

## PROGRAMA DE DISCIPLINA

<b>Código:</b> PEQ-5001	<b>Disciplina:</b> Fenômenos de Transporte
<b>Créditos:</b> 04	<b>Carga Horária:</b> 60 horas
<b>Linha(s) de Pesquisa:</b> Comum a todas as linhas do Programa.	
<b>Prof. Responsável:</b> Sebastião Ribeiro Ferreira	

### 1. EMENTA

Em fenômenos de transporte são ministrados balanços macroscópicos de transporte, no estado estacionário e em regime transiente; balanços microscópicos de transporte no estado estacionário e, balanços microscópicos de transporte em regime transiente. Ocasionalmente podem ser incluídos temas especiais tais como camada limite e métodos numéricos.

### 2. OBJETIVO

Os principais objetivos da disciplina Fenômenos de Transporte são:

- Apresentar os fundamentos de fenômenos de transporte que são importantes para uso em engenharia, assim como em pesquisa.
- Analisar os fenômenos de transporte, as equações envolvidas e resolver problemas, tais como avaliar a concentração de determinado componente em um reator químico do tipo tanque agitado, realizar o projeto básico de trocadores de calor, assim como fornecer subsídios para outras disciplinas. São destacadas resoluções de problemas idealizados, que tenham solução analítica.
- Iniciar a disciplina com noções de fenômenos de transporte, realizando uma pequena revisão de equações de fluxo, as quais estão presentes nos balanços globais, assim como nos diferenciais. A disciplina fenômenos *realmente* começa com os balanços macroscópicas, porque para realizá-los, geralmente, é necessário conhecer menos informações para análise do *volume de controle*, em relação aos balanços microscópicos. A disciplina prossegue com os balanços microscópicos, para os quais se necessitam obter mais informações ou detalhadas informações do volume de controle, são quase sempre mais difíceis de serem resolvidos que os macroscópicos, e são importantes tanto para engenharia assim como para pesquisa.

### 3. CONTEÚDO PROGRAMÁTICO

A seguir é detalhado o programa da disciplina, com base nos capítulos da sua ementa:

Capítulo 1. Balanços macroscópicos de transporte, no estado estacionário e em regime transiente.

- a) (Para alunos adiantados é possível iniciar o capítulo com a dedução das equações macroscópicas da conservação da matéria, energia e quantidade de movimento para um fluido com vários componentes, e simplificá-las para uma mistura binária ou então para um fluido puro etc. Para alunos principiantes é melhor usar a sequência apresentada a seguir.)
- b) Em síntese, são analisados principalmente os capítulos 1, 8, 16, 7, 15 e 22 de Bird et al (1960), 1, 9, 17, 7, 15 e 23 de Bird et al (2002), 4, 5 e 6 de Welty et al (1969).
- c) Nesta etapa é usada a lista de exercícios 1, a qual é fornecida aos alunos e representa, aproximadamente, a sequência das aulas.
- d) Nesta etapa são empregados, em uma aula introdutória, os capítulos 1, 8 e 16 de Bird et al (1960) ou os capítulos 1, 9 e 17 de Bird et al (2002), somente para que os alunos tenham ou revejam a noção de fluxo de matéria, energia e quantidade de movimento. Ou seja, não são vistos os capítulos completos. Posteriormente, são analisados os capítulos 7, 15 e 22 de Bird et al (1960) ou 7, 15 e 23 de Bird et al (2002), que representam os balanços globais ou macroscópicos. Estes balanços são vistos no começo da disciplina porque, em geral, é mais fácil trabalhar com eles, que com os balanços microscópicos. Além disto, quase sempre, é necessário conhecer menos informações para analisar problemas macroscópicos que microscópicos etc.
- e) Os principais temas vistos no capítulo 1 são:

Na aula introdutória são discutidos os fundamentos pedagógicos de resolução de situações-problema, assim como é apresentada uma metodologia de resolução de problemas em fenômenos de transporte. A parte pedagógica está baseada, por exemplo, no livro de Polya (1995), denominado *A arte de resolver problemas*.

Dedução intuitiva de velocidade média do fluido, em um problema de fluxo em um tubo horizontal, que se desdobra em dois tubos.

Obtenção da equação macroscópica da continuidade para um fluido puro, para uma mistura não reativa A, B, para um fluido onde ocorre somente uma reação química e também para um fluido no qual ocorrem várias reações. Resolução de problemas sem e com reação química.

Dedução da equação macroscópica de quantidade de movimento para um fluido puro. Resolução de problema sobre enchimento de uma correia transportadora.

Obtenção da equação macroscópica da energia para um fluido puro. Dedução da equação ideal de Bernoulli e da não ideal de Bernoulli. Resolução de problemas.

Dedução da equação macroscópica do momento angular para um fluido puro.

Dedução de equações de projeto para um trocador de tubos concêntricos. Resolução de problemas.

Resolução de problema de aquecimento de um líquido em um tanque agitado.

Dedução da equação macroscópica da energia para um fluido contendo vários componentes. Resolução de problemas.

Obtenção da equação macroscópica da quantidade de movimento para um fluido contendo vários componentes.

Análise e obtenção da equação macroscópica transiente para a entropia de um meio contínuo (um fluido puro), discutindo sua importância para cálculos de engenharia.

Capítulo 2. Balanços microscópicos de transporte no estado estacionário.

- a) (Para alunos adiantados é possível iniciar o capítulo com a dedução das equações microscópicas da conservação da matéria, energia e quantidade de movimento para um fluido contendo vários componentes, e simplificá-las para uma mistura binária ou

então para um fluido puro etc. Para alunos principiantes é melhor usar a sequência apresentada a seguir.)

- b) Em síntese, são analisados principalmente os capítulos 3, 10, 16 e 18 de Bird et al (1960), 3, 11, 17 e 19 de Bird et al (2002), 8, 9, 16 e 25 de Welty et al (1969).
- c) Nesta etapa é usada a lista de exercícios 2, a qual é fornecida aos alunos e representa aproximadamente a sequência das aulas.
- d) Nesta etapa são analisados balanços diferenciais ou microscópicos, com resolução de problemas no estado estacionário. Empregando alguns fundamentos já apreendidos no capítulo 1 deste programa, são analisados problemas microscópicos, para os quais em geral se necessitam conhecer mais informações ou informações detalhadas, em relação aos problemas macroscópicos. A transformada de Laplace é usada como uma das ferramentas matemáticas básicas para análise de problemas.
- e) Os principais temas vistos no capítulo 2 são:
  - Obtenção da equação microscópica da continuidade para um fluido puro, para um fluido contendo uma mistura não reativa A, B e para um fluido contendo uma mistura reativa A, B.
  - Dedução a equação microscópica da quantidade de movimento para um fluido puro.
  - Obtenção da equação microscópica do momento angular para um fluido puro.
  - Dedução da equação microscópica da energia (isotérmica) para um fluido puro.
  - Resolução do problema de um fluido escoando entre duas placas, as quais se movem devido à ação de uma força na placa superior e outra na placa inferior.
  - Dedução da equação microscópica da continuidade para um meio contínuo contendo mistura com muitos componentes.
  - Dedução a equação microscópica da quantidade de movimento para uma mistura com muitos componentes.
  - Obtenção da equação microscópica da energia para uma mistura com muitos componentes.
  - Dedução da equação microscópica do momento angular para um fluido com muitos componentes.
  - Apresentação da potencialidade da transformada de Laplace para resolver problemas de engenharia, tanto dependentes do tempo  $t$ , assim como de outras variáveis, tais como  $x$ ,  $y$  e  $z$ .
  - Resolução de problemas de difusão com reação química heterogênea, difusão com reação química heterogênea lenta e difusão com reação química homogênea.
  - Resolução de problemas de transferências simultâneas, como, por exemplo, de transferência simultânea de energia e matéria, para notar a influência de um fenômeno (transferência de matéria) no outro (transferência de energia) e vice-versa.

### Capítulo 3. Balanços microscópicos de transporte em regime transiente.

- a) (Aproveitando o conhecimento acumulado nos capítulos 1 e 2, são analisados problemas transientes, especialmente à luz dos fundamentos do capítulo 2, de balanços microscópicos.)
- b) Em síntese, são analisados principalmente os capítulos 3, 10, 16 e 18 de Bird et al (1960), 3, 11, 17 e 19 de Bird et al (2002), 8, 9, 16 e 25 de Welty et al (1969).
- c) Nesta etapa é usada a lista de exercícios 3, a qual é fornecida aos alunos e representa, aproximadamente, a sequência das aulas.
- d) Nesta etapa são analisados balanços diferenciais ou microscópicos, com resolução de problemas em regime transiente. Uma das ferramentas básicas para análise de problemas é a transformada de Laplace.
- e) Os principais temas vistos no capítulo 3 são:
  - Obtenção, usando transformada de Laplace ou outro método adequado, a solução para a segunda equação de difusão de matéria para uma placa, para concentrações conhecidas nas duas superfícies da placa. É obtida uma solução similar para difusão

de calor, assim como para difusão de quantidade de movimento. Nota-se uma similaridade entre as três soluções.

Resolução de um problema similar ao anterior para um meio semi-infinito.

Resolução de problemas em placa com condição de contorno convectiva.

Resolução de problemas de objeto semi-infinito com condição de contorno convectiva.

Resolução de problemas de difusão com reação química, tanto em placa assim como em meio semi-infinito.

Resolução de problemas com absorção gasosa e com reação química.

Resolução de problemas transientes em esferas.

Resolução de problemas transientes em cilindros.

Análise e obtenção da equação microscópica transiente para a entropia de um meio contínuo (um fluido puro), discutindo sua importância para cálculos de engenharia.

#### **4. PROCEDIMENTOS DE ENSINO**

A disciplina é ministrada da seguinte maneira:

- a) As aulas são realizadas usando quadro branco ou verde ou negro, em forma de aula expositiva, com auxílio de multimídia, para apresentação de figuras, esquemas ou tabelas, relativas a fenômenos de transporte.
- b) As aulas são conduzidas em uma sequência aproximadamente igual à de cada lista de exercícios, correspondente a cada um dos capítulos desenvolvidos na disciplina.
- c) Geralmente é ministrada uma parte de teoria e em seguida ou concomitantemente é resolvido um problema relativo ao tema tratado na teoria.

#### **5. FORMAS E CRITÉRIOS DE AVALIAÇÃO**

São usados os seguintes critérios, formas de avaliação e recomendações:

- a) Aconselham-se 40 horas semanais de estudos para a disciplina.
- b) Geralmente são realizadas três avaliações escritas, cada uma correspondente a um capítulo da ementa.
- c) É permitida a consulta a três livros durante as avaliações, podendo estar incluídos, por exemplo, livros didáticos de fenômenos de transporte, matemática e física. Mas é vedada a consulta a materiais que sejam somente de soluções de problemas de fenômenos de transporte, também conhecidos como manuais de soluções, incluindo livros, suas cópias eletrônicas, manuscritas, fotocópias ou material de qualquer índole contendo as citadas soluções.
- d) Em cada avaliação é permitida a consulta a duas folhas de anotações, que podem ser escritas na frente e no verso, podendo ser manuscritas ou digitadas ou fotocopiadas em folha A4, com tamanho aproximadamente equivalente às letras arial 12 ou times roman, com margens de pelo menos 2 cm.
- e) São vedados nas avaliações os usos de calculadoras, Internet, aparelhos celulares, computadores, microcomputadores, sistemas com câmeras, similares ou não similares, nem CD, DVD etc.
- f) As listas de exercícios são fornecidas como auxiliares de estudo para o aluno, mas não são atribuídas notas para sua resolução.
- g) Os seminários foram eliminados da disciplina, devido ao número cada vez maior de alunos matriculados e ao exíguo tempo disponível para tais atividades, já que a quantidade de matéria a ser ministrada é muito grande.

## 6. BIBLIOGRAFIA

São aconselhados como livros básicos de texto para a disciplina, os de Bird et al. (1960, 2002), Slattery (1999) e Welty et al. (1969), que são apresentados a seguir. A farta lista de livros de matemática, física, reatores e termodinâmica são importantes auxiliares para o desenvolvimento da disciplina fenômenos de transporte, e podem ser escolhidos à vontade pelos alunos.

ABRAMOWITZ, M., STEGUN, I.A. *Handbook of mathematical functions*. Dover, 1973.

Alonso, M. Finn, E. *Physics*, Addison Westley Longman, 1992.

Amundson, N.R. *Mathematical methods in chemical engineering, matrices and their application*, Prentice-Hall, 1966.

Aris, R. *Vectors, tensors, and the basic equations of fluid mechanics*, Prentice-Hall, 1962.

Arpaci, V. *Conduction heat transfer*, Addison-Wesley, 1966.

Astarita, G. *Mass transfer with chemical reaction*, Elsevier, 1967.

Batchelor, G.K. *An introduction to fluid mechanics*, Cambridge University Press, 1967.

Belfiore, L.A. *Transport phenomena for chemical reactor design*, Wiley, 2003.

Bird, R.B., Steward, W.E., Lightfoot, E. *Transport phenomena*, Wiley, 1960.

Bird, R.B., Steward, W.E., Lightfoot, E. *Transport phenomena*, Wiley, 2002.

Boas, M.L. *Mathematical methods in physical science*, Wiley, 1983.

Callen, H.B. *Thermodynamics and an introduction to thermostatistics*, Wiley, 1985.

Carslaw, H.S., Jaeger, J.C. *Conduction of heat in solids*, Oxford University Press, 1980.

Churcill, R.V. *Introduction to complex variables and applications*, McGraw-Hill, 1948.

Churcill, R.V. *Operational mathematics*, McGraw Hill, 1958.

Crank, J. *The mathematics of diffusion*, Clarendon Press, 1976.

de Groot, S., Mazur, P. *Nonequilibrium thermodynamics*, North Holland, Amesterdam, 1962.

Eckert, E.R.G, Drake, R.M.Jr. *Heat and mass transfer*, McGraw-Hill, 1959.

Erdélyi, A., Magnus, W., Oberhettinger, F., Tricomi, F.G. *Tables of integral transforms*, McGraw-Hill, 1954.

Froment, G.F., Bischoff, K.B. *Chemical reactor analysis and design*, Wiley, 1990.

Geankoplis, C.J. *Transport processes and separation process principles*, Prentice Hall PTR, 2003.

Greenberg, M.D. Advanced engineering mathematics, Prentice-Hall, 1998.

Halliday, D., Resnick, R., Walker, J. Fundamentals of physics, Wiley, 2001.

Hildebrand, F.B. Advanced calculus for applications, Prentice-Hall, 1962.

Hirschfelder, J.O., Curtiss, C.F., Bird, R.B. Molecular theory of gases and liquids, Wiley, 1964.

Hougen, O.A., Watson, K.M., Ragatz, R.A. Chemical process principles, Wiley, 1959.

Jakob, M. Heat transfer, Wiley, 1949.

Jenson, V.G., Jeffreys, G.V. Mathematical methods in chemical engineering, Academic Press, 1977.

Jonker, H., Hanjalic, K., Tummars, M.J., Kenjeres S. Analysis and modelling of physical transport phenomena, VSSD, 2009.

Jost, W. Diffusion, Academic Press, 1952.

Kennard, E.H. Kinetic theory of gases, McGraw-Hill, 1938.

King, C.J. Separation processes, McGraw-Hill, 1971.

Knudsen, M. The kinetics theory of gases, Methuen, 1950.

Kreyszig, E. Matemática Superior, LTC, 1985.

Lamb, H. Hydrodynamics, Cambridge University Press, 1895.

Landau, L.D., Lifshitz, E.M. Fluid mechanics, Pergamon Press, 1987.

Levi, M. The mathematical mechanic: using physical reasoning to solve problems, Princeton University Press, 2009.

Luikov, A.V. Analytical heat diffusion theory, Academic Press, 1968.

Marshall, W.R.Jr., Pigford, R.L. Applications of differential equation of chemical engineering problems, University of Delaware Press, 1947.

McCabe, W.L., Smith, J.C., Harriot. P. Unit operations of chemical engineering, McGraw-Hill, 2000.

Mickley, A.S., Sherwood, T.K., Reid, C.E. Applied mathematics in chemical engineering, McGrawHill, 1957.

Modell, M., Reid, R.C. Thermodynamics and Its applications in chemical engineering, Prentice-Hall, 1983.

Morse, P.M., Feshbach, H. Methods of theoretical physics, McGraw-Hill, 1953.

Polya, G. A arte de resolver problemas, Interciências, 1995.

Prager, W. Mechanics of continua, Ginn, Boston, 1961.

Reid, R.C., Prausnitz, J.M., Sherwood, T.K. The properties of gases and liquids, McGraw-Hill, 1977.

Rice, R.G., Do, D.D. Applied mathematics and modeling for chemical engineers, Wiley, 1995.

Sandler, S.I. Chemical and engineering thermodynamics, Wiley, 1989.

Schiesser, W.E., Silebi, C.A. Computational transport phenomena: numerical methods for the solution of transport problems, Cambridge University Press, 1997.

Schlichting, h. Boundary layer theory, McGraw-Hill, 1979.

Sherwood, T.K., Pigford, R.L., Wilke, C.R. Mass transfer, McGraw-Hill, 1975.

Slattery, J.C. Advanced transport phenomena, Cambridge University Press, 1999.

Sneddon, I.N. Elements of partial differential equation, Dover, 1996.

Sneddon, I.N. Use of integral transform, McGraw-Hill, 1972.

Souza-Santos, M.L. Analytical and approximate methods in transport phenomena, CRC Press, 2008.

Spiegel, M.R., Lipschutz, S, Liu, J. Mathematical handbook of formulas and tables, McGraw-Hill, 2009.

Tipler, P.A. Physics, Worth, 1982.

Tosun, I. Modeling in transport phenomena, Elsevier, 2007.

Treybal, R.E. Mass transfer operations, McGraw-Hill, 1980.

Truesdell, C. The elements of continuum mechanics, Springer-Verlag, 1966.

van Wylen, G.J., Sonntag, R.E. Fundamentals of classical thermodynamics, Wiley, 1965.

Walas, S.M. Modeling with differential equations in chemical engineering, Butterworth-Heinemann, 1991.

Welty, J.R., Wickes, C.E., Wilson, R.E. Fundamentals of momentum, heat, and mass transfer, Wiley, 1969.

Whitaker, S. Introduction to fluid mechanics, Prentice-Hall, 1968.

Whitaker, S. Fundamental of heat transfer, Krieger Publishing, 1983.

Wylie, C.R., Barrett, L.C. Advanced engineering mathematics, McGraw-Hill, 1995.