



INSTITUTO FEDERAL
SANTA CATARINA

INSTITUTO FEDERAL DE SANTA
CATARINA

CAMPUS SÃO JOSÉ

ÁREA TÉCNICA DE REFRIGERAÇÃO
E CONDICIONAMENTO DE AR



METODOLOGIA PARA O CÁLCULO DA ESPESSURA DE
ISOLANTE NECESSÁRIA A UMA APLICAÇÃO

Volume III

Curso Técnico – Módulo 2

Prof. Carlos Boabaid Neto, M.Eng.

2009

OBJETIVOS DO ISOLAMENTO TÉRMICO

- minimizar os fluxos de calor, visando maior eficiência do equipamento/sistema (economia de energia)
- evitar condensação (superfícies frias)

GEOMETRIA

Do ponto de vista da geometria da situação física, têm-se duas classes de problemas:

- superfícies planas (superfícies de câmaras frigoríficas, de refrigeradores, freezers, balcões, dutos de ar condicionado de seção retangular, etc.)
- superfícies cilíndricas (tubulações em geral)

(I) SUPERFÍCIES PLANAS

/ I.1 / Cálculo para um fluxo de calor máximo admissível

(a) a partir dos catálogos do fabricante, identifique o valor da condutividade térmica “k” do material isolante escolhido;

(b) a partir do projeto, ou das condições observadas, identifique as temperaturas dos meios em cada lado da superfície: T_{ext} (temperatura externa), e T_{in} (temperatura do meio refrigerado).

A temperatura externa vai, logicamente, depender de onde o equipamento estiver localizado. Se estiver ao ar livre (por exemplo, câmara frigorífica), a temperatura externa deve ser o mesmo valor recomendado pelas normas de projeto, ou seja, as temperaturas máximas médias de verão (caso mais crítico) para cada localidade ou região geográfica. Utilize os valores apresentados na Tabela 2 (Anexos, ao final deste texto).

No caso de um equipamento localizado no interior de uma edificação não climatizada, pode-se utilizar, como regra geral, valores **3°C abaixo** dos valores indicados na Tabela 2. Na realidade, no caso de um ambiente mal ventilado, ou com muita geração de carga térmica, muito provavelmente este ambiente atingirá temperaturas tão altas quanto as temperaturas de verão estipuladas na Tabela 2. Portanto, é necessária atenção do projetista neste aspecto.

Já a temperatura interna vai depender, obviamente, do tipo de produto a ser armazenado (a Tabela 4, ao final do texto, apresenta informações a respeito das condições de armazenagem de diversos tipos de produtos).

(c) a partir do projeto, identifique o valor do fluxo de calor máximo (\dot{q}_{max}) admitido para a aplicação em questão (ou a máxima taxa de transferência de calor permissível, \dot{Q}_{max});

Caso a informação sobre fluxo de calor não esteja disponível, pode-se utilizar os seguintes parâmetros:

TABELA 1

SITUAÇÃO	q [W/m ²]
câmaras frigoríficas, boa qualidade	< 9
câmaras frigoríficas, qualidade aceitável	< 14
equipamentos frigoríficos em geral, localizados em ambientes internos	< 10

- (d) a partir dos dados obtidos em (b), calcule o valor do coeficiente global de transferência de calor necessário, utilizando as equações:

$$U = \frac{\dot{q}}{\Delta T} \quad \text{ou} \quad U = \frac{\dot{Q}}{A \cdot \Delta T}$$

onde: $\Delta T = (T_{\text{ext}} - T_{\text{int}})$, [$^{\circ}\text{C}$]

A – área total a ser coberta com isolamento, [m^2]

- (e) determinar os coeficientes de convecção “ h_{ext} ” e “ h_{int} ”, utilizando as tabelas fornecidas;
 (f) a partir do valor calculado de “U”, determine a espessura necessária do isolante “L”, a partir da equação:

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_{\text{ext}}} + \frac{L}{k} + \frac{1}{h_{\text{int}}}} \quad \rightarrow \quad L = k \cdot \left(\frac{1}{U} - \frac{1}{h_{\text{ext}}} - \frac{1}{h_{\text{int}}} \right)$$

Lembre-se que, na equação para o “U”, devem existir tantos parâmetros $\frac{1}{k}$ quantas forem as “camadas” de diferentes materiais presentes no arranjo físico; entretanto, para materiais não-isolantes ($k > 0,8 \text{ W/m.K}$), o parâmetro perde significância e pode ser desprezado.

- (g) volta-se aos catálogos do produto escolhido, e escolhe-se o produto com **espessura igual ou imediatamente superior** ao valor calculado no item (f);
 (h) se for necessário realimentar os dados de projeto, recalcula-se a taxa de transferência (ou fluxo de calor) resultante, utilizando a espessura de isolante selecionada no item (f);

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_{\text{ext}}} + \frac{L}{k} + \frac{1}{h_{\text{int}}}} \quad \rightarrow \quad \dot{q} = U \cdot \Delta T \quad \text{ou} \quad \dot{Q} = U \cdot A \cdot \Delta T$$

Em alguns casos, os catálogos de fabricantes trazem, para cada tipo de material e espessura de isolamento, o valor da resistência térmica (“ R_t ”), por m^2 de área. Neste caso, para simplicidade de cálculo, pode-se fazer o seguinte. A partir dos dados de projeto identificados no item (b), calcule a resistência térmica necessária, pela seguinte equação:

$$R_t = \frac{\Delta T}{\dot{q}}$$

Volta-se ao catálogo, e seleciona-se o produto com a **resistência igual ou imediatamente superior** ao valor calculado pela equação acima. Se necessário, recalcula-se o fluxo de calor e a taxa de transferência de calor resultante, para a resistência térmica do isolante selecionado.

/ I.2 / Cálculo para evitar condensação na superfície

Neste caso, a preocupação é evitar a condensação do vapor d’água, presente no ar, sobre a superfície externa do isolamento, situação bastante comum em câmaras e balcões frigoríficos,

tubulações frigoríferas, tubulações de água gelada, etc., quando posicionadas em ambientes que podem apresentar elevada umidade relativa.

Em outras palavras, deseja-se que a superfície externa do isolamento permaneça a uma temperatura superior à temperatura de orvalho do ar ambiente.

- (a) a partir das informações disponíveis, determine a condição (temperatura e umidade relativa) mais crítica do ar que está, ou estará, em contato com a superfície sobre a qual será aplicado o isolamento; no caso de ambientes climatizados, estes dados podem ser os de projeto; senão, é necessário medir, ou estimar.

A partir destas informações, calcular a temperatura de orvalho, através da seguinte equação:

$$T_{\text{orv}} = (109,8 + T_{\text{ar}}) * (UR / 100)^{0,1247} - 109,8$$

onde: T_{ar} – temperatura de bulbo seco do ar, em [°C]
 UR – umidade relativa do ar, em [%]
 T_{orv} – temperatura de orvalho, em [°C]

Ex.: $T_{\text{ar}} = 20^{\circ}\text{C}$, $UR = 60\%$

$$\begin{aligned} T_{\text{orv}} &= (109,8 + 20) * (60/100)^{0,1247} - 109,8 = 129,8 * 0,6^{0,1247} - 109,8 \\ &= 129,8 * 0,938286 - 109,8 = 121,79 - 109,8 = \underline{\underline{11,99^{\circ}\text{C}}} \end{aligned}$$

- (b) a partir de catálogos dos fabricantes, identifique o valor da condutividade térmica “k” do material isolante escolhido;
- (c) determinar os coeficientes de convecção “ h_{ext} ” e “ h_{int} ”, utilizando as tabelas fornecidas;
- (d) a partir dos dados obtidos em (a), (b) e (c), calcular a espessura necessária do isolante “L”, a partir da equação:

$$L = k \cdot \left(Cl \cdot \frac{1}{h_{\text{ext}}} - \frac{1}{h_{\text{int}}} \right)$$

onde: $Cl = \frac{(T_{\text{orv}} - T_{\text{in}})}{(T_{\text{ar}} - T_{\text{orv}})}$

- (e) volta-se aos catálogos dos fabricantes, e escolhe-se o produto com **espessura igual ou imediatamente superior** ao valor calculado no item (d);
- (f) com o valor de espessura calculado no item (e), calcula-se o valor do fluxo de calor obtido:

$$q = U \cdot \Delta T \quad \text{onde} \quad U = \frac{1}{\frac{1}{h_{\text{ext}}} + \frac{L}{k} + \frac{1}{h_{\text{int}}}}$$

O valor do fluxo de calor calculado não deve ser superior aos valores estipulados na Tabela 1. Caso isto ocorra, deve-se dimensionar o isolamento baseado no critério de máximo fluxo de calor.

(II) SUPERFÍCIES CILÍNDRICAS

/ II.1 / Cálculo para um fluxo de calor máximo admissível

- a partir de catálogos dos fabricantes, identifique o valor da condutividade térmica “k” do material isolante escolhido;
- identifique o diâmetro externo “D_{ext}” da tubulação a ser isolada;
- identifique a temperatura do ar ambiente onde a tubulação será instalada (T_{ar}), e a temperatura média do fluido no interior da tubulação (T_{fluido});
- a partir do projeto, identifique o valor da taxa de transferência de calor “ \dot{Q}_{\max} ” máxima admitida, por metro linear de tubo (L = 1 m); no caso desta informação não estar disponível, utilize como referência:

- $\dot{Q}_{\max} \leq 5 \text{ W/m}$ para tubulações de fluido refrigerante;
- $\dot{Q}_{\max} \leq 10 \text{ W/m}$ para tubulações de água gelada;

Em algumas instalações, por exemplo, de água gelada, é necessário controlar para que o aumento de temperatura da água gelada ao longo da tubulação não ultrapasse determinado valor. Neste caso, o valor taxa de transferência de calor máxima admitida, \dot{Q}_{\max} , por metro linear de tubo, é calculada por:

$$\dot{Q}_{\max} = \frac{\dot{m} \cdot c \cdot \Delta T}{L} \quad [\text{W/m}]$$

onde: \dot{m} : vazão mássica do fluido que percorre a tubulação, [kg/s]
c : calor específico da água = 4190 J/kg.°C
L : comprimento da tubulação, [m]
 ΔT : aumento de temperatura máximo admissível no comprimento L de tubulação, [°C]

- com a taxa calculada em (d), determina-se a resistência térmica necessária, utilizando a equação:

$$R_t = \frac{\Delta T}{\dot{Q}_{\max}}$$

onde: $\Delta T = (T_{\text{ar}} - T_{\text{fluido}})$

- com a resistência calculada em (e), determine a espessura de isolante necessário, utilizando a equação:

$$E = \frac{D_{\text{ext}}}{2} \cdot (2,7183^F - 1) \quad \text{onde} \quad F = 2 \cdot \pi \cdot k \cdot R_t$$

Observe que, neste caso, desconsiderou-se as resistências térmicas decorrentes dos mecanismos de convecção, que de fato são insignificantes nos arranjos envolvendo dutos.

- (g) volta-se então aos catálogos dos fabricantes, e escolhe-se o produto com **espessura igual ou imediatamente superior** ao valor calculado no item (f);
- (h) se fôr necessário realimentar os dados de projeto, recalcula-se a taxa de transferência de calor resultante, por metro linear de comprimento do tubo, utilizando a espessura de isolante selecionada no item (g):

$$R_t = \frac{\ln\left(1 + \frac{2 \cdot E}{D_{\text{ext}}}\right)}{2 \cdot \pi \cdot k} \qquad \dot{Q} = \frac{\Delta T}{R_t} \quad [\text{W/m}]$$

Se fôr necessário determinar a taxa de transferência de calor total em determinado comprimento de tubulação, multiplica-se o valor “ \dot{Q} ” pelo comprimento total da tubulação, em [m].

- (i) é conveniente comparar o valor determinado no item (g), com o valor da “espessura crítica”, derivada do conceito de “raio crítico”, que representa o valor limite para o raio externo do isolamento; abaixo deste valor, o aumento do isolante tem o efeito de aumentar o fluxo de calor, ao invés de reduzi-lo; este é definido como segue:

$$E_c = \frac{k}{h_{\text{ext}}} - \frac{D}{2}$$

Se a espessura determinada no item (g) fôr superior ao valor de E_c , deve-se então utilizar uma espessura inferior.

/ II.2 / Cálculo para evitar condensação na superfície

- (a) identifique a temperatura do ar ambiente onde a tubulação será instalada (T_{ar}), e a temperatura média do fluido no interior da tubulação (T_{fluido});
- (b) determinar a temperatura de orvalho do ar ambiente, de acordo com a metodologia apresentada no item /I.2/ (letra (a));
- (c) determine o diâmetro externo D_{ext} da tubulação a ser isolada;
- (d) determinar o coeficiente de convecção “ h_{ext} ”, utilizando as tabelas fornecidas;
- (e) a partir dos catálogos do fabricante do produto escolhido, identifique o valor da condutividade térmica “ k ” do material isolante escolhido;
- (f) para o produto escolhido, determine qual a menor espessura E disponível, para o diâmetro D_{ext} determinado no item (b); este valor da espessura será utilizado como valor inicial para o cálculo do item (f) a seguir;
- (g) calcular os seguintes fatores:

$$F_1 = \frac{k}{\ln\left(\frac{r_3}{r_2}\right)} \qquad F_2 = h_{\text{ext}} \cdot r_3$$

onde: r_2 = raio externo da tubulação, [m]
 r_3 = raio externo do isolante, [m]

e que são calculados como segue:

$$r_2 = \frac{D_{\text{ext}}}{2} \qquad r_3 = r_2 + E$$

(h) calcular a temperatura superficial do isolante, para os dados selecionados:

$$T_s = \frac{F_1 \cdot T_{\text{fluido}} + F_2 \cdot T_{\text{ar}}}{F_1 + F_2}$$

(i) comparar o valor de T_s calculado no item (h) com o valor da temperatura de orvalho calculada no item (b); se T_s for menor que T_{orv} , isto indica que deve ocorrer condensação, ou seja, que a espessura do isolante selecionada no item (f) não é suficiente; então, deve-se selecionar a espessura imediatamente superior, repetir os cálculos dos itens (g) e (h), e fazer novamente a comparação com a temperatura de orvalho; o procedimento deve ser repetido até que $T_s > T_{\text{orv}}$; quando então, ter-se-á a espessura mínima para prevenção de condensação.

Se fôr necessário alimentar, ou reavaliar, os dados do projeto, a taxa de transferência de calor resultante, por metro linear de comprimento do tubo, para a espessura de isolante selecionada no item (i) acima, utiliza-se as mesmas equações do capítulo /II.1/:

$$R_t = \frac{\ln\left(1 + \frac{2 \cdot E}{D_{\text{ext}}}\right)}{2 \cdot \pi \cdot k} \qquad \dot{Q} = \frac{\Delta T}{R_t} \quad [\text{W/m}]$$

Para a taxa de transferência de calor total em determinado comprimento de tubulação, multiplica-se o valor “ \dot{Q} ” acima calculado, pelo comprimento total da tubulação, em [m].

DADOS E INFORMAÇÕES ADICIONAIS

TABELA 2 – Condições do ar ambiente

Condições externas para verão (°C)

Cidades	TBS	TBU	Temperatura Máxima
I-Região Norte			
Macapá (AP)	34	28,5	34,7
Manaus (AM)	35	29,0	36,9
Santarém (PA)	35	28,5	37,3
Belém (PA)	33	27,0	34,9
II-Região Nordeste			
João Pessoa (PB)	32	26,0	-
São Luís (MA)	33	26,0	33,9
Parnaíba (PI)	34	28,0	33,2
Terezina (PI)	38	28,0	40,3
Fortaleza (CE)	32	26,0	32,4
Natal (RN)	32	27,0	32,7
Recife (PE)	32	26,0	32,6
Petrolina (PE)	36	25,0	38,4
Maceió (AL)	33	27,0	35,0
Salvador(BA)	32	26,0	33,6
Aracaju (SE)	32	26,0	-
III-Região Sudeste			
Vitória (ES)	33	28,0	36,1
Belo Horizonte (MG)	32	24,0	35,5
Uberlândia (MG)	33	23,5	37,6
Rio de Janeiro (RJ)	35	26,5	39,4
São Paulo (SP)	31	24,0	34,9
Santos (SP)	33	27,0	37,7
Campinas (SP)	33	24,0	37,4
Pirassununga (SP)	33	24,0	37,8
IV-Região Centro-Oeste			
Brasília (DF)	32	23,5	34,8
Goiânia (GO)	33	26,0	37,3
Cuiabá (MT)	36	27,0	39,0
Campo Grande (MT)	34	25,0	37,0
Ponta-Porã (MT)	32	26,0	35,8
V-Região Sul			
Curitiba (PR)	30	23,5	33,3
Londrina (PR)	31	23,5	34,0
Foz de Iguaçu (PR)	34	27,0	38,0
Florianópolis (SC)	32	26,0	36,0
Joinville (SC)	32	26,0	36,0
Blumenau (SC)	32	26,0	36,0
Porto Alegre (RS)	34	26,0	39,0
Santa Maria (RS)	35	25,5	40,0
Rio Grande (RS)	30	24,5	-
Pelotas (RS)	32	25,5	-
Caxias do Sul (RS)	29	22,0	-
Uruguaiana (RS)	34	25,5	-

Estimativa de coeficientes de convecção

Para os coeficientes de convecção “ h_{ext} ” e “ h_{int} ”, utilize os seguintes valores:

TABELA 3

SITUAÇÃO	h [W/m ² .°C]
câmara frigorífica, lado externo, pouco vento	25
câmara frigorífica, lado externo, muito vento	35
câmara frigorífica, lado interno	9
equipamentos em geral, lado externo, localizados em ambientes fechados	8
balcão frigorífico, lado interno	20
refrigeradores ou freezers, lado interno, com ventilador	15
refrigeradores ou freezers, lado interno, sem ventilador (circulação natural)	6
tubulações, sem proteção ou pintada, localizada em zonas ligeiramente ventiladas	9
tubulações, isolamento revestido com lâmina de aço, zonas pouco ventiladas	7
tubulações, revestido de alumínio, compartimentos ou espaços muito restritos	5

Observe que a maioria destes valores são para situações de convecção natural. No caso de convecção forçada, os valores de “ h ” crescem consideravelmente e, neste caso, as resistências (parâmetro $\frac{1}{h}$) perdem significância nas equações e podem ser desprezados.

TABELA 4 – Condições do armazenamento de alguns tipos de alimentos

<i>Products</i>	<i>Temperature</i>	<i>Humidity</i>	<i>Life</i>
Apples	1–4*	85–90	2–8 months
Bananas, green	12–14	90	10–20 days
ripe	14–16	90	5–10 days
Beer, barrel	2–12	65	3–6 months
Cabbage	0–1	95	3–5 weeks
Carrots, young	0–1	95	1–2 months
old	0–1	95	5–8 months
Celery	0–1	95	1–2 months
Cucumber	10–12	90–95	10–14 days
Dairy products, milk	0–1	–	2–4 months
cream	–23–(–28)	–	6–12 months
cheese	1–4	65–70	6–18 months
yoghurt			
Dried fruits	0–1	Low	6 months up
Eggs, shell	–1–0	80–85	5–6 months
Fish, wet	1–2	90–95	5–15 days
Fruit soft (berries)	0–1	90–95	5–7 days
Grapefruit	10–14	85–90	4–6 weeks
Grapes	0–1	90–95	2–5 months
Lemons, green	14–15	85–90	1–6 months
Lettuce	0–1	90–95	1–2 weeks
Meats, bacon	1–4	85	1–3 months
beef	–1–(+1)	85–90	1–6 weeks
ham, fresh	0–1	85–90	7–14 days
lamb, mutton	0–1	85–90	5–14 days
pork, fresh	0–1	85–90	3–7 days
poultry	–1–0	85–90	1 week
frozen	–12	90–95	2–8 months
frozen	–18	–	4–12 months
Melons	4–10 [†]	85–90	1–4 weeks
Mushrooms	0	90	1–4 days
Onions	0–1	65–70	1–8 months
Oranges	0–9 [†]	85–90	3–12 weeks
Pears	–1–(+1)*	90–95	2–6 months
Pineapples	7–10	90	2–4 weeks
Plums	0–1	85–90	2–8 weeks
Potatoes, new crop	10–12	85–95	3–6 weeks
main crop	1–3	90–95	6–10 months
Tomatoes, green	12–15	85–90	3–5 weeks
ripe	10	85–90	8–12 days
Wine unfortified	8–10	–	Indefinite