

*Wilton Jorge*  
Depto. de Ciências Físicas – UFU  
Uberlândia – MG

## **I. Fundamentos teóricos**

### **I.1 Introdução**

O calor é uma modalidade de energia em trânsito que se transfere do corpo de temperatura mais alta para o corpo de temperatura mais baixa.

A transmissão de calor se verifica quando, entre dois sistemas ou duas regiões de um mesmo sistema, existe uma diferença de temperatura. Como diferenças de temperatura são comuns na natureza, os fenômenos de fluxo de calor são bastante freqüentes.

A transmissão de calor pode se dar por três modos: condução, convecção e radiação. Embora predomine um dos modos de transmissão, normalmente eles estão associados.

Na condução, a energia é transmitida por meio de impactos moleculares, sem um apreciável deslocamento das moléculas, e pelo deslocamento dos elétrons livres das regiões de alta temperatura para as de baixa temperatura. É a transmissão característica nos sólidos.

Na convecção, característica dos fluidos, a transferência de energia se dá por meio do movimento do fluido.

Em contraste com os mecanismos de condução e convecção, nos quais a energia é transferida através de um meio material, o calor pode também ser transferido, através da radiação, em regiões onde existe o vácuo. Na radiação, a energia é transferida através de ondas eletromagnéticas. Para temperaturas próximas do ambiente, a transmissão por radiação pode ser desprezada.

Quando o fluxo de calor é constante, ou seja, não depende do tempo e a temperatura de cada ponto permanece constante, o regime de transmissão de calor é chamado de permanente ou estacionário. O fluxo de calor é variável ou transitório quando a temperatura, em vários pontos do sistema, muda com o tempo. Nessa condição, a energia interna do sistema não permanece constante. Os

problemas de fluxo de calor variável são mais complexos do que os de fluxo permanente e habitualmente são resolvidos por métodos aproximados.

### I.2 Símbolos utilizados

$\phi$  = fluxo de calor  
 $h$  = coeficiente de película  
 $A$  = área  
 $T$  = temperatura  
 $m$  = massa  
 $E$  = capacidade térmica  
 $Q$  = quantidade de calor  
 $K$  = condutividade térmica  
 $c$  = calor específico  
 $x$  = distância

### I.3 Equação de Fourier

A relação básica para a transmissão de calor é a equação de Fourier. O fluxo de calor unidimensional através de um dado elemento é fornecido pela equação diferencial:

$$\phi = \frac{dQ}{dt} = -KA \frac{dT}{dx}$$

na qual:

- $K$  é a condutividade térmica do material. Ela depende fundamentalmente da natureza do material, do seu estado de agregação e da temperatura;
- $A$  é a área da seção através da qual o calor flui, área esta medida perpendicularmente à direção do fluxo;
- $dT/dx$  é o gradiente de temperatura na seção, isto é, a razão da variação da temperatura com a distância ( $x$ ) na direção do fluxo de calor.

O sinal negativo foi introduzido na equação para indicar que a transmissão de calor se dá no sentido dos  $dx$  positivos e no sentido das temperaturas decrescentes.

#### I.4 Camada limite

Quando um fluido escoar ao longo de uma superfície, as partículas na vizinhança dessa superfície são desaceleradas em virtude das forças viscosas. As partículas fluidas adjacentes à superfície colam-se a ela e têm velocidades nulas em relação ao contorno. O fluido contido nessa região é chamado de camada limite hidrodinâmica. Na vizinhança imediata da parede, o calor somente pode fluir por condução porque as partículas fluidas são estacionárias em relação à parede. Assim, todo o calor transmitido para o ambiente por convecção passará antes pela camada limite. A equação que nos dará o fluxo pela camada limite será:

$$\phi = -\frac{K}{x} A \Delta T = -h A \Delta T \cdot$$

A razão  $K/x$  ( $h$ ) é chamada coeficiente de película e seu valor depende das propriedades físicas e da velocidade do fluido, da forma, da natureza e da rugosidade da superfície e do tipo de escoamento.

O coeficiente de película ( $h$ ) mede o efeito global da transmissão de calor por convecção. Em função do grande número de variáveis e da pequena espessura ( $x$ ) da camada limite, o coeficiente da película é de difícil determinação. Os valores encontrados em tabelas foram determinados associando experimentações com a análise dimensional.

#### I.5 Esfriamento de um sistema

O esfriamento de um corpo em um ambiente qualquer se dá em um regime de transmissão de calor variável. Se a diferença entre a temperatura do corpo e do ambiente não for muito grande e o coeficiente de película não sofrer grandes variações, o problema pode ser resolvido da seguinte forma:

Suponhamos um corpo a uma temperatura inicial  $T_i$  e o ambiente a uma temperatura  $T_a$ . O corpo estando a uma temperatura maior do que a ambiente cederá a este uma quantidade de calor sensível. Em um intervalo de tempo infinitesimal  $dt$ , a quantidade de calor cedida será:

$$dQ = -mcdT;$$

fazendo

$$E = mc, dQ = -Edt.$$

O calor cedido pelo corpo será transmitido ao ambiente por convecção. No intervalo de tempo  $dt$ , a quantidade de calor transmitida ao ambiente será dada pela expressão:

$$\phi = \frac{dQ}{dt} = -hA\Delta T,$$

$$dQ = -hA(T_a - T)dt = hA(T - T_a)dt.$$

Fazendo um balanço energético no intervalo de tempo  $dt$ , temos:

Energia cedida pelo corpo = Energia transmitida ao ambiente,

$$mc dT = -E dT = hA(T - T_a)dt,$$

$$\frac{dT}{T - T_a} = -\frac{hA}{E} dt.$$

Quando  $t = 0$ ,  $T = T_i$ .

Integrando a expressão anterior, temos:

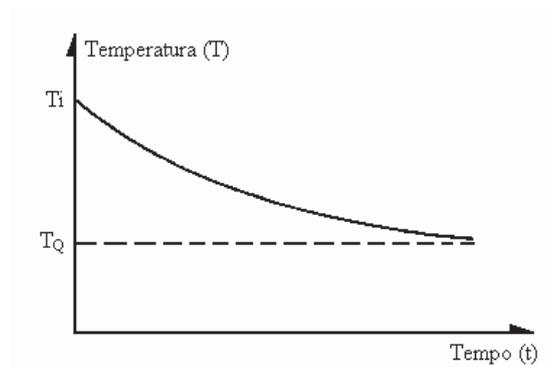
$$\ln \frac{T - T_a}{T_i - T_a} = -\frac{hA}{E} t.$$

Fazendo  $z = hA/E$ :

$$T - T_a = (T_i - T_a)e^{-zt}.$$

A última equação descreve a variação da temperatura do corpo com o tempo, durante o esfriamento do corpo. Ela é semelhante à equação da voltagem com o tempo em um sistema elétrico, constando de resistor associado com um condensador que esteja descarregando.

O gráfico representativo da equação é:



A quantidade  $mc/ha$  é chamada de constante de tempo do corpo por ter dimensões de tempo. Observe que, após um tempo  $t = mc/ha$ , a diferença de temperatura cai para 36,8% do seu valor inicial, e tende a zero, exponencialmente.

## II. Procedimento experimental

Fixe um termômetro com o bulbo imerso em uma certa quantidade de água contida em um frasco.

Aqueça o conjunto até a temperatura de 50°C. Cesse o aquecimento. Quando a coluna de mercúrio do termômetro começar a descer, anote as temperaturas e os respectivos tempos para atingi-las.

Construa um gráfico usando os valores coletados das temperaturas e dos tempos. Compare o seu gráfico com o previsto pela teoria.

Vamos alterar as condições de contorno e verificar as suas influências no experimento.

Aqueça certa quantidade de água até a temperatura de 50°C, utilizando um termômetro para medi-la.

A seguir, retire o termômetro de dentro da água e anote as temperaturas e os respectivos tempos.

Repita o experimento algumas vezes, anotando os valores para as mesmas temperaturas e os respectivos tempos.

Construa um gráfico com os valores médios obtidos.

Compare os dois gráficos e tire as conclusões sobre as influências do meio.

Faça uma analogia entre os experimentos realizados e o de descarga de um condensador.

## III. Referências bibliográficas

1. HOLMAN, J. P. **Transferência de calor**. São Paulo: McGraw-Hill, 1983.
2. KREITH, F. **Princípios da transmissão de calor**. São Paulo: Edgard Blücher, 1973.
3. McKELVRY, J. P.; GROTCHE, H. **Física**. São Paulo: Harper & Row, 1979. v. 2.
4. RESNICK, R.; HALLIDAY, D. **Física**. 3 ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 1980. v. 2.
5. ZEMANSKY, W. M. **Calor e termodinâmica**. Rio de Janeiro: Guanabara Dois, 1978.