



## PLANO DE ENSINO

<b>Programa</b>	Ciências Mecânicas (53001010053P0)
<b>Nome</b>	Dinâmica dos Fluidos não-Newtonianos
<b>Sigla</b>	PCMEC
<b>Número</b>	0175
<b>Créditos</b>	4
<b>Período de Vigência</b>	01/01/2004 - presente
<b>Professor responsável</b>	Francisco Ricardo Cunha
<b>Disciplina obrigatória</b>	Não. O curso será auto-suficiente, mas alguma familiaridade com Mecânica dos Sólidos e Mecânica dos Fluidos ajudaria o discente.

### EMENTA

#### Objetivos:

O objetivo desta disciplina é mostrar aos discentes de pós-graduação em ciências mecânicas como as técnicas e conceitos da dinâmica dos fluidos não-newtonianos podem ser aplicados para entender a reologia e resolver escoamentos de fluidos não lineares em diversas situações. Além disso, espera-se aprimorar o treinamento desses discentes em tópicos avançados de mecânica dos fluidos, a fim de formular modelos para descrever o comportamento de líquidos com efeitos elásticos e viscosos. Com este fim o curso abordará tópicos avançados como: movimento browniano de macromoléculas, hidrodinâmica de baixo Reynolds, viscoelasticidade linear e não linear, modelos constitutivos para materiais complexos, incluindo polímeros líquidos e suspensões.

#### Justificativa:

Uma ampla classe de materiais (por exemplo: plásticos, polímeros, suspensões de pequenas partículas em fluidos, sangue, muco e muitos outros fluidos biológicos) exibe propriedades viscosas e elásticas sob deformação. A tarefa de prever o comportamento dinâmico de tais fluidos, muitas vezes em geometrias complexas, é uma questão de considerável interesse prático e científico para pesquisadores que trabalham em ciências mecânicas e engenharia. A disciplina introduz primeiro o estudo de escoamentos de fluidos newtonianos em baixos números de Reynolds e o movimento browniano de macromoléculas. Tópicos estes que fornecem uma base para os assuntos que serão tratados posteriormente no curso referentes a efeitos viscosos, elásticos e relaxação. Adicionalmente, a disciplina tratará da relação entre tensão e deformação para fluidos viscoelásticos (para geometrias simples) e do cálculo de campos de escoamento e forças dinâmicas. A maioria dos cálculos de escoamentos para geometrias complexas são realizados atualmente em um computador, no entanto a disciplina mostra como estes cálculos podem ser simplificados com uso de ideias de aproximações de lubrificação e camada limite elástica.

#### Conteúdo:

---

**1)** Fenômenos peculiares em fluidos não-Newtonianos, aspectos moleculares: macromolécula, análise dimensional, parâmetro físico elástico: números de Deborah e Weissenberg. **2)** Movimento Browniano: relaxação e difusão molecular, vínculo com relaxação elástica em modelo dumbbell; **3)** Equações gerais de balanço da hidrodinâmica para um meio contínuo (massa, quantidade de movimento e momento angular); **4)** Hidrodinâmica em baixos números de Reynolds, lei de Stokes; **5)** Formalismo geral de equações constitutivas; **6)** Fluidos não-Newtonianos viscosos (ou generalizados) com viscosidade dependente da taxa de cisalhamento – modelos Ad hoc e fluidos tipo Reiner-Rivlin. **7)** Viscoelasticidade linear : cisalhamento oscilatório de pequena amplitude (SAOS), excitação harmônica, módulos viscoelásticos, princípio da causa-efeito e relações de Kramers-Kronig; **8)** Fluido de Maxwell e fluido de Jeffrey; **9)** Degrau de deformação, função relaxação de tensões e tempo de relaxação elástico, fluidos de segunda ordem, tensões elásticas (diferença de tensões normais), viscosidade extensional e regra da equivalência de Cox-Merz (entre cisalhamento permanente e oscilatório); **10)** Aproximação de lubrificação, escoamentos unidirecionais em canais e capilares, camada limite elástica e algumas soluções exatas; **11)** Derivadas temporais Jaumann e Oldroyd; **12)** Viscoelasticidade não-linear (cisalhamento oscilatório de grande amplitude - LAOS); **13)** Curvas de Lissajous; **14)** Fluidos Oldroyd-Maxwell; **15)** Modelos constitutivos não-lineares diferenciais e Integrais: Fluido Erickson-Rivlin, Fluido BKZ; **16)** Modelos microhidrodinâmicos de duas equações dumbbell - FENE; **17)** Princípios constitutivos para suspensões, modelo de fluido homogêneo equivalente, tensor de tensões Batchelor-Landau (“Stresslet”) e viscosidade de Einstein; **18)** Tensor de tensões não-simétrico para fluidos polares (ferrofluidos).

---

#### Forma de Avaliação

Estudos dirigidos (40% da nota final); Listas de exercícios (20% da nota final); Atividade experimental e relatório: Fluidos não-newtonianos em cisalhamento permanente e transiente (20% da nota final); Seminário proferido pelo discente baseado em artigo científico publicado de periódicos cujo tema será correlacionado aos tópicos tratados na disciplina (20% 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.

---

#### Bibliografia:

1) Bird, R.B., Armstrong, R.G. and Hassager, O. Dynamics of polymeric liquid. John Wiley. 1987; 2) Tanner, R.I. Engineering Rheology. Oxford Press, Oxford (UK), 1985; 3) Happel, J. & Brenner, H., 1973 (2 ed.). Low Reynolds number hydrodynamics. Kluwer Academic Publishers; 4) Barnes, H.A, Hutton, J.F. and Walters, K. An introduction to Rheology. Elsevier. 1989. 5) Larson, R.G. Constitutive Equations for polymer melts and solutions. Cambridge University Press. 1990; 6) Russel, W.B., Saville, D.A. & Showalter, W.R., 1989. Colloidal Dispersion. Cambridge University Press, Cambridge; 7) Guazzelli, E. & Morris, J.F (2012), A Physical Introduction to suspension dynamics, CUP – Cambridge. Kim, S. & Karrila, S.J., 1991. Microhydrodynamics: Principles and selected applications. Butterworth Heinemann, Boston.

---



### Unit information

<b>Program</b>	Mechanical Science (53001010053P0)
<b>Course unit</b>	Non-Newtonian Fluid Dynamics
<b>Unit code</b>	PCMEC
<b>Unit number</b>	0175
<b>Credit points</b>	4
<b>Period</b>	01/01/2004 - Current
<b>Professor</b>	Francisco Ricardo da Cunha
<b>Prerequisites</b>	No. The course will not require any significant previous knowledge of fluid mechanics, but familiarity with both the Solids Mechanics and Fluid Mechanics will be an advantage.

### Unit outline

**Objective:**

The aim of this course is to show to graduate students in mechanical sciences how the techniques and concepts from non-newtonian fluid dynamics can be applied to understand the rheology and solve flows of nonlinear fluid in a variety of situations. In addition, it is expected to improve the training of these graduate students in advanced topics of fluid mechanics in order to formulate model for describing the behavior of liquid having both elastic and viscous effects. With this goal the course will cover advanced topics such as: Brownian motion of macromolecules, low Reynolds hydrodynamics, linear and nonlinear viscoelasticity, constitutive models for complex materials, including liquid polymers and suspensions.

**Purpose:**

A wide class of materials (e.g. plastics, polymers, suspensions of small particles in fluids, blood, mucus and many other biological fluids) display both viscous and elastic properties under deformation. The task of predicting the dynamic behavior of such fluids, often in complex geometries, is a matter of considerable practical and scientific interest for researchers working on mechanical sciences and engineering. The course will first consider the study of low Reynolds Newtonian flow and the Brownian motion of macromolecules, which provides a basis for the topics that comes later and provides an introduction to theory of suspensions flows. The course will then consider the relation between stress and strain for viscoelastic fluids, and for simple geometries, the calculation of flow fields and dynamic forces. Most flow calculations for complex geometries are nowadays performed on a computer, but the course will aim to show how such calculation may be simplified by the use of lubrication ideas and elastic boundary layer.

**Contents:**

1) Peculiar phenomena in non-Newtonian fluids, molecular aspects: macromolecule, dimensional analysis, elastic physical parameter: Deborah and Weissenberg numbers. 2) Brownian motion: relaxation and molecular diffusion, link with elastic relaxation in dumbbell model; 3) General hydrodynamic balance equations for a continuous medium (mass, momentum and angular momentum); 4) Hydrodynamics at low Reynolds numbers, Stokes law; 5) General formalism of constitutive equations; 6) Non-Newtonian viscous (or generalized) fluids with shear rate dependent viscosity, Ad hoc models and Reiner-Rivlin fluids; 7) Linear viscoelasticity: small amplitude oscillatory shear (SAOS), harmonic excitation, viscoelastic moduli, cause-effect principle and Kramers-Kronig relations; 8) Maxwell fluid and Jeffrey fluid; 9) Step strain, stress

---

relaxation function and elastic relaxation time, second order fluids, elastic stresses (normal stresses differences), extensional viscosity and Cox-Merz equivalence rule (between permanent and oscillatory shear); **10)** Lubrication approach, unidirectional flows in channels and capillaries, elastic boundary layer and some exact solutions; **11)** Jaumann and Oldroyd temporal Derivatives; **12)** Nonlinear viscoelasticity (Large Amplitude Oscillatory Shear - LAOS); **13)** Lissajous curves; **14)** Oldroyd-Maxwell fluids; **15)** Differential and Integral Nonlinear Constitutive Models: Erickson-Rivlin Fluid, BKZ Fluid. **16)** Microhydrodynamic models of two dumbbell equations, FENE; **17)** Constitutive principles for suspensions, equivalent homogeneous fluid model, Batchelor-Landau stress tensor ("Stresslet") and Einstein viscosity. **18)** Non-symmetric stress tensor for polar fluids (i.e. ferrofluids).

---

**Assessment**

Self-student exercises (40% of the final grade); Exercise lists (20% of the final grade), Experimental activity and report: non-Newtonian fluids in steady and unsteady shear flows (20% of the final grade); and a Student seminar (20% 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 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) Bird, R.B., Armstrong, R.G. and Hassager, O. Dynamics of polymeric liquid. John Wiley. 1987; 2) Tanner, R.I. Engineering Rheology. Oxford Press, Oxford (UK), 1985; 3) Happel, J. & Brenner, H., 1973 (2 ed.). Low Reynolds number hydrodynamics. Kluwer Academic Publishers; 4) Barnes, H .A, Hutton, J.F. and Walters, K. An introduction to Rheology. Elsevier. 1989. 5) Larson, R.G. Constitutive Equations for polymer melts and solutions. Cambridge University Press. 1990; 6) Russel, W.B., Saville, D.A. & Showalter, W.R., 1989. Colloidal Dispersion. Cambridge University Press, Cambridge; 7) Guazzelli, E. & Morris, J.F (2012), A Physical Introduction to suspension dynamics, CUP – Cambridge. Kim, S. & Karrila, S.J., 1991. Microhydrodynamics: Principles and selected applications. Butterworth Heinemann, Boston.

---