



ISOLAMENTO TÉRMICO PARA CÂMARAS FRIGORÍFICAS

Prof. Dr. Paulo Renato Perez dos Santos

**- Porto Alegre / RS -
- 2005 -**



ISOLAMENTO TÉRMICO PARA CÂMARAS FRIGORÍFICAS

1.0 - INTRODUÇÃO

Quando existe uma diferença de temperatura entre duas regiões do espaço, esta tende a desaparecer espontaneamente, pela passagem de calor de uma região para outra.

Ao conjunto de fenômeno que caracterizam esta passagem de calor de uma região para outra, damos o nome de transmissão de calor.

A transmissão de calor pode efetuar-se de três maneiras distintas:

- condução;
- convecção;
- radiação.

Obedecendo cada uma destas formas, a leis próprias, podemos admitir em comum as seguintes características:

- necessidade de uma diferença de temperatura entre duas regiões;
- o fluxo térmico sempre se verifica no sentido das temperaturas decrescentes.

2.0 - CONDUÇÃO

A transmissão de calor por condução é a maneira pela qual o calor passa de uma parte a outra de um mesmo corpo ou de corpos diferentes em contato, sem deslocamento das partículas do corpo ou corpos considerados. Num corpo sólido os átomos se acham em posição de equilíbrio, ao redor dos quais eles podem oscilar. Suas vibrações são tanto mais intensas quanto maior for a temperatura.

É evidente que se aumentarmos a amplitude das vibrações por aquecimento, essa vibração irá se propagando por ressonância e a energia sob a forma de calor se transmitirá das partes com maior energia para as de menor. Após determinado tempo o equilíbrio será atingido e teremos uma temperatura uniforme em todo o corpo.

A transmissão por simples condução ocorre também nos líquidos e gases, porém é muito difícil evitar que seja acompanhado por convecção, uma vez que o aquecimento ou resfriamento desses fluídos provoca a formação de correntes convectivas.

3.0 - CONVECÇÃO

Nos fluídos a transmissão de calor se dá por convecção. Aquecendo-se a parede de um recipiente que contém um fluído, nota-se perfeitamente que as partículas com maior temperatura, tornam-se mais leves e sobem e no lugar delas descem as outras com temperatura menor, criando uma corrente de fluído com sentido determinado.

Não há somente transmissão de energia, mas também movimento das partículas. Essas partículas aquecidas se afastam do lugar em que receberam calor, indo em direção das mais frias. Forçando a circulação dos fluídos, pode-se ativar a passagem do calor e



neste caso o fenômeno recebe a denominação de convecção forçada para distingui-la da convecção natural ou livre que se verifica em caso contrário.

Portanto, na transmissão de calor por convecção teremos um coeficiente que depende das condições experimentais enquanto que no caso da condução ela depende somente da qualidade do material e das temperaturas.

4.0 - RADIAÇÃO

Além destas formas de transmissão, que pressupõem a existência de um meio material, através do qual o calor se transmite, existe uma terceira forma em que não é necessária esta suposição e que se denomina radiação.

Esta transmissão se dá quando o calor é transportado por meio de vibrações eletromagnéticas de mesma natureza das ondas luminosas. É a maneira pela qual o Sol envia calor à Terra.

A transmissão de calor por radiação independe de um meio material e podendo ser transmitido no vácuo.

O ar é sempre transparente à radiação, enquanto que diversos gases, vapores e a maior parte dos gases combustíveis não são permeáveis a radiação dentro de certos limites de comprimento de onda.

Por outro lado a maior parte dos líquidos dentro dos limites de aplicação prática, podem ser considerados não permeáveis.

Obviamente este é um fenômeno que segue leis completamente distintas das leis da condução e da convecção.

Teremos sempre uma superposição de duas formas de transmissão pelo menos.

5.0 - FLUXO DE CALOR EM REGIME PERMANENTE

A quantidade de calor trocado na unidade de tempo, em qualquer um dos processos de transmissão de calor citados, toma o nome de fluxo térmico. O fluxo térmico, isto é, o calor que penetra no corpo é igual ao calor que abandona o mesmo.

Nesta situação a distribuição de temperaturas no interior do corpo no qual se verifica a passagem de calor também não varia com o tempo.

Em nosso estudo trataremos de problemas em que o fluxo de energia é permanente.

6.0 - TRANSMISSÃO DE CALOR POR CONDUÇÃO

A transmissão de calor por condução obedece à chamada lei de Fourier, segundo a qual o fluxo térmico é diretamente proporcional à superfície através da qual se verifica a passagem de calor e ao gradiente de temperatura.

Assim, para uma propagação de calor unidirecional e permanente, através de uma parede plana de faces paralelas, teremos:

$$Q = (\beta S \Delta t) / x \quad (01)$$



onde,

- S é a superfície onde se dá a passagem de calor;
- Δt é a diferença de temperatura entre as faces da parede;
- x é a espessura da parede;
- β é o coeficiente de condutividade interna.

O valor de β de acordo com a equação acima, representa a quantidade de calor que flui na unidade de tempo, por unidade de superfície, quando o gradiente de temperatura no material considerado é a unidade de temperatura através da unidade de comprimento.

Esse coeficiente é uma propriedade do material, dependendo essencialmente de sua fase. Geralmente seu valor diminui na direção sólido, líquido e gás.

Além disso, o valor de varia, com a natureza do corpo, composição, pureza, temperatura, conteúdo de unidade e homogeneidade, entre outras.

De uma maneira geral, para os corpos sólidos homogêneos, a experiência tem mostrado que o coeficiente de condutividade térmica é uma função linear da temperatura.

Por outro lado, para os corpos higroscópicos, o coeficiente de condutividade térmica cresce com o crescimento da umidade.

Para os materiais porosos como tijolos de barro e papelão, por exemplo, este aumento pode ser bastante além do, devido a grande diferença entre o β da água e do ar.

Para facilitar a resolução dos problemas de transmissão de calor mais complexos, é preferível introduzir, o conceito de resistência térmica.

A semelhança do que ocorre em eletricidade serão feitas as seguintes considerações:

- Δt poderá ser chamado de diferença de potencial elétrico;
- Q poderá ser chamado de intensidade de corrente térmica.

logo,

$$R_t = \Delta t / Q = x / \beta S \quad (02)$$

O conceito de resistência térmica nos permite simplificar os cálculos referentes à transmissão de calor em paredes compostas de várias camadas. Basta para isto considerar cada camada como uma resistência térmica colocada em série com as demais.

Material	γ (kgf / m ³)	β (Kcal m/hm ² °C)
Borracha esponjosa	70 a 90	0,031
Cortiça	90 a 110	0,032
	110 a 150	0,037
Eucatex frigorífico	200 a 220	0,028
Gesso celular	120 a 130	0,043
Lã de vidro	24 a 60	0,023



	65 a 100	0,026
Lã de rocha	65 a 110	0,023
	115 a 130	0,026
Papelão laminado	600 a 700	0,072
Plástico esponjoso	20 a 30	0,035
Poliestireno	15 a 20	0,027
	20 a 25	0,030
	25 a 40	0,033
Poliuretano	28 a 32	0,019
	32 a 80	0,021
Serragem	200 a 250	0,062

Tabela 1 - Características físicas e térmicas de isolantes.

Assim, como na eletricidade, a resistência do conjunto nos será dada pela soma das resistências parciais, de modo que podemos escrever:

$$\begin{aligned}Rt_1 &= \frac{t_1 - t'}{Q} = \frac{x_1}{\beta_1 S}; Rt_2 = \frac{t' - t''}{Q} = \frac{x_2}{\beta_2 S}; Rt_3 = \frac{t'' - t_2}{Q} = \frac{x_3}{\beta_3 S} \\Rt &= Rt_1 + Rt_2 + Rt_3 = \frac{x_1}{\beta_1 S} + \frac{x_2}{\beta_2 S} + \frac{x_3}{\beta_3 S} \\Rt &= \frac{t_1 - t_2}{Q} = \frac{1}{S} \sum_{i=1}^n \frac{x_i}{\beta_i}\end{aligned}\quad (03)$$

onde,

- n é o número de camadas de materiais diferentes que constituem a parede.

As expressões acima nos permitem calcular não só o fluxo térmico através uma parede composta, como as temperaturas intermediárias das diversas camadas.

6.0 - TRANSMISSÃO DE CALOR POR CONVECÇÃO

A transmissão de calor por convecção está diretamente relacionada com o movimento do fluido que permanentemente coloca novas partículas em contato com a superfície quente ou fria. A esse movimento dá-se o nome de convecção, o qual é responsável pela criação das correntes convectivas.

Como a maioria dos gases e líquidos são mal condutores de calor, essa quantidade de energia transmitida por condução, embora presente, é desprezível em relação aquela transportada por convecção.



Entretanto, quando um fluido que está em movimento entra em contato com superfícies sólidas, se forma, na proximidade dessas paredes, uma camada que apresenta movimento laminar paralelo a essas superfícies com velocidade muito próxima de zero, não permitindo a transmissão de calor por convecção, resultando admitir que o calor que atravessa essa camada ocorre por condução, devendo nesse caso, ser levado em conta.

Sendo assim, pode-se observar que a transmissão de calor por convecção pura não existe, mas somente sob a forma de transmissão de calor entre fluido e parede onde intervém, também, a condução.

O fluxo térmico nesta situação é expresso pela chamada lei de Newton:

$$Q = \alpha_c S \Delta t \quad (04)$$

onde,

- α_c é o coeficiente de condutividade externa.

O coeficiente de condutividade externa não é uma propriedade do fluido ou da parede, mas sim um coeficiente geral com o qual se pretende representar o efeito conjunto de vários fatores.

Como fatores que afetam diretamente o coeficiente de película podemos citar:

- a forma geométrica e a orientação da superfície de contato;
- as constantes físicas do fluido;
- do movimento do fluido em relação a superfície.

A determinação do coeficiente de condutividade externa constitui um dos aspectos mais complexos da transmissão de calor. Na realidade o valor de α_c é feito a partir de equações teóricas ou empíricas de aplicação bastante restritas, as quais tornam o equacionamento da convecção bastante extenso.

Nesse estudo nos limitaremos a apresentar os coeficientes para a solução dos problemas de transmissão de calor mais comuns na refrigeração.

Utilizando aqui o conceito desenvolvido anteriormente, de resistência térmica, podemos escrever que:

$$R_t = \Delta t / Q = 1 / S \alpha_c \quad (05)$$

7.0 - TRANSMISSÃO DE CALOR POR RADIAÇÃO

Como já vimos, a transmissão de calor por radiação dá-se através de meios transparentes, visto esse processo ocorrer devido a propagação de uma onda eletromagnética.

Todos os corpos emitem radiação, em qualquer temperatura. Entretanto, a composição espectral da radiação emitida varia de acordo com a temperatura, de maneira que somente em elevadas temperaturas a radiação se torna visível.

A física experimental submeteu no século passado a radiação a um estudo do qual resultaram várias conclusões importantes:



- a quantidade total de energia emitida é proporcional a área da superfície emitente, ao tempo, depende da natureza da superfície e da sua temperatura absoluta;
- em uma análise espectral analisando a radiação emitida, verificou-se que a sua intensidade variava com o comprimento de onda λ , sendo nula para $\lambda = C$ e tendendo novamente a zero, quando λ tende para o infinito;
- na natureza o máximo de energia emitida ou absorvida é com o corpo negro, que pode ser obtido, com muita aproximação, enegrecendo-se uma superfície qualquer com preto fosco, ou utilizando um artifício de se estudar a radiação que sai por um fino orifício de uma cavidade fechada, enegrecida internamente.

O corpo negro constitui um padrão ideal, com o qual são comparadas as emissões dos corpos reais.

Inicialmente os Físicos Stefan e Boltzman verificaram que a quantidade de calor emitida ou absorvida por um corpo valia:

$$Q = S\tau i (T_1^4 - T_2^4) F \quad (06)$$

onde,

- F é o fator de forma;
- S é a área radiante;
- τ é a constante de Stefan-Boltzman;
- i é a emissividade do corpo, sendo menor do que um para corpos cinzentos e igual a um, para o corpo negro;
- T_1 e T_2 são as temperaturas dos corpos absorventes e emitentes.

Fazendo um arranjo de grandezas, teremos como expressão final: $Q = \alpha_i S \Delta t$ e podemos observar que se trata de uma equação semelhante à já adotada para o cálculo do calor transmitido por condução externa.

O Valor α_i é o coeficiente de transmissão de calor por radiação, com unidades idênticas ao coeficiente de condução externa.

Utilizando o conceito de resistência térmica podemos escrever:

$$R_t = \Delta t / Q = 1 / \alpha_i S \quad (07)$$

8.0 - CONVECÇÃO E RADIAÇÃO

A condutividade externa e a radiação normalmente atuam juntas nos processos de transmissão de calor.

Sendo assim, isso mostra que:

- o calor total em jogo é igual a soma dos calores transmitidos por radiação e convecção;
- o coeficiente de transmissão de calor resultante da radiação e da convecção é igual a soma dos coeficientes α_i e α_c .



Este coeficiente de transmissão externa global que designamos por coeficiente de filme ou película e vale:

$$\alpha = \alpha_i + \alpha_c \quad (08)$$

Nas aplicações normais, o que importa são os valores assumidos pelo α quando em contato com as paredes, tetos e pisos.

E interessante notar que, numa superfície horizontal, quando a transmissão de calor se verifica para cima, ela é auxiliada pelo movimento convectivo, de modo que o valor de α é maior do que se o processo ocorresse para baixo.

A tabela abaixo apresenta os valores médios do coeficiente de filme.

Situação	α (kcal / m ² h°C)
Ar contra paredes internas	7
Ar contra paredes externas	20
Ar contra chapas horizontais (internamente) para cima	9
Ar contra chapas horizontais (internamente) para baixo	5
Ar contra chapas horizontais (externa) para cima	25
Ar contra chapas horizontais (externas) para baixo	13

Tabela 2 – Valores do coeficiente de filme ou película ($v = 7,7$ m/s).

Procedimento diverso do anterior é adotado para o cálculo de transmissão de calor por radiação devido a incidência solar. É preferível calcular o calor transferido por radiação, como parcela adicional que penetra diretamente na câmara devido a um aumento hipotético de temperatura (Δt_{sol}), criado pela incidência dos raios solares.

9.0 -CONDUÇÃO, CONVECÇÃO E RADIAÇÃO

Quando dois fluídos a temperaturas diversas são separados por uma parede, o calor se transmite do fluido cuja temperatura é mais elevada por convecção e radiação até a parede, para a seguir, atravessa-la por condução e finalmente passar novamente da parede ao segundo fluído por convecção e radiação.

Tal transmissão complexa de calor pode ser calculada introduzindo-se o conceito de coeficiente global de transmissão de calor, admitindo-se para isto, que o calor que passa de um meio para outro através de uma parede, seja calculado pela expressão:

$$Q = K S \Delta t \quad (09)$$

onde,

- K é o coeficiente global de transmissão de calor.



O coeficiente global de transmissão de calor, naturalmente, se compõe dos coeficientes de filme ou película entre cada fluido e a respectiva parede e do coeficiente de condutividade interna da parede.

Sendo assim, empregando o conceito de resistência térmica, podemos escrever:

$$\begin{aligned}Rt_1 &= \frac{t_1 - t'}{Q} = \frac{1}{\alpha_1 S} \\Rt_2 &= \frac{t' - t''}{Q} = \frac{\Delta u}{kS} \\Rt_3 &= \frac{t'' - t_2}{Q} = \frac{1}{\alpha_2 S}\end{aligned}\tag{10}$$

De modo que a resistência térmica do conjunto terá por expressão,

$$Rt_1 = \frac{t_1 - t_2}{Q} = Rt_1 + Rt_2 + Rt_3 = \frac{1}{\alpha_1 S} + \frac{\Delta u}{KS} + \frac{1}{\alpha_2 S}\tag{11}$$

Comparando com a equação vista anteriormente,

$$Rt = \frac{t_1 - t_2}{Q} = \frac{1}{KS}\tag{12}$$

Concluimos que,

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{x}{\beta} + \frac{1}{\alpha_2}}\tag{13}$$

Considerando-se que a característica térmica de uma câmara frigorífica seja dada pela equação abaixo,

$$C_T = \frac{Q}{S}\tag{14}$$

poderemos calcular a espessura de isolante, pela seguinte equação:

$$x = \frac{\beta(\Delta T)}{C_T}\tag{15}$$



A tabela abaixo mostra os valores de C_T utilizados atualmente.

Tipo de câmara	C_T (kcal / m ² h)
Resfriamento e estocagem	7
Congelamento	5

Tabela 3 - Característica térmicas de câmaras frigoríficas.

10.0 - ISOLANTES TÉRMICOS

Os materiais utilizados para revestimentos destinados a minimizar da propagação de calor entre dois ambientes à temperaturas distintas, são denominadas isolantes térmicos.

É evidente que a principal propriedade de um isolante térmico é a de possuir uma condutividade térmica tão baixa quanto possível. No entanto, um baixo valor de β não basta para defini-lo. Ele deverá satisfazer a outros requisitos, como:

- resistência às temperaturas de trabalho;
- facilidade de aplicação;
- custo baixo;
- estabilidade química;
- resistência mecânica;
- ser auto-extinguível;
- não ser higroscópico.

Os isolantes térmicos são elementos porosos ou fibrosos, que devem sua baixa condutividade ao ar ou gás aprisionado em sua estrutura molecular. Com efeito, quanto maior a quantidade de ar ou gás no seu interior, tanto mais sua condutibilidade se aproximará do coeficiente do ar ou do gás utilizado na expansão. Isto ocorre porque as pequenas cavidades minimizam as correntes convectivas.

Sendo assim, quanto menor a massa específica do material, maior será o número de poros e, por consequência, maior sua capacidade de isolamento.