

Fondamenti di Impianti e Logistica

Prof. Ing. Riccardo Melloni
Università degli Studi di Modena e Reggio Emilia

Tubazioni: isolamento

PROPRIETA' FISICHE:

- Basso calore specifico
- Basso coefficiente di conducibilità termica k
- Basso coefficiente di dilatazione termica
- Buona resistenza meccanica
- Alto punto di fusione.

PROPRIETA' CHIMICHE:

- Inerzia chimica alla corrosione dei materiali a cui sono applicati
- Stabilità chimica dei componenti l'isolante alle alte temperature.

PROPRIETA' TECNOLOGICHE:

- Lavorabilità in pezzi
- Colabilità in forme
- Flessibilità
- Basso potere abrasivo.

CAMPI DI APPLICAZIONE:

- Basse temperature da -200°C a 0°C
- Medie temperature da 0°C a 200°C
- Alte temperature da 200°C a 2000°C

TIPI DI ISOLANTI:

Materiali isolanti fibrosi (lana di vetro, lana di roccia, fibre vegetali od animali)

- Dimensioni ϕ pochi μ e lunghezza pochi cm
- Lana di vetro e di roccia (temperature di fusione 1000°C) usate tra 100 e 450°C
- Fibre vegetali da -20°C e 100°C (igroscopiche)
- Resistenza meccanica limitata per cui vengono fasciati con reti metalliche ed annegati nel gesso
- Su corpi cilindrici si applicano anche fascette di acciaio per conferire maggiore omogeneità al corpo di isolamento
- Per tubazioni lunghe si applicano in sito con fascette elementi prefabbricati di corpi isolanti (coppelle).

TIPI DI ISOLANTI:

Materiali granulari

- Dimensioni da pochi μ a pochi mm
- Costituiti da sughero espanso, trucioli di sughero, trucioli e segatura di legno, conglomerati di pomice, terre di diatomiti o farina fossile
- Campo di temperatura dai 1000° C per diatomiti o farine fossile, e basse temperature per il sughero ed il legno
- Polistirene espanso specialmente per basse temperature.

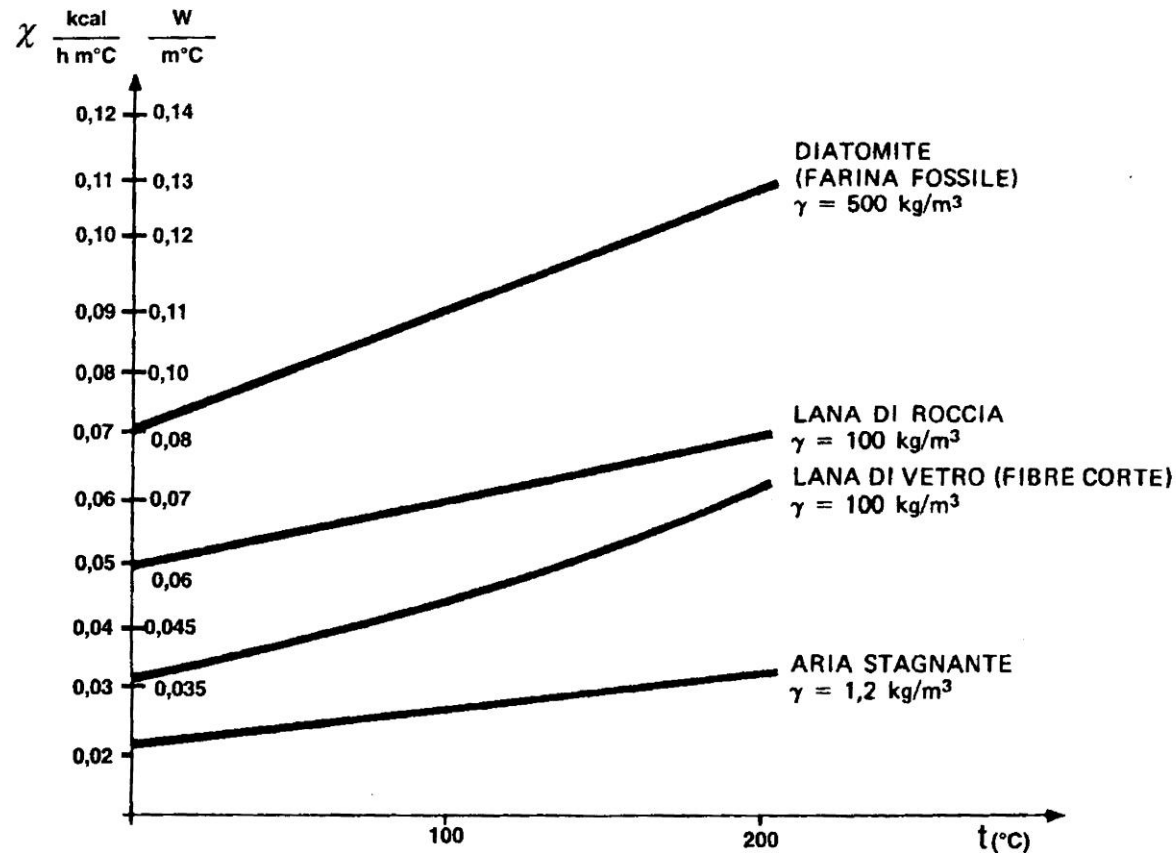
MATERIALI ISOLANTI COMPATTI:

- Resistenza meccaniche superiori ai PRECEDENTI
- Costituzione: con base ossido di magnesio, agglomerato con materiali cementanti, con caolino, allumina e sillimanite, silicati complessi di alluminio
- Impiego sopra i 1500° C (silicati di zirconio, ossido di zirconio)
- Formati in mattoni sagomati, hanno caratteristiche di refrattarietà e sono detti isolanti refrattari

MATERIALI ISOLANTI A RIFLESSIONE:

- È una tecnologia particolare di coibentazione
- Vasi di Dewar per bassissime temperature (trasporto di gas liquefatto quali ossigeno azoto,..) thermos familiari

Isolanti, materiali coibenti termici



Conducibilità termica, in funzione della temperatura, per alcuni isolanti impiegati per il rivestimento delle tubazioni.

Isolanti, materiali coibenti termici

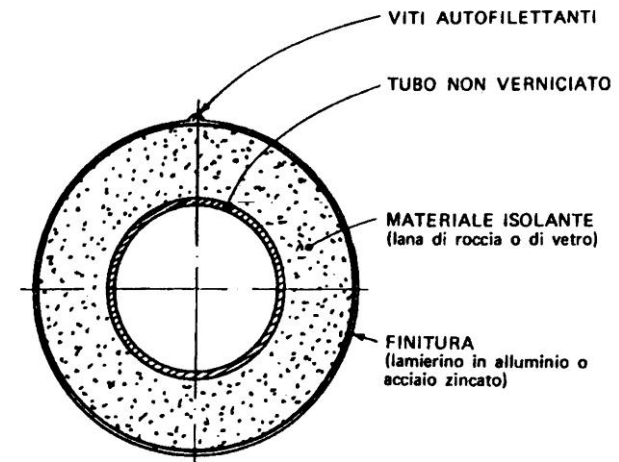
N.B.:

nel caso di fissaggio con viti autofilettanti, è opportuno avvolgere la barriera di vapore con un materassino di lana di roccia o di vetro di (spessore 10 mm), al fine di evitare la foratura della barriera da parte delle viti.

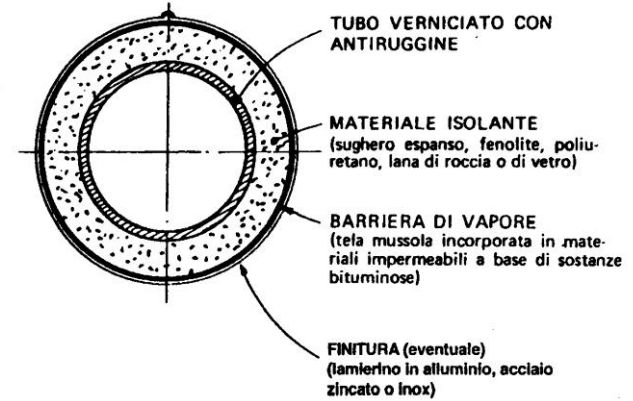
Figure: rivestimenti per tubi contenenti fluidi ed aventi la funzione di impedire:

- a) La dispersione del calore;
- b) Lo stillicidio.

a) TUBAZIONE CON FLUIDO CALDO ($> t$ AMBIENTE)

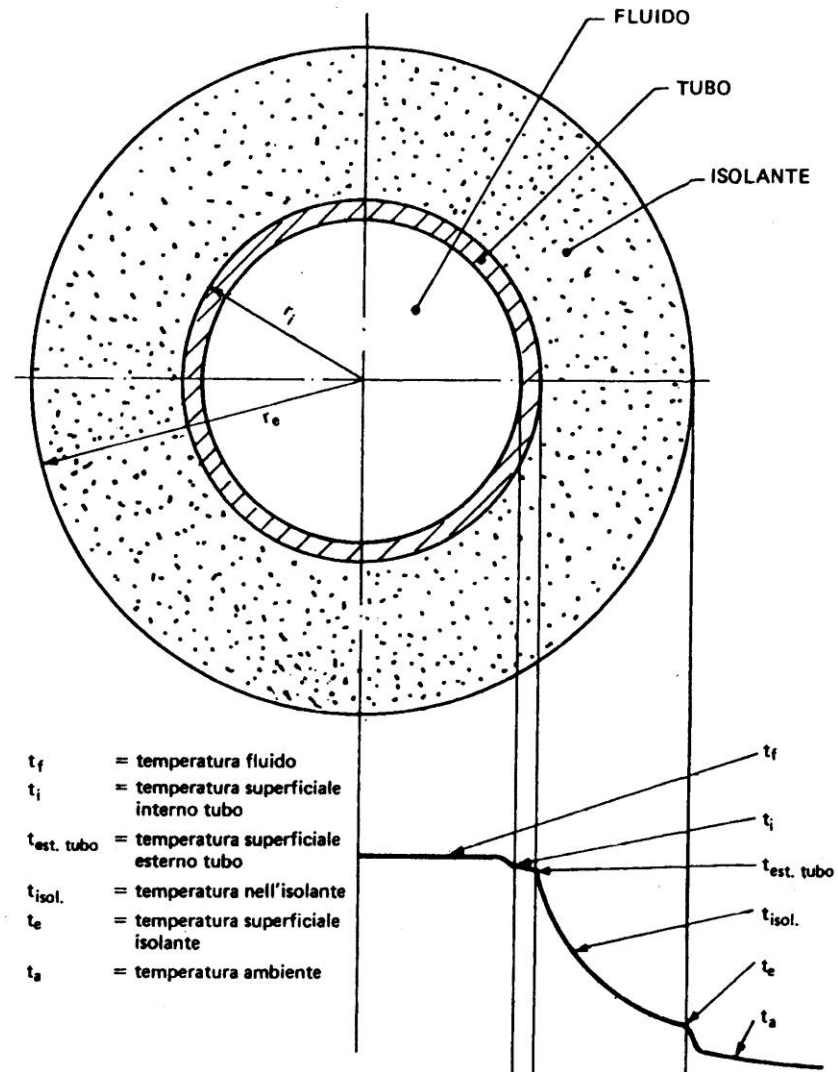


b) TUBAZIONE CON FLUIDO FREDDO ($< t$ AMBIENTE)



Isolanti, materiali coibenti termici

Fig. Sezione schematica di un tubo contenente un fluido caldo, esternamente rivestito con materiale isolante, ed andamento delle temperature attraverso i vari materiali.



Isolanti, materiali coibenti termici

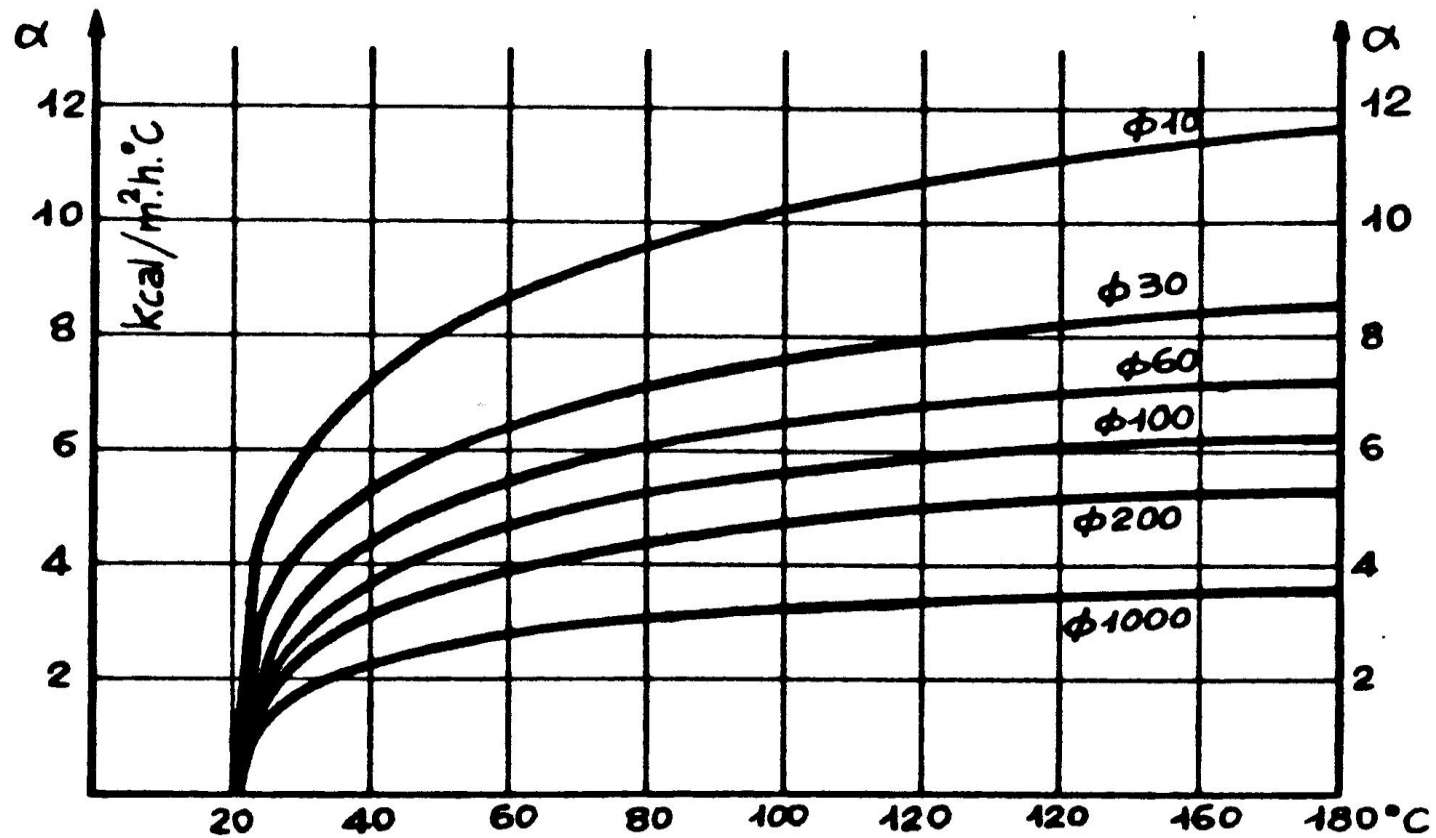


Fig.: Andamento del valore di α con la temperatura, parametrizzata con il diametro esterno.

Isolanti, materiali coibenti termici

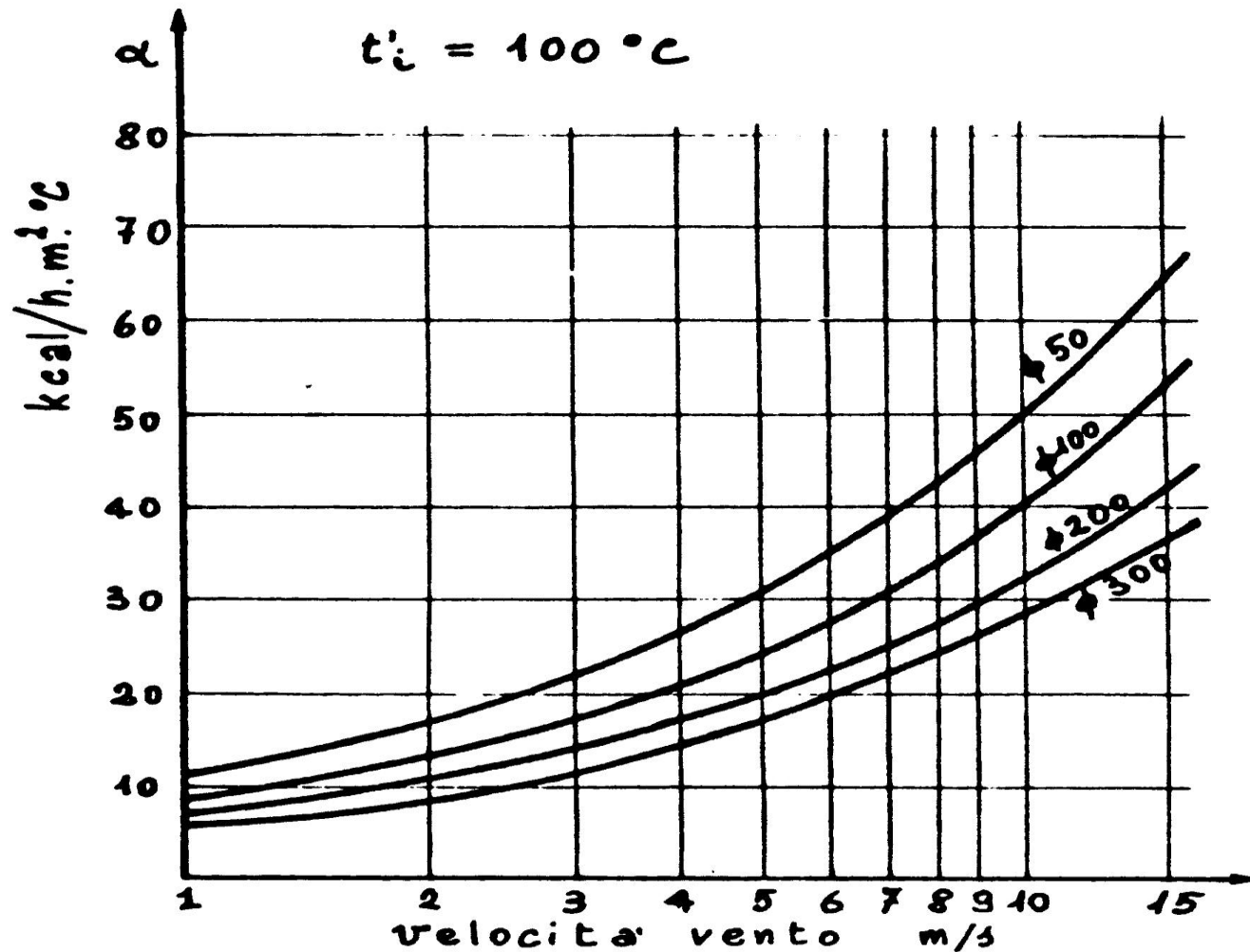


Fig.: Andamento del valore di α con la velocità del vento normale incidente, a temperatura fissata e parametrizzata con il diametro esterno.

Isolanti, materiali coibenti termici

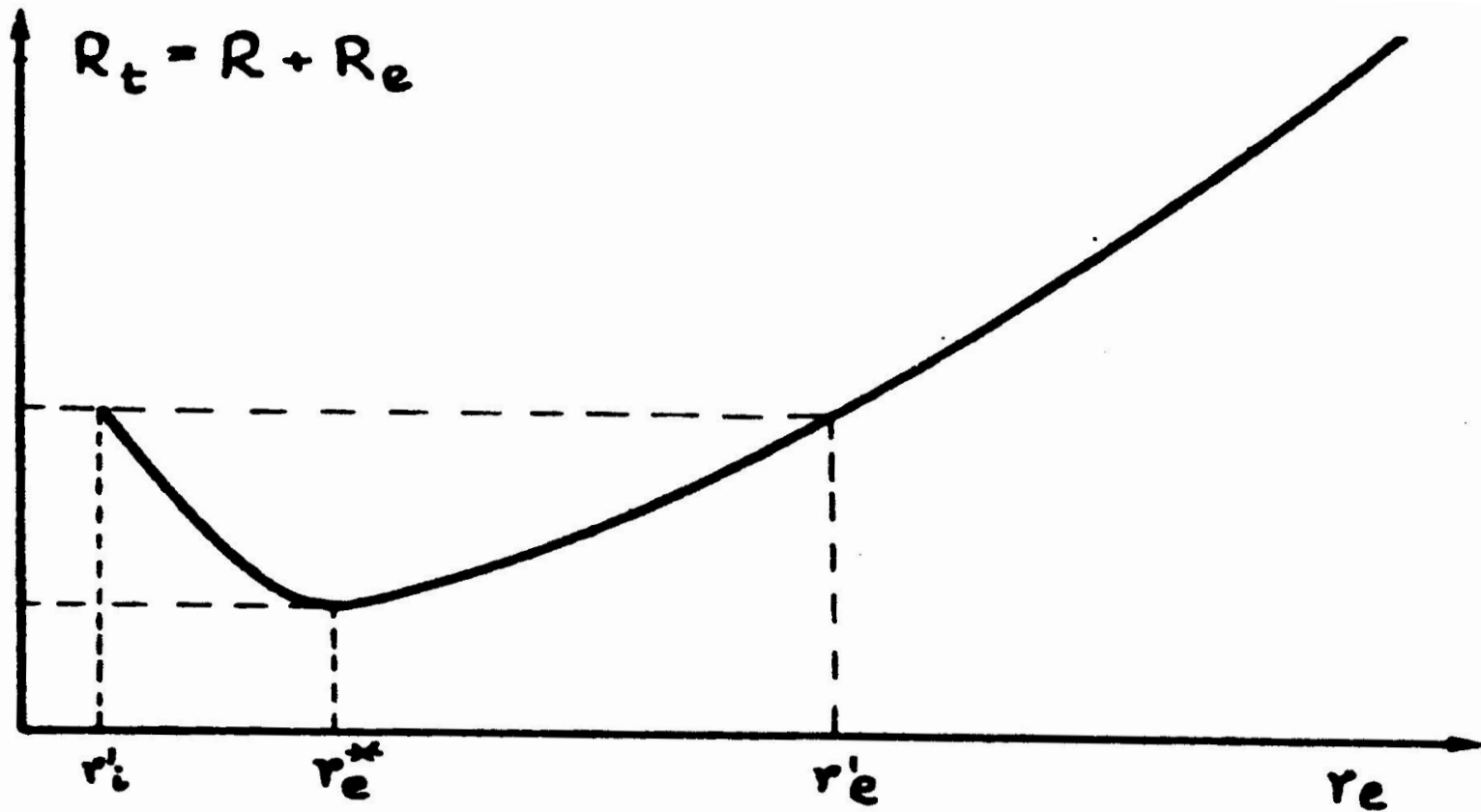


Fig.: Andamento del costo totale associato alla scelta dello spessore dell'isolante, ovvero del raggio esterno r_e

CALCOLO DEL RAGGIO CRITICO

Nelle applicazioni pratiche si può considerare

$$R_t = \frac{\ln \frac{r_e}{r_i}}{\lambda} + \frac{1}{\alpha * r_e}$$

Derivando rispetto ad r_e e ponendo uguale a zero si ottiene il valore di r_e che rende minimo R_t e quindi massimo Q

$$\frac{dR_t}{dr_e} = \frac{1}{\lambda r_e} - \frac{1}{\alpha * r_e^2} = 0$$

Da cui

$$r_e^* = \frac{\lambda}{\alpha}$$

CALCOLO DEL RAGGIO CRITICO

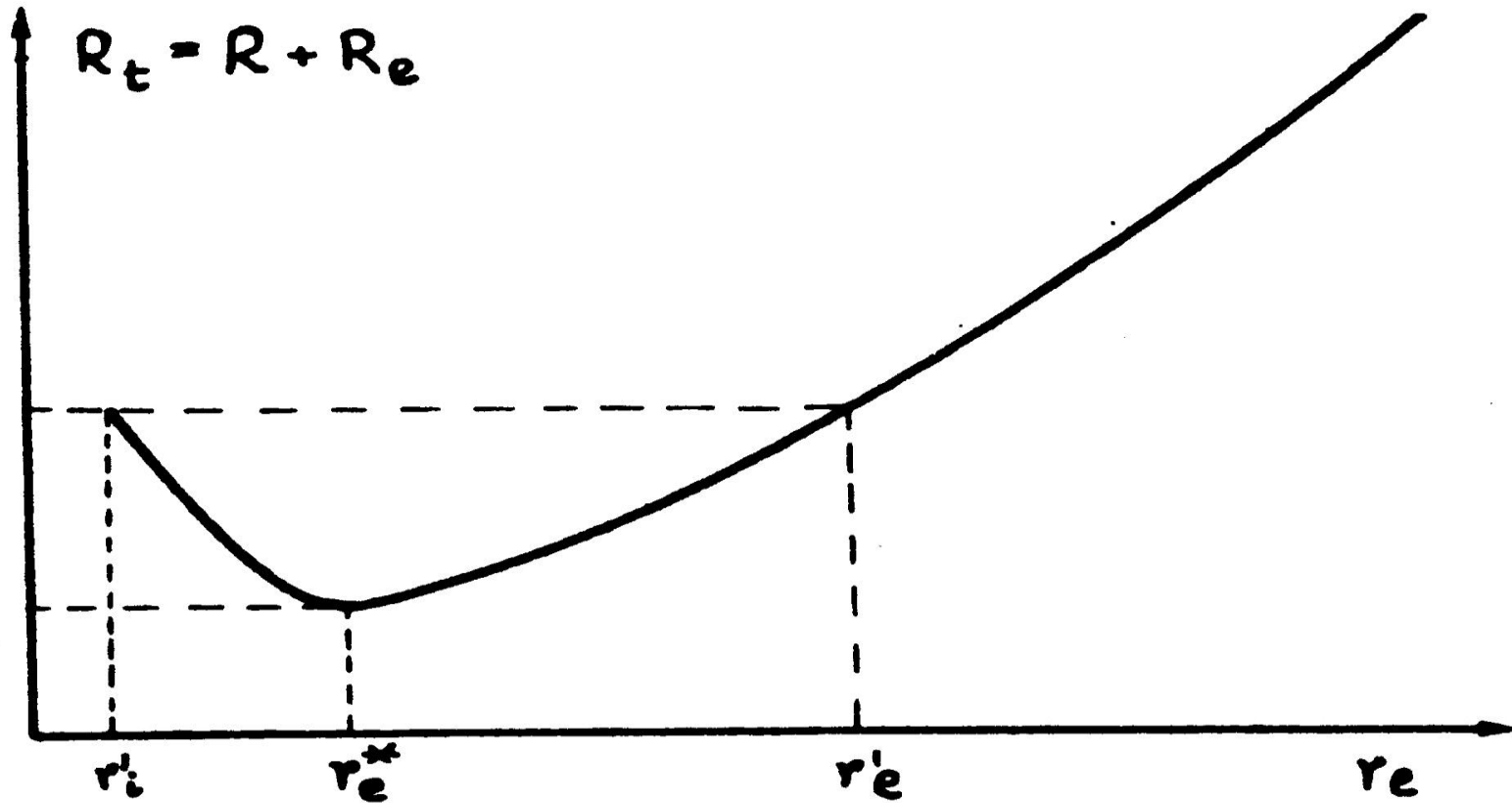
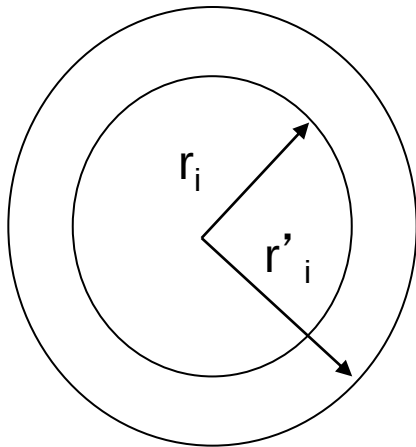


Fig.: Andamento della resistenza totale associato alla scelta dello spessore dell'isolante, ovvero del raggio esterno r_e

Dispersioni di energia termica

- t_i = temperatura interna del fluido
- t_e = temperatura esterna



$$Q = 2 \cdot \pi \cdot r_i \cdot (t_i - t_1) \cdot \alpha_i$$

$$t_i - t_1 = \frac{Q}{2 \cdot \pi \cdot r_i \cdot \alpha_i}$$

$$Q = -2 \cdot \pi \cdot r \cdot \lambda_t \frac{dt}{dr}$$

$$dt = -\frac{Q}{2 \cdot \pi \cdot \lambda_t} \cdot \frac{dr}{r}$$

$$t_1 - t'_1 = \frac{Q}{2 \cdot \pi \cdot \lambda_t} \cdot \ln \frac{r'_i}{r_i}$$

$$Q = 2 \cdot \pi \cdot r'_i \cdot (t'_i - t_e) \cdot (\alpha + \alpha_r)$$

$$t'_i - t_e = \frac{Q}{2 \cdot \pi \cdot r'_i \cdot (\alpha + \alpha_r)}$$

Dispersioni di energia termica

$$t_i - t_e = Q \cdot \left(\frac{1}{2 \cdot \pi \cdot r_i \cdot \alpha_i} + \frac{\ln \frac{r'_i}{r_i}}{2 \cdot \pi \cdot \lambda_t} + \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot r'_i \cdot (\alpha + \alpha_r)} \right)$$

$$Q = K \cdot \Delta t = \frac{\Delta t}{R}$$

$$t_i - t_e = Q \cdot (R_i + R_t + R_e)$$

Dispersione di energia termica

- Tubazione che trasporta vapore saturo a 150°C con $r_i=75\text{ mm}$ ed $r_i'=79,5\text{ mm}$

$$\alpha_i = 8,14 \cdot 10^3 \quad \left[\text{W} / \text{m}^2 \text{ } ^{\circ}\text{C} \right]$$

$$\lambda_t = 4,65 \cdot 10 \quad \left[\text{W} / \text{m}^{\circ}\text{C} \right]$$

$$\alpha = 8,03 \quad \left[\text{W} / \text{m}^2 \text{ } ^{\circ}\text{C} \right]$$

$$\alpha_r = 8,84 \quad \left[\text{W} / \text{m}^2 \text{ } ^{\circ}\text{C} \right]$$

$$R_i = 2,61 \cdot 10^{-4} \quad \left[\text{m}^2 \text{ } ^{\circ}\text{C} / \text{W} \right]$$

$$R_t = 1,99 \cdot 10^{-4} \quad \left[\text{m}^2 \text{ } ^{\circ}\text{C} / \text{W} \right]$$

$$R_e = 1,19 \cdot 10^{-1} \quad \left[\text{m}^2 \text{ } ^{\circ}\text{C} / \text{W} \right]$$

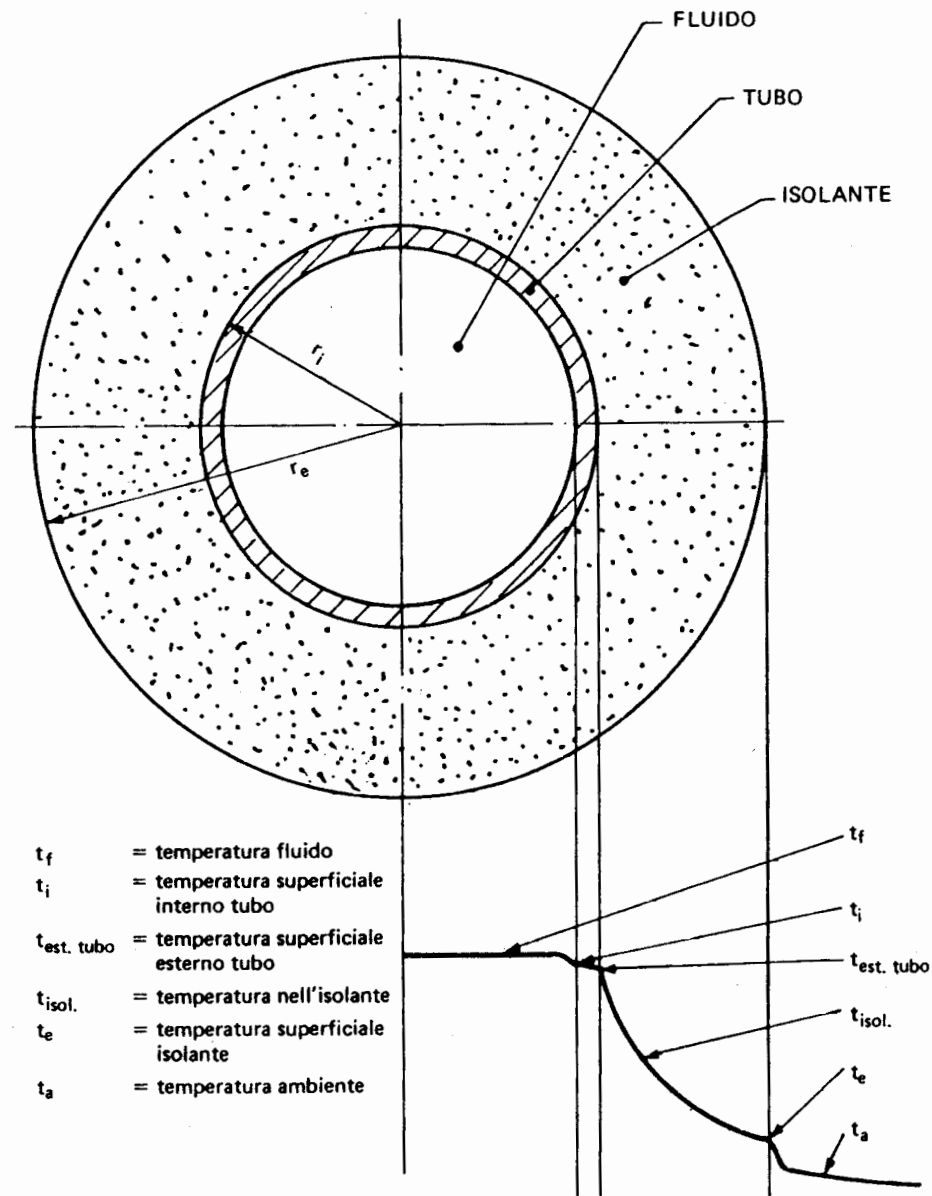


Fig. 33.22 – Sezione schematica di un tubo contenente un fluido caldo, esternamente rivestito con materiale isolante, e andamento delle temperature attraverso i vari materiali.

Equazioni del flusso termico scambiato tra condotti e ambiente esterno

La quantità di calore che, nell'unità di tempo, passa dall'interno del tubo all'esterno è data dalla:

$$Q = \frac{t_i - t_a}{R} * L \quad (\text{kcal/h} \quad \text{o} \quad \text{W})$$

dove R è la resistenza totale espressa dalla:

$$R = \frac{1}{2\pi} \left(\frac{1}{h_i * r_i} + \frac{1}{\chi} \ln \frac{r_e}{r_i} + \frac{1}{h_e * r_e} \right) \quad \left[\frac{\text{hm}^\circ\text{C}}{\text{kcal}} \right] \quad \text{opp} \left[\frac{\text{m}^\circ\text{C}}{\text{W}} \right]$$

$$Q = \frac{2\pi(t_i - t_a) * L}{\frac{1}{\chi} \ln \frac{r_e}{r_i} + \frac{1}{h_e * r_e}} \quad (\text{kcal/h} \quad \text{opp} \quad \text{W})$$

Se si vuole riferire la potenza termica Q alla superficie longitudinale della condotta, per esempio a quella esterna $S_e = 2\pi r_e L$ (m²), l'espressione diviene:

$$Q' = \frac{t_i - t_a}{R} * S_e \quad (\text{kcal/h} \quad \text{o} \quad \text{W})$$

con

$$R' = \left(\frac{r_e}{h_i * r_i} + \frac{r_e}{\chi} \ln \frac{r_e}{r_i} + \frac{1}{h_e} \right) \quad \left[\frac{\text{hm}^2\text{°C}}{\text{kcal}} \right] \quad \text{opp} \quad \left[\frac{\text{m}^2\text{°C}}{\text{W}} \right]$$

A sua volta, trascurando h_i :

$$Q' = \frac{S_e (t_i - t_a) * L}{\frac{r_e}{\chi} \ln \frac{r_e}{r_i} + \frac{1}{h_e}} \quad (\text{kcal/h} \quad \text{opp} \quad \text{W})$$

Rivestimenti coibenti antigelo

Esaminiamo il caso della protezione delle tubazioni in ambienti a temperature inferiori a 0° C e convoglianti fluidi che non devono gelare (ad esempio acqua).

Consideriamo un tratto di tubo di lunghezza infinitesima dl , la quantità dQ trasmessa all'esterno vale per la relazione precedente:

$$dQ = \frac{t_i - t_a}{R} dl$$

dove

$$R = \frac{1}{2\pi\chi} \ln \frac{r_e}{r_i} + \frac{1}{2\pi r_e h_e}$$

Tale quantità di calore dQ deve essere uguale alla quantità di calore persa dal fluido percorrente il tubo:

$$dQ = - G c_p dt_i$$

G = portata del fluido (kg/h);

c_p = calore specifico del fluido (kcal/kg ° C oppure kJ/kg ° C): per l'acqua $c_p = 1$ kcal/kg ° C;

dt_i = raffreddamento del fluido nel tratto dl.

Poiché $t_a = \text{costante}$:

$$dQ = - G c_p d(t_i - t_a)$$

eguagliando le espressioni si ricava:

$$\frac{1}{GR} dl = -c_p \frac{d(t_i - t_a)}{t_i - t_a}$$

ovvero:

$$\frac{t_i - t_a}{R} dl = Gc_p d(t_i - t_a)$$

che integrata lungo un tratto di condotta di lunghezza L e semplificata fornisce:

$$\frac{L}{c_p * G * R} = \ln \frac{t_i' - t_a}{t_i - t_a} \quad \text{ovvero} \quad \frac{S_e}{c_p * G * R'} = \ln \frac{t_i' - t_a}{t_i - t_a}$$

dove:

t'_i = temperatura di entrata dell' acqua nel tratto di tubo considerato;

t_i = temperatura di uscita dell' acqua nel tratto di tubo considerato;

L = lunghezza della condotta (m);

S_e = superficie esterna del rivestimento coibente (m^2);

R = resistenza totale del coibente in $\left[\frac{h \text{ m } ^\circ C}{kcal} \right]$ R' in $\left[\frac{m^2 \text{ } ^\circ C}{W} \right]$

RIVESTIMENTI COIBENTI PROPRIAMENTE DETTI

$$CQ = Q * n c \quad (\text{€/anno})$$

dove

Q = calore disperso attraverso un tratto lungo L di isolante (kcal/h opp W);

n = numero di ore annue di funzionamento (h/a);

c = costo unitario del calore disperso (€/kcal opp. €/Wh);

$$Q = \frac{2\pi\chi(t_i - t_a)L}{\ln \frac{r_e}{r_i}}$$

Tenendo conto che è:

r_e = raggio esterno del rivestimento (m);

r_i = raggio interno del rivestimento (m);

L = lunghezza della tubazione in (m);

c_i = costo unitario del rivestimento in opera (€/m³);

1/ = termine unitario di ammortamento, in n anni, al tasso di interesse i .

Il costo in opera dell' isolante può essere determinato con

RIVESTIMENTI COIBENTI PROPRIAMENTE DETTI

Al valore C'_i ottenuto si deve aggiungere il costo (€/anno) del rivestimento esterno in lamiera, dove oltre ai termini noti, c_r misura il costo unitario del rivestimento in opera (€/m²).

$$C'_i = \pi(r_e^2 - r_i^2) L c_i \frac{1}{a_n^-} \quad (\text{euro/anno})$$

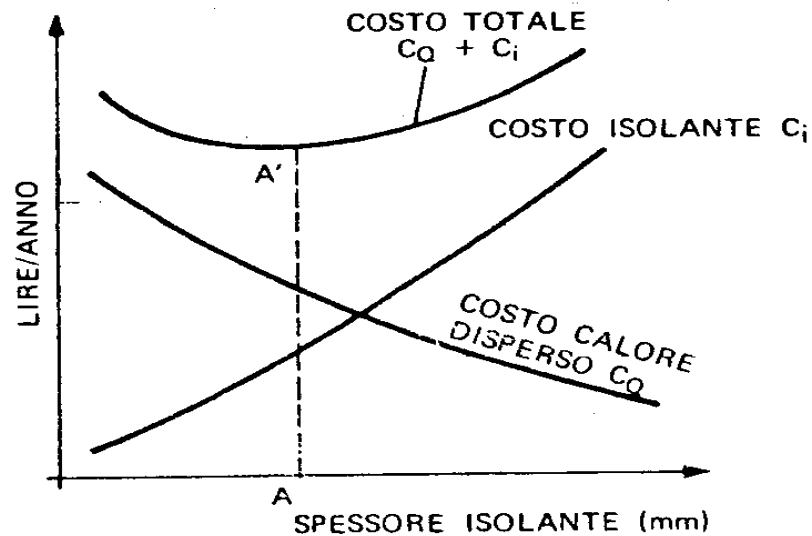
In totale, quindi, il costo corrispondente al rivestimento vale:

$$C_i = C'_i + C''_i$$

Si tratta di trovare il valore di r_e e quindi dell'isolante $r_e - r_i$ (fig. 33.22), che rende minima la somma

$$C = C_Q + C_i$$

RIVESTIMENTI COIBENTI PROPRIAMENTE DETTI



A = spessore isolante a cui corrisponde il costo totale annuo minimo (AA'), cioè lo spessore più economico.

Fig. 33.23 – Determinazione grafica del valore ottimale di r_e .

RIVESTIMENTI ANTISTILLICIDIO

Le grandezze fondamentali relative all'aria umida sono le seguenti (riferite a 1 kg di aria secca):

- a) *temperatura al bulbo secco* t : temperatura segnata da un termometro normale posto nell'aria atmosferica;
- b) *temperatura al bulbo umido* t_{bu} : temperatura segnata da un termometro, con bulbo avvolto in una garza umida, posto nell'aria atmosferica;
- c) *temperatura di rugiada* t_{rug} : temperatura già definita;
- d) *umidità specifica o assoluta* x : quantità di vapore, misurata in grammi o in chilogrammi, contenuta in 1 kg di aria secca (kg vapore/kg aria secca oppure g vapore/kg aria secca);
- e) *umidità relativa* ϕ : rapporto, espresso in percentuale, tra l'umidità specifica effettiva dell'aria umida considerata e l'umidità specifica che l'aria umida avrebbe se fosse satura;
- f) *entalpia o calore totale* J : è la somma, espressa in kcal/kg di aria secca, dei sottoindicati addendi:

RIVESTIMENTI ANTISTILLCIDIO

- 1) calore necessario per portare 1 kg di aria secca da 0°C e 760 mm Hg alla temperatura dell'aria umida t : $0,24 \cdot t$ ($0,24\text{ kcal}/^{\circ}\text{C} \cdot \text{kg}$ aria secca è il calore specifico dell'aria);
- 2) calore necessario per vaporizzare l'umidità assoluta x contenuta nell'aria umida supposta a 0°C : $595 \cdot x$ (595 kcal/kg vapore è il calore di vaporizzazione);
- 3) calore necessario per surriscaldare l'umidità x da 0°C alla temperatura dell'aria umida t : $0,46 \cdot t \cdot x$ ($0,46\text{ kcal}/^{\circ}\text{C} \cdot \text{kg}$ vapore è il calore specifico del vapore surriscaldato);

Vale a dire: $J = (0,24 \cdot t + 595 \cdot x + 0,46 \cdot t \cdot x)\text{ kcal/kg}$ aria secca;

g) volume specifico v : è il volume dell'aria umida contenente 1 kg di aria secca e x kg di vapore.

RIVESTIMENTI ANTISTILLICIDIO

Sul diagramma di Mollier di fig. 33.24, le rette orizzontali collegano punti di temperatura costante, mentre le rette verticali passano per punti di umidità assoluta x costante; le rette oblique uniscono punti a entalpia J costante; le curve sono caratterizzate da umidità relativa (p costante).

Applichiamo ora al caso che qui ci interessa le nozioni sopra ricordate ed in particolare il principio che mettendo a contatto l'aria umida (supposta costante la pressione atmosferica), a temperatura minore dell'aria, la miscela aria – vapore si raffredda.

Lo spessore del rivestimento coibente si calcola nel modo sottoindicato. Siano:

r_e : raggio esterno del rivestimento;

r_i : raggio interno del rivestimento, pari al raggio esterno del tubo (m);

L : lunghezza della tubazione (m);

χ , h_i , h_e , t_i , t_e , t_a le grandezze fisiche già definite in precedenza.

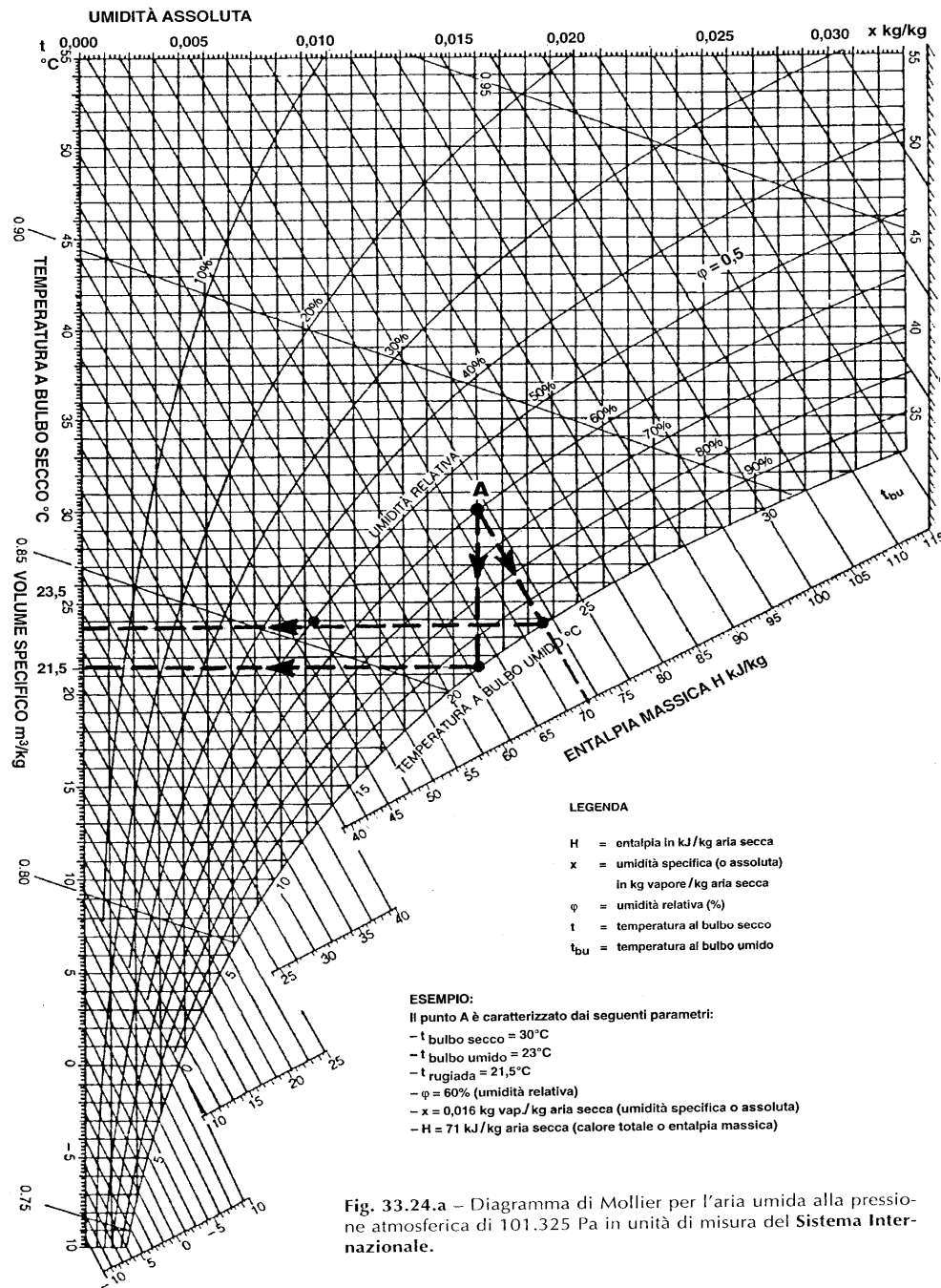


Fig. 33.24.a – Diagramma di Mollier per l'aria umida alla pressione atmosferica di 101.325 Pa in unità di misura del Sistema Internazionale.

RIVESTIMENTI ANTISTILLICIDIO

$$Q = \frac{2\pi(t_a - t_i)}{\frac{1}{h_i r_i} + \frac{1}{\chi} \ln \frac{r_e}{r_i} + \frac{1}{h_e r_e}} * L \quad (\text{kcal/h})$$

Nel caso di acqua fluente nella tubazione, il termine $1/h_i r_i$ è trascurabile.

Q è calcolabile mediante la:

$$Q = h_e 2\pi r_e l (t_a - t_e) \quad (\text{kcal/h})$$

il valore di h_e per tubi in aria calma è con sufficiente approssimazione:

$$h_e = 8.2 + 0.0073 * t \sqrt[3]{t} \quad (\text{kcal/hm}^2\text{°C})$$

RIVESTIMENTI ANTISTILLCIDIO

uguagliando le espressioni precedenti si ha:

$$\frac{(t_a - t_i)}{\frac{1}{\chi} \ln \frac{r_e}{r_i} + \frac{1}{h_e r_e}} = h_e r_e (t_a - t_i)$$

In cui le incognite sono t_e , r_e . Fissato t_e , che deve essere maggiore della temperatura di rugiada dell'aria circostante la tubazione, si ricava per tentativi r_e , e quindi lo spessore $s = r_e - r_i$, del rivestimento coibente, capace di garantire una temperatura superficiale sul rivestimento stesso maggiore del punto di rugiada.