

Fenômenos de Transporte

Conceitos e Definições

Prof. Rodolfo Rodrigues
Universidade Federal do Pampa

BA000200 – Fenômenos de Transporte
Campus Bagé

6 e 7 de março de 2017



Informações de Contato

Rodolfo Rodrigues, Dr. Eng.

Professor de Engenharia Química

Sala: **2108 (Sala dos professores 1)**

E-mail: **rodolfo@unipampa.edu.br**

Website: **rodolfo.chengineer.com**



Introdução



O que são os Fenômenos de Transporte?

- Os **Fenômenos de Transporte** é um ramo da **Física** que interpõe muitas áreas da **Ciência Aplicada**;
- O assunto inclui 3 tópicos intimamente relacionados:
 - **Mecânica dos fluidos** que envolve o transporte de **momento**;
 - **Transferência de calor** que envolve o transporte de **energia**;
 - **Transferência de massa** que envolve o transporte de **massa** de várias espécies químicas.



O que são os Fenômenos de Transporte?

- Na prática, esses 3 fenômenos ocorrem simultaneamente em problemas de **Engenharia**.
- Esses fenômenos podem ser estudados em 3 níveis:
 - Nível macroscópico;
 - Nível microscópico;
 - Nível molecular.
- Na Engenharia é usual se limitar aos níveis macro- e microscópico.



O que são os Fenômenos de Transporte?

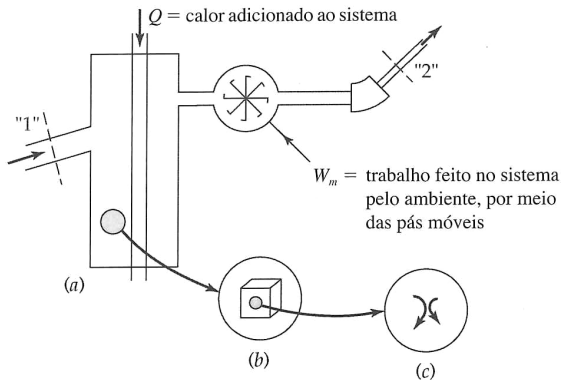


Figura 1: (a) Sistema de escoamento a **nível macroscópico** envolvendo ar (N_2 e O_2); (b) região a **nível microscópica** dentro do sistema macroscópico, contendo N_2 e O_2 , que estão escoando; (c) colisão entre uma molécula de N_2 e uma molécula de O_2 , a **nível molecular**.

Componente Curricular



Componente Curricular

Informações Básicas

BA000200 - Fenômenos de Transporte

■ **Cursos:**

- Engenharia de Computação (EC11),
- Engenharia de Energia (EE11) e
- Engenharia de Produção (EP11).

■ **Docentes:**

- Diurno: Rodolfo Rodrigues e Tânia R. de Souza;
- Noturno: Rodolfo Rodrigues e M. Alejandra Liendo;



Componente Curricular

Informações Básicas

BA000200 - Fenômenos de Transporte

■ **Pré-requisito:**

- BA010903 - Física II;
- BA000118 - Equações Diferenciais

■ **Carga horária (60 h):**

- Teórica: 45 h (3 créditos);
- Prática: 15 h (1 crédito)



Componente Curricular

Ementa

- 1 Conceitos e definições fundamentais.
- 2 Estática e cinemática dos fluidos.
- 3 Balanços globais de massa e energia.
- 4 Transferência de calor por condução e por convecção.
- 5 Introdução à transferência de massa e analogia com a transferência de calor.



Componente Curricular

Objetivo Geral

- **Capacitar** o discente a que desenvolva conhecimentos básicos sobre fenômenos de transporte aplicados à Engenharia, de modo que o habilite a **compreender** os princípios fundamentais de tais fenômenos, bem como a **desenvolver** raciocínio criativo no sentido de encontrar a melhor solução para um dado problema. Além disso, a formação de um profissional seguro, crítico e criativo para **acompanhar e projetar** sistemas que envolvam conceitos de fenômenos de transporte.



Componente Curricular

Objetivos Específicos

- **Reconhecer** os princípios do escoamento de fluidos, transferência de calor, transferência de massa e os diversos fenômenos envolvidos nesses processos, bem como estabelecer as relações desses fenômenos e as suas leis com a Engenharia;
- **Aplicar** os conhecimentos de escoamento de fluidos, transferência de calor e transferência de massa que foram obtidos em estudos de caso;
- **Relacionar** entre si os diversos conceitos a serem abordados, de modo que possam ser reconhecidos e aplicados;

Componente Curricular

Objetivos Específicos

- **Relacionar** os fundamentos teóricos da disciplina em experimentos de Laboratório;
- **Fornecer** condições para que o discente adquira características com o intuito de trabalhar em equipe e de desenvolver o raciocínio criativo no sentido de encontrar a melhor solução para um dado problema.



Componente Curricular

Metodologia

- Serão ministradas aulas expositivo-dialogadas empregando quadro-branco e projetor multimídia.
- Os assuntos serão abordados a partir de exemplos e exercícios.
 - A resolução dos exercícios propostos necessitarão de **calculadora científica** e régua (em alguns casos).
- Serão realizadas aulas práticas relacionadas a parte teórica abordada.
 - Durante as práticas é obrigatório o uso de **jaleco** por todos os presentes.

Componente Curricular

Avaliação do Processo de Ensino-Aprendizagem

- A avaliação será realizada através de 3 (três) provas (**P1**, **P2** e **P3**) e atividades extraclases envolvendo conteúdos teóricos e práticos.
- A nota final (**NF**) é o resultado de:

$$NF = (0,8 * MP) + (0,2 * MA)$$

- **MP** corresponde a média aritmética das notas das provas **P1** a **P3** e
- **MA** é a média aritmética das notas das atividades extraclases

Componente Curricular

Avaliação do Processo de Ensino-Aprendizagem

- Se **NF** for **maior ou igual a 6,0** o discente será considerado **aprovado**.
- Se **NF** for **menor que 6,0** o discente será considerado **reprovado**.
- Para os discentes que não alcançarem a NF maior ou igual a 6,0 será realizada uma **prova substitutiva (PS)**.
 - A **PS** incluirá um conteúdo parcial da disciplina e substituirá a **menor nota** de **P1, P2** ou **P3**.
- Além disso, para que o discente seja aprovado ele deverá ter no **mínimo 75% de frequência** nas aulas.



Componente Curricular

Atividades de Recuperação Preventiva

- Durante o semestre serão propostas atividades com o objetivo de avaliar o processo de aprendizagem dos discentes e identificar as deficiências dos mesmos.
- Estas atividades incluem a resolução de lista de exercícios em sala de aula/extraclasses e o acompanhamento das práticas de laboratório a partir de roteiros com atividades extraclasses.
- A partir do diagnóstico obtido com as atividades poderão ser propostos atendimentos de reforço em horários previamente acordados.



Componente Curricular

Bibliografia Básica

- 1 BRAGA FILHO, W. *Fenômenos de Transporte para Engenharia*. Rio de Janeiro: LTC, 2006. (14 exemplares)
- 2 **BRUNETTI, F. *Mecânica dos Fluidos*. 2. ed. rev. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2008.** (07 exemplares)
- 3 ÇENGEL, Y. A.; CIMBALA, J. M. *Mecânica dos Fluidos: Fundamentos e Aplicações*. São Paulo: McGraw-Hill, 2007. (21 exemplares)
- 4 **GEANKOPLIS, C. J. *Transport Processes and Separation Process Principles (Includes Unit Operations)*. 4. ed. Upper Saddle River: Prentice Hall, 2003.** (03 exemplares)

Componente Curricular

Bibliografia Básica

- 5 **INCROPERA, F. P.; DeWITT, D. P.; BERGMAN, T. L.; LAVINE, A. S. *Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa*. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2008. (28 exemplares)**
- 6 **KREITH, F. *Princípios de Transferência de Calor*. São Paulo: Pioneira, 2003. (22 exemplares)**
- 7 **LIVI, C. P. *Fundamentos de Fenômenos de Transporte: Um Texto para Cursos Básicos*. Rio de Janeiro: LTC, 2004. (08 exemplares)**
- 8 **POTTER, M. C.; WIGGERT, D. C. *Mecânica dos Fluidos*. São Paulo: Cengage Learning, 2009. (26 exemplares)**

Componente Curricular

Bibliografia Complementar

- 1 BEJAN, A. *Transferência de Calor*. São Paulo: Edgard Blucher, 2004. (02 exemplares)
- 2 **BIRD, R. B.; STEWART, W. E.; LIGHTFOOT, E. N.** ***Fenômenos de Transporte*. 2. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2004. (06 exemplares)**
- 3 FOX, R. W.; McDONALD, A. T.; PRITCHARD, P. J. *Introdução à Mecânica dos Fluidos*. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2006. (13 exemplares)
- 4 HOLMAN, J. P. *Heat Transfer*. 9. ed. New York: McGraw-Hill, 2002. (06 exemplares)

Componente Curricular

Bibliografia Complementar

- 5 MIDDLEMAN, S. *An Introduction to Mass and Heat Transfer: Principles of Analysis and Design*. Hoboken: John Wiley & Sons, 1998. (06 exemplares)
- 6 MORAN, M. J.; SHAPIRO, H. N.; MUNSON, B. R.; DeWITT, D. P. *Introdução à Engenharia de Sistemas Térmicos: Termodinâmica, Mecânica dos Fluidos e Transferência de Calor*. São Paulo: LTC, 2005. (08 exemplares)
- 7 ROMA, W. N. L. *Fenômenos de Transporte para Engenharia*. 2. ed. São Carlos: RiMa, 2006. (10 exemplares)

Componente Curricular

Bibliografia Complementar

- 8 WELTY, J. R.; WICKS, C. E.; RORRER, G. L.; WILSON, R. E. *Fundamentals of Momentum, Heat and Mass Transfer*. 5. ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2008. (03 exemplares)



Componente Curricular

Conteúdo Programático

1 Conceitos e Definições

- Sistemas de unidades
- Definição de fluido
- Propriedades dos fluidos

2 Estática dos fluidos

- Fluidos incompressíveis e compressíveis
- Pressão em um ponto
- Escalas e medidores de pressão
- Equação manométrica



Componente Curricular

Conteúdo Programático

3 Cinemática dos fluidos

- Classificação dos escoamentos
 - Regime permanente e regime transiente
 - Regime laminar e turbulento
- Vazão e velocidade média

4 Balanços globais de massa e energia

- Balanço global de massa e equação da continuidade
- Balanço global de energia
 - Balanço de energia mecânica
 - Equação de Bernoulli
- Estimativa da perda de carga no escoamento de fluidos
- Medidores de escoamento de fluidos



Componente Curricular

Conteúdo Programático

5 Transferência de calor

- Introdução e mecanismos de transferência de calor
- Lei de Fourier e condutividade térmica
- Equação geral da condução
- Condução unidimensional em regime permanente
 - Placa plana e cilindro
- Transferência de calor por convecção
 - Coeficiente global de transferência de calor
 - Sistemas com condução e convecção de calor: Aletas
 - Convecção forçada no interior de tubos

6 Transferência de massa e analogia com a transf. de calor



Componente Curricular

Conteúdo Programático: Aulas Práticas

Mecânica dos fluidos

- 1 Determinação de massa específica e viscosidade de fluidos
- 2 Medidores de vazão e velocidade para líquidos e gases

Transferência de calor

- 3 Transferência de calor por condução em barras
- 4 Transferência de calor por convecção forçada



Conceitos e Definições



Conceitos e Definições Fundamentais

Sistema de Unidades Comuns

Tabela 1: Sistemas de unidades comuns.

Sistema	Comprimento	Massa	Tempo	Força
SI	m	kg	s	N
CGS	cm	g	s	dyn
MKS	m	kg	s	kgf
FPS	ft	lb	s	lbf



Conceitos e Definições Fundamentais

Unidades de Base do SI

Tabela 2: Unidades de base do SI.

Grandeza	Unidade
Comprimento	m
Massa	kg
Tempo	s
Temperatura	K
Quantidade de matéria	kgmol (ou kmol)

Conceitos e Definições Fundamentais

Prefixos SI

Tabela 3: Prefixos SI.

Prefixo	Símbolo	Fator de multiplicação
tera	T	10^{+12}
giga	G	10^{+9}
mega	M	10^{+6}
quilo	k	10^{+3}
centi	c	10^{-2}
mili	m	10^{-3}
micro	μ	10^{-6}
nano	n	10^{-9}
pico	p	10^{-12}

Conceitos e Definições Fundamentais

Unidades de Grandezas no SI

Tabela 4: Unidades de grandezas no SI.

Grandeza	Unidade
Unidades geométricas/mecânicas	
Área	m^2
Velocidade	m/s
Massa específica	kg/m^3
Volume específico	m^3/kg
Força	$N (=kg.m/s^2)$
Pressão	$Pa (=kg/(m.s^2))$
Viscosidade	$Pa.s (=kg/(m.s))$
Trabalho, energia	$J (=kg.m^2/s^2)$
Potência, taxa de energia	$W (=J/s=kg.m^2/s^3)$

Conceitos e Definições Fundamentais

Unidades de Grandezas no SI

Tabela 5: Unidades de grandezas no SI (continuação).

Grandeza	Unidade
Unidades geométricas/mecânicas	
Fluxo de energia	W/m^2 ($=kg/s^3$)
Unidades térmicas	
Temperatura	K
Capacidade calorífica	J/K
Capacidade calorífica específica	J/(kg.K)
Condutividade térmica	W/(m.K)
Fluxo de calor	W/m^2
Coeficiente de transf. de calor	W/($m^2.K$)

Conceitos e Definições Fundamentais

Escalas de Temperatura

- Escalas relativas: °C (Celsius) e °F (Fahrenheit);
- Escalas absolutas: K (Kelvin) e R (Rankine).



Conceitos e Definições Fundamentais

Definição de Fluido

- *“Fluido é uma substância sem uma forma própria que assume o formato do recipiente”.*
- *“Fluido é uma substância que submetida a uma força tangencial constante não atinge uma nova configuração de equilíbrio”.*



Conceitos e Definições Fundamentais

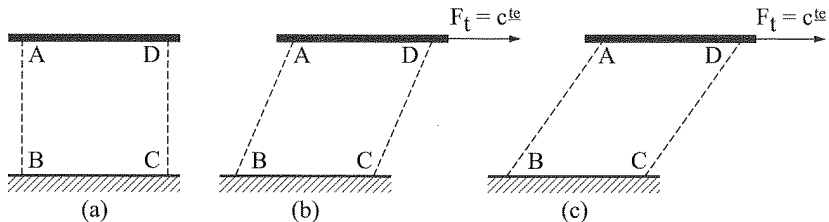


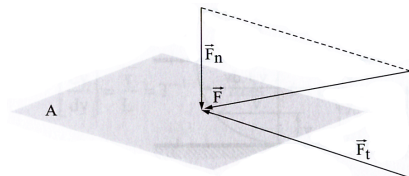
Figura 2: Experimento de um fluido preso entre 2 placas planas, uma inferior fixa e outro superior solicitada por uma força tangencial F_t . Este experimento é ilustrado pela sequência de figuras (a), (b) e (c).

Fonte: Brunetti (2008).

Conceitos e Definições Fundamentais

Tensão de Cisalhamento

- Uma força \vec{F} aplicada a uma área A pode ser decomposta em uma força normal, \vec{F}_n , e tangencial, \vec{F}_t , a superfície.



Fonte: Brunetti (2008).

- Define-se tensão de cisalhamento média como:

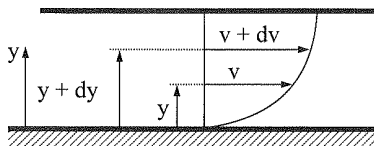
$$\tau = \frac{F_t}{A}$$



Conceitos e Definições Fundamentais

Lei de Newton da Viscosidade

- Em muitos fluidos a tensão de cisalhamento, τ , é proporcional ao gradiente de velocidade.



Fonte: Brunetti (2008).

- Disso traduz-se a lei de Newton da viscosidade:

$$\tau \propto \frac{dv}{dt} \quad \text{ou} \quad \frac{\tau}{dv/dy} = \text{constante} \quad (2)$$

- Fluidos que seguem esta lei são ditos fluidos newtonianos.

Conceitos e Definições Fundamentais

Lei de Newton da Viscosidade

- Esta lei impõe uma proporcionalidade entre a tensão de cisalhamento e o gradiente de velocidade:

$$\tau = \mu \frac{dv}{dt} \quad (3)$$

- “Viscosidade, μ , é a propriedade que indica a maior ou a menor dificuldade de o fluido escoar (escorrer)”.



Conceitos e Definições Fundamentais

Propriedades Físicas dos Fluidos

- Massa específica ou densidade absoluta ou densidade, ρ :

$$\rho = \frac{m}{V} \quad \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right] \quad (4)$$

onde m é massa e V é volume.

- Densidade relativa, d ;
- Volume específico, v :

$$v = \frac{V}{m} = \frac{1}{\rho} \quad \left[\frac{\text{m}^3}{\text{kg}} \right] \quad (5)$$

Conceitos e Definições Fundamentais

Propriedades Físicas dos Fluidos

- Para um gás perfeito (ideal) pode-se determinar ρ por:

$$\rho = \frac{p \cdot Mw}{R \cdot T} \quad (6)$$

onde Mw é peso molecular [kg/kgmol]

R é constante dos gases [8314,34 J/(kgmol.K)]



Conceitos e Definições Fundamentais

Propriedades Físicas dos Fluidos

- Peso específico, γ :

$$\gamma = \frac{mg}{V} = \rho g \quad \left[\frac{\text{N}}{\text{m}^3} \right] \quad (7)$$

onde g é aceleração da gravidade.

- Viscosidade absoluta ou viscosidade dinâmica ou viscosidade, μ [Pa.s];
- Viscosidade cinemática, ν :

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad \left[\frac{\text{m}^2}{\text{s}} \right] \quad (8)$$

Conceitos e Definições Fundamentais

Vazão e Fluxo de Matéria

Tabela 6: Variáveis de processo vazão e fluxo.

Variável	Definição	Unidade
Vazão mássica, Q_m	m/t	kg/s
Vazão volumétrica, Q_v	$V/t = Q_m/\rho$	m^3/s
Fluxo mássico	Q_m/A	$kg/(m^2s)$
Fluxo volumétrico	Q_v/A	$m^3/(m^2s) = m/s$

