



PLANO DE ENSINO

| | |
|-------------------------------|--|
| Programa | Ciências Mecânicas (53001010053P0) |
| Nome | Microhidrodinâmica |
| Sigla | PCMEC |
| Número | 0208 |
| Créditos | 4 |
| Período de Vigência | 01/01/2004 - presente |
| Professor responsável | Francisco Ricardo Cunha |
| Disciplina obrigatória | Não. O curso será auto-suficiente, mas alguma familiaridade com Mecânica dos Sólidos e Mecânica dos Fluidos ajudaria o discente. |

EMENTA

Objetivos:

A disciplina tem como meta principal cobrir os elementos de microhidrodinâmica no contexto de fluidos complexos como as suspensões e emulsões. Pequenas partículas podem permanecer suspensas em um fluido por muito tempo se suas dimensões lineares forem suficientemente pequenas, tipicamente, em torno de poucos micros. Suspensões fluidas deste tipo são importantes em biologia, físico-química, hidrologia, indústria química e em estudos ambientais. As partículas podem ser esferas ou fibras rígidas ou discos rígidos, gotas líquidas (como em emulsão), bolhas de gás, cadeias longa flexível, macromoléculas, células bacterianas ou vírus ou microrganismos em geral. No decorrer do curso serão assumidas propriedades físicas e geométricas das partículas as mais simples possível, visando descrever alguns processos básicos e escoamentos na escala micro analiticamente. O objetivo do curso não é abordar as aplicações acima, mas focar em princípios mais fundamentais e abordagens teóricas que ajudarão os discentes de ciências mecânicas a compreender fundamentalmente a microhidrodinâmica e a reologia de fluidos complexos em diversos contextos. Com este foco, o curso abordará os seguintes tópicos: (i) Elementos da hidrodinâmica de baixo número de Reynolds, (ii) Teorema recíproco e representação integral do escoamento de Stokes, (iii) Movimento browniano, (iv) interações partícula-partícula (hidrodinâmica, dipolar magnética e interações de curto alcance), (v) Tensor de tensões de fluidos complexos, incluindo suspensões, emulsões e ferrofluidos diluídos em cisalhamento, (iv) sedimentação de pequenas partículas (flutuações e dispersão), agregação e escoamentos em diferentes escalas como ocorre em meio meio poroso.

Justificativa:

O movimento do fluido solvente de uma suspensão em torno de uma partícula no contexto de microhidrodinâmica pode ocorrer numa escala tão pequena que as forças de inércia do fluido são desprezíveis. A hidrodinâmica em baixos números de Reynolds, portanto, tem um papel central na disciplina em tela. O curso nas primeiras aulas introduz a teoria básica para estudo de escoamentos de fluidos newtonianos em baixos números de Reynolds. Estas aulas fornecerão a base para o trabalho posterior na disciplina além de fornecer o suporte necessário para uma introdução à teoria das suspensões. O movimento browniano de pequenas partículas, incluindo partículas

magnéticas coloidais (como em um ferrofluido), também é um fenômeno importante em microhidrodinâmica. O movimento browniano randomiza as localizações e orientações, e em algumas circunstâncias, as formas de partículas que se movem livremente, impondo uma distribuição de probabilidade mais uniforme na suspensão. Distribuição de probabilidade configuracional de partículas em regime permanente pode resultar do equilíbrio entre efeitos hidrodinâmicos e brownianos, e essas distribuições de probabilidade determinam as propriedades reológicas da suspensão (fluido complexo). Numa suspensão magnética coloidal, por exemplo, o movimento browniano equilibra os efeitos magnéticos (como a precessão) na ausência de escoamento (equilíbrio). Ademais, as propriedades da suspensão são modificadas por forças interativas e torque entre as partículas suspensas (e.g., interações hidrodinâmicas viscosas e interações dipolares). As trajetórias das partículas mudam no tempo e flutuações de velocidade de partículas podem ser observadas como consequência de interações de partícula-partícula tanto de longo como de curto alcance. Em particular, as forças atrativas de van der Waals fazem com que as partículas se unam quando ficam muito próximas, enquanto forças de repulsão entre partículas (devido a íons no solvente e, ou partículas carregadas ou uma camada de distribuição de surfactante na superfície da partícula) as separam. Os efeitos e influência dessas interações de partículas em fenômenos observados em suspensões como difusão, agregação/coagulação, flutuações de trajetórias e velocidade de partículas em sedimentação além de partículas livres da ação líquida gravitacional suspensas em fluido newtoniano, mas sujeitas a um campo de cisalhamento, serão explorados e discutidos na disciplina. Espera-se que, entre outras coisas, este curso mostre a importância de se investigar o vínculo ligação entre as escalas micro (microhidrodinâmica) e macro de fluidos complexos (reologia).

Conteúdo:

1) Introdução ao estudo da microhidrodinâmica; **2)** Vetor de tensões e tensor de tensões, equações de Cauchy e Stokes, análise dimensional para escoamentos lentos; **3)** Linearidade, reversibilidade e simetria. **4)** Soluções exatas das equações de Stokes: escoamentos axissimétricos, escoamentos em baixos números de Reynolds em coordenadas esféricas (partícula esférica) e um resumo da solução de Lamb em harmônicos esféricos; **5)** Teorema da Reciprocidade e suas consequências; **6)** Solução fundamental do escoamento de Stokes (Stokeslet); **7)** O tensor de Oseen e as funções de Green do escoamento de Stokes; **8)** Problema de Mobilidade e Resistência; **9)** Representação integral das equações de Stokes; **10)** Formulação do método integral de contorno para partículas deformáveis; **11)** Leis de Faxén e Expansão Multipolar (stokeslet, rotlet e stresslet); **12)** Movimento browniano, auto-difusão e equação estocástica de Langevin. **13)** Formalismo constitutivo para suspensões; **14)** Tensor de Tensões efetivo de suspensões em modelagem de fluido equivalente (Landau-Batchelor), viscosidade efetiva de suspensões e emulsões diluídas: viscosidades de Einstein e Taylor; **15)** Equação de magnetização e tensor de tensões para uma suspensão magnética coloidal (ferrofluido), viscosidade rotacional; **16)** Interações hidrodinâmicas e método das reflexões; **17)** Interações dipolares (força dipolar e torque); **18)** Solução de escoamentos de Stokes usando aproximação de corpos delgados (partículas anisotrópicas: bastões, fibras e partículas ativas); **19)** Condutividade térmica efetiva e viscosidade extensional de uma suspensão de partículas rígidas; **20)** Teoria da lubrificação e interações hidrodinâmicas de curto alcance; **21)** Forças repulsivas e atrativas de curto alcance; **22)** Modelos microestruturais/anisotrópicos de macromoléculas (modelo dumbbell); **23)** Escoamento em meios porosos (escala de Darcy-Brikman-

Forchheimer); porosidade, permeabilidade, saturação, pressão capilar e ângulo de contato.

Forma de Avaliação

Estudos dirigidos (40% da nota final); Listas de exercícios (30% da nota final); Seminário proferido pelo discente baseado em artigo científico publicado de periódicos cujo tema será correlacionado aos tópicos tratados na disciplina (30% da nota final). As listas de exercícios serão entregues ao longo do semestre.

Serão atribuídas menções aos estudantes com base nas notas finais obtivas, de acordo com o critério de menções da UnB. Casos omissos serão resolvidos pelos professores da disciplina.

Observação:

Vale informar que ainda não existe um livro específico cobrindo todo o conteúdo da disciplina. No entanto, sugere-se as referências bibliográficas a seguir.

Bibliografia:

1) Happel, J. & Brenner, H., Low Reynolds number hydrodynamics (2a. ed). Kluwer Academic Publishers, 1973; 2) Graham, M.D., Microhydrodynamics, Brownian motion, and complex fluids, Cambridge University Press (CUP), 2018. 3) Guazzelli, E. & Morris, J.F., A physical introduction to suspension dynamics, CUP, Cambridge, 2012; 4) Russel, W.B., Saville, D.A. & Schowater, W.R., 1989, Colloidal dispersion, Cambridge University Press, Cambridge. 5) Kim, S. & Karrila, S.J., Microhydrodynamics: Principles and selected applications. Butterworth Heinemann, Boston, 1991; 6) Sinaiski, E.G. & Zaichik, Statistical Microhydrodynamics, Wiley, 2008. 7) Odenbach, S. (editor). Lecture Notes in Physics: Colloidal Magnetic Fluids (basics developments and application of ferrofluids), Springer, 2009. 8) Landau, L.D. & Lifschitz, E.M. Fluid Mechanics. Pergamon. 1987 (2a. edição). 9) Cunha, F.R. & Gontijo, R.G. Revisiting the governing equations of a magnetic suspension of polar particles: from microhydrodynamics analysis to rheological response, Physics of Fluids (AIP), 36, 081303, 2024. 10) Batchelor, G.K. Developments in microhydrodynamics, in Theoretical and Applied Mechanics, W.T. Koiter (editor), North-Holand Publishing Company, 1976. 11) Batchelor, G. K. Transport properties of two-phase materials with random structure, Annual Review of Fluid Mechanics, 6, 227-255, 1974.
