

Engenharias, São Judas – Unimonte
 Transferência de Calor, Prof. Simões
 Condução, tubos e esferas - resolução

1. Uma tubulação de cobre ($k=385 \text{ W/mK}$), de 3,0 cm de diâmetro externo e 1,5 cm de diâmetro interno, conduz um fluido a uma temperatura de -5°C . A temperatura do ambiente em que se encontra a tubulação é de 28°C . Calcule quanto calor é absorvido pelo refrigerante em 5 metros de tubo. A seguir, o tubo é revestido por uma camada de lã de vidro ($k=0,044 \text{ W/mK}$) de 1,0 cm de espessura. Calcule o calor absorvido após o revestimento.

a) Sem revestimento:

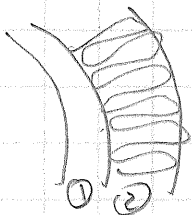
$$\begin{aligned} k &= 385 \text{ W/mK} \\ L &= 5,0 \text{ m} \\ T_1 &= 28^\circ\text{C} \\ T_2 &= -5^\circ\text{C} \\ r_1 &= 7,5 \times 10^{-3} \text{ m} \\ r_2 &= 1,5 \times 10^{-2} \text{ m} \end{aligned}$$

$$\dot{q} = \frac{2k\pi L}{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)} (T_1 - T_2)$$

$$\dot{q} = \frac{2 \cdot 385 \cdot \pi \cdot 5,0}{\ln\left(\frac{1,5 \times 10^{-2}}{7,5 \times 10^{-3}}\right)} \cdot (28 - (-5))$$

$$\dot{q} = 5,76 \times 10^5 \text{ W} \quad \text{antes}$$

b) Com revestimento



$$R = \frac{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{2k\pi L}$$

$$\textcircled{1} \text{ Cobre} \Rightarrow R_1 = \frac{\ln\left(\frac{1,5 \times 10^{-2}}{7,5 \times 10^{-3}}\right)}{2 \cdot 385 \cdot \pi \cdot 5,0}$$

$$R_1 = 5,73 \times 10^{-5} \text{ K/W}$$

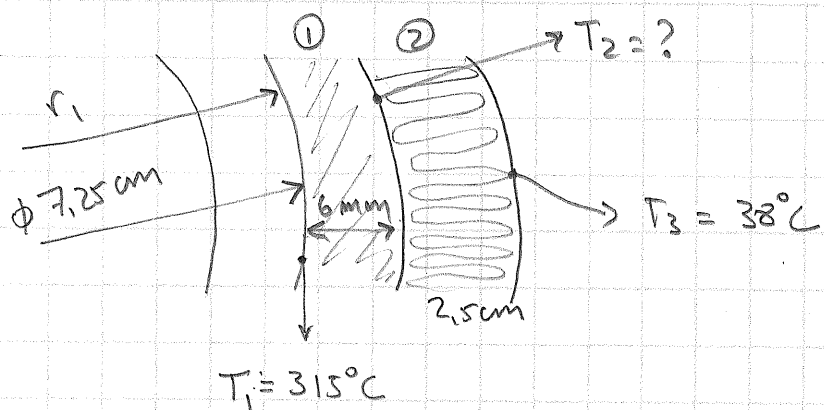
$$\textcircled{2} \text{ Lã de vidro} \Rightarrow R_2 = \frac{\ln\left(\frac{2,5 \times 10^{-2}}{1,5 \times 10^{-2}}\right)}{2 \cdot 0,044 \cdot \pi \cdot 5,0} \Rightarrow R_2 = 0,370 \text{ K/W}$$

$$R_t = 5,73 \times 10^{-5} + 0,370 \Rightarrow R_t = 0,370 \text{ K/W}$$

$$\dot{q} = \frac{\Delta T}{R_t} \Rightarrow \dot{q} = \frac{28 - (-5)}{0,370} \Rightarrow \dot{q} = 89,2 \text{ W} \quad \text{depois}$$

2. Um tubo de aço de 7,25 cm de diâmetro externo é coberto com 6,0 mm de amianto ($k=0,166 \text{ W/mK}$) seguido de uma camada de 2,5 cm de fibra de vidro ($k=0,048 \text{ W/mK}$). A temperatura da parede externa do tubo é 315°C , e a temperatura externa do isolamento é de 38°C . Calcule a temperatura da interface entre o amianto e a fibra de vidro. R.: 291°C

SUPOR $L=1,0 \text{ m}$



$$r_1 = \frac{7,25}{2} = 3,63 \text{ cm}$$

$$r_1 = 3,63 \times 10^{-2} \text{ m}$$

① Amianto $\Rightarrow k_1 = 0,166 \text{ W/mK}$
 $r_1 = 3,63 \times 10^{-2} \text{ m}$
 $r_2 = 4,23 \times 10^{-2} \text{ m}$ } 6 mm

② Fibra de vidro $\Rightarrow k_2 = 0,048 \text{ W/mK}$
 $r_1 = 4,23 \times 10^{-2} \text{ m}$
 $r_2 = 6,73 \times 10^{-2} \text{ m}$ } 2,5 cm

$$R_1 = \frac{\ln \frac{4,23}{3,63}}{2 \cdot 0,166 \cdot \pi \cdot 1,0} \Rightarrow R_1 = 0,147 \text{ K/W}$$

$$R_2 = \frac{\ln \frac{6,73}{4,23}}{2 \cdot 0,048 \cdot \pi \cdot 1} \Rightarrow R_2 = 1,54 \text{ K/W}$$

$$R_{\text{t}} = 0,147 + 1,54 \Rightarrow R_{\text{t}} = 1,69 \text{ K/W}$$

$$\dot{q} = \frac{\Delta T}{R_{\text{t}}} \Rightarrow \dot{q} = \frac{315 - 38}{1,69} \Rightarrow \dot{q} = 164 \text{ W (p/m)}$$

$$\dot{q} = \frac{2k_1 L}{\ln \frac{r_2}{r_1}} \cdot (T_1 - T_2) \Rightarrow 164 = \frac{2 \cdot 0,166 \cdot \pi \cdot L}{\ln \frac{4,23}{3,63}} \cdot (315 - T_2)$$

$$T_2 = 291^\circ\text{C}$$

3. Um tubo de aço ($k=50 \text{ W/mK}$) de 4,0 polegadas de diâmetro interno e $\frac{1}{4}$ de polegada de espessura, é utilizado para a distribuição de vapor em uma indústria. O vapor passa no interior do tubo a uma temperatura de 300°C . Calcule quanto de calor é perdido, por metro linear de tubo, se a temperatura da parede externa do tubo é de 25°C . Se o tubo for revestido por calhas de lã de vidro ($k=0,044 \text{ W/mK}$) de 50 mm de espessura, para quando será reduzida essa perda? Dado: 1 pol.=25,4 mm

$$4,0'' = 102 \text{ mm} = 0,102 \text{ m} \quad (r_1 = 5,10 \times 10^{-2} \text{ m})$$

$$\frac{1}{4}'' = 6,35 \text{ mm} = 6,35 \times 10^{-3} \text{ m} \quad (r_2 = 5,74 \times 10^{-2} \text{ m})$$

⇒ Usaremos R nos dois cálculos

① Aço ⇒ R_1 ⇒ $k_1 = 50 \text{ W/mK}$

$$r_1 = 5,10 \times 10^{-2} \text{ m} \quad R_1 = \frac{\ln \frac{5,74}{5,10}}{2 \cdot 50 \cdot \pi \cdot 1,0} = 3,76 \times 10^{-4} \text{ K/W}$$

$$r_2 = 5,74 \times 10^{-2} \text{ m}$$

② Lã de vidro ⇒ R_2 ⇒ $k_2 = 0,044$

$$r_1 = 5,74 \times 10^{-2} \text{ m} \quad R_2 = \frac{\ln \frac{0,107}{5,74 \times 10^{-2}}}{2 \cdot 0,044 \cdot \pi \cdot 1,0} = 2,25 \text{ K/W}$$

$$r_2 = 0,107$$

a) Só tubo de aço:

$$\dot{q} = \frac{\Delta T}{R_t} \Rightarrow \dot{q} = \frac{300 - 25}{3,76 \times 10^{-4}} \Rightarrow \dot{q} = 7,31 \times 10^5 \text{ W}$$

b) Aço + revestimento:

$$R_t = 3,76 \times 10^{-4} + 2,25 \Rightarrow R_t = 2,25 \text{ K/W}$$

$$\dot{q} = \frac{\Delta T}{R_t} \Rightarrow \dot{q} = \frac{300 - 25}{2,25} \Rightarrow \dot{q} = 1,22 \times 10^3 \text{ W}$$

4. No problema anterior, deseja-se reduzir a perda de calor do tubo para 50 W/m, utilizando-se poliuretano ($k=0,024$ W/mK). De quanto seria a espessura do isolamento necessária? Qual será a temperatura no centro da camada de poliuretano?

$$\dot{q} = 50 \text{ W (p/m)}$$

$$\dot{q} = \frac{\Delta T}{R_t} \Rightarrow \dot{q} = \frac{\Delta T}{R_{aço} + R_{pol}}$$

$$50 = \frac{300 - 25}{3,74 \times 10^{-4} + R_{pol}} \Rightarrow R_{pol} = 5,5 \text{ K/W}$$

$$R_{pol} = \frac{\ln \frac{r_2}{r_1}}{2 \cdot k \cdot \pi \cdot L} \Rightarrow 5,5 = \frac{\ln \frac{r_2}{5,74 \times 10^{-2}}}{2 \cdot 0,024 \cdot \pi \cdot 1,0}$$

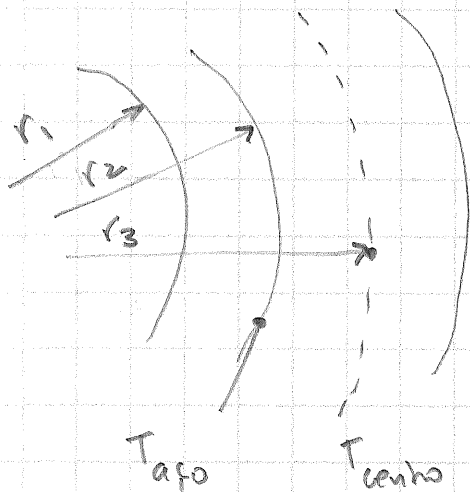
$$\ln \frac{r_2}{5,74 \times 10^{-2}} = 0,829 \quad e^{0,829} = \frac{r_2}{5,74 \times 10^{-2}}$$

$$r_2 = 0,132 \text{ m}$$

$$\text{Espessura} \Rightarrow 0,132 - 5,74 \times 10^{-2} = 7,42 \times 10^{-2} \text{ m} = \boxed{7,42 \text{ cm}}$$

$$\text{Raio central} \Rightarrow \frac{0,132 + 5,74 \times 10^{-2}}{2} = 9,47 \times 10^{-2} \text{ m}$$

∴ (2) o cálculo da temperatura

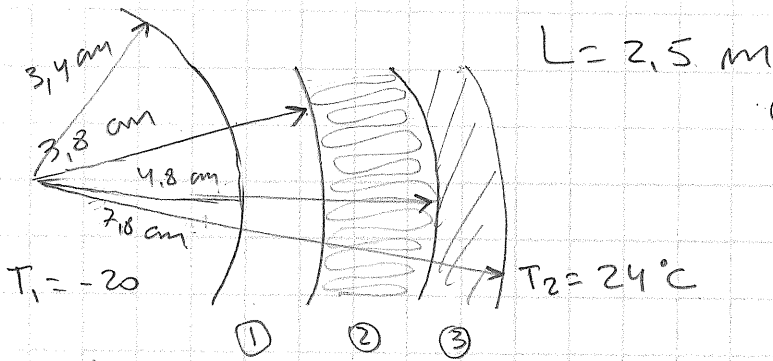


$$\dot{q} = \frac{2 \cdot k \cdot \pi \cdot L \cdot (T_1 - T_2)}{\ln \left(\frac{r_2}{r_1} \right)}$$

$$50 = \frac{2 \cdot 50 \cdot \pi \cdot 1,0 \cdot (300 - T_{aço})}{\ln \frac{5,74}{5,10}} \Rightarrow T_{aço} = 300^\circ \text{C}$$

$$50 = \frac{2 \cdot 0,024 \cdot \pi \cdot 1,0 \cdot (300 - T_{centro})}{\ln \frac{9,47 \times 10^{-2}}{5,74}} \Rightarrow T_{centro} = \boxed{134^\circ \text{C}}$$

5. Um tubo de cobre, de 3,8 cm de diâmetro externo e 4,0 mm de espessura, conduz vapor de R-12 a uma temperatura de -20°C aproximadamente, e para alcançar o compressor, tem de passar por uma sala de 2,5 m onde a temperatura ambiente é de 24°C . O tubo é envolto por um isolamento duplo, formado por uma camada de 10 mm de espessura de lã de vidro ($k = 0,044 \text{ W/mK}$) envolta por isotubo de poliestireno ($k = 0,029 \text{ W/mK}$) de 30 mm de espessura. Qual o ganho de calor total do refrigerante ao passar pela sala?



① Cobre $\Rightarrow k_1 = 385 \text{ W/mK}$
 $r_1 = 3,4 \times 10^{-2} \text{ m}$
 $r_2 = 3,8 \times 10^{-2} \text{ m}$

② Lã de vidro $\Rightarrow k_2 = 0,044 \text{ W/mK}$
 $r_1 = 3,8 \times 10^{-2} \text{ m}$
 $r_2 = 4,8 \times 10^{-2} \text{ m}$

③ Poliestireno $\Rightarrow k_3 = 0,029 \text{ W/mK}$
 $r_1 = 4,8 \times 10^{-2} \text{ m}$
 $r_2 = 7,8 \times 10^{-2} \text{ m}$

$$R_1 = \frac{\ln \frac{r_2}{r_1}}{2k_1 L} \quad R_1 = \frac{\ln \frac{3,8}{3,4}}{2 \cdot 385 \cdot \pi \cdot 2,5} \Rightarrow R_1 = 1,85 \times 10^{-5} \text{ K/W}$$

$$R_2 = \frac{\ln \frac{4,8}{3,8}}{2 \cdot 0,044 \cdot \pi \cdot 2,5} \Rightarrow R_2 = 0,338 \text{ K/W}$$

$$R_3 = \frac{\ln \frac{7,8}{4,8}}{2 \cdot 0,029 \cdot \pi \cdot 2,5} \Rightarrow R_3 = 1,07 \text{ K/W}$$

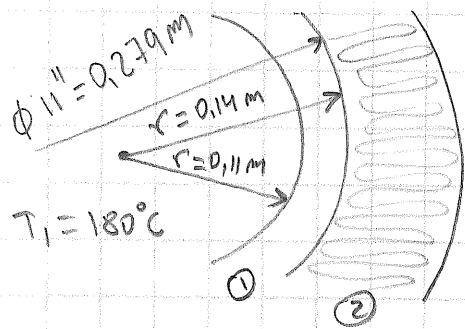
$$R_{\text{t}} = 1,85 \times 10^{-5} + 0,338 + 1,07 \Rightarrow R_{\text{t}} = 1,41 \text{ K/W}$$

$$\dot{q} = \frac{\Delta T}{R_{\text{t}}} \Rightarrow \dot{q} = \frac{24 - (-20)}{1,41} \Rightarrow \boxed{\dot{q} = 31,2 \text{ W}}$$

6. Duas substâncias são misturadas, reagindo entre si e liberando calor dentro de um tubo de diâmetro externo de 11 polegadas, feito de cerâmica ($k = 34,4 \text{ kcal/hm}^\circ\text{C}$) com espessura de 3,0 cm. O comprimento do tubo é 1,5 m. Todo o calor gerado na reação é cedido ao ambiente a uma taxa de 290 W, de modo que a temperatura da mistura, 180°C , permanece constante. Será necessário isolar a tubulação para que a temperatura na face externa do isolante não ultrapasse 30°C . O isolante escolhido foi o silicato de cálcio ($k = 0,053 \text{ kcal/hm}^\circ\text{C}$), disponível nas espessuras indicadas. Determine a espessura a ser escolhida para atender ao projeto.

ESPECIFICAÇÕES

Produtos	Espessuras (pol)	Diâmetro Nominal (pol)
Tubos Segmentados	1,1½, 2,2½ e 3	11 a 36



$$L = 1,5 \text{ m}$$

$$\dot{q} = 290 \text{ W}$$

W	kcal/h
1,163	1
290	x

$$x = 249 \text{ kcal/h}$$

$$\dot{q} = \frac{\Delta T}{Rt} \Rightarrow 249 = \frac{180 - 30}{Rt}$$

$$Rt = 0,602 \text{ } ^\circ\text{Ch/kcal}; \quad R = \frac{\ln \frac{r_2}{r_1}}{2k\pi L}$$

$$Rt = R_{\text{tubo}} + R_{\text{isolante}}$$

$$R_{\text{tubo}} = \frac{\ln \frac{0,14}{0,11}}{2 \cdot 34,4 \cdot \pi \cdot 1,5} \Rightarrow R_{\text{tubo}} = 7,44 \times 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{Ch/kcal}$$

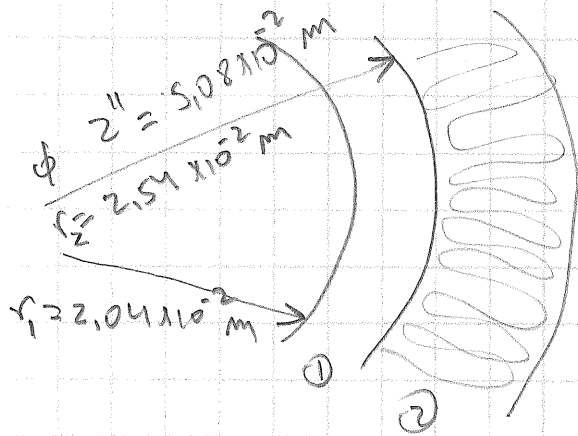
$$0,602 = 7,44 \times 10^{-4} + R_{\text{isolante}} \Rightarrow R_{\text{isol.}} = 0,601 \text{ } ^\circ\text{Ch/kcal}$$

$$0,601 = \frac{\ln \frac{r_2}{0,14}}{2 \cdot 0,053 \cdot \pi \cdot 1,5} \Rightarrow \ln \frac{r_2}{0,14} = 0,30$$

$$e^{0,30} = \frac{r_2}{0,14} \Rightarrow r_2 = 0,189; \quad e = 0,189 - 0,14 = 0,049 \text{ m}$$

$$4,9 \text{ cm} \approx 2''$$

7. Uma tubulação de aço ($k=50 \text{ W/mK}$) de 2,0 polegadas de diâmetro externo e 5,0 mm de espessura conduz vapor superaquecido a uma temperatura de 300°C . Determine a espessura da calha de Lã de Vidro ($k=0,033 \text{ W/mK}$) a ser usada, de modo que a perda térmica não ultrapasse 50 W/m . $T_{\text{ambiente}} = 25^\circ\text{C}$



① Aço

$$k = 50 \text{ W/mK}$$

$$r_1 = 2,04 \times 10^{-2} \text{ m}$$

$$r_2 = 2,54 \times 10^{-2} \text{ m}$$

$$R_{12} = \frac{\ln \frac{r_2}{r_1}}{2k\pi L} = \frac{\ln \frac{2,54}{2,04}}{2 \cdot 50 \cdot \pi \cdot 1,0} = 6,98 \times 10^{-4} \text{ K/W}$$

$$\dot{q} = \frac{\Delta T}{R_{\text{t}}} \Rightarrow 50 = \frac{300 - 25}{R_{\text{t}}} \Rightarrow R_{\text{t}} = 5,5 \text{ K/W}$$

(R do aço é desprezível) $\therefore R_{\text{t}} = R_{\text{Lã de vidro}}$

$$5,5 = \frac{\ln \frac{r_2}{2,54 \times 10^{-2}}}{2 \cdot 0,033 \cdot \pi \cdot 1,0} \Rightarrow \ln \frac{r_2}{2,54 \times 10^{-2}} = 1,14$$

$$e^{1,14} = \frac{r_2}{2,54 \times 10^{-2}} \Rightarrow r_2 = 7,95 \times 10^{-2} \text{ m}$$

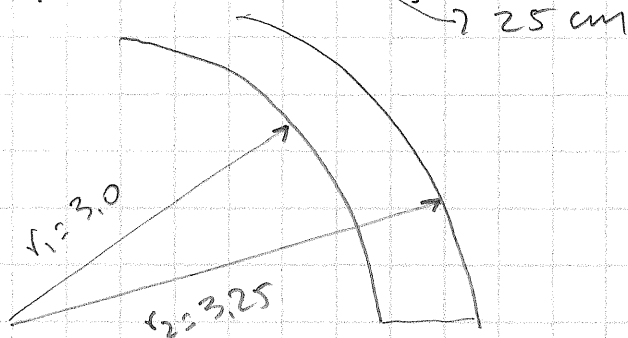
$$\text{espessura} = 7,95 \times 10^{-2} - 2,54 \times 10^{-2}$$

$$\text{espessura} = 5,41 \times 10^{-2} \text{ m}$$

$$\boxed{5,41 \text{ cm} = 2,13''}$$

8

Um armazém semiesférico com um raio de ^{interno} 3,0 metros é construído para armazenar temporariamente uma carga de um alimento perecível que deve ser mantido a uma temperatura de 5°C. As placas usadas são de poliestireno expandido (EPS) pré-moldadas, com espessura de 80 mm ($k=0,040 \text{ W/mK}$). Considerando uma temperatura externa de 40°C, e apenas o fluxo pelo poliestireno por condução, estime a potência necessária em BTU/h para manter essas condições.



$$\dot{q} = \frac{4 \cdot k \cdot \pi \cdot (T_1 - T_2)}{\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2}}$$

$$\dot{q} = \frac{4 \cdot 0,040 \cdot \pi \cdot (40 - 5)}{\frac{1}{3,0} - \frac{1}{3,25}}$$

$$\dot{q} = 686 \text{ W} \quad (\text{fluxo na esfera total})$$

Fluxo na semiesfera $\dot{q} = \frac{686}{2} \Rightarrow \dot{q} = 343 \text{ W}$

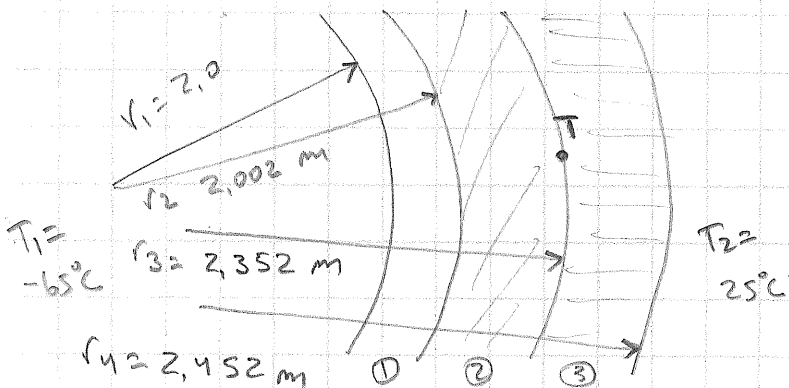
BTU/h	W
1	0,293
x	343

$$x = \frac{343}{0,293} = 1,17$$

$$\dot{q} = 1,17 \times 10^3 \text{ BTU/h}$$

$$k = 0,034 \text{ kcal/h m}^\circ\text{C}$$

9. Um reservatório esférico de raio interno igual a 2,0 m é feito de aço inox ($k=16 \text{ kcal/h m}^\circ\text{C}$) com espessura igual a 20 mm. O reservatório é revestido por uma camada de lã de vidro ($k=0,030 \text{ kcal/h m}^\circ\text{C}$) de espessura igual a 35 cm, e por uma camada externa de poliestireno expandido ($k=0,040 \text{ W/mK}$) de 10 cm. A temperatura na face interna do reservatório é de -65°C e na face externa do isolamento é 25°C . Calcular o fluxo de calor que penetra na esfera e a temperatura entre a lã de vidro e o poliestireno.



$$R = \frac{\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2}}{4 \cdot k \cdot \pi}$$

$$R_1 = \frac{\frac{1}{2,000} - \frac{1}{2,002}}{4 \cdot 16 \cdot \pi}$$

$$R_1 = 2,48 \times 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C h/kcal} \text{ (desprezível)}$$

$$R_2 = \frac{\frac{1}{2,002} - \frac{1}{2,352}}{4 \cdot 0,030 \cdot \pi} \Rightarrow R_2 = 0,197 \text{ }^\circ\text{C h/kcal}$$

$$R_3 = \frac{\frac{1}{2,352} - \frac{1}{2,452}}{4 \cdot 0,034 \cdot \pi} \Rightarrow R_3 = 4,06 \times 10^{-2} \text{ }^\circ\text{C h/kcal}$$

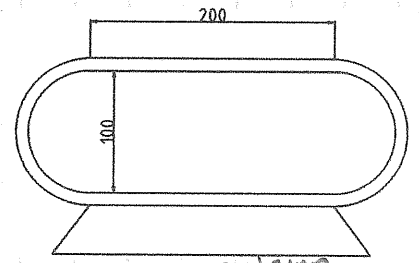
$$R_{\text{t}} = 0,197 + 4,06 \times 10^{-2} \Rightarrow R_{\text{t}} = 0,238 \text{ }^\circ\text{C h/kcal}$$

$$\dot{q} = \frac{\Delta T}{R_{\text{t}}} \Rightarrow \dot{q} = \frac{25 - (-65)}{0,238} \Rightarrow \dot{q} = 378 \frac{\text{kcal}}{\text{h}}$$

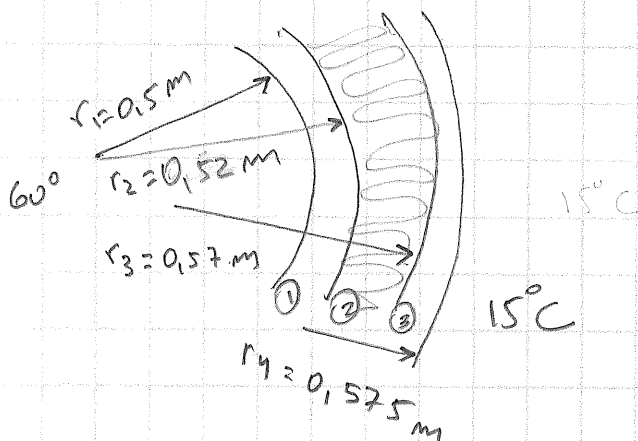
$$\dot{q} = \frac{4 \cdot k \cdot \pi}{\frac{1}{r_3} - \frac{1}{r_4}} (T_2 - T) \Rightarrow 378 = \frac{4 \cdot 0,034 \cdot \pi}{\frac{1}{2,352} - \frac{1}{2,452}} (25 - T)$$

$$T = 9,7^\circ\text{C}$$

10. Um reservatório acumulará água a uma temperatura de 60°C , em um ambiente a 15°C . O reservatório é cilíndrico, fechado por semiesferas, e as dimensões indicadas estão em cm. O reservatório é de PVC ($k=0,21 \text{ W/mK}$) de 20 mm, revestido por 50 mm de lã de vidro ($k=0,030 \text{ W/mK}$), e manta asfáltica de 5,0 mm ($k=0,75 \text{ W/mK}$). A água será conduzida até o ponto de consumo a 20 metros por um tubo de PVC de 50 mm de diâmetro e espessura de 3 mm, revestido por calha de lã de vidro ($k=0,044 \text{ W/mK}$) de 30 mm de espessura, e manta asfáltica de 5 mm. Determine a perda calórica por condução nessa instalação.



Tanque - cilindro



$$R = \frac{\ln \frac{r_2}{r_1}}{2 \cdot k \cdot \pi \cdot L}$$

$$R_1 = \frac{\ln \frac{0,52}{0,5}}{2 \cdot 0,21 \cdot \pi \cdot 2,0} \Rightarrow R_1 = 1,49 \times 10^{-2} \text{ K/W}$$

$$R_2 = \frac{\ln \frac{0,57}{0,52}}{2 \cdot 0,030 \cdot \pi \cdot 2} \Rightarrow R_2 = 0,244 \frac{\text{K}}{\text{W}}; \quad R_3 = \frac{\ln \frac{0,575}{0,57}}{2 \cdot 0,044 \cdot \pi \cdot 2} \Rightarrow R_3 = 1,58 \times 10^{-2} \frac{\text{K}}{\text{W}}$$

$$R_t = 1,49 \times 10^{-2} + 0,244 + 1,58 \times 10^{-2} \Rightarrow R_t = 0,275 \text{ K/W}$$

$$\dot{q}_{\text{cil}} = \frac{\Delta T}{R_t} \Rightarrow \dot{q}_{\text{cil}} = \frac{60 - 15}{0,275} \Rightarrow \dot{q}_{\text{cil}} = 164 \text{ W}$$

Tanque - semiesteras

$$R = \frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2}; \quad R_1 = \frac{1}{0,5} - \frac{1}{0,52} \Rightarrow R_1 = 2,91 \times 10^{-2} \frac{\text{K}}{\text{W}}$$

$$R_2 = \frac{1}{0,52} - \frac{1}{0,57} \Rightarrow R_2 = 4,47 \times 10^{-3} \frac{\text{K}}{\text{W}}; \quad R_3 = \frac{1}{0,57} - \frac{1}{0,575} = 276 \times 10^{-2} \frac{\text{K}}{\text{W}}$$

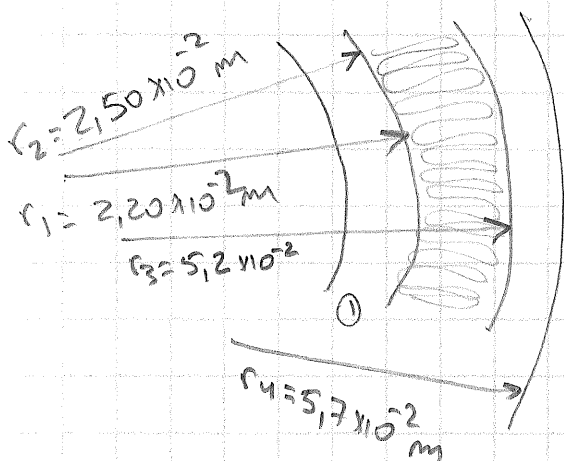
⑩ cont. (semiesferas)

$$R_t = 2,91 \times 10^{-2} + 4,47 \times 10^{-1} + 2,76 \times 10^{-2}$$

$$R_t = 0,504 \text{ K/W}$$

$$\dot{q}_{\text{esf}} = \frac{60-15}{0,504} \Rightarrow \dot{q}_{\text{esf}} = 89,3 \text{ W}$$

Tubo (L=20 m)



$$R_1 = \frac{\ln \frac{2,5}{2,2}}{2 \cdot 0,21 \cdot \pi \cdot 20} \Rightarrow R_1 = 4,84 \times 10^{-3} \frac{\text{K}}{\text{W}}$$

$$R_2 = \frac{\ln \frac{5,2}{2,2}}{2 \cdot 0,030 \cdot \pi \cdot 20} \Rightarrow R_2 = 0,228 \frac{\text{K}}{\text{W}}$$

$$R_3 = \frac{\ln \frac{5,7}{5,2}}{2 \cdot 0,044 \cdot \pi \cdot 20} \Rightarrow R_3 = 1,66 \times 10^{-2} \frac{\text{K}}{\text{W}}$$

$$R_t = 4,84 \times 10^{-3} + 0,228 + 1,66 \times 10^{-2} \Rightarrow R_t = 0,250 \text{ K/W}$$

$$\dot{q}_{\text{tubo}} = \frac{60-15}{0,25} \Rightarrow \dot{q}_{\text{tubo}} = 180 \text{ W}$$

$$\dot{q} = \dot{q}_{\text{cal}} + \dot{q}_{\text{esf}} + \dot{q}_{\text{tubo}}$$

$$\dot{q} = 164 + 89,3 + 180 \Rightarrow$$

$$\boxed{\dot{q} = 436 \text{ W}}$$