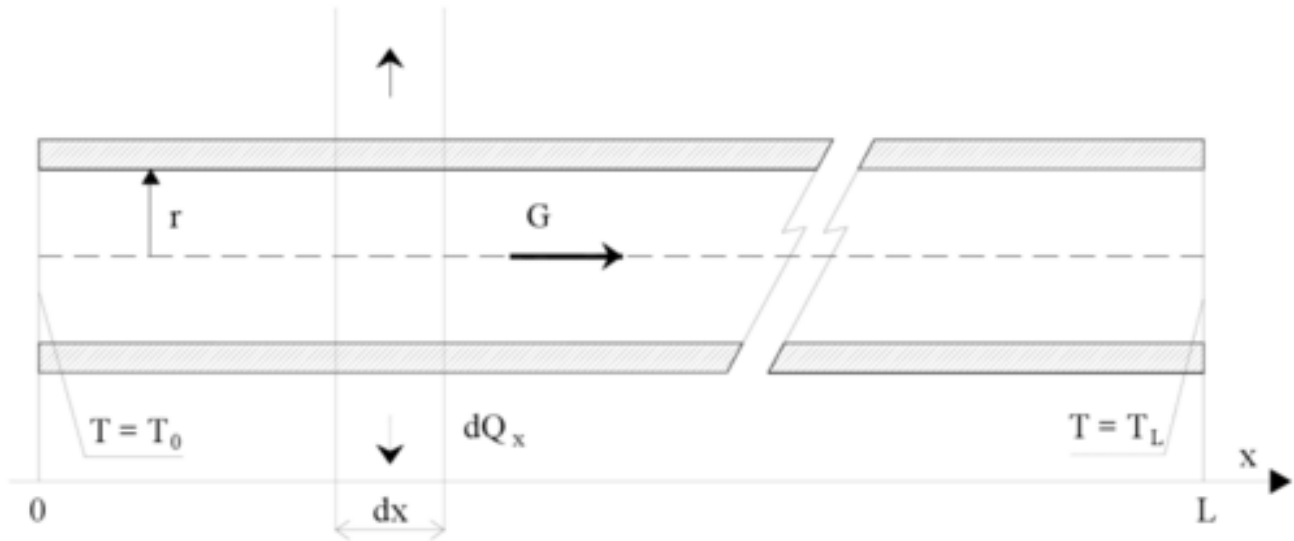


VARIAZIONE TEMPERATURA IN UN TUBO IN CUI SCORRE UN FLUIDO CALDO



**Fig. 6.12:** raffreddamento di un fluido in una tubazione;  $T_0$  = temperatura d'ingresso;  $T_L$  = temperatura d'uscita;  $G$  = portata;  $r$  = raggio del tubo.

- a) il regime sia stazionario;
- b) la temperatura  $T_a$  sia uniforme;
- c) la temperatura  $T$  del fluido sia funzione soltanto della  $x$  e non vari sulla sezione;
- d) le proprietà termofisiche del fluido non varino con la temperatura.

L'ipotesi c) è ben verificata se il moto è turbolento, essendovi rimescolamento. Consideriamo un elemento  $dx$  di tubo, attraverso il quale si trasmette, nell'unità di tempo, il calore  $dq_x$ :

$$dq_x = 2 \cdot \pi \cdot r \cdot H(T - T_a) \cdot dx \quad (6.51)$$

Nel passaggio da  $x$  ad  $x+dx$ , la portata  $G$  di fluido subisce un raffreddamento  $dT$  al quale corrisponde una cessione di calore  $dq_f$  da parte del fluido, tale che

$$dq_f = -G \cdot \gamma \cdot dT \quad (6.52)$$

essendo inoltre  $T=T(x)$ :

$$dq_f = -G\gamma \frac{dT}{dx} dx \quad (6.53)$$

poiché il regime è stazionario:

$$dq_x = dq_f \quad (6.54)$$

e quindi:

$$2\pi rH(T - T_a) = -G\gamma \frac{dT}{dx} \quad (6.55)$$

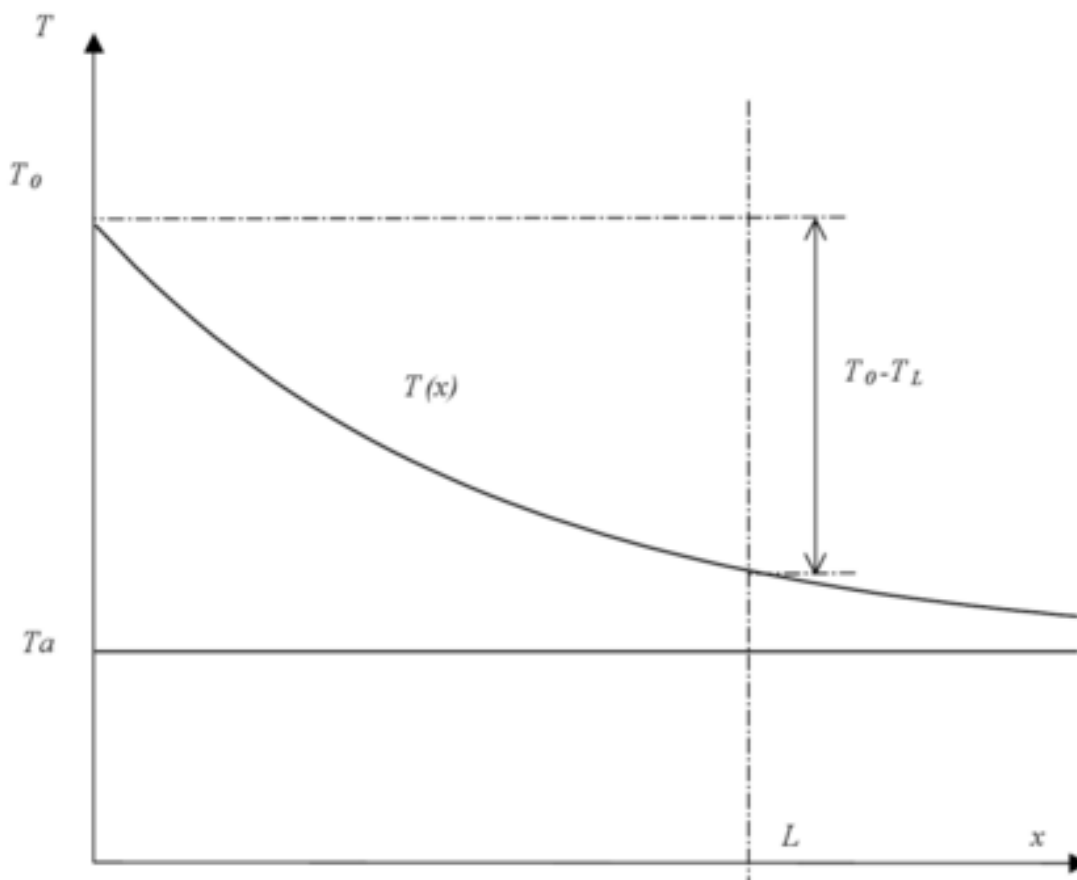
integrando per separazione di variabili:

$$\ln(T - T_a) = -\frac{2\pi rH}{G\gamma} x + M \quad (6.56)$$

la costante  $M$  si determina imponendo che per  $x=0$ ,  $T=T_0$ :

$$M = \ln(T_0 - T_a) \quad (6.57)$$

sostituendo e passando agli esponenziali:



**Fig. 6.13:** andamento della temperatura di un fluido che si raffredda all'interno di una tubazione.  $T_0$  = temperatura di ingresso del fluido;  $T_a$  = temperatura dell'ambiente esterno;  $L$  = lunghezza della tubazione.

$$T = T_a + (T_0 - T_a)e^{-\frac{2\pi H}{G\gamma}x} \quad (6.58)$$

L'andamento  $T=T(x)$  rappresentato dalla (6.58) è disegnato in fig. 6.13.

Al fine di limitare le dispersioni di calore ed evitare valori eccessivamente bassi di  $T(L)$ , si può intervenire sull'esponente dell'equazione (6.58). La portata  $G$  e il raggio  $r$  sono dati di progetto, così come la lunghezza  $L$  della tubazione, sulla quale si può intervenire avvicinando al massimo il punto di produzione del calore al punto di utilizzazione; nel caso di distribuzioni complesse, si può verificare che il punto di produzione sia collocato in posizione baricentrica rispetto alle utenze. Per diminuire l'abbassamento di temperatura si può infine intervenire su  $H$ , installando attorno al tubo di metallo uno spessore di materiale isolante, come può meglio comprendersi leggendo l'esempio numerico riportato nel seguito.

### **Esempio N°1**

Si consideri un tubo in acciaio percorso da acqua calda, lambito esternamente da aria a  $10^\circ\text{C}$ . Il tubo ha le seguenti caratteristiche:

Denominazione DN40

$$d_i = 38,1 \text{ mm}$$

$$d_e = 48,3 \text{ mm}$$

$$A_i = 1140 \text{ mm}^2$$

$$L = 100 \text{ m}$$

$$\lambda = 54 \text{ W/mK}$$

Dati di progetto:  $v = 0,25 \text{ m/s}$ ;  $T_{w,0} = 95^\circ\text{C}$ . Vogliamo verificare che l'acqua calda pervenga all'utilizzatore ad una temperatura maggiore di  $90^\circ\text{C}$ . Per prima cosa calcoliamo la temperatura di arrivo  $T_L$  in assenza di isolamento; utilizziamo la:

$$T_{w,L} = T_a + (T_{w,0} - T_a)e^{-\frac{2\pi HL}{G\gamma}} \quad (6.59)$$

è necessario calcolare:

$$\text{raggio medio } r = \frac{24,15 + 19,05}{2} = 21,60 \text{ mm} = 0,0216 \text{ m} \quad (6.60)$$

$$\begin{aligned} \text{portata} \quad G &= Av\rho_w \\ A &= \pi r^2 = 0,00114 \text{ m}^2 \\ \rho_w(95^\circ\text{C}) &= 961,8 \text{ kg/m}^3 \end{aligned} \quad (6.61)$$

$$G = 0,00114 \cdot 0,25 \cdot 961,8 = 0,274 \text{ kg / s}$$

calore specifico acqua a 95°C:  $\gamma_w = 4205 \text{ J/kgK}$

trasmissione 
$$H = \frac{l}{\frac{l}{k_w} + \frac{s}{\lambda} + \frac{l}{k_a}} \quad (6.62)$$

$$\begin{aligned} k_w &= 2000 \text{ W/m}^2\text{K} \\ k_a &= 10 \text{ W/m}^2\text{K} \\ s &= 0,0051 \text{ m} \\ \lambda_{acc} &= 54 \text{ W/mK} \end{aligned}$$

$$H = \frac{l}{\frac{l}{2000} + \frac{0,0051}{54} + \frac{l}{10}} = \frac{l}{0,0005 + 9,4 \cdot 10^{-5} + 0,1} = \frac{l}{0,10059} = 9,94 \text{ W / m}^2\text{K} \quad (6.63)$$

$$\frac{2 \pi r H L}{G \gamma} = \frac{2 \pi \cdot 0,0216 \cdot 9,94 \cdot 100}{0,274 \cdot 4205} = \frac{134,90}{1152,17} = 0,1171 \quad (6.64)$$

$$T_{wL} = 10 + (95 - 10)e^{-0,1171} = 10 + 85 \cdot 0,8895 = 10 + 75,6 = 85,6 \text{ }^\circ\text{C} \quad (6.65)$$

Il raffreddamento è eccessivo ed è quindi necessario isolare la tubazione; utilizziamo cospelle in lana di roccia di spessore pari a 1 cm e calcoliamo il nuovo valore della trasmissione:

Raggio medio 
$$r = \frac{19,05 + 34,15}{2} = 26,6 \text{ mm} = 0,0266 \text{ m} \quad (6.66)$$

Trasmittanza

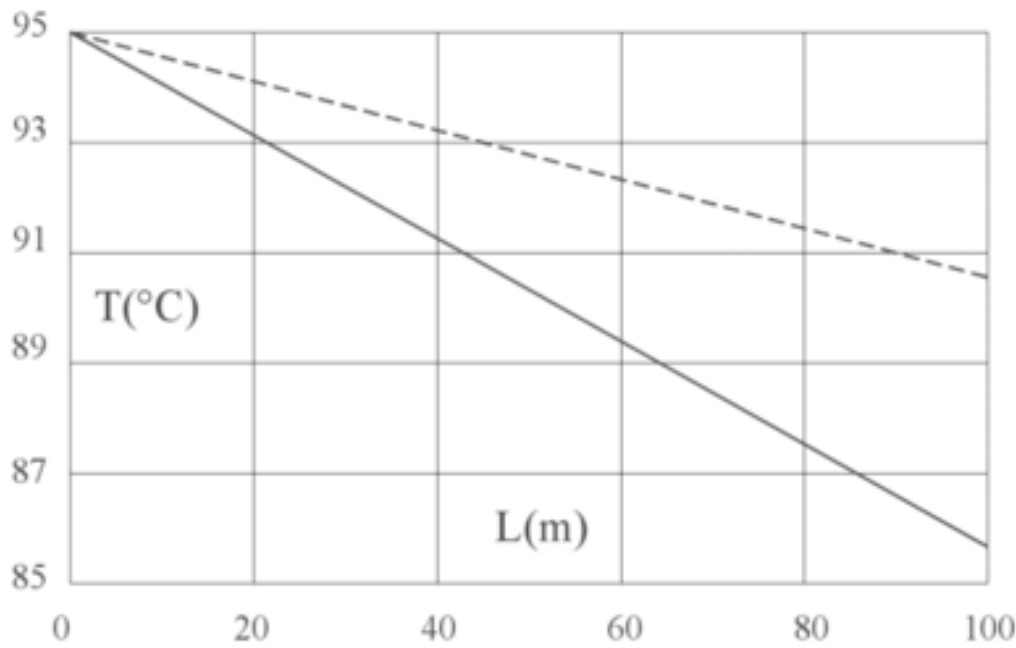
$$\begin{aligned} H &= \frac{l}{\frac{l}{k_w} + \left(\frac{s}{\lambda}\right)_{acc} + \left(\frac{s}{\lambda}\right)_{is} + \frac{l}{k_a}} = \frac{l}{\frac{l}{2000} + \frac{0,0051}{54} + \frac{0,01}{0,058} + \frac{l}{10}} = \\ &= \frac{l}{0,27291} = 3,66 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}} \end{aligned} \quad (6.67)$$

$$\frac{2 \pi r H L}{G \gamma} = \frac{2 \pi \cdot 0,0266 \cdot 3,66 \cdot 100}{0,274 \cdot 4205} = \frac{61,170}{1152,17} = 0,053 \quad (6.68)$$

e quindi la temperatura nella sezione finale è pari a:

$$T_{wL} = 10 + (95 - 10)e^{-0,053} = 10 + 85 \cdot 0,9483 = 10 + 80,6 = 90,6 \text{ }^\circ\text{C} \quad (6.69)$$

Uno spessore di 1 cm di isolante è stato così sufficiente ad innalzare al valore desiderato la temperatura dell'acqua in arrivo. Si tenga presente che negli impianti di riscaldamento e teleriscaldamento una perdita di calore così rilevante come nell'esempio proposto non è accettabile e gli spessori di isolanti sono sempre maggiori, dell'ordine di 4 + 6 cm, in modo da limitare gli abbassamenti di temperatura ad  $1 \div 2 \text{ }^\circ\text{C}$ .



**Fig. 6.14:** raffreddamento dell'acqua in una tubazione di distribuzione;  
 ————— tubo nudo; - - - - - tubo isolato 1 cm.

## 6.6 L'isolamento delle tubazioni.

Tutte le tubazioni adibite al trasporto di fluidi termovettori sono in genere rivestite di materiale isolante. Per i fluidi caldi, il rivestimento isolante ha la duplice funzione di limitare le dispersioni termiche e di eliminare o ridurre il pericolo che le persone possano venire in contatto accidentale con la superficie esterna della tubazione, la quale, come si è visto, si porta ad una temperatura prossima a quella del fluido interno. Se questa è molto elevata, come accade nelle distribuzioni di acqua surriscaldata e vapore, ragioni di sicurezza impongono che tutto il circuito sia accuratamente rivestito e sigillato.

Anche per i fluidi freddi il rivestimento isolante, sempre presente, espleta una duplice funzione. La prima è quella di limitare le perdite termiche; la seconda è quella di evitare la condensa sulla superficie esterna del tubo, che si porta quasi sempre, in assenza di isolamento, ad una temperatura nettamente minore

