

## **ROTEIRO - EXPERIÊNCIA 3: TRANSFERÊNCIA DE CALOR**

### 1. OBJETIVO

Este experimento tem como objetivos ilustrar, discutir e analisar:

- interações na forma de calor e trabalho.
- velocidades de processos/transformações.

### 2. MATERIAL E EQUIPAMENTOS

Este experimento está ligado ao estudo da reação química em fase líquida que será feito no próximo laboratório (hidrólise do anidrido acético). Esta reação exotérmica será realizada em um béquer, sob agitação, que poderá ser isolado termicamente ou não. O intuito deste experimento é avaliar a perda de calor do béquer para o ar ambiente, estudando os efeitos da agitação do meio, do uso de isolamento térmico e da presença de ventilação na taxa de transporte de energia.

- ✓ Reagentes: água.
- ✓ Material: béqueres, provetas, copos de isopor.
- ✓ Equipamentos: agitador magnético, aquecedor elétrico, ventilador.
- ✓ Instrumentos: termômetros, cronômetros.

### 3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Um béquer representará um reator químico de mistura e combinações diferentes de velocidade de agitação, de uso de isolamento térmico e de ventilação serão testadas (uma condição por grupo).

- Em uma proveta, medir um volume de água conforme quantidade especificada pelo professor.
- Adicionar a água ao béquer e aquecer até cerca de 80 °C.
- Medir a temperatura do ar ambiente ( $T_{ar}$ ).
- Transferir o béquer para o agitador magnético. Caso o experimento de seu grupo seja feito com isolamento térmico, colocar o béquer em um copo de isopor tampado. Ajustar a velocidade de rotação do agitador magnético em valor especificado pelo professor. Ligar o ventilador, caso indicado.
- Aguardar a temperatura lida no termômetro começar a cair.
- Disparar o cronômetro e registrar a temperatura da água a cada 1 ou 2 min e acompanhar a sua evolução.

## 4. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 4.1. Calor específico

O calor específico a pressão constante da água líquida pode ser calculado pela seguinte correlação polinomial usando os parâmetros na Tabela 1:

$$C_p = a + b.T + c.T^2 + d.T^3$$

As unidades para esta correlação são:  $C_p$  em J/mol.K e  $T$  em K e ela é válida para o intervalo  $273 \leq T \leq 373$  K. A Tabela 1 apresenta também a massa molecular da água ( $MM$ ) e a sua densidade a  $25^\circ\text{C}$  ( $\rho$ ).

Tabela 1: Parâmetros para cálculo de  $C_p$ , massa molecular e densidade

Substância	$a$	$b$	$c$	$d$	$MM$ (g/mol)	$\rho_{25^\circ\text{C}}$ (kg/m <sup>3</sup> )
Água (líquida)	$9,21 \times 10^1$	$-4,00 \times 10^{-2}$	$-2,21 \times 10^{-4}$	$5,35 \times 10^{-7}$	18,0	1000

Quando a temperatura do sistema muda, seu calor específico também sofre alteração. Quando não ocorre mudança de fase, pode-se estimar o valor médio de  $C_p$  como a média aritmética entre os valores calculados de  $C_p$  para os estados inicial e final do sistema. Alternativamente pode-se adotar uma temperatura média do sistema e calcular  $C_p$  nesta temperatura.

### 4.2. Resistência térmica

Energia térmica é aquela armazenada na agitação de átomos, moléculas e partículas. Ela está associada à temperatura absoluta do sistema e é ausente na condição de 0 K.

Pela segunda lei da termodinâmica, energia térmica espontaneamente flui de uma região de alta temperatura ( $T_q$ ) para uma região de baixa temperatura ( $T_f$ ). Esta transferência de energia é denominada ‘calor’.

Quando dois sistemas com temperaturas diferentes trocam calor, há um potencial térmico entre eles que induz a transferência de energia. Este potencial térmico é dado pela diferença entre suas temperaturas médias dos sistemas:  $\Delta T = (T_q - T_f)$ .

Para fluir de uma região até outra, a energia térmica pode atravessar diferentes meios, sendo transportada por diferentes mecanismos (condução, convecção, radiação). Cada um destes meios oferece uma resistência térmica ao transporte de calor.

Sabe-se que na condução e na convecção a taxa de transferência de energia térmica ou calor ( $q$ , J/s ou W) é diretamente proporcional ao potencial térmico. Desta forma, pode-se definir a resistência térmica ( $R_T$ , K/W) da seguinte forma:

$$q = \frac{\Delta T}{R_T}$$

Quando menor for a resistência térmica, mais intensa é a troca de calor.

### 4.3. Conservação de energia térmica

Energia se conserva, de acordo com a primeira lei da termodinâmica. Neste laboratório estuda-se a transferência de energia térmica de água quente (sistema) para o ar ambiente (vizinhança). A quantidade de energia térmica no sistema ( $E$ , J) diminui de acordo com a taxa de retirada (calor  $q$ , J/s). Esta equação de conservação pode ser escrita como:

$$\frac{dE}{dt} = -q$$

O conceito de derivada será discutido na disciplina de cálculo. Neste momento considere que  $dt$  é uma variação infinitesimal (muito pequena) de tempo:

$$\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta E}{\Delta t} = \frac{dE}{dt}$$

O termo  $dE/dt$  na equação de conservação representa a taxa de acúmulo ou de variação de energia térmica no sistema. Neste problema ela é negativa (sistema está perdendo energia). A taxa de retirada de energia é  $q = \Delta T/R_T$  conforme item 4.2.

Como o calor é trocado pelo sistema a pressão constante e sem mudança de fase, a variação de energia equivale a uma variação de entalpia:  $\Delta E = \Delta H = m \cdot Cp \cdot \Delta T$ , em que  $Cp$  é o calor específico médio do sistema,  $m$  é a massa do sistema e  $\Delta T$  é a variação de temperatura do sistema com o tempo. Considerando que  $dE = dH = m \cdot Cp \cdot dT$ , a equação de conservação fica:

$$\frac{dT}{dt} = -\frac{(T - T_{ar})}{R_T \cdot m \cdot Cp}$$

A resolução deste tipo de equação diferencial será estudada mais adiante em Cálculo (ver Apêndice). Para este problema, a solução é:

$$\ln\left(\frac{T - T_{ar}}{T_i - T_{ar}}\right) = -\frac{1}{R_T \cdot m \cdot Cp} \cdot t$$

em que  $T_i$  é a temperatura do sistema no instante inicial ( $t = 0$ ) e  $\ln()$  é a função logaritmo natural, inversa da função exponencial  $\exp()$ .

Com essa equação pode-se calcular a temperatura média do sistema em qualquer instante de tempo  $t$ . Para um tempo muito longo tem-se  $T \cong T_{ar}$ , ou seja, o sistema atingiu o equilíbrio térmico com a vizinhança.

A Figura 2 ilustra curvas obtidas por esta equação para valores altos ou baixos de resistência térmica  $R_T$ . Quanto menor a resistência, mais rapidamente a temperatura do sistema cai.

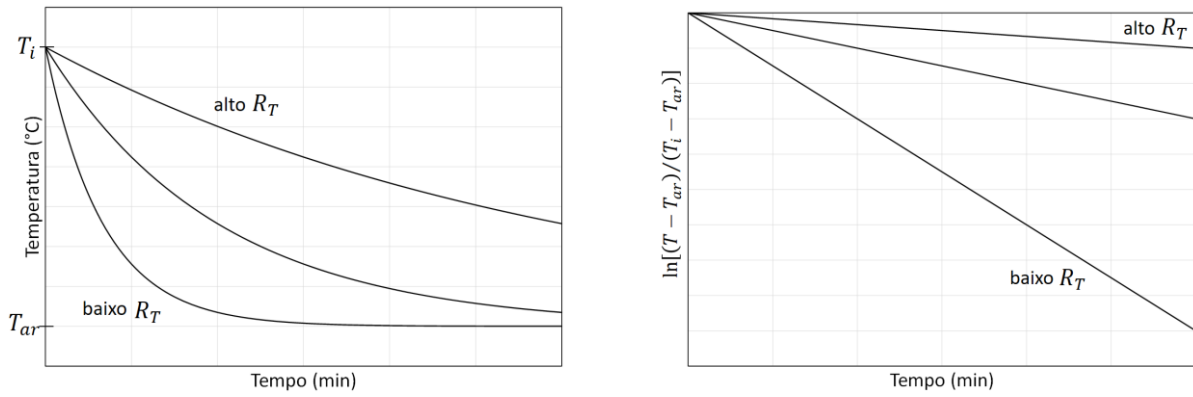


Figura 2: Variação de temperatura do sistema perdendo calor para o ar ambiente em relação à resistência térmica ( $R_T$ ).

## 5. BIBLIOGRAFIA

Atkins, P.; Jones, L. *Princípios de Química: Questionando a vida moderna e o meio ambiente*. 2ª ed., Porto Alegre: Bookman, 2001.

Hirota, W.H., Rodrigues, R.B., Sayer, C., Giudici, R. Hydrolysis of acetic anhydride: Non-adiabatic calorimetric determination of kinetics and heat exchange, *Chem. Eng. Sci.*, v.65, p3849-3858, 2010.

Incropera, F.P.; Dewitt, D.P.; Bergman, T.L.; Lavine, A.S. *Fundamentos de transferência de calor e da massa*. Rio de Janeiro: LTC, 2008.

### Apêndice: Solução da equação diferencial

Equação diferencial: 
$$\frac{dT}{dt} = -\frac{(T - T_{ar})}{R_T \cdot m \cdot Cp}$$
 Variáveis:  $T$  e  $t$

Definição de parâmetro: 
$$\alpha = \frac{1}{R_T \cdot m \cdot Cp}$$
  $\alpha$  é constante

Troca de variáveis: 
$$\theta = (T - T_{ar})$$

Regra da cadeia: 
$$\frac{dT}{dt} = \frac{dT}{d\theta} \cdot \frac{d\theta}{dt} = 1 \cdot \frac{d\theta}{dt}$$
 pois  $T = \theta + T_{ar}$

A equação diferencial fica: 
$$\frac{d\theta}{dt} = -\alpha \cdot \theta$$

Integração de  $t = 0$  até  $t$ : 
$$\frac{1}{\theta} d\theta = -\alpha dt \quad \rightarrow$$

$$\rightarrow \int_{\theta_i}^{\theta} \frac{1}{\theta} d\theta = - \int_0^t \alpha dt \quad \rightarrow \quad [\ln(\theta) - \ln(\theta_i)] = -[\alpha \cdot t - \alpha \cdot 0]$$

$$\rightarrow \ln\left(\frac{\theta}{\theta_i}\right) = -\alpha \cdot t \quad \rightarrow \quad \ln\left(\frac{T - T_{ar}}{T_i - T_{ar}}\right) = -\frac{1}{R_T \cdot m \cdot Cp} \cdot t$$

ou seja 
$$T = T_{ar} + (T_i - T_{ar}) \cdot \exp\left(-\frac{1}{R_T \cdot m \cdot Cp} \cdot t\right)$$