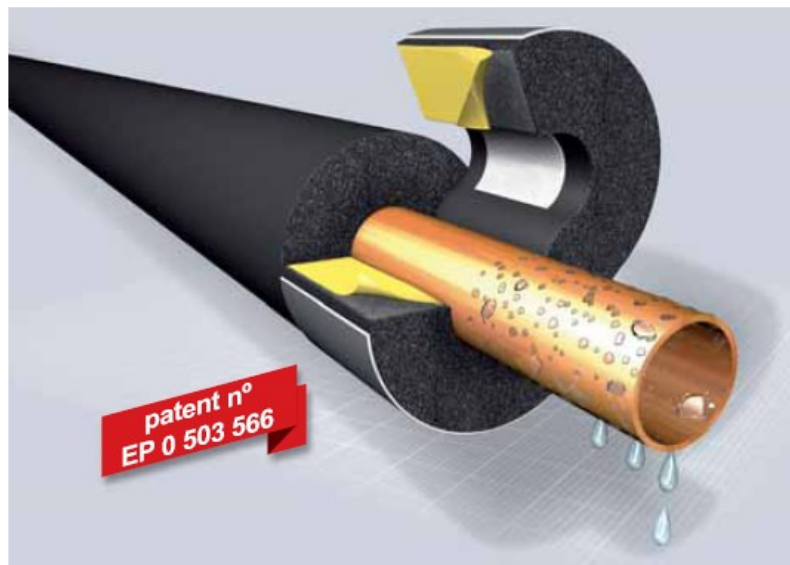


INSTITUTO FEDERAL
SANTA CATARINA

INSTITUTO FEDERAL DE SANTA
CATARINA

CAMPUS SÃO JOSÉ

ÁREA TÉCNICA DE REFRIGERAÇÃO
E CONDICIONAMENTO DE AR



TRANSFERÊNCIA DE CALOR (TCL)

Volume II – Isolamento Térmico

Curso Técnico – Módulo 2

Prof. Carlos Boabaid Neto, M.Eng.

2009

1. DEFINIÇÃO

O isolamento térmico consiste em proteger as superfícies aquecidas, como a parede de um forno, ou resfriadas, como a parede de um refrigerador, através da aplicação de materiais de baixa condutividade térmica (k).

OBJETIVO → minimizar os fluxos de calor, quer por problemas técnicos (segurança, evitar condensação), quer por problemas econômicos (economizar energia), ou ainda por critério de conforto térmico.

FUNDAMENTO → normalmente, os materiais isolantes são porosos, e aprisionam o ar ($k = 0,02 \text{ kcal/h.m.}^{\circ}\text{C}$, quando parado) nas pequenas cavidades do material sólido, evitando sua movimentação, e impedindo a convecção. Por isto, materiais porosos com poros pequenos e paredes finas de materiais de baixo valor de k, ilustrados na Figura 1, resultam em bons isolantes térmicos.

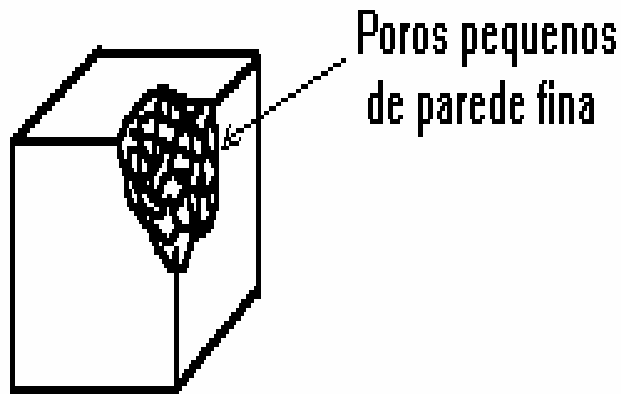


Figura 1

2. CARACTERÍSTICAS DE UM BOM ISOLANTE

- **baixo valor de k**

Quanto menor o k, menor será a espessura necessária para uma mesma capacidade isolante. Apenas a título ilustrativo, a Figura 2 mostra algumas espessuras (em [mm]) de alguns materiais, baseados na mesma capacidade de isolamento.

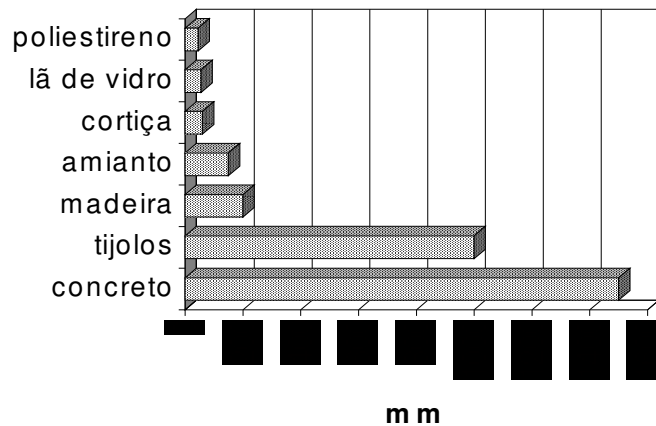


Figura 2

- **baixa capacidade higroscópica**

Capacidade higroscópica é a propriedade do material relacionada à absorção de água. Água, ao penetrar nos poros, substitui o ar, aumentando o valor de k . Além disto, quando se tratar de isolamento de ambientes cuja temperatura seja inferior a 10°C , existe a possibilidade da água absorvida passar para o estado sólido com conseqüente aumento de volume, o que causará ruptura das paredes isolantes.

- **baixa massa específica**

Em certas aplicações, um bom isolante precisa ser leve, de modo a não sobrecarregar desnecessariamente o aparelho isolado, principalmente no caso de aviões, barcos, automóveis, ou ainda no caso de forros ou outras partes de fábricas e edifícios onde o material terá de ficar suspenso.

- **resistência mecânica compatível com o uso**

De maneira geral, quanto maior a resistência mecânica do material isolante, maior será o número de casos que ele poderá resolver, além do que apresentará menor fragilidade, o que é conveniente nos processos de transportes e no tocante à facilidade de montagem.

- **incombustibilidade, estabilidade química, outros**

Uma série de outras características serão necessárias, dependendo da aplicação a que o material isolante se destina.

3. MATERIAIS ISOLANTES BÁSICOS

A maioria dos isolantes usados industrialmente são feitos dos seguintes materiais : amianto, carbonato de magnésio, sílica diatomácea, vermiculita, lã de rocha, lã de vidro, cortiça, plásticos expandidos, aglomerados de fibras vegetais, silicato de cálcio.

O **amianto** é um mineral que possui uma estrutura fibrosa, do qual se obtém fibras individuais. O amianto de boa qualidade deve possuir fibras longas e finas e além disto, infusibilidade, resistência e flexibilidade.

O **carbonato de magnésio** é obtido do mineral "dolomita", e deve sua baixa condutividade ao grande número de microscópicas células de ar que contém.

A **sílica diatomácea** consiste de pequenos animais marinhos cuja carapaça se depositou no fundo dos lagos e mares.

A **vermiculita** é uma "mica" que possui a propriedade de se dilatar em um só sentido durante o aquecimento. O ar aprisionado em bolsas entre as camadas de mica torna este material um bom isolante térmico.

A **lã de rocha** ou **lã mineral**, assim como a **lã de vidro**, são obtidas fundindo minerais de sílica em um forno e vertendo a massa fundida em um jato de vapor a grande velocidade. O produto resultante, parecido com a lã, é quimicamente inerte e incombustível, e apresenta baixa condutividade térmica devido aos espaços com ar entre as fibras.

A **cortiça** é proveniente de uma casca de uma árvore e apresenta uma estrutura celular com ar encerrado entre as células.

Os **plásticos expandidos** são essencialmente poliestireno expandido e poliuretano expandido, que são produzidos destas matérias plásticas, que durante a fabricação sofrem uma expansão com formação de bolhas internas microscópicas.

4. FORMAS DOS ISOLANTES



Os isolantes térmicos podem ser adquiridos em diversas formas, dependendo da constituição e da finalidade à qual se destinam. Alguns exemplos comumente encontrados são :

◆ calhas

São aplicadas sobre paredes cilíndricas, e fabricadas a partir de cortiça, plásticos expandidos, fibra de vidro impregnadas de resinas fenólicas, etc.



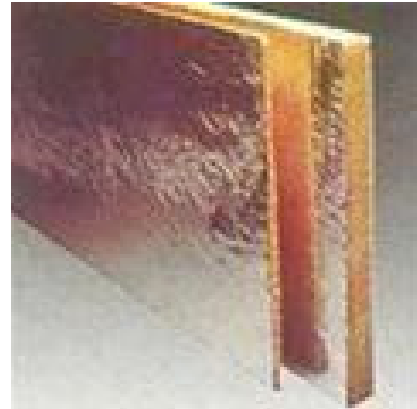
◆ mantas

São aplicadas no isolamento de superfícies planas, curvas ou irregulares, como é o caso de fornos, tubulações de grande diâmetro, etc.



◆ placas

São normalmente aplicadas no isolamento de superfícies planas, como é o caso de câmaras frigoríficas, estufas, fogões, etc.



◆ segmentos

São normalmente aplicados em tubulações de grande diâmetro, tanques e equipamentos cilíndricos de grandes dimensões, onde é difícil aplicar calhas pré-moldadas. Em geral, são feitos a partir de silicato de cálcio ou lã de vidro. Oferecem grande durabilidade e podem ser utilizados tanto em ambientes internos quanto externos



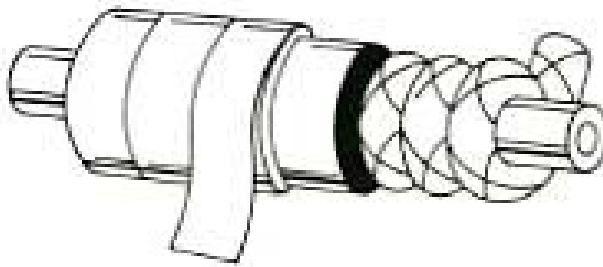
◆ flocos

São normalmente aplicados para isolar locais de difícil acesso, ou ainda na fabricação de mantas costuradas com telas metálicas. São fabricados a partir de lãs de vidro e de rocha.



◆ cordas

São aplicadas no isolamento de registros, válvulas, juntas, cabeçotes, etc, principalmente em locais sujeitos a desmontagem para manutenção periódica.



◆ papel

O papel de fibra de cerâmica é refratário, apresenta baixo peso, e é processado a partir de uma mistura de fibras de sílica e alumina de alta pureza em uma folha uniforme, altamente flexível. É fácil de manusear e pode ser cortado rapidamente por uma faca, tesourão ou matrizes de corte de aço comum. Sua flexibilidade permite que seja dobrado e enrolado para adaptar-se às configurações mais complexas.



◆ pulverizados ou granulados

São aplicados no isolamento de superfícies com configurações irregulares, ou ainda no preenchimento de vãos de difícil acesso.



◆ pré-formados (moldados)

São peças especiais fabricadas conforme especificações e desenhos solicitados pelo cliente, podendo apresentar uma variedade de formatos.



5. APLICAÇÃO DE ISOLANTES

- isolamento de equipamentos ou dependências cuja temperatura deve ser mantida inferior à temperatura ambiente local.

Exemplo: câmaras frigoríficas, refrigeradores, trocadores de calor usando fluidos a baixa temperatura, etc.

principal problema ⇔ migração de vapores

O fenômeno da migração de vapores em isolamento de superfícies resfriadas é resultante de uma depressão interna causada pelas baixas temperaturas e pode ser esquematizado assim :

redução da temp. interna → depressão → tendência a equalização → migração do ar + umidade → elevação do valor de k (redução da capacidade isolante) e possíveis danos físicos ao isolamento.

A aplicação de "barreiras de vapor" consiste em usar materiais impermeáveis para evitar que vapores d'água atinjam o isolamento. Um tipo de barreira de vapor, comumente utilizado para proteger o isolamento de tubulações que transportam fluidos em baixas temperaturas, consiste de folhas de alumínio (normalmente com 0,15 mm)

coladas com adesivo especial no sentido longitudinal e com uma superposição de 5 cm no sentido transversal para completa vedação.

- isolamento de equipamentos ou dependências cuja temperatura deve ser mantida superior à temperatura ambiente local

Exemplo : estufas, fornos, tubulações de vapor, trocadores de calor usando fluidos a altas temperaturas.

Principal problema \Rightarrow dilatações provocadas pelas altas temperaturas.

Neste caso, não existe o problema da migração de vapores, porém devem ser escolhidos materiais que possam suportar as temperaturas de trabalho.

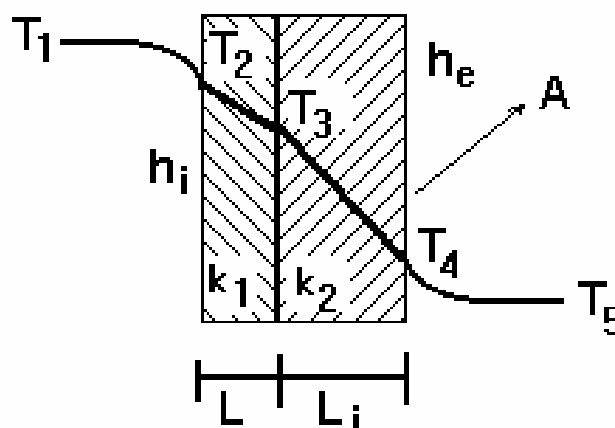
6. CÁLCULO DE ESPESSURAS DE ISOLANTES

O cálculo leva em conta as limitações de temperatura e questões econômicas:

- Limitação da Temperatura

Tanto externamente (caso de um forno no qual a temperatura externa não deve ser maior do aquela que causa queimaduras nos trabalhadores) quanto interiormente (como em um recinto onde devemos ter a temperatura superior a de orvalho, de modo a evitar a condensação e gotejamento de água), o cálculo da espessura isolante poderá ser feito fixando as temperaturas envolvidas e calculando a espessura isolante necessária.

Como exemplo, o cálculo da espessura isolante L_i de um forno, pode ser feito considerando que a temperatura T_4 da superfície é fixada por razões de segurança. Conhecendo-se as temperaturas dos ambientes e os coeficiente de película dos ambientes interno e externo e ainda as condutividades térmicas dos materiais das paredes, o cálculo pode ser feito como mostrado na equação 1.

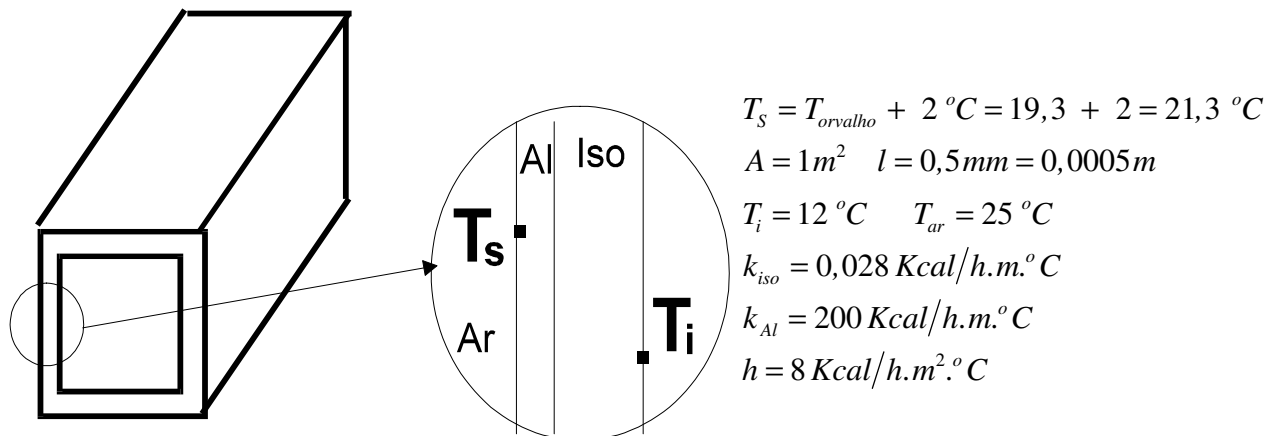


[Figura 3]

Considerando as resistências térmicas entre T_1 e T_4 e entre T_4 e T_5 , obtemos as seguintes expressões para o fluxo de calor :

$$\dot{q} = \frac{T_1 - T_4}{\frac{1}{h_i + h_e} + \frac{L}{k \cdot A} + \frac{L_i}{k_i \cdot A}} = \frac{T_4 - T_5}{\frac{1}{h_e \cdot A}} \quad (\text{eq. 1})$$

Exercício 1. Ar condicionado para um centro de processamento de dados é distribuído em um duto retangular de alumínio ($k = 200 \text{ Kcal/h.m.}^\circ\text{C}$) de espessura $0,5 \text{ mm}$. A temperatura no ambiente deve ser mantida em $25 \text{ }^\circ\text{C}$ e o coeficiente de película é $8 \text{ Kcal/h.m}^2.\text{ }^\circ\text{C}$. Sabendo-se que a temperatura na superfície interna do duto é $12 \text{ }^\circ\text{C}$, calcular a espessura do isolante térmico ($k = 0,028 \text{ kcal/h.m}^\circ\text{C}$) a usar, para que não ocorra condensação na superfície externa do duto isolado, com segurança de $2 \text{ }^\circ\text{C}$, considerando que a temperatura de orvalho local é $19,3 \text{ }^\circ\text{C}$.



Utilizando a equação 1 , obtemos a espessura do isolante :

$$\frac{T_s - T_i}{\frac{L_{Al}}{k_{Al} \cdot A} + \frac{L_{iso}}{k_{iso} \cdot A}} = \frac{T_{ar} - T_s}{\frac{1}{h_e \cdot A}}$$

Substituindo os dados fornecidos, podemos obter a espessura do isolante :

$$\frac{21,3 - 12}{\frac{L_{iso}}{0,028 \times 1} + \frac{0,0005}{200 \times 1}} = \frac{25 - 21,2}{\frac{1}{8 \times 1}} \Rightarrow \boxed{L_{iso} = 0,0088\text{m} = 8,8\text{mm}}$$

- espessura isolante mais econômica

A medida que se aumenta a espessura de isolante de qualquer superfície, o regime de perda de calor da superfície diminui, porém, aumenta em contraposição o custo do isolamento.

A espessura mais econômica do isolamento é aquela para a qual a soma do custo anual da perda de calor e do custo anual do isolamento seja mínimo.

O processo de cálculo consiste em determinar as quantidades de calor perdidas considerando a aplicação de várias espessuras de isolamento, obtendo-se a quantidade de calor anual, considerando o tempo de utilização do equipamento. O valor em quilocalorias deve ser convertido em cruzeiros por ano, considerando o custo da produção do calor.

A seguir, considerando o custo do isolamento nas várias espessuras calculadas, determinam-se os custos anuais do isolamento desde que se considere o tempo de amortização em anos para a instalação.

Colocando em um gráfico tendo em abcissa a espessura do isolamento e em ordenadas o custo anual, obtém-se uma curva decrescente para o custo do calor perdido, e uma curva ascendente para o custo do isolamento. Evidentemente a soma dos custos (custo do calor perdido mais custo do isolamento) resultará em uma curva que deverá passar por um mínimo, ou seja, para determinada espessura de isolante haverá um custo mínimo anual.

A espessura ótima do isolante é aquela que apresenta um custo total (custo do calor perdido + custo do isolante) mínimo, como pode ser observado na Figura 4.

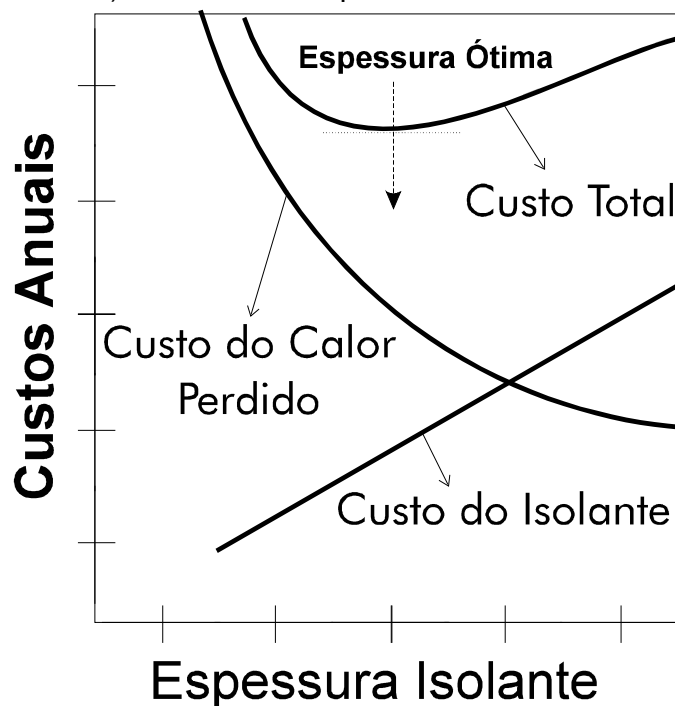


Figura 4

7. ISOLAMENTO DE TUBOS - CONCEITO DE RAIOS CRÍTICO

O aumento da espessura isolante de paredes cilíndricas de pequenos diâmetros nem sempre leva a uma redução da transferência de calor, podendo até mesmo a vir aumentá-la. Vejamos a expressão para o fluxo de calor através de uma parede cilíndrica, de comprimento L, composta pela parede de um tubo metálico e de uma camada isolante, como pode ser visto na Figura 5.

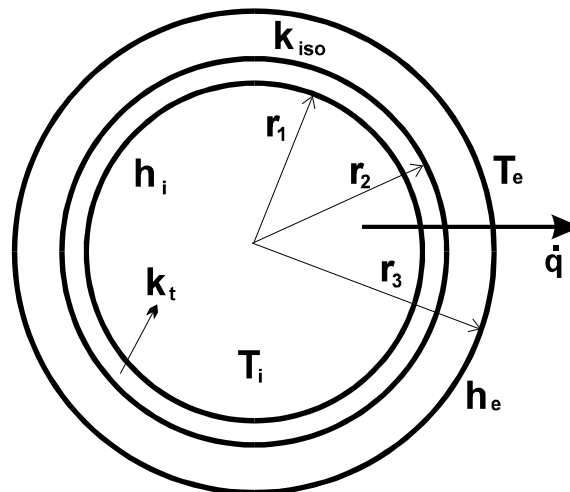


Figura 5

Considerando as quatro resistências térmicas entre T_i e T_e (duas a convecção e duas a condução), a expressão para o fluxo de calor é :

$$\dot{q} = \frac{\Delta T_{total}}{R_1 + R_2 + R_3 + R_4} = \frac{T_i - T_e}{\frac{1}{h_i \cdot A_i} + \frac{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{k_t \cdot 2\pi \cdot L} + \frac{\ln\left(\frac{r_3}{r_2}\right)}{k_{iso} \cdot 2\pi \cdot L} + \frac{1}{h_e \cdot A_e}} \quad (\text{eq. 2})$$

As áreas interna e externa da parede cilíndrica dependem dos raios r_1 e r_2 , portanto :

$$\dot{q} = \frac{T_i - T_e}{\frac{1}{h_i \cdot (2\pi \cdot r_1 \cdot L)} + \frac{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{k_t \cdot 2\pi \cdot L} + \frac{\ln\left(\frac{r_3}{r_2}\right)}{k_{iso} \cdot 2\pi \cdot L} + \frac{1}{h_e \cdot (2\pi \cdot r_3 \cdot L)}} \quad (\text{eq. 3})$$

Observando a equação 3, podemos analisar o efeito da elevação da espessura do isolante, ou seja, elevação do raio r_3 na Figura 5, nas resistências térmicas. A Tabela 1 sintetiza o efeito da elevação de r_3 em cada resistência:

RESISTÊNCIA	EXPRESSÃO	EFEITO
R_1	$\frac{1}{h_i \cdot (2 \cdot \pi \cdot r_1 \cdot L)}$	inalterada
R_2	$\frac{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{k_t \cdot 2 \cdot \pi \cdot L}$	inalterada
R_3	$\frac{\ln\left(\frac{r_3}{r_2}\right)}{k_{iso} \cdot 2 \cdot \pi \cdot L}$	aumenta
R_4	$\frac{1}{h_e \cdot (2 \cdot \pi \cdot r_3 \cdot L)}$	diminui

A representação gráfica da variação de cada resistência e do fluxo de calor resultante em função do aumento da espessura isolante (aumento de r_3) é mostrada na Figura 6 :

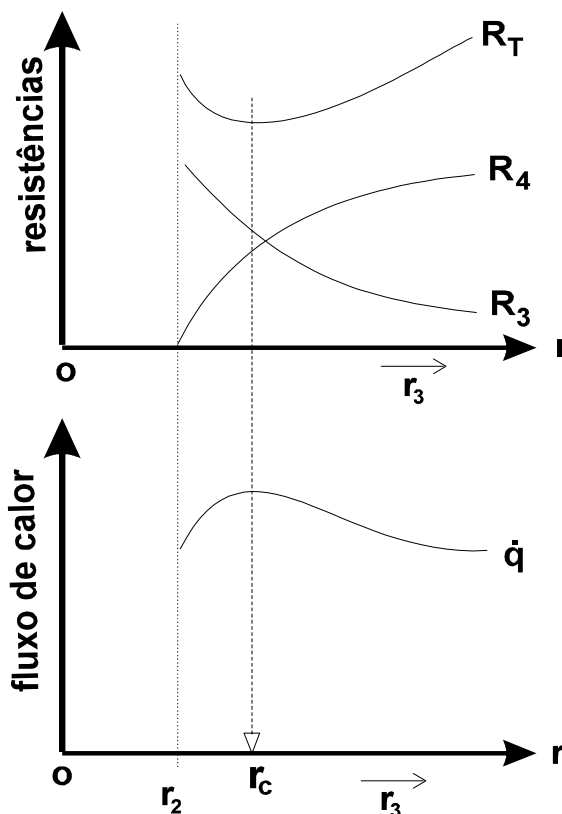
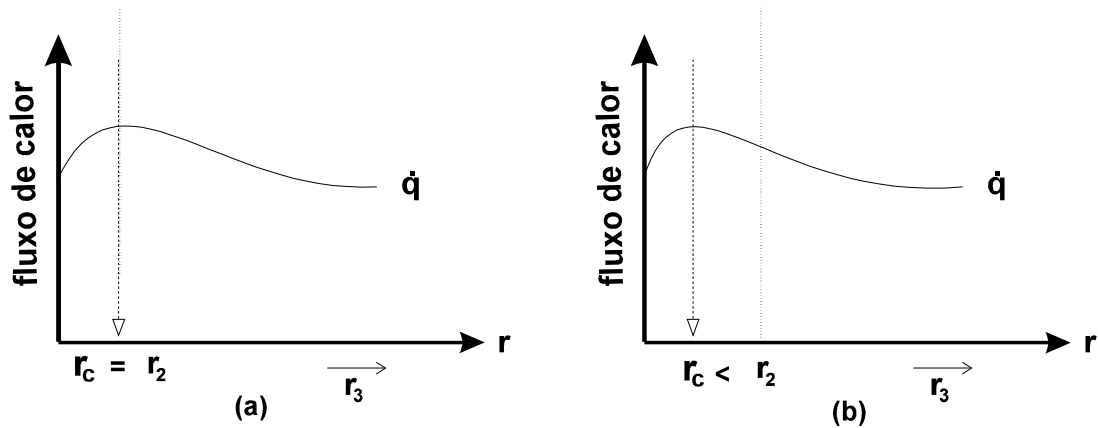


Figura 6

Observamos que existe um raio crítico (r_c) que propicia um fluxo de calor maior inclusive do que sem nenhum isolamento. Este raio crítico é comumente usado para o cálculo de condutores elétricos, em que se quer isolamento elétrico e, ao mesmo tempo, uma dissipação do calor gerado.

No caso de isolamento de tubos, de uma maneira geral, é desejável manter o raio crítico o menor possível, tal que a aplicação da isolação resultará em redução da perda

de calor. Isto pode ser conseguido utilizando-se uma isolação de baixa condutividade térmica, tal que o raio crítico seja pouco maior, igual ou até mesmo menor que o raio da tubulação. A Figura 7(a) ilustra a situação onde o raio crítico é igual ao raio do tubo e a Figura 7(b) a situação onde o raio crítico é menor que o raio do tubo.



[Figura

7

Consideremos que a temperatura da superfície externa de um tubo a ser isolado seja fixada em T_s , enquanto que a temperatura no ambiente externo é T_e . Neste caso, a equação 3 pode ser colocada na seguinte forma :

$$\dot{q} = \frac{T_i - T_e}{\frac{\ln\left(\frac{r_3}{r_2}\right)}{k_{iso} \cdot 2\pi \cdot L} + \frac{1}{h_e \cdot (2\pi \cdot r_3 \cdot L)}} \quad (\text{eq. 4})$$

A condição para que o fluxo de calor expresso pela equação 4 seja máximo é :

$$\frac{d\dot{q}}{dr_3} = 0 \quad (\text{eq. 5})$$

Neste caso, temos que o raio r_3 é igual ao raio crítico (r_{cr}). Através de alguma manipulação a equação 5 pode ser colocada na seguinte forma :

$$\frac{-2\pi \cdot L \cdot (T_s - T_e) \cdot \left(\frac{1}{k_{iso} \cdot r_{cr}} - \frac{1}{h \cdot r_{cr}^2} \right)}{\left[\frac{\ln\left(\frac{r_{cr}}{r_2}\right)}{k_{iso}} + \frac{1}{r_{cr} \cdot h} \right]} = 0 \quad (\text{eq. 6})$$

Da equação 6 obtemos que :

$$\frac{1}{k_{iso} \cdot r_{cr}} - \frac{1}{h \cdot r_{cr}^2} = 0 \quad (\text{eq. 7})$$

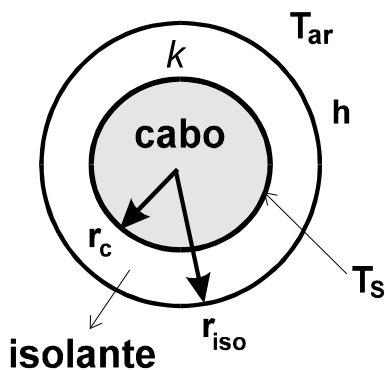
A expressão para o raio crítico fica assim :

$$r_{cr} = \frac{k_{iso}}{h}$$

(eq. 8)

A equação 8 expressa o conceito de raio crítico de isolamento. Se o raio externo do isolante (r_3) for menor que o valor dado pela equação, então a transferência de calor será elevada com a colocação de mais isolante. Para raios externos maiores que o valor crítico, um aumento da espessura isolante causará um decréscimo da transferência de calor. O conceito central é que para valores de coeficiente de película (h) constantes, quanto menor o valor de condutividade térmica do isolante (k_{iso}), ou seja, quanto melhor o isolante utilizado, menor o raio crítico. Deve também ser ressaltado que para valores de h e k_{iso} normalmente encontrados nas aplicações mais comuns o raio crítico é pequeno. Portanto, somente tubulações de pequeno diâmetro serão afetadas.

Exercício 2. Um cabo elétrico de alumínio com 15 mm de diâmetro deverá ser isolado com borracha ($k = 0,134 \text{ kcal/h.m.}^\circ\text{C}$). O cabo estará ao ar livre ($h = 7,32 \text{ Kcal/h.m}^2.\circ\text{C}$) a 20°C . Investigue o efeito da espessura da isolação na dissipação de calor, admitindo que a temperatura na superfície do cabo é de 65°C .



$$\begin{aligned} \varnothing_c = 15 \text{ mm} &\Rightarrow r_c = 7,5 \text{ mm} = 0,0075 \text{ m} \\ k &= 0,134 \text{ Kcal/h.m.}^\circ\text{C} \\ h &= 7,32 \text{ Kcal/h.m}^2.\circ\text{C} \\ T_s &= 65^\circ\text{C} \quad T_{ar} = 20^\circ\text{C} \\ L &= 1 \text{ m} \end{aligned}$$

Cálculo do raio crítico :

$$r_{cr} = \frac{k}{h} = \frac{0,134 (\text{Kcal/h.m.}^\circ\text{C})}{7,32 (\text{Kcal/h.m}^2.\circ\text{C})} = 0,0183 \text{ m} = 18,3 \text{ mm}$$

A dissipação de calor é dada pela seguinte expressão :

$$\dot{q} = \frac{T_s - T_{ar}}{\frac{\ln\left(\frac{r_{iso}}{r_c}\right)}{k_{iso} \cdot 2 \cdot \pi \cdot L} + \frac{1}{h \cdot (2 \cdot \pi \cdot r_{iso} \cdot L)}}$$

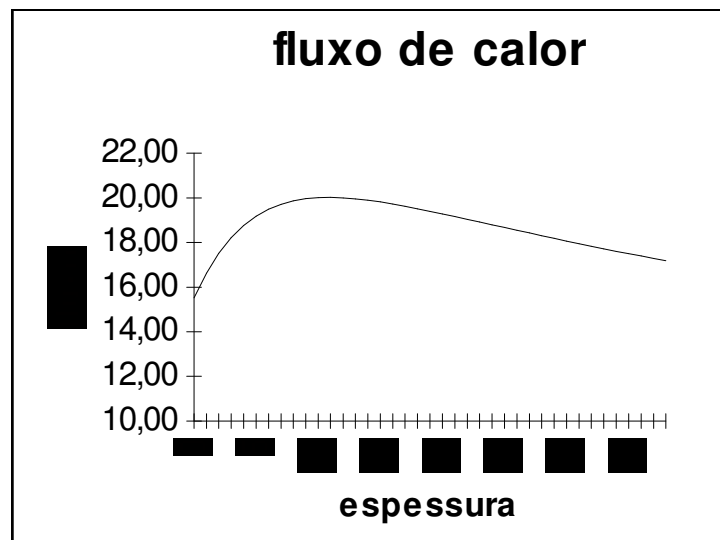
Para um comprimento unitário de cabo ($L = 1 \text{ m}$), o fluxo de calor dissipado é função do raio do isolante :

$$\dot{q} = \frac{65 - 20}{\frac{\ln\left(\frac{r_{iso}}{0,0075}\right)}{0,134 \times 2 \times \pi \times 1} + \frac{1}{7,32 \times (2 \times \pi \times r_{iso} \times 1)}}$$

Dando valores para r_{iso} na equação acima, podemos observar o efeito da espessura isolante na dissipação de calor :

Raio Isolante	Espessura	Fluxo	Comentário
7,5 mm	0,0 mm	15,52 Kcal/h	sem isolação
12,9 mm	5,4 mm	19,31 Kcal/h	raio menor que o crítico
18,3 mm	10,8 mm	20,02 Kcal/h	raio crítico : fluxo máximo

Observamos que, quando o cabo está isolado com espessura correspondente ao raio crítico, o fluxo de calor dissipado é 22% maior do que sem nenhuma isolação. A figura abaixo mostra graficamente a variação do fluxo de calor dissipado com a espessura isolante



Notamos também na figura que, para valores de espessura correspondente a raios maiores que o crítico, o fluxo de calor dissipado tende a se reduzir novamente.

EXERCÍCIOS PROPOSTOS :

Exercício 3. Queremos determinar a condutividade térmica de um material à base de borracha. Para isto, construímos uma caixa em forma de cubo, de dimensões 1 m x 1 m, com placas do referido material com 10 cm de espessura. Dentro da caixa, colocamos uma resistência elétrica de dissipação 1 KW. Ligada a resistência e aguardado o equilíbrio térmico, mediram-se as temperaturas nas superfícies interna e externa do material e achamos, respectivamente, 150 e 40 °C. Qual é o valor da condutividade térmica do material :

- (a) em unidades do sistema métrico;
- (b) em unidades do sistema inglês.

DADO : 1 KW = 3413 Btu/h = 860 Kcal/h

Exercício 4. Uma parede de um tanque de armazenagem de ácido deve ser construída com revestimento de chumbo 1/8" de espessura ($k= 20 \text{ Btu/h.ft.}^\circ\text{F}$), uma camada de tijolo isolante de sílica ($k=0,5 \text{ Btu/h.ft.}^\circ\text{F}$) e um invólucro de aço de 1/4" de espessura ($k= 26 \text{ Btu/h.ft.}^\circ\text{F}$). Com a superfície interna do revestimento de chumbo a 190 °F e meio ambiente a 80 °F, a temperatura da superfície externa do aço não deve ser maior que 140 °F de modo a evitar queimaduras nos trabalhadores. Determinar a espessura do tijolo refratário de sílica se o coeficiente de película do ar é $2 \text{ Btu/h.ft}^2.\circ\text{F}$.

Tente resolver utilizando somente as unidades inglesas. Porém, se preferir converter:

$$1 \text{ Btu/h.ft.}^\circ\text{F} = 1,73073 \text{ W/m.K}$$

$$1 \text{ Btu/h.ft}^2.\circ\text{F} = 5,67826 \text{ W/m}^2.\text{K}$$

ou seja, - para conversão de Btu/h.ft.°F para W/m.K multiplicar por 1,73073

- para conversão de Btu/h.ft².°F para W/m².K multiplicar por 5,67826

Exercício 5. Qual é a espessura de isolamento de fibra de vidro ($k = 0,02 \text{ kcal/h.m.}^\circ\text{C}$) necessária para permitir uma garantia de que a temperatura externa de um forno de cozinha não excederá 43 °C? A temperatura máxima na superfície interna do forno a ser mantida pelo tipo convencional de controle termostático é 190°C, a temperatura da cozinha pode variar de 15°C (inverno) a 32°C (verão) e o coeficiente de película entre a superfície do forno e o ambiente pode variar entre $10 \text{ kcal/h.m}^2.\circ\text{C}$ (cozinha fechada) e $15 \text{ kcal/h.m}^2.\circ\text{C}$ (cozinha arejada).

RESPOSTAS DOS EXERCÍCIOS PROPOSTOS :

Exercício 3 :

a) 0,13 Kcal/h.m.^{°C}

b) 0,087 Btu/h.ft.^{°F}

Exercício 4 :

a) 0,207 ft \approx 2,5"

Exercício 5 :

a) 0,027 m = 2,7 cm

Material extraído de:

- Eduardo Emery Cunha Quites, Luiz Renato Bastos Lia; INTRODUÇÃO À TRANSFERÊNCIA DE CALOR. Apostila.