



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 fluxo 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 obtidas, 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).



Unit information

Program	Mechanical Science (53001010053P0)
Course unit	Microhydrodynamics
Unit code	PCMEC
Unit number	0208
Credit points	4
Period	01/01/2004 - Current
Professor	Francisco Ricardo da Cunha
Prerequisites	No. The course will be self-contained, but some familiarity with both the Solids Mechanics and Fluid Mechanics would be helpful.

Unit outline

Objective:

This course will cover the elements of microhydrodynamics in the context of complex fluids like suspensions and emulsions. Small particles can remain in suspension in a fluid for a long time if their linear dimensions are sufficiently small, typically few microns. Fluid suspensions of this kind are important in biology, physical chemistry, hydrology, chemical industry and environmental studies. The particles may be rigid spheres or rods or disks, liquid drops (as in an emulsion), gas bubbles, flexible long-chain macromolecules, bacterial cells or viruses and microorganisms in general. In these lectures we assume simple geometrical and physical properties of the particles in order to be able to describe some basic processes analytically. The aim of the course is not to address the above applications, but to focus on common principles and theoretical approaches that will help students in mechanical sciences to fundamentally understand the microhydrodynamics and rheology of complex fluids in a variety of contexts. With this focus the course will cover the following topics: (i) Elements of low Reynolds number hydrodynamics, (ii) Reciprocal theorem and integral representation of Stokes flow, (iii) Brownian motion, (iv) particle-particle interactions (hydrodynamic, dipolar magnetic and short), (v) Stress tensor of complex fluids including suspensions, emulsions and dilute ferrofluids, (iv) sedimentation of small particles (fluctuations and dispersion) and porous media.

Purpose:

Motion of the suspending fluid around a particle is on such a small scale that the inertia forces of the fluid are negligible. Low-Reynolds number hydrodynamics therefore has a central role in microhydrodynamics. The course will first consider the study of Newtonian creeping flows in the first few lectures, which provides a basis for the work that comes later, and provides an introduction to a theory of suspensions. The theory of Brownian motion of small particles, including colloidal magnetic particles (as in a ferrofluid), is also an important phenomenon in the field of microhydrodynamics. Brownian motion randomizes the locations and orientations, and in some circumstances the shapes, of freely moving particles, and tends to make probability distribution more uniform. Steady particle - configurational probability distribution may result from the balance between hydrodynamics and Brownian effects, and these probability distributions determine the rheological properties of the suspension (complex fluid). In colloidal magnetic suspension Brownian motion balances the magnetic effects (like precession) in the absence of flow. Additionally, the suspension properties are modified by interactive forces and torque between

the suspended particles (e.g. viscous hydrodynamic interactions and dipolar interactions). Particles trajectories change in time and particle velocity fluctuations can be observed as a consequence of both long and short range interactions particle interactions. In particular, attractive van der Waals forces cause the particles to stick together when they become very close, and repulsion forces between particles (due to ions in the solvent and charged particles or a layer of surfactant distribution in the particle surface) will push them apart. The influence of these particle interactions on the observed phenomenon like diffusion, aggregation/coagulation, fluctuations in sedimentation and shear flows of neutrally buoyant particles suspended in a Newtonian fluid will be explored and discussed in this course. It is hoped that, among other things, this course will show the importance of the link between the micro (microhydrodynamics) and macro scales of complex fluids (rheology).

Contents:

1) Introduction to the study of microhydrodynamics; **2)** Traction and stress tensor, Cauchy and Stokes equations, dimensional analysis for creeping flows; **3)** Linearity, reversibility and symmetry. **4)** Exact solutions of the Stokes equations: axisymmetric flows, creeping flows in spherical coordinates (spherical particle) and a summary of Lamb's solution in spherical harmonics; **5)** Reciprocity Theorem and its consequences; **6)** Fundamental solution of Stokes flow (Stokeslet); **7)** Oseen tensor and Green's functions of the Stokes flow; **8)** Mobility and Resistance Problem; **9)** Integral representation of Stokes Equations; **10)** Formulation of the boundary integral method for deformable particles. **11)** Faxén Laws and Multipole expansion (Stokeslet, rotlet and stresslet); **12)** Brownian motion, self-diffusion and Langevin stochastic equation. **13)** Constitutive formalism for suspensions; **14)** Particle Stress Tensor (Landau-Batchelor), effective viscosity of dilute suspensions and emulsions: Einstein and Taylor viscosities; **15)** Magnetization equation and stress Tensor for a colloidal magnetic suspension (ferrofluid), rotational viscosity; **16)** Hydrodynamic Interactions and method of Reflections; **17)** Dipolar interactions (dipolar force and torque); **18)** Solution of Stokes flows using slender body approximation (anisotropic particles: rods, fibers and active particles); **19)** Effective thermal conductivity and extensional viscosity of a suspensions of rigid rods. **20)** Lubrication theory and short-range hydrodynamics interactions; **21)** Short-range repulsive and attractive forces; **22)** Microstructural/anisotropic models of macromolecules (dumbbell model); **23)** Flow in porous media (Darcy-Brikman-Forchheimer scales); porosity, permeability, saturation, capillary pressure and contact angle.

Assessment

Self-student exercises (40% of the final grade), Exercise lists (30% of the final grade) and a student seminar (30% of the final grade) based on a scientific paper related to the covered topics on microhydrodynamics and its applications. Exercise lists will be delivered during the course.

Obs:

Almost all the material in the course (and very much more besides) can be found in the references below if the student look hard enough. There exist no books covering the whole content of this course.

Reference:

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).
