UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
Escola de Engenharia de Lorena – EEL

ENGENHARIA FÍSICA

FENÔMENOS DE TRANSPORTE B

Prof. Dr. Sérgio R. Montoro

sergio.montoro@usp.br

srmontoro@dequi.eel.usp.br

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
Escola de Engenharia de Lorena – EEL

TRANSFERÊNCIA DE CALOR

ENGENHARIA FÍSICA

AULA 8

RAIO CRÍTICO DE ISOLAMENTO

RAIO CRÍTICO DE ISOLAMENTO OU ESPESSURA CRÍTICA DE ISOLAMENTO

Considere um tubo de pequeno diâmetro, um cabo, ou um fio cuja superfície externa tem uma temperatura aproximadamente constante e dissipa calor por convecção para o ar circundante. Suponha que a superfície esteja recoberta por uma camada isolante. Em algumas situações, o acréscimo de isolamento aumenta a perda de calor até uma espessura crítica de isolamento na qual a perda de energia atinge um máximo.

Outros acréscimos de isolamento, além da espessura crítica, provocam a diminuição da perda de energia. Por isso, a espessura crítica pode ser utilizada para propiciar o resfriamento de um cabo, ou um fio ou tubo.

Entretanto, se o isolamento for usado para reduzir a perda de calor de um tubo, é essencial que a espessura final do isolamento seja maior que a espessura crítica de isolamento.

RAIO CRÍTICO DE ISOLAMENTO OU ESPESSURA CRÍTICA DE ISOLAMENTO

Vamos examinar a espessura crítica de isolamento num **cilindro** e numa **esfera**.

CILINDRO:

Para deduzir uma expressão da espessura crítica de isolamento, consideremos um tubo circular de raio r_i mantido a uma temperatura uniforme T_i e recoberto por uma camada isolante de raio r_o, como está na Figura 1. O calor é dissipado convectivamente da superfície externa do isolante para um ambiente à temperatura T_∞, com um coeficiente de transferência de calor h_0:

RAIO CRÍTICO DE ISOLAMENTO OU ESPESSURA CRÍTICA DE ISOLAMENTO

CILINDRO:

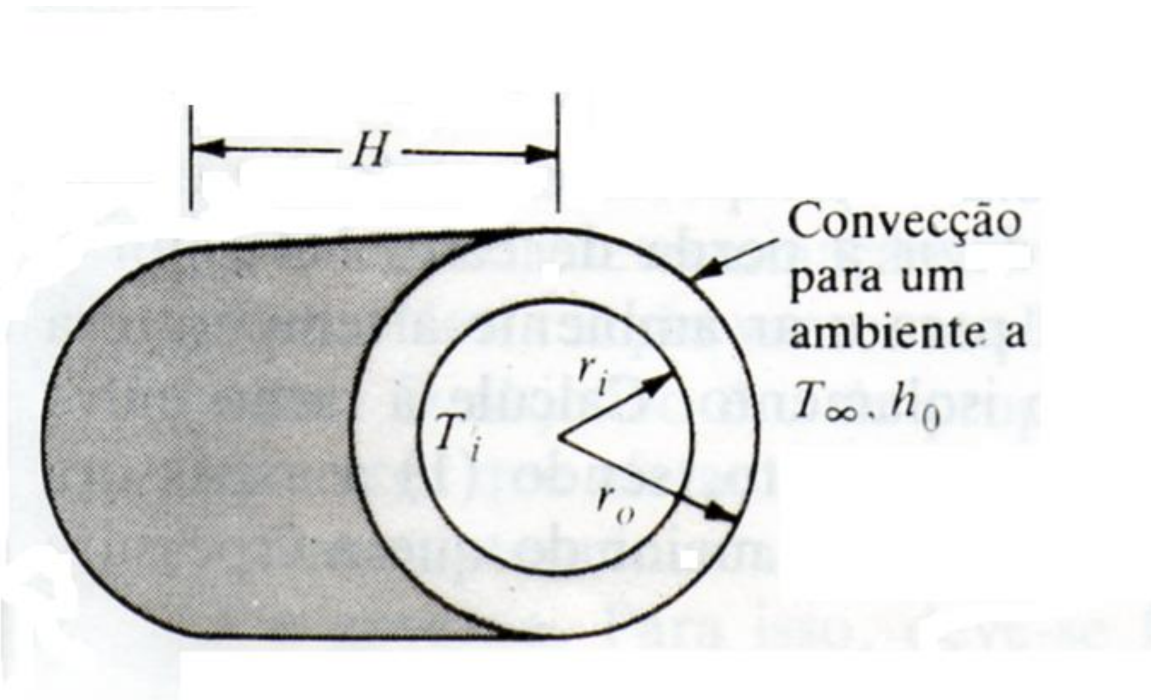


Figura 1: *Nomenclatura para o raio crítico do isolamento de um tubo.*

RAIO CRÍTICO DE ISOLAMENTO OU ESPESSURA CRÍTICA DE ISOLAMENTO

CILINDRO:

A taxa de perda de calor Q no tubo é dada por:

$$Q = \frac{T_i - T_\infty}{R_{is} + R_o} \qquad \textbf{(Equação 1)}$$

RAIO CRÍTICO DE ISOLAMENTO OU ESPESSURA CRÍTICA DE ISOLAMENTO

CILINDRO:

Se *H* for o comprimento do tubo e *k*, a condutividade térmica do isolante, as resistências térmicas R_{is} e R_o do isolamento e da convecção na superfície externa, são:

$$R_{is} = \frac{1}{2\pi k H} \ln \frac{r_o}{r_i}$$

e

$$R_o = \frac{1}{2\pi r_o H h_o}$$

(Equação 2) **(Equação 3)**

RAIO CRÍTICO DE ISOLAMENTO OU ESPESSURA CRÍTICA DE ISOLAMENTO

CILINDRO:

Agora admitamos que T_i, T_∞, k, H, h_o e r_i permaneçam constantes e que r_o *varie* (*isto é,* $r_o \geq r_i$). Notamos que, à medida que r_o cresce, a resistência R_o decresce, mas R_{is} cresce. Portanto, Q pode ter um máximo para um certo valor de $r_o \equiv r_{oc}$. Determina-se este valor crítico do raio r_oc derivando-se a Equação 1 em relação a r_o e igualando a zero a expressão resultante:

$$\frac{dQ}{dr_o} = -\frac{2\pi k H\left(T_i - T_\infty\right)}{\left[\ln\left(r_o / r_i\right) + k/(h_o r_o)\right]^2}\left(\frac{1}{r_o} - \frac{k}{h_o r_o{}^2}\right) = 0 \qquad \textbf{(Equação 4)}$$

RAIO CRÍTICO DE ISOLAMENTO OU ESPESSURA CRÍTICA DE ISOLAMENTO

CILINDRO:

A solução da Equação 4 em r_o dá o raio crítico de isolamento r_{oc} com o qual a taxa de transferência do calor é um máximo; encontramos:

$$\boxed{r_{oc} = \frac{k}{h_o}}$$

(Equação 5)

Raio Crítico de Isolamento para um corpo cilíndrico.

Onde k é a condutividade térmica do isolante.

RAIO CRÍTICO DE ISOLAMENTO OU ESPESSURA CRÍTICA DE ISOLAMENTO

CILINDRO:

OBSERVAÇÃO:

Na prática, o significado físico deste resultado é o seguinte: se o raio for maior que o raio crítico definido pela Equação 5, qualquer acréscimo de isolante sobre a superfície do tubo diminui a perda de calor, como se espera.

Mas, se o raio for menor do que o raio crítico, como em tubos, cabos ou fios de pequeno diâmetro, a perda de calor aumentará continuamente com o acréscimo de isolante até que o raio da superfície externa do isolamento seja igual ao raio crítico. A perda de calor atinge um máximo na espessura crítica de isolamento e principia a decrescer com o aumento de isolamento além do raio crítico.

RAIO CRÍTICO DE ISOLAMENTO OU ESPESSURA CRÍTICA DE ISOLAMENTO

CILINDRO:

OBSERVAÇÃO:

Há numerosas aplicações práticas do raio crítico de isolamento. Nos fios e cabos elétricos, a espessura crítica do revestimento pode ser utilizada para conseguir um máximo de resfriamento. Se o isolamento em um tubo de vapor for umedecido, a condutividade térmica do isolamento cresce, o que aumenta o raio crítico. Então, é possível que, com o raio crítico resultante, a perda de calor do tubo seja maior com o isolamento úmido do que sem nenhum isolamento.

RAIO CRÍTICO DE ISOLAMENTO OU ESPESSURA CRÍTICA DE ISOLAMENTO

ESFERA:

Na análise precedente discutimos a espessura crítica de um isolamento num corpo cilíndrico. No caso de uma esfera, seguindo procedimento semelhante, podemos demonstrar que o raio crítico de isolamento é dado por:

$$\boxed{r_{oc} = \frac{2k}{h_o}}$$

(Equação 6)

Raio Crítico de Isolamento para um corpo esférico.

Onde k é a condutividade térmica do isolante.

RAIO CRÍTICO DE ISOLAMENTO OU ESPESSURA CRÍTICA DE ISOLAMENTO

EFEITOS DA RADIAÇÃO:

Os resultados dados anteriormente para o raio crítico não incluem os efeitos da radiação térmica. Suponha que o coeficiente de transferência de calor h_o na superfície externa do isolamento seja aproximado pela soma de uma parcela de convecção (h_c) e uma parcela de radiação (h_r), na forma:

$$h_o = h_c + h_r$$ **(Equação 7)**

RAIO CRÍTICO DE ISOLAMENTO OU ESPESSURA CRÍTICA DE ISOLAMENTO

EFEITOS DA RADIAÇÃO:

Então o raio crítico dado pelas Equações 5 e 6 se tornam, respectivamente:

$$r_{oc} = \frac{k}{h_c + h_r}$$

Para um cilindro **(Equação 8)**

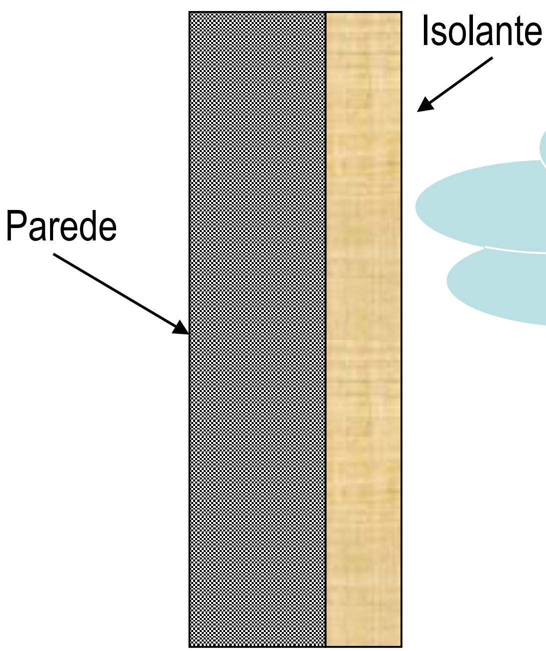
$$r_{oc} = \frac{2k}{h_c + h_r}$$

Para uma esfera **(Equação 9)**

RAIO CRÍTICO DE ISOLAMENTO OU ESPESSURA CRÍTICA DE ISOLAMENTO

OBSERVAÇÃO IMPORTANTE

ESPESSURA CRÍTICA DE ISOLAMENTO EM ÁREAS PLANAS:



Não tem problemas de isolamento para áreas planas (não envolve raio crítico), pois a área não aumenta em virtude do aumento da espessura do isolamento.

RAIO CRÍTICO DE ISOLAMENTO OU ESPESSURA CRÍTICA DE ISOLAMENTO

EXEMPLO 1:

Determine o raio crítico de um tubo recoberto por uma camada de amianto, com a condutividade térmica k = 0,2 W/m.ºC, se o coeficiente da transferência convectiva de calor externo for h_∞ = 10 W/m^2.ºC. (*Resp.*: r_c = 2 cm).

RAIO CRÍTICO DE ISOLAMENTO OU ESPESSURA CRÍTICA DE ISOLAMENTO

EXEMPLO 2:

Um fio elétrico, de diâmetro D = 3 mm, deve ser recoberto por um isolante de borracha, com condutividade térmica k = 0,15 W/m.ºC. Se o coeficiente de transferência de calor externo é h_∞ = 50 W/m_2.ºC, qual é a espessura ótima do isolamento de borracha para provocar a máxima perda de calor pelo fio?

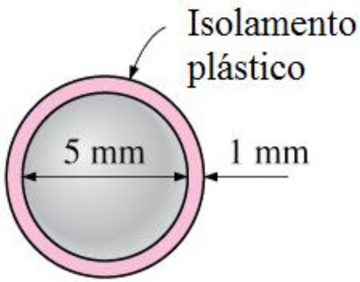
(*Resp.:* 1,5 mm)

RAIO CRÍTICO DE ISOLAMENTO OU ESPESSURA CRÍTICA DE ISOLAMENTO

EXEMPLO 3:

Uma bola esférica de 5 mm de diâmetro a 50ºC é envolta com isolamento plástico (k = 0,13 W/m.ºC) de 1 mm de espessura. A bola está exposta a um meio a 15ºC, com um coeficiente de transferência de calor por convecção de 20 W/m^2.ºC. Determinar se o isolamento de plástico sobre a bola irá ajudar ou prejudicar a transferência de calor a partir da bola. **OBS:** detalhar todos os cálculos envolvidos para justificar a resposta.

Resp: irá aumentar a TC.



RAIO CRÍTICO DE ISOLAMENTO OU ESPESSURA CRÍTICA DE ISOLAMENTO

EXEMPLO 4:

Um tubo de diâmetro d_o = 2,5 cm deve ser isolado com uma camada de amianto de condutividade térmica k_a = 0,2 W/m.ºC. O coeficiente da transferência convectiva de calor da superfície do amianto para o ar ambiente é h_o = 12 W/m^2.ºC.

A) Calcule o raio crítico de isolamento.

B) Se outra camada de amianto, com 3 mm de espessura, for acrescentada sobre o tubo, a transferência de calor aumenta ou diminui?