



PLANO DE ENSINO

Programa	Ciências Mecânicas (53001010053P0)
Nome	Escoamentos Multifásicos
Sigla	PCMEC
Número	0169
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 Fluidos seria vantajoso para o discente.

EMENTA

Objetivos:

Escoamentos multifásicos que ocorrem tanto em sistemas particulados móveis como em meios porosos (partículas fixas) são importantes e de interesse em diversas aplicações industriais (por exemplo, indústrias químicas, petrolíferas e de geração de energia). Este curso apresentará aos alunos de pós-graduação em ciências mecânicas os fundamentos de escoamentos bifásicos, incluindo: uma discussão dos níveis moleculares e contínuos envolvidos nas teorias de modelagem (i.e., da equação de Boltzmann a equação de Cauchy), análise de escalas e dimensional, teoria contínua de mistura para escoamentos bifásicos particulados, equações de transporte médias (volume-tempo), formalismo constitutivo, tensor de tensões médio da fase e força de interação entre as fases, conceitos de viscosidade e pressão de "partícula", flutuações de velocidade e difusão de partículas em suspensões, escoamento bifásico em meios porosos, sedimentação e fluidização. Ao contrário do tratamento tradicional dado, a fluidização é descrita na presente disciplina como um fenômeno de transporte, com base nos princípios das equações de balanço. Uma análise de estabilidade linear para um leito fluidizado bem como a instabilidade de Saffman-Taylor em meios porosos e a dispersão de partículas em sedimentação também serão tópicos relevantes discutidos na disciplina.

Justificativa:

Alcançar uma melhor compreensão dos escoamentos multifásicos na natureza e na indústria é um dos grandes desafios intelectuais que a ciências mecânicas e a engenharia mecânica enfrentam atualmente. A disciplina escoamentos multifásicos busca fornecer uma primeira base e os fundamentos teóricos para enfrentar esse desafio. Com esta proposta, apresenta-se uma visão moderna dos princípios físicos e teorias de modelagem envolvendo as equações médias locais de balanço (volume-tempo), os mecanismos governantes de fases contínuas interativas, incluindo escoamentos particulados gás-sólido e líquido-sólido. Entre os tópicos fundamentais da disciplina, trata-se também da propagação de ondas de concentração, dos principais mecanismos de estabilidade em leitos fluidizados e de uma análise

de flutuações de velocidade e dispersão na sedimentação associadas com interações hidrodinâmicas e efeitos colisionais partícula-partícula. Espera-se que a familiaridade com os conceitos relevantes de escoamentos multifásicos seja essencial para os alunos de pós-graduação em Ciências Mecânicas explorarem novas ideias em pesquisas teóricas e, (ou) experimentais vinculadas as suas respectivas dissertações e teses.

Conteúdo:

1) Coordenadas generalizadas não-ortogonais; **2)** Formalismo Lagrangiano e Hamiltoniano; **3)** Teorema transporte de Reynolds na forma generalizada; **4)** Revisão das equações gerais de balanço (massa, momento linear, momento angular e energia – em termos do tensor de tensões) para escoamentos monofásicos **5)** Fundamentos básicos de Mecânica Estatística: equação de Liouville; **6)** Chapman-Enskog: da equação de Boltzmann às equações de balanço de massa, Cauchy e energia; **7)** Expansão de Chapman-Enskog para baixos números de Knudsen; **8)** Base do método Lattice – Boltzmann e sua conexão com simulações de escoamentos de fluidos particulados; **9)** Princípios da teoria contínua para escoamentos bifásicos (fases contínuas interpenetrantes): média volumétrica-temporal de transporte ; **10)** Equações médias de balanço para escoamentos bifásicos; **11)** Formulação constitutiva dos tensores de tensões para fases contínua e particulada (dispersa): força de interação entre as fases, conceitos de pressão de partícula e viscosidade de partícula; **12)** Teoria contínua de mistura aplicada a escoamento em meios porosos (partículas fixas): porosidade, permeabilidade e saturação; **13)** Equação constitutiva para interfaces entre dois fluidos – conceito de pressão capilar e ângulo de contato; **14)** Modelagem de escoamentos em meios porosos (escala do poro e escala da matriz porosa): lei de Darcy, termo de Brinkman e extensão de Forchheimer; **15)** Escoamentos bifásicos em meios porosos de fluidos com diferentes saturações, Instabilidade Saffman-Taylor em meios porosos; **16)** Sedimentação, fluidização, flutuações de velocidade em suspensões, difusão hidrodinâmica em suspensões não-Brownianas; **17)** Análise de escala, adimensionalização em sistemas particulados bifásicos (Froude, Reynolds, razão de massa específica fluido-sólido e fração volumétrica); **18)** Ondas de concentração em leitos fluidizados e análise de estabilidade linear de uma suspensão fluidizada; **19)** Análise modal, taxa de amplificação de instabilidades, velocidade de propagação de onda, curvas neutras e diagramas de estabilidade-instabilidade. **20)** Descrição do tensor de tensões de partícula – fluido homogêneo equivalente (Landau-Batchelor); **21)** Tensor de tensões de uma suspensão magnética e modelo bifásicos com fase particulada magnética.

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 em 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:

Quase todo o conteúdo da disciplina pode ser encontrado nas referências bibliográficas a seguir. Todas as informações necessárias serão tratadas nas aulas.

Bibliografia:

1) Barenblatt, G.I., Theory of fluid flows through natural rocks. Kluwer Academic, 1990; **2)** Scheidegger, A.E., Hydrodynamics in porous media, in Handbuch der Physik, vol VII. 2. Springer, 1963. **3)** Chapman, S. and Cowling, T.G. The mathematical theory of non-uniform gases, Cambridge University Press, 1970 (3a. edição). **4)** Zhu, C., Fan, L.S., Yu, Z., Dynamics of multiphase flows, Cambridge University Press (CUP), Cambridge, 2021; **5)** Gidaspow, D., Mutiphase Flow and Fluidization-Continuum and Kinetic, Theory Descriptions. Academic Press, 1994; **6)** Bear, J., Dynamics of fluids in porous media, New York, Dover publications, 2013, **7)** Batchelor, G.K., An introduction to fluid dynamics. Cambridge University Press, Cambridge, 1967; **8)** Roco, M.C., Particulate Two-Phase Flow. Butterworth-Heinemann, Boston, 1993; **9)** Guazzelli, E. & Oger, L., Mobile Particulate Systems, Nato ASI Series, Serie E: Applied Science - Vol. 287. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, (A Colletion of Lectures), 1995; **10)** Landau, L.D., & Lifshitz, E.M., 1987 (2 ed.). Fluid mechanics. Pergamon, Oxford, 1987; **11)** Russel, W.B., Saville, D.A. & Schowater, W.R., Colloidal Dispersion. Cambridge University Press, Cambridge, 1989 ; **12)** R. E. Rosensweigh, Ferrohydrodynamics, CUP, 1985.



Unit information

Program	Mechanical Science (53001010053P0)
Course unit	Multiphase Flows
Unit code	PCMEC
Unit number	0169
Credit points	4
Period	01/01/2004 - Current
Professor	Francisco Ricardo da Cunha
Prerequisites	No, but familiarity with Fluid Mechanics will be an advantage.

Unit outline

Objective:

Multiphase flows occurring in both mobile particulate systems and porous media (non-mobile particles) are of importance and interest in several industrial applications (e.g. chemical, petroleum, and power generation industries). This course will introduce to graduate students in mechanical sciences the fundamentals of two-phase flows including: a discussion of molecular and continuum levels of the modelling theories (i.e. from Boltzmann to Cauchy equation), scalings and dimensional analysis, continuous mixture theory for two-phase particulate flows, volume-time-averaged transport equations, constitutive formalism, phases bulk stress tensor and phase interaction force, concepts of viscosity and particle pressure, velocity fluctuations and diffusion in suspensions, two-phase flow in porous media, sedimentation and fluidization. Unlike traditional treatment of the subject, fluidization is described in the course as a branch of transport phenomena, based on the principles of balance equations. A linear stability analysis for a fluidized bed will also be explored as well as the instability of Saffman – Taylor in porous media and mixing and dispersion of sedimenting particles will be discussed.

Purpose:

Achieving a better understanding of multiphase flows is one of the great intellectual challenges facing mechanical science and engineering today. These lectures set the theoretical background to that challenge by presenting a modern view of the basic physical principles, modelling theories involving local volume-time-averaged transport, governing mechanisms of interacting continuous phases including gas-solid and liquid-solid flows. Among the topics considered will be fundamental concentration wave propagation, instability mechanisms in fluidized beds and velocity fluctuations and dispersion in sedimentation. It is expected that familiarity with the relevant concepts of multiphase flows will be essential for graduate students to explore new ideas in theoretical and experimental research works on the theme.

Contents:

1) Generalized non-orthogonal coordinates; **2)** Lagrangian and Hamiltonian formalism; **3)** Reynolds transport theorem in a generalized form; **4)** Review of the general balance equations (mass, linear momentum, angular momentum and energy – in terms of the stress tensor) for single-phase flows **5)** Basic foundations of Statistical Mechanics: Liouville equation; **6)** Chapman-Enskog: from the Boltzmann equation to the mass, Cauchy and energy balance equations; **7)** Chapman-Enskog expansion for low Knudsen numbers; **8)** Basis of the Lattice – Boltzmann method and its connection with particulate fluid flow simulations; **9)** Principles of continuous mixture theory for two-

phase flows (continuous interpenetrating phases): volume-time-averaged transport; **10)** Average balance equations for two-phase flows; **11)** Constitutive formulation of the stress tensors for continuous and particulate (dispersed) phases, interaction force between phases, concepts of particle pressure and particle viscosity; **12)** Continuous mixture theory applied to flow in porous media (fixed particles): porosity, permeability and saturation; **13)** Constitutive equation for interfaces between two fluids – concept of capillary pressure and contact angle; **14)** Modeling of flows in porous media (pore scale and porous matrix scale): Darcy's law, Brinkman's term and Forchheimer's extension; **15)** Biphasic flows in porous media with fluids with different saturations, Saffman-Taylor instability in porous media; **16)** Sedimentation, fluidization, velocity fluctuations in suspensions, hydrodynamic diffusion in non-Brownian suspensions; **17)** Scale analysis, adimensionalization in biphasic particulate systems (Froude, Reynolds, fluid-solid specific mass ratio and volume fraction); **18)** Concentration waves in fluidized beds: linear stability analysis of a fluidized suspension; **19)** Modal analysis, instabilities amplification rate, wave propagation velocity, neutral curves and stability-instability diagrams. **20)** Description of the particle stress tensor – equivalent homogeneous fluids (Landau-Batchelor); **21)** Stress tensor of a magnetic suspension and two-phase model with magnetic particulate phase.

Assessment

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

Obs:

None textbooks really suitable for the whole course. All necessary information will be provided in lectures. For reference consult:

Reference:

1) Barenblatt, G.I., Theory of fluid flows through natural rocks. Kluwer Academic, 1990; **2)** Scheidegger, A.E., Hydrodynamics in porous media, in Handbuch der Physik, vol VII. 2. Springer, 1963. **3)** Chapman, S. and Cowling, T.G. The mathematical theory of non-uniform gases, Cambridge University Press, 1970 (3a. edição). **4)** Zhu, C., Fan, L.S., Yu, Z., Dynamics of multiphase flows, Cambridge University Press (CUP), Cambridge, 2021; **5)** Gidaspow, D., Multiphase Flow and Fluidization-Continuum and Kinetic, Theory Descriptions. Academic Press, 1994; **6)** Bear, J., Dynamics of fluids in porous media, New York, Dover publications, 2013, **7)** Batchelor, G.K., An introduction to fluid dynamics. Cambridge University Press, Cambridge, 1967; **8)** Roco, M.C., Particulate Two-Phase Flow. Butterworth-Heinemann, Boston, 1993; **9)** Guazzelli, E. & Oger, L., Mobile Particulate Systems, Nato ASI Series, Serie E: Applied Science - Vol. 287. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, (A Collection of Lectures), 1995; **10)** Landau, L.D., & Lifshitz, E.M., 1987 (2 ed.). Fluid mechanics. Pergamon, Oxford, 1987; **11)** Russel, W.B., Saville, D.A. & Schowater, W.R., Colloidal Dispersion. Cambridge University Press, Cambridge, 1989 ; **12)** R. E. Rosensweig, Ferrohydrodynamics, CUP, 1985.
