MÓDULO 4

4.10 - DIMENSIONAMENTODE ISOLAMENTO TÉRMICO

● Isolamento Térmico (Transmissão de Calor)

A transmissão de calor em tubulações plásticas adquire particular interesse devido às suas características de isolante térmico. Estas características podem incorrer em significativas economias em instalações para transporte de fluidos, onde se deseja baixa perda de calor ao longo da linha, evitando-se ou minimizando-se o uso de isolamentos térmicos adicionais, tão comuns em linhas de tubos metálicos.

O cálculo para transferência de calor em tubos plásticos se faz da mesma maneira que em tubos de outros materiais. Sendo assim, as equações básicas envolvidas em cálculos de transmissão de calor são as que se seguem.

• Quantidade de Calor

Necessária para elevar ou diminuir a temperatura de um corpo (substância) de uma temperatura t_1 para t_2.

$$Q = M \cdot c\,(t_2 - t_1)$$

Onde: Q = Quantidade de calor (kcal)

M = Massa da substância (kg)

t_1 = Temperatura inicial da substância (°C)

t_2 = Temperatura final da substância (°C)

c = Calor especifico da substância (kcal/kg.°C)

• Transmissão de Calor em Tubulações

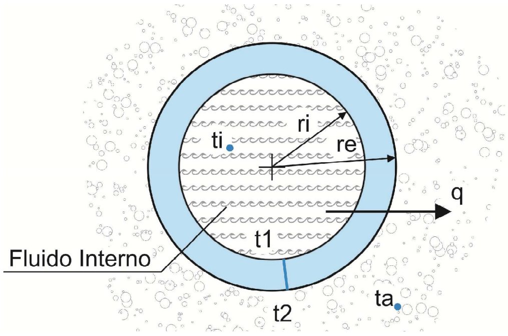
Em tubulações, a transmissão de calor ocorre através de um fluido com uma temperatura $\boldsymbol{t_i}$que transmite calor por convecção à superfície interna de um tubo ($\boldsymbol{T_1}$). O calor é daí propagado por condução à superfície externa ($\boldsymbol{T_2}$) e novamente, por convecção, é transmitido por uma substância em circulação (como o ar atmosférico) com a temperatura $\boldsymbol{t_a}$e por radiação. Essa transmissão pode ser analisada,analogamente,pela Lei de *Ohm,* como:

$$q = (t_i - t_a)/R$$

Onde: R = Resistência total a transmissão de calor:

R = Resistência a (Convecção + Condução + Radiação/Convecção)

$$R = R_\alpha + R_\lambda + R_{\alpha s}$$



Em tubulações, temos:

$$q = \frac{2.\pi.L.(t_i - t_a)}{\frac{1}{\alpha.ri} + \frac{1}{\lambda}.\ln(re/ri) + \frac{1}{\alpha_s.re}}$$

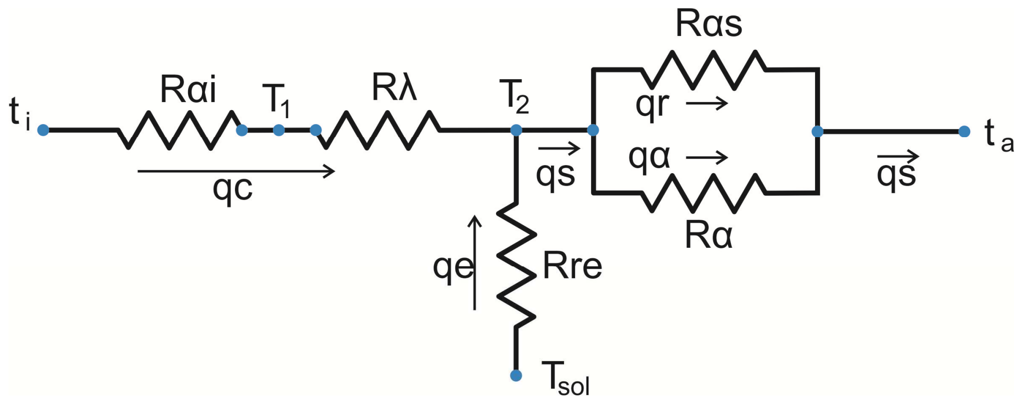
Se fossem colocadas várias camadas de isolantes térmicos, teríamos:

$$q = \frac{2.\pi.L.(t_i - t_a)}{\frac{1}{\alpha.ri} + \left(\Sigma\frac{1}{\lambda i}.\ln(re_i/ri_i)\right) + \frac{1}{\alpha_s.re}}$$

Onde:
- re_i = Raio externo do isolante (tubo)
- ri_i = Raio interno do isolante(tubo)
- L = Comprimento do isolante (tubo)
- α = Coeficiente de Convecção do fluido
- λ = Condutividade térmica do isolante (tubo)
- α_s = Coeficiente de radiação à atmosfera

Pelo mesmo raciocínio, poderíamos imaginar camadas intermediárias de fluidos entre tubos concêntricos, ocorrendo transmissões intermediárias por convecções e/ou radiação.

De forma genérica, a transição de calor em tubulações expostas pode ser representada por:



Onde:
- ti = Temperatura do fluido interno
- R_α = Resistência a convecção do fluido interno p/ o tubo
- T_1 = Temperatura da superfície interna do tubo
- R_λ = ∑ resistências a condução nas paredes do tubo e isolamentos
- T_2 = Temperatura na superfície externa do tubo ouisolamento
- R_{re} = Resistência a radiação do sol sobre o tubo
- T_{sol} = Temperatura relativa ao sol
- $R_{\alpha s}$ = Resistência a radiação do tubo à atmosfera
- $R\alpha$ = Resistência a convecção para a atmosfera
- ta = Temperatura ambiente
- q_c = Fluxo de calor estabelecido entre a superfície interna e externa do tubo e isolamentos
- q_e = Fluxo de calor de radiação solar para o tubo
- q_r = Fluxo de calor de radiação para a atmosfera
- $q\alpha$ = Fluxo de calor de convecção para a atmosfera
- q_s = Fluxo de calor que sai para a atmosfera
- q_s = $q_r + q_\alpha = q_e + q_c$

EXEMPLO:

Uma tubulação enterrada de PEAD transportando álcool a uma temperatura de 0^oC. Determinar qual a distância percorrida pelo álcool até que sua temperatura se eleve de 5^oC.

Dados:

Tubo diâmetro externo	(D) = 450 mm
diâmetro interno	(d) = 399 mm
Velocidade de escoamento	(v) = 0,32 m/s
Temperatura da superfície externa do tubo devido à temperatura do solo	(t) = 17ºC
Calor específico do álcool	(c) = 0,57 kcal/kg.^oC
Densidade do álcool	(γ) = 785 kg/m^3
Coeficiente de condutividade térmica do PEAD a 0^oC	(λ) = 0,37 kcal/m.h.^oC

Quantidade de calor para elevar a temperatura do álcool de 5^oC:

$$Q = M . c . (t_2 - t_1)$$

$$M = \frac{\pi . d^2}{4} \cdot \gamma = \frac{\pi . 0{,}399^2}{4} \cdot 785 = 98{,}2\ kg/m$$

Logo: $Q = 98{,}2 . 0{,}57 . (5 - 0) = 279{,}9\ kcal/m$ (de tubo)

Desprezando-se a convecção do álcool, para um comprimento de tubo (L) igual a 1 m, temos:

$$q = \frac{2 \cdot \pi \cdot 1 \cdot (17 - 0)}{\frac{1}{0{,}37} \cdot 1n\,(0{,}45/0{,}399)} = 328{,}6\ kcal/h$$

Portanto, para aumentar a temperatura do álcool de 5^oC será necessário o seguinte tempo:

$$T = \frac{279{,}9\ \ kcal}{328{,}6\ \ kcal} = 0{,}852\ \ h = 3066\ \ s$$

Para a velocidade de escoamento de 0,32 m/s, a distância percorrida (comprimento da tubulação) será de:

$$3066\ s \cdot 0{,}32\ m/s = 981\ m$$

• Condensação em Tubulações

O fenômeno da condensação é bastante importante em tubulações conduzindo fluidos frios e refrigerantes, como em instalações de ar condicionado.

<u>A condensação ocorre quando a temperatura externa da tubulação fica abaixo da temperatura de orvalho</u>, que por sua vez é função da umidade relativa do ar, temperatura ambiente e pressão atmosférica. Seus valores são extraídos de cartas psicrométricas.

O projetista, então, deve especificar elementos isolantes que envolvam a tubulação para evitar a condensação.

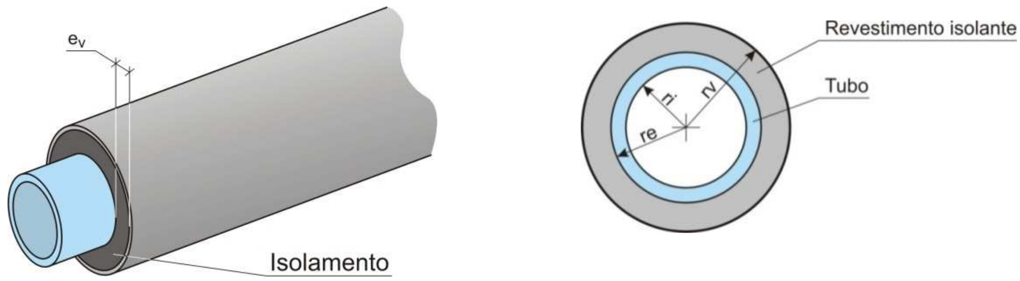


Fig.– Isolamento térmico de tubulações

EXEMPLO:
Verificar se ocorrerá condensação do ar atmosférico na superfície externa de um tubo de PP de diâmetro 250 SDR 11, transportando um fluido a 15°C, sendo a temperatura ambiente de 30°C e a umidade relativa do ar de 70%.

Dados:
D=250 mm = 0,25 m
d= 204,4 mm = 0,2044 m
λ= Coeficiente médio de condutividade térmica do PP entre 12°C e 30°C = 0,18kcal/m.h.°C
t= Temperatura interna do tubo
α= Coeficiente de convecção livre do ar =15 kcal/m²h.°C
t_o=Temperatura de condensação do ar a 30°C (orvalho) e umidade relativa de 70% = 24°C
t_e=Temperatura na superfície externa do tubo
Para 1 m de tubo, temosFluxo que atravessa o tubo:

$$q = \frac{2\,.\,\pi\,.(t_a - t\,)}{\frac{1}{\lambda}\cdot 1n\,(D/d) + \frac{1}{\alpha \cdot D/2}}$$

$$q = \frac{2\,.\,\pi\,.(30 - 15)}{\frac{1}{0{,}18}\cdot 1n\,(0{,}25/0{,}2044) + \frac{1}{15\cdot 0{,}125}} = 57\ kcal/h$$

O fluxo de calor que atravessa o tubo, neste caso, é igual ao fluxo de condução (fluxo pela parede do tubo). Portanto, o fluxo de condução é:

$$q = \frac{2\,.\,\pi\,.(t_e - t\,)}{\frac{1}{\lambda}\,1n\,(D/d)} = \frac{2\,.\,\pi\,.(t_e - 15)}{\frac{1}{0{,}18}\,1n\,(025/0{,}2044)} = 57\ kcal/h$$

Logo: $57\ kcal/h = 5{,}613\ (t_e - 15)$logo; $t_e = \frac{57}{5{,}613} + 15 = 25{,}15^o\ C$

Portanto, não ocorre condensação, pois a temperatura da superfície do tubo é maior que a temperatura de condensação (24°C).

Repetindo o exemplo, considerando-se porém um tubo de aço de mesmas dimensões e com λ = 40 kcal/m.h.°C, temos:

- Fluxo que atravessa o tubo:

$$q = \frac{2\,.\,\pi\,.(30 - 15)}{\frac{1}{40}\ln(0{,}25/0{,}2044) + \frac{1}{15 \cdot 0{,}125}} = 176{,}47\ \ kcal/h$$

- Fluxo de condução:

$$q = \frac{2\,.\,\pi\,.(t_e - 15)}{\frac{1}{40}\ln(0{,}25/0{,}2044)} = 1248\,(t_e - 15) = 176{,}47\ kcal/h$$

Logo: $$t_e = \frac{176{,}47}{1248} + 15 = 15{,}14^o\,C$$

Portanto, ocorre condensação, pois a temperatura externa do tubo é menor que a temperatura de condensação (24°C).

Para cálculos rápidos, privilegiando a segurança, podemos sugerir a seguinte expressão:

$$\frac{(t_o - t)}{q/S} \le r_V \cdot \left(\frac{1}{\lambda_V} \cdot \ln\left(r_V/re\right) + \frac{1}{\lambda_T} \cdot \ln\left(re/ri\right) \right)$$

Onde: t_a = temperatura ambiente
t = temperatura do fluido interno ao tubo
t_o = temperatura de orvalho
r_V = Raio externo do isolante = $e_V + re$
e_V = Espessura do revestimento ($r_V - re$)
re = Raio externo do tubo
ri = Raio interno do tubo
q/S = fluxo de calor por unidade de área externa do revestimento
$q/S = \alpha\,(t_a - t_o)$
α= coef. de convecção livre do ar de 7 -15 kcal/m²h.°C . Tomando o pior caso, ar parado, α= 7 kcal/m²h.°C
λ_V = condutividade térmica do revestimento
λ_T = condutividade térmica do tubo

Valores de ($t_a - t_o$) e da consequente temperatura de orvalho em função da umidade relativa podem ser extraídos da Tabela abaixo, com boa aproximação.Atentar que$q/S = \alpha\,(t_a - t_o)$ e que a temperatura de orvalho pode ser extraída considerando-se que$t_o = t_a - (t_a - t_o)$.

Tabela- Umidade Relativa do Ar e temperatura de orvalho

φmax (%)	$t_a - t_o$ °C	φmax (%)	$t_a - t_o$ °C
95	≈ 0,7	70	≈ 5,2
90	≈ 1,5	65	≈ 6,2
85	≈ 2,3	60	≈ 7,5
80	≈ 3,2	55	≈ 8,5
75	≈ 4,2	50	≈ 9,9

Nota: valores extraídos de carta psicrométrica para $t_a \approx 10^oC$, pois valores de umidade relativa maiores ocorrem a temperaturas mais baixas. Tabela extraída do livro "Refrigeração" de Ênio Cruz da Costa

PROPRIEDADES DE ALGUNS MATERIAIS ISOLANTES

MATERIAL	PESO ESPECÍFICO (ρ) kgf/m^3	CONDUTIVIDADE TÉRMICA (λ)W/m.°C
Água	1000	0,57
Alvenaria	1800	0,98
Ar	1,2	0,026
Asfalto	2120	0,76
Concreto	2300	1,4
Concreto celular	300 – 600	0,057 – 0,14
Cortiça	200	0,052
Cortiça aglomerada	200	0,042
Epoxi	900	0,12 – 0,177
Espuma de borracha	80	0,035
Espuma plástico geral	25	0,041
Espuma poliestireno(PS)	15 – 30	0,032 – 0,040
Espuma poliuretano (PU)	30 – 45	0,023
Espuma vidro rígida	145	0,053
Lã Vidro	100 – 200	0,029 – 0,052
Lã Rocha	100 – 200	0,029 – 0,041
Madeira - pinho	550	0,16 – 0,35
Madeira Aglomerada	210	0,032
PEAD	950	0,43
PP	920	0,22
Vermiculite	70	0,046
Vidro	2500	0,76

EXEMPLO:

Determinar a espessura necessária de revestimento de espuma de poliestireno em um tubo de PP de DE 32 SDR6 (e = 5,4 mm) conduzindo fluido a 5°C, com uma temperatura ambiente de 25°C e umidade relativa do ar de 80%.

Dados:

λ_V = condutividade térmica do revestimento:0,032 kcal/m.h.°C

λ_T = condutividade térmica do tubo: 0,18 kcal/m.h.°C

re = Raio externo do tubo: 0,032 m

ri = Raio interno do tubo: 0,0266 m

$t_a - t_o$ = 3,2°C (da Tabela)

α = coef. de convecção livre do ar de 11 kcal/m²h.°C

$q/S = \alpha(t_a - t_o)$ = 11.(3,2) = 35,2 kcal/m².h

$$t_o = t_a - (t_a - t_o) = 25 - 3,2 = 21,8°C$$

$$\frac{(t_o - t)}{q/S} \leq r_V \cdot \left(\frac{1}{\lambda_V} \cdot ln\left(r_V / re \right) + \frac{1}{\lambda_T} \cdot ln\left(re / ri \right) \right)$$

$$\frac{(21,8 - 5)}{35,2} \leq r_V \cdot \left(\frac{1}{0,032} \cdot ln\left(r_V / 0,032 \right) + \frac{1}{0,18} \cdot ln\left(0,032 / 0,0266 \right) \right)$$

Fazendo as interações, isto é, arbitrando valores para r_V até que a desigualdade acima seja atingida, concluímos que $r_V \geq$ 19,2 mm

Ou seja: espessura mínima do revestimento e_V= 19,2 – re = 3,2 mm