

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS**  
**Engenharia Química - Instituto de Química**

**Lista de Exercícios 1 - Fenômenos de Transporte 2**

Prof. Dyrney Araújo dos Santos

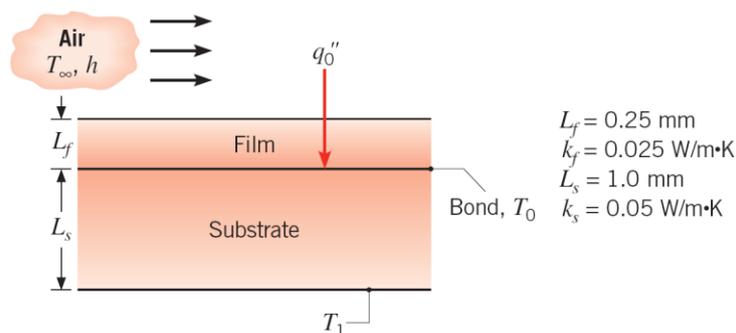
**Exercício 1:** Um cilindro com raio  $r_0$ , comprimento  $L$  e condutividade térmica  $k$  está imerso em um fluido com coeficiente de transferência de calor por convecção  $h$  e temperatura desconhecida  $T_\infty$ . Em certo instante de tempo, a distribuição de temperaturas no cilindro é  $T(r) = a + br^2$ , na qual  $a$  e  $b$  são constantes. Obtenha expressões para a taxa de transferência em  $r_0$  e para a temperatura do fluido.

**Exercício 2:** Observa-se que a distribuição de temperaturas, em estado estacionário, no interior de uma parede unidimensional com condutividade térmica de  $50 \text{ W/(m.K)}$  e espessura de  $50 \text{ mm}$  tem a forma  $T(^{\circ}\text{C}) = a + bx^2$ , onde  $a = 200^{\circ}\text{C}$ ,  $b = -2000^{\circ}\text{C/m}^2$  e  $x$  está em metros.

- a) Qual a taxa volumétrica de geração de calor na parede?
- b) Determine os fluxos térmicos nas duas superfícies da parede. De que modo esses fluxos térmicos estão relacionados com a taxa de geração de calor?

**Exercício 3:** O vidro traseiro de um automóvel é desembaçado pela fixação de um aquecedor em película, fino e transparente, sobre a sua superfície interna. Aquecendo eletricamente este elemento, um fluxo térmico uniforme pode ser estabelecido na superfície interna. Para um vidro com  $4 \text{ mm}$  de espessura, determine a potência elétrica, por unidade de área do vidro, necessária para manter uma temperatura na superfície interna de  $15^{\circ}\text{C}$ , quando a temperatura do ar no interior do carro e o coeficiente convectivo são, respectivamente,  $25^{\circ}\text{C}$  e  $10 \text{ W/(m}^2\cdot\text{K)}$ , enquanto a temperatura e o coeficiente convectivo no ar exterior (ambiente) são, respectivamente,  $-10^{\circ}\text{C}$  e  $65 \text{ W/(m}^2\cdot\text{K)}$ . Considere a condutividade térmica do vidro igual a  $1,4 \text{ W/(m.K)}$ .

**Exercício 4:** Em um processo de fabricação, uma película transparente está sendo fixada sobre um substrato conforme mostrado no esboço. Para curar a adesão a uma temperatura  $T_0$  uma fonte radiante é usada para fornecer um fluxo térmico ( $\text{W/m}^2$ ), que é totalmente absorvido na superfície da fixação. A parte interior do substrato é mantida a  $T_1$ , enquanto a superfície livre da película está exposta ao ar a  $T_\infty$ , com coeficiente de transferência de calor por convecção  $h$ .



a) Mostre o circuito térmico que representa a situação de transferência de calor em regime estacionário. Certifique-se de que sejam identificados todos os elementos, nós e taxas de transferência de calor. Deixe na forma simbólica.

b) Suponha as seguintes condições:  $T_{\infty} = 20^{\circ}\text{C}$ ,  $h = 50 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$  e  $T_1 = 30^{\circ}\text{C}$ . Calcule o fluxo térmico  $q_0$  que é necessário para manter a temperatura da superfície de fixação a  $T_0 = 60^{\circ}\text{C}$ .

**Exercício 5:** Considere uma tubulação de Cobre de 100 m de comprimento que transporta vapor de água à  $110^{\circ}\text{C}$ , mas exposto ao meio ambiente ( $25^{\circ}\text{C}$ ), com as seguintes características técnicas.

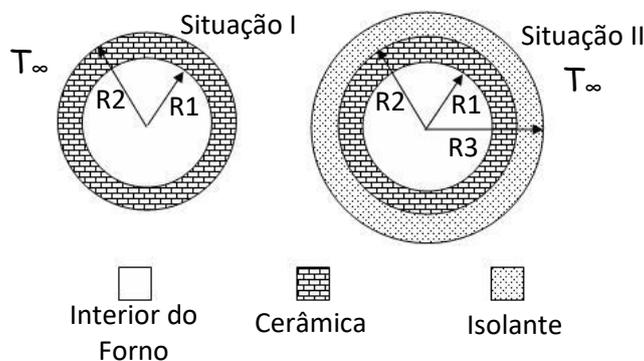
Condutividade térmica do cobre:	450 W/m.K
Coefficiente de película interno à tubulação:	100 W/m <sup>2</sup> K
Diâmetro interno do tubo:	10 cm
Diâmetro externo do tubo:	12 cm
Coefficiente de película externo à tubulação:	0,225 W/m <sup>2</sup> K
Espessura do isolante:	10 cm
Condutividade térmica do isolante:	0,045 W/m.K
Custo Energético:	$1.10^{-5} \text{R}\$/\text{J}$

a) Calcule a taxa de calor perdida na ausência do isolamento.

b) Calcule a taxa de calor perdida na presença do isolamento.

c) Calcule a “economia mensal” trazida pelo isolante. Comente o resultado utilizando o conceito de raio crítico de isolamento.

**Exercício 6:** Uma panificadora de Goiânia – GO queima GLP (gás liquefeito de petróleo) em seu forno industrial (cilíndrico) que atualmente está sem isolamento (Situação I). Você foi contratado pelo gerente para fazer uma avaliação técnica sobre a possibilidade de utilizar um isolante térmico (Situação II) para diminuir os custos com o aquecimento do forno, nas seguintes condições:



Dados Técnicos acerca do forno industrial:

Comprimento do Forno:	10 m
Raio Interno do Forno:	1,5 m
Raio Externo do Forno:	2,0 m
Espessura do isolante:	0,3 m
Temperatura da Parede Interna do Forno:	250 °C
Temperatura Ambiente externo ao Forno:	25 °C
Condutividade Térmica da Cerâmica:	0,050 W/(m.K)
Coefficiente Convectivo de Troca Térmica Externo:	0,400 W/(m <sup>2</sup> .K)

De acordo com os dados técnicos apresentados anteriormente:

- Avalie a taxa de calor que o forno está perdendo atualmente para o ambiente externo, ou seja, sem isolamento térmico (Situação I).
- Avalie a condutividade térmica do isolante ( $k_i$ ) necessária para que a taxa de calor seja reduzida em 40% (situação II).

**Exercício 7:** Considere um tubo sólido longo, totalmente isolado no raio externo  $r_2$  e resfriado no raio interno  $r_1$ , com termo de “geração” (neste caso consumo) uniforme de calor  $\dot{Q}$  (W/m<sup>3</sup>) no interior do sólido.

- Obtenha a solução geral para a distribuição de temperaturas no tubo.
- Em uma aplicação prática, um limite poderia ser fixado para a temperatura máxima permitida na superfície isolada ( $r = r_2$ ). Especificando esse limite como  $T_{s,2}$ , identifique condições de contorno apropriadas que poderiam ser usadas para determinar as constantes arbitrárias que aparecem na solução geral. Determine essas constantes e a forma correspondente da distribuição de temperaturas.
- Determine a taxa de retirada de calor por unidade de comprimento do tubo.
- Se o refrigerante estiver disponível a uma temperatura  $T_\infty$ , obtenha uma expressão para o coeficiente convectivo que deveria ser mantido na superfície interna para permitir a operação nas condições especificadas de  $T_{s,2}$  e  $\dot{Q}$ .

**Exercício 8:** Um aquecedor elétrico delgado é enrolado ao redor da superfície externa de um longo tubo cilíndrico cuja superfície interna é mantida a uma temperatura de 5°C. A parede do tubo possui raios interno e externo iguais a 25 e 75 mm, respectivamente, e uma condutividade térmica de 10W/(m.K). A resistência térmica de contato entre o aquecedor e a superfície externa do tubo (por unidade de comprimento do tubo) é  $R_{t,c} = 0,01$  m.K/W. A superfície externa do aquecedor está exposta a um fluido com temperatura de -10°C, com um coeficiente convectivo de 100 W/(m<sup>2</sup>.K). Determine a potência do aquecedor, por unidade de comprimento do tubo, requerida para mantê-lo a 25°C.

**Exercício 9:** Um tubo de aço inoxidável (com condutividade térmica de 14,2 W/(m.K)) usado para transportar um fluido farmacêutico refrigerado tem um diâmetro interno de 36 mm e uma espessura de parede de 2 mm. O fluido farmacêutico e o ar ambiente estão, respectivamente, nas temperaturas de 6°C e 23°C, respectivamente, enquanto os coeficientes convectivos interno e externo são 400W/(m<sup>2</sup>.K) e 6W/(m<sup>2</sup>.K), respectivamente.

- a) Qual é o ganho de calor por unidade de comprimento do tubo?
- b) Qual é o ganho de calor por unidade de comprimento, se uma camada de 10 mm de isolante de silicato de cálcio, com condutividade térmica de  $0,050 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ , for colocada sobre a superfície externa do tubo?

**Exercício 10:** Uma sonda criocirúrgica esférica pode ser introduzida em tecidos doentes com o propósito de congelar e dessa maneira destruir o tecido. Considere uma sonda com 3 mm de diâmetro cuja superfície é mantida a  $-30^\circ\text{C}$  quando introduzida em um tecido que se encontra a  $37^\circ\text{C}$ . Uma camada esférica de tecido congelado se forma ao redor da sonda, com uma temperatura de  $0^\circ\text{C}$  na fronteira (interface) entre os tecidos congelado e normal. Se a condutividade térmica do tecido congelado é de aproximadamente  $1,5 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$  e a transferência de calor na fronteira entre as fases pode ser caracterizada por um coeficiente convectivo efetivo de  $50 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ , qual é a espessura da camada de tecido congelado?

**Exercício 11:** Um vaso esférico, usado como reator para produzir fármacos, tem uma parede de aço inoxidável, com condutividade térmica de  $17 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ , com 10 mm de espessura e diâmetro interno de 1 m. A superfície externa do vaso é exposta ao ar ambiente a  $25^\circ\text{C}$ . Nesta superfície, um coeficiente convectivo de  $6 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$  pode ser admitido.

- a) Durante uma operação em regime estacionário, uma temperatura da superfície interna de  $50^\circ\text{C}$  é mantida pela geração de energia no interior do reator. Qual é a perda de calor no reator?
- b) Se uma camada de 20 mm de isolante de fibra de vidro, com condutividade térmica de  $k_{\text{iso}} = 0,040 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ , for aplicada no exterior do vaso e a taxa de geração de energia térmica permanecer inalterada, qual será a temperatura da superfície interna do vaso?

**Exercício 12:** Uma parede plana, com espessura de 0,1 m e condutividade térmica de  $25 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ , apresenta uma taxa volumétrica de “geração” de calor uniforme de  $0,3 \text{ MW}/\text{m}^3$  e está isolada em um de seus lados, enquanto o outro encontra-se exposto a um fluido a  $92^\circ\text{C}$ . O coeficiente de transferência de calor por convecção entre a parede e o fluido é de  $500 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ . Determine a temperatura máxima na parede.

**Exercício 13:** Uma corrente elétrica de 700 A flui através de um cabo de aço inoxidável de diâmetro de 5 mm e resistência elétrica de  $6 \cdot 10^{-4} \Omega/\text{m}$ . O cabo encontra-se em um ambiente que está a uma temperatura de  $30^\circ\text{C}$ , e o coeficiente total de transferência de calor, associado à convecção entre o cabo e o ambiente é  $25 \text{ W}/\text{m}^2\cdot^\circ\text{C}$ . Pergunta-se:

- a) se o cabo estiver desencapado, qual será a temperatura na sua superfície?
- b) há preocupação em relação à capacidade do isolamento em suportar temperaturas elevadas. Qual a espessura do isolamento ( $0,5 \text{ W}/\text{m}\cdot\text{K}$ ) que produzirá o menor valor de temperatura na camada de isolamento? Qual é este valor de temperatura?

**Exercício 14:** Uma aleta piniforme, com comprimento de 40 mm e diâmetro de 2 mm, é fabricada com uma liga de alumínio, com condutividade térmica de  $140 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ .

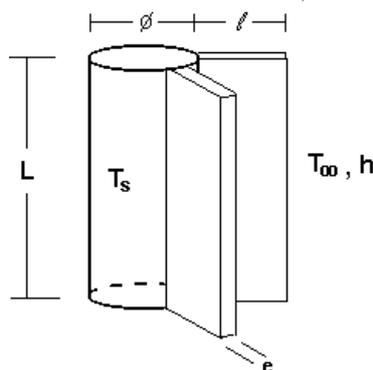
a) Determine a taxa de transferência de calor na aleta considerando a temperatura da sua base de  $50^{\circ}\text{C}$ , a temperatura do ambiente de  $25^{\circ}\text{C}$ , o coeficiente de transferência por convecção de  $1000 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$  e condição de extremidade adiabática.

b) Um engenheiro sugere que, com a manutenção da extremidade da aleta a uma temperatura baixa, a taxa de transferência de calor na aleta pode ser aumentada. Para uma temperatura na extremidade da aleta de  $0^{\circ}\text{C}$ , determine a nova taxa de transferência de calor na aleta. Qual a porcentagem de aumento na taxa de calor perdida com esta nova condição? As outras condições são iguais às da parte (a).

**Exercício 15:** Aletas anulares de alumínio de  $1,5 \text{ cm}$  de comprimento e  $1 \text{ mm}$  de espessura são colocadas sobre um tubo de  $2,5 \text{ cm}$  de diâmetro para “dissipar” calor. A temperatura da superfície do tubo é de  $170^{\circ}\text{C}$  enquanto a temperatura ambiente é de  $25^{\circ}\text{C}$ . Calcular a perda de calor por aleta considerando o coeficiente de transferência por convecção de  $130 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot^{\circ}\text{C})$  e a condutividade térmica do alumínio de  $200 \text{ W}/(\text{m}\cdot^{\circ}\text{C})$ .

**Exercício 16:** Determine o aumento percentual na transferência de calor associado à fixação de aletas, com condutividade térmica de  $240 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ , de perfil retangular a uma parede plana. As aletas têm  $50 \text{ mm}$  de comprimento;  $0,5 \text{ mm}$  de espessura e são igualmente espaçadas a uma distância de  $4 \text{ mm}$  ( $250$  aletas/m). O coeficiente convectivo associado à parede sem aletas é de  $40 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ , enquanto o resultante após a colocação das aletas é de  $30 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ .

**Exercício 17:** Um tubo de diâmetro  $2 \text{ in}$  e  $1,2 \text{ m}$  de comprimento transporta um fluido a  $150^{\circ}\text{C}$ , com coeficiente de película de  $1800 \text{ kcal}/(\text{h}\cdot\text{m}^2\cdot^{\circ}\text{C})$ . Para facilitar a troca de calor com o ar ambiente foi sugerido o aletamento do tubo, com aletas longitudinais de  $2 \text{ mm}$  de espessura e  $19 \text{ mm}$  de altura, montadas com espaçamento aproximado de  $6 \text{ mm}$  (na base). O tubo e as aletas de aço tem condutividade térmica igual a  $40 \text{ kcal}/(\text{h}\cdot\text{m}\cdot^{\circ}\text{C})$ . O ar ambiente está a  $28^{\circ}\text{C}$ , com coeficiente de película  $15 \text{ kcal}/(\text{h}\cdot\text{m}^2\cdot^{\circ}\text{C})$ . Desprezando a resistência térmica à convecção do fluido no interior do tubo, pede-se (OBS: o esquema abaixo está ilustrando apenas duas de todas as aletas):



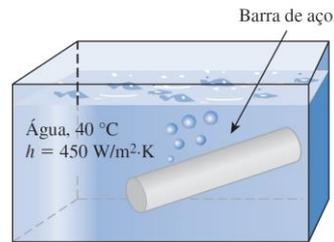
a) o calor transferido pelo tubo sem as aletas.

b) o número de aletas.

c) o calor transferido pelo tubo aletado.

d) O aumento percentual da taxa de calor após a fixação das aletas.

**Exercício 18:** Em um processo de endurecimento rápido, barras de aço com massa específica de  $7,832 \text{ kg/m}^3$ , calor específico de  $434 \text{ J/(kg.K)}$  e condutividade térmica de  $63,9 \text{ W/(m.K)}$ , são aquecidas em um forno a  $850^\circ\text{C}$  e depois resfriadas em banho de água até uma temperatura média de  $95^\circ\text{C}$ . O banho de água está a uma temperatura uniforme de  $40^\circ\text{C}$  e seu coeficiente de transferência de calor por convecção é de  $450 \text{ W/(m}^2\text{.K)}$ . Considere que as barras de aço têm diâmetro de  $50 \text{ mm}$  e comprimento de  $2 \text{ m}$ . Determine o tempo necessário para arrefecer a barra de aço de  $850^\circ\text{C}$  a  $95^\circ\text{C}$  no banho de água e a quantidade total de calor transferido à água durante o endurecimento de uma barra. Justifique a utilização do método de cálculo.



**Exercício 19:** Considere uma esfera de ferro de  $1 \text{ in}$  de diâmetro com as seguintes propriedades físicas: condutividade térmica de  $30 \text{ Btu/(h.ft.}^\circ\text{F)}$ , calor específico de  $0,12 \text{ Btu/(lbm.}^\circ\text{F)}$  e massa específica de  $436 \text{ lbm/ft}^3$ . A esfera se encontra inicialmente à temperatura de  $270^\circ\text{F}$ . Se a esfera for subitamente colocada no interior de um fluido que se encontra a uma temperatura de  $70^\circ\text{F}$ , quanto o tempo é necessário para que o centro da esfera atinja a temperatura de  $128^\circ\text{F}$ ? Considere o coeficiente de película igual a  $365 \text{ Btu/(h.ft.}^\circ\text{F)}$ .