, RJ

Wellington C. Jesus²

Departamento de Matemática - ICEX - UFF, Volta Redonda, RJ

Fluidos magnéticos, também conhecidos como ferrofluidos, são suspensões coloidais (suspensões de pequenas partículas num meio contínuo) sintéticas compostas por nanopartículas magnéticas sólidas, revestidas com um surfactante (ou carregadas eletricamente) e suspensas num líquido carregador. Existem dois mecanismos pelos quais a magnetização de um ferrofluido coloidal pode relaxar após a alteração do campo aplicado. No primeiro mecanismo o relaxamento ocorre pela rotação das partículas no líquido, caracterizado por um tempo de difusão rotacional browniano τ_B . No segundo mecanismo o relaxamento é devido à rotação do vetor magnético dentro da partícula, com um tempo característico τ_N , chamado tempo de Néel [9]. O movimento browniano previne a sedimentação quando as partículas são nanométricas. A influência exercida por um campo magnético, mesmo que modesta, em um fluido magnético abre um vasto leque de possibilidades para controlar sistemas com um componente fluido magnético.

Um estudo analítico e numérico sobre a viscosidade efetiva de um fluido magnético foi desenvolvido com base na equação de difusão para as partículas esféricas com momento magnético permanente. O estudo tem como ponto de partida o trabalho de Jesus et al. [6], onde considerou-se o modelo mais simples em que o ferrofluido é superparamagnético, isto é, apresenta magnetização apenas na presença de um campo magnético externo e se alinha instantaneamente com o campo magnético. Esse é um modelo contínuo já que não há necessidade de descrever-se o estado de configuração das partículas magnéticas e é apropriado para suspensões muito diluídas de partículas magnéticas com diâmetro $\lesssim 6\text{nm}$. No entanto, as mudanças de viscosidade e efeitos viscoelásticos nos níveis para aplicações práticas são observadas apenas em fluidos magnéticos com partículas de tamanho maior [8]. Para tais partículas, o momento magnético fica bloqueado na orientação da partícula. Consequentemente, a magnetização responde a alterações no campo magnético pelo processo lento de rotação de partículas devido a vorticidade local (considerado $\tau_B \ll \tau_N$). Isso introduz anisotropia no sistema, muito parecido como em um cristal líquido ou em um polímero líquido-cristalino. O modelo é verdadeiramente multi-escala e de alta dimensionalidade (5D mais o tempo) dado que agora é necessário considerar a nano (micro) estrutura e sua dinâmica no espaço de configuração (em S^2). Esse é um problema com um alto impacto no estudo e na concepção de uma ampla classe de *soft materials* [4] avançados e na formulação de fluidos complexos. Os ferrofluidos têm um papel importante em aplicações biomédicas para diagnóstico e terapia, administração de medicamentos, tratamentos de hipertermia e ressonância magnética [2]. O controle do escoamento por um campo magnético externo é importante para aplicações em bombeamento microfluídico e direcionamento de entrega de fármacos [7]. Diversas pesquisas teóricas [1] e aplicadas [11] recentes tentam entender e descrever a viscosidade efetiva do fluido magnético.

¹carlos_r@id.uff.br

²wellingtonjesus@id.uff.br

Considera-se uma partícula magnética esférica de raio a , com momento magnético m , suspensa em um fluido newtoniano. Assumimos que a direção do momento magnético é fixada para a partícula. Seja \mathbf{u} o vetor unitário na direção do momento magnético, então o vetor momento magnético é dado por $\mathbf{m} = m\mathbf{u}$. Derivamos uma equação cinemática para a função densidade de probabilidade $\psi(\mathbf{x}, \mathbf{u}, t)$ de \mathbf{u} no tempo t e na posição \mathbf{x} satisfazendo uma equação de Smoluchowski em S^2 [3, 5].

Estima-se $\psi(\mathbf{x}, \mathbf{u}, t)$ usando um método de expansão em série, mais especificamente, empregando os harmônicos esféricos (a porção angular de uma família ortogonal de soluções para o laplaciano sobre a superfície da esfera) como um conjunto de base. As estimativas de $\psi(\mathbf{x}, \mathbf{u}, t)$, da microestrutura, são utilizadas para a aproximação numérica da magnetização da macroestrutura e esses resultados são comparados com a equação da magnetização dada por Shliomis [10]. Essas aproximações seguem um comportamento qualitativo similar para pequenos campos magnéticos e comportam-se drasticamente diferentes quando a intensidade do campo magnético cresce.

Referências

- [1] A. Bhandari. “Theoretical Development in the Viscosity of Ferrofluid”. Em: **Journal of Tribology** 145.5 (jan. de 2023). 050801. ISSN: 0742-4787. DOI: 10.1115/1.4056626. URL: <https://doi.org/10.1115/1.4056626>.
- [2] A. Bhandari e P. Kuchhal. “The concept of high dielectric material for the treatment of liver cancer through microwave heating”. Em: **Journal of Medical Engineering & Technology** 43.3 (2019). PMID: 31313608, pp. 165–172. DOI: 10.1080/03091902.2019.1637471. eprint: <https://doi.org/10.1080/03091902.2019.1637471>.
- [3] M. Doi e S. F. Edwards. **The Theory of Polymer Dynamics**. Oxford University Press, 1986.
- [4] I. W. Hamley. “Introduction to Soft Matter: polymer, colloids, amphiphiles and liquid crystals”. Em: **Chichester: John Wiley & Sons, Ltd** 268 (2000).
- [5] P. Ilg e S. Odenbach. “Ferrofluid structure and rheology”. Em: **Colloidal Magnetic Fluids**. Ed. por S. Odenbach. Lecture Notes in Physics 763. Berlin Heidelberg: Springer, 2009.
- [6] W. C. Jesus, A. M. Roma e H D. Ceniceros. “Deformation of a Sheared Magnetic Droplet in a Viscous Fluid”. Em: **Communications in Computational Physics** 24.2 (2018), pp. 332–355. ISSN: 1991-7120. DOI: <https://doi.org/10.4208/cicp.0A-2017-0161>.
- [7] M. G. M. N. Christiansen e S. Simone. “Living, Self-Replicating Ferrofluids for Fluidic Transport”. Em: **Advanced Functional Materials** 30.40 (2020), p. 2003912. DOI: <https://doi.org/10.1002/adfm.202003912>. eprint: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/adfm.202003912>.
- [8] S. Odenbach. **Magnetoviscous Effects in Ferrofluids**. Berlin: Springer, 2002.
- [9] R. E. Rosensweig. **Ferrohydrodynamics**. New York, NY: Cambridge University Press, 1985.
- [10] M. I. Shliomis. “Hydrodynamics of a liquid with intrinsic rotation”. Em: **Soviet Journal of Experimental and Theoretical Physics** 24 (1967), p. 173.
- [11] X. Zhang, L. Sun, Y. Yu e Y. Zhao. “Flexible Ferrofluids: Design and Applications”. Em: **Advanced Materials** 31.51 (2019), p. 1903497. DOI: <https://doi.org/10.1002/adma.201903497>. eprint: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/adma.201903497>.