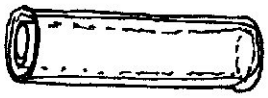
DIMENSIONAMENTO MECCANICO DELLE TUBAZIONI

DATI: G_v = PORTATA [t/h]
p = PRESSIONE [bar, psi]
T = TEMPERATURA [°C, K]
MATERIALE: _____
L = LUNGHEZZA TUBAZIONE [m]
T_e = TEMPERATURA ESTERNA [K]
C_{COMB} = COSTO COMBUSTIBILE [€/kg]
H_i = POTERE CALORIFICO COMBUSTIBILE [MJ/kg]

C_i = COSTO UNITARIO RIVESTIMENTO ISOLANTE [€/m³]
C_r = COSTO UNITARIO RIVESTIMENTO ESTERNO DI LAMIERA IN OPERA [€/m²]
m = DURATA PIANO DI AMMORTAMENTO [ANNI]
i = TASSO INTERESSE ANNUALE SUL CAPITALE [__ %]
n = NUMERO ORE DI FUNZIONAMENTO [h/ANNO]

SVOLGIMENTO: $\left.\begin{matrix} p \\ T \end{matrix}\right\} \xrightarrow{\text{MOLIERE}} v_s$ = VOLUME SPECIFICO $\Rightarrow \rho = \frac{1}{v_s}$ = DENSITÀ del FLUSSO



1) Calcolo diametro interno della tubazione:

$$\boxed{G_v = \rho \cdot V_{FLUSSO} \cdot A = \rho \cdot V_{FLUSSO} \cdot \frac{\pi D^2}{4}} \Rightarrow \boxed{D = \sqrt{\frac{4G}{\rho V_{FLUSSO} \pi}}} \Rightarrow \boxed{D \rightarrow D_{UNI}}$$

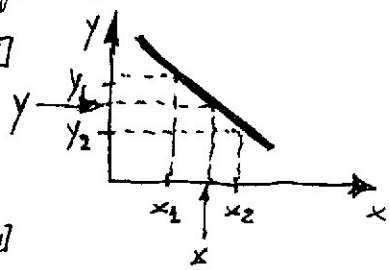
con $V_{FLUSSO} \simeq 30$ m/s

2) Dalla Tabella unificazione a DUNIFICATO e leggere il $\boxed{D_e = \text{DIAMETRO ESTERNO UNIFICATO}}$

TABELLA CONVERSIONI			
TEMPERATURA:	$[°F] = 32 + \frac{9}{5}[°C]$	MASSA:	$[\text{POUND}] \simeq \frac{1}{2}[kg]$
LUNGHEZZA:	$[\text{INCH}] = 2{,}54\ [cm]$	PRESSIONE:	$\left[\frac{\text{POUND}}{\text{INCH}^2} = \text{PSI}\right]$
	$[\text{FEET}] = 12\ [\text{INCH}]$		$1[bar] \simeq 14{,}5[psi]$

3) Dalla normativa ANSI B31.1-APPENDICE A, TABLE A-1, ricavo la tensione ammissibile alla temperatura del fluido mediante interpolazione

$T[°F]$	$S[10^3 psi]$
x_1	y_1
x	y
x_2	y_2



$$\frac{x - x_1}{x_2 - x_1} = \frac{y - y_1}{y_2 - y_1} \Rightarrow \boxed{S[T=T]}\ [psi]$$

4) Secondo la norma americana ANSI B36.10 lo spessore minimo della tubazione si ricava come:

$$\boxed{t_{min} = \frac{p D_e}{2(SE + pY)}}$$

[INCH] [psi] [psi]

dove E = TIENE CONTO del grado di qualità della saldatura ≤ 1
Y = COEFFICIENTE DI DUTTILITÀ $= f$(MATERIALE, TEMPERATURA) si ricava dalla Tabella fornita

5) Si assume un sovraspessore di CORROSIONE $\boxed{c = \left(\frac{1}{8}\right)'' = 0{,}125\ [\text{INCH}]}$

6) Considerando la TOLLERANZA DI LAVORAZIONE (12,5 %), lo spessore t:

$$\boxed{t = 1{,}125(t_{min} + c)}$$

per tener conto di eventuali FILETTATURE

7) Unifico t a $t_{UNIFICATO}$ dalla Tabella per il NPS scelto precedentemente ammesso t_{UNI} immediatamente superiore e ricavando il corrispondente SCHEDULE NUMBER.

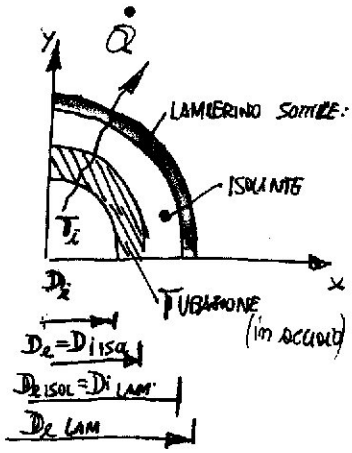
8) Possiamo dunque calcolare $\boxed{D_i = D_e - 2t_{UNI}} \Rightarrow \boxed{V_{FLUSSO\ EFFETTIVA} = \frac{4G}{\pi D_i^2 \rho}}$

DETERMINAZIONE DELLO SPESSORE OTTIMALE DI RIVESTIMENTO

Valore minimo del costo totale annuo dell'isolamento termico:

$$\boxed{\text{COSTO TOTALE} = \text{COSTO CALORE DISPERSO} + \text{COSTO ISOLAMENTO}}$$

$$\boxed{C = C_Q + C_i}$$



$D_{eT} = D_{iT} + 2\tau_{UNI}$	RELAZIONI GEOMETRICHE
$D_{eT} = D_{i\,ISOLANTE}$	
$D_{e\,ISOLANTE} = D_{i\,ISOLANTE} + 2\tau_{ISOLANTE}$	
$D_{e\,ISOLANTE} = D_{i\,LAMIERINO}$	
$D_{e\,LAMIERINO} = D_{i\,LAMIERINO} + 2\tau_{LAMIERINO}$	

$$\boxed{\dot{Q} = \frac{(T_i - T_e)L}{\frac{1}{2\pi h r_i} + \cancel{\left(\frac{1}{2\pi\lambda_{acc}} \ln\frac{D_{eT}}{D_{iT}}\right)} + \frac{1}{2\pi\chi}\ln\frac{D_{e\,ISOL}}{D_{i\,ISOL}} + \cancel{\left(\frac{1}{2\pi\lambda_{LAMIERO}} \ln\frac{D_{e\,LAM}}{D_{i\,LAM}}\right)} + \frac{1}{h_e r_e 2\pi}}}$$

Trascurabile — Trascurabile

è possibile trascurare la resistenza conduttiva della tubazione e del lamierino in confronto a quella dell'isolante

$\lambda_{acc}, \lambda_{LAM} \gg \chi$ = CONDUCIBILITÀ TERMICA ISOLANTE $\Rightarrow \frac{1}{\lambda_{acc}}, \frac{1}{\lambda_{LAM}} \ll \frac{1}{\chi}$

Trascurando anche gli effetti della convezione

$$\boxed{\dot{Q} \simeq \frac{(T_i - T_e)L}{\frac{1}{2\pi\chi}\ln\frac{D_{e\,ISOL}}{D_{i\,ISOL}}} = \frac{2\pi\chi(T_i - T_e)L}{\ln\frac{r_{e\,ISOL}}{r_{i\,ISOL}}}}$$

$$\boxed{Q = \dot{Q}\,m}$$

con
- Q = CALORE DISPERSO ATTRAVERSO UNA TUBAZIONE LUNGA L
- m = TEMPO ANNUO DI FUNZIONAMENTO $\left[\frac{s}{anno}\right]$
- c = COSTO UNITARIO DEL CALORE DISPERSO $= \boxed{\frac{c_{COMB}}{H_i \cdot \eta_{COMBUSTIONE}} = c}$ $[€/s]$

$$\boxed{C_Q = \dot{Q}\,m\,c}$$ $[€/anno]$ COSTO DEL CALORE DOVUTO ALLA DISPERSIONE TERMICA

$$\boxed{C_i = \text{COSTO TOTALE ISOLAMENTO} = C_i' + C_i''}$$

con $\boxed{C_i' = c_i\,\pi\left(r_{e\,ISOL}^2 - r_{i\,ISOL}^2\right)L}$ COSTO IN OPERA dell'ISOLANTE

con
- c_i = COSTO UNITARIO RIVESTIMENTO ISOLANTE $\left[\frac{€}{m^3}\right]$
- $\frac{1}{a_m}$ = TERMINE UNITARIO DI AMMORTAMENTO in m ANNI al TASSO i $= \boxed{\frac{i(1+i)^m}{(1+i)^m - 1} = \frac{1}{a_m}}$

$$\boxed{C_i'' = 2\pi\, r_{e\,LAMIERA}\, L\, c_r \frac{1}{a_m}}$$

COSTO IN OPERA del RIVESTIMENTO IN LAMIERA dell'ISOLANTE

con c_r = COSTO UNITARIO RIVESTIMENTO ESTERNO IN LAMIERA $\left[\frac{€}{m^2}\right]$

---

per cui la funzione totale COSTO TOTALE è data da:

$$C_{TOT} = \frac{2\pi\chi(T_i - T_e)L\,c}{\ln\frac{r_{e\,ISOLANTE}}{r_{i\,ISOLANTE}}}\,m + c_i\,\pi\left(r_{e\,ISOLANTE}^2 - r_{i\,ISOLANTE}^2\right)L\frac{1}{a_m} + c_r\,2\pi\, r_{e\,ISOLANTE}\,L\frac{1}{a_m}$$

in cui l'unica incognita è s. Dobbiamo trovare il minimo della funzione.

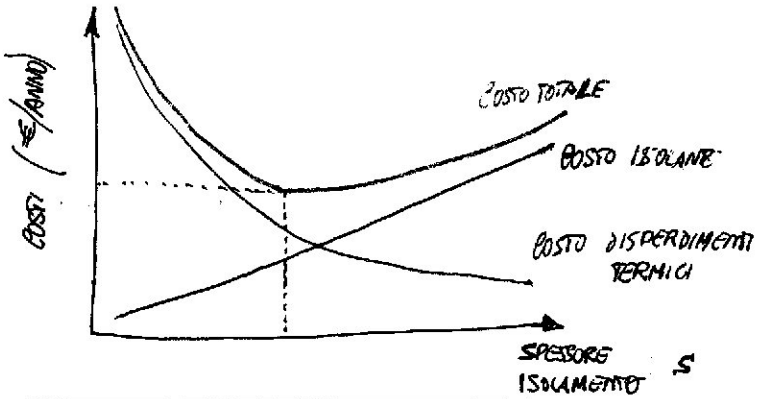
$$C_{TOT} = \frac{2\pi\chi(T_i-T_e)L\,n\,c}{\ln\left(\frac{r_{i\,ISOLANTE}+s}{r_{i\,ISOLANTE}}\right)} + e_i\pi\left[\left(r_{i\,ISOLANTE}+s\right)^2-\left(r_{i\,ISOLANTE}\right)^2\right]L\frac{1}{a_m} + e_r\,2\pi\left(r_{i\,ISOLANTE}+s\right)L\frac{1}{a_m}$$

$$C_{TOT} = \frac{2\pi\chi(T_i-T_e)L\,n\,c}{\ln\left(\frac{r_{i\,ISOLANTE}+s}{r_{i\,ISOLANTE}}\right)} + \left\{\left[e_i\left(r_{i\,ISOLANTE}+s\right)^2-r_{i\,ISOLANTE}^2\right]+2e_r\left(r_{i\,ISOLANTE}+s\right)\right\}\pi L\frac{1}{a_m}$$

Il minimo della funzione costo è:

$$\begin{cases}\dfrac{dC_{TOT}}{ds}=0\\[2mm] \dfrac{d^2C_{TOT}}{ds^2}>0\end{cases}$$

$\Rightarrow$ in teoria basta derivare la funzione perché ha una forma con un solo punto stazionario. Non volendo derivare basta effettuare vari calcoli di costo totale con vari s e scegliere quello con costo totale minimo.

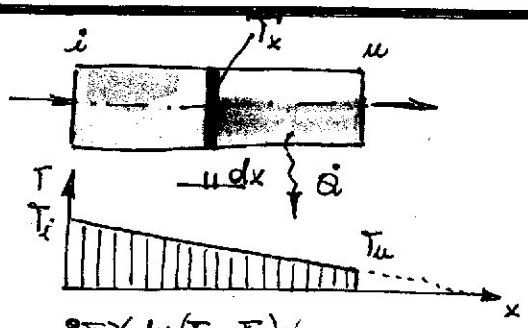


$$\left.\begin{array}{l} C_{TOT_1}(s_1)\\ C_{TOT_2}(s_2)\\ \vdots\\ C_{TOT_m}(s_m)\end{array}\right\}$$

Scelgo $\boxed{s \ \ni' \ C_{TOT_{MIN}}}$ sia minimo: $\min\left(C_{TOT_1}, C_{TOT_2}, \dots C_{TOT_m}\right)$

RIVESTIMENTO ANTIGELO

$T_{FLUIDO} > T_{CONGELAMENTO} > T_{AMB}$



$$\boxed{\dot{Q} = \frac{2\pi\chi L(T_i-T_e)}{\ln\left(\frac{r_e}{r_i}\right)_{ISOLANTE}}}$$

Per una sezione infinitesima: $$|d\dot{Q}| = \underbrace{\frac{2\pi\chi\,dx\,(T_x-T_e)}{\ln\left(\frac{r_e}{r_i}\right)_{ISOLANTE}}}_{\text{CALORE SCAMBIATO}} = \underbrace{-c_p\,G\,dT_x}_{\text{CALORE CEDUTO}}$$

Posso scrivere $dT_x = d(T_x-T_e)$ $\Rightarrow$ $$\frac{2\pi\chi(T_x-T_e)\,dx}{c_p\,G\,\ln\left(\frac{r_e}{r_i}\right)_{ISOLANTE}} = -d(T_x-T_e)$$

Integrando tra 0 ed L: $$\int_0^L \frac{2\pi\chi\,dx}{c_p\,G\,\ln\left(\frac{r_e}{r_i}\right)_{ISOLANTE}} = -\int_{T_{INGRESSO}}^{T_{USCITA}} \frac{d(T_x-T_e)}{T_x-T_e}$$

si ha: $$\boxed{\frac{2\pi\chi L}{c_p\,G\,\ln\left(\frac{r_e}{r_i}\right)_{ISOLANTE}} = \ln\frac{T_i-T_e}{T_u-T_e}}$$

con
- χ = CONDUCIBILITÀ TERMICA DEL MATERIALE
- L = LUNGHEZZA PROGETTO
- c_p = CALORE SPECIFICO FLUIDO
- T_e = TEMP. ESTERNA (la più bassa a cui il fluido può lavorare)
- T_i = DATO FORNITO dal committente = temperatura INGRESSO

Le incognite sono $r_{e\,ISOLANTE}$ e la T_u. Qualora il fluido non si muova nella tubazione, è opportuno che le stesse rimangano indipendenti.

Fisso $\boxed{T_u > T_{CONGELAMENTO}}$ $\Rightarrow$ $T_u = T_{CONGELAMENTO} + 1 = 2\,[°C]$

1) Fisso $\boxed{T_u}$
2) Calcolo $\boxed{r_{e_{ISOL}}}$
3) Calcolo $\boxed{s_{ISOLAMENTO} = r_{e_{ISOLAM}} - r_{i_{ISOLAM}}}$
4) Verifico il valore calcolato al dato unificato immediatamente superiore. $\boxed{s_{ISOLAM}^{UNI} \geq s_{ISOLAM}^{CALCOLATO}}$

Esempio: Fluido: H_2O

$T_{CONGEL} = 0°C$

$c_p = 4186{,}6 \frac{J}{kg\,K}$

$NPS = 6'' \xrightarrow{TAB} D_{e_{TUBAZ}} = 168{,}08\,mm$ da TABELLA ANSI B36.10

$T_i = 5°C$

$T_e = -10°C$

$Q = 25{,}5\ m^3/h$

$L = 300\ m$

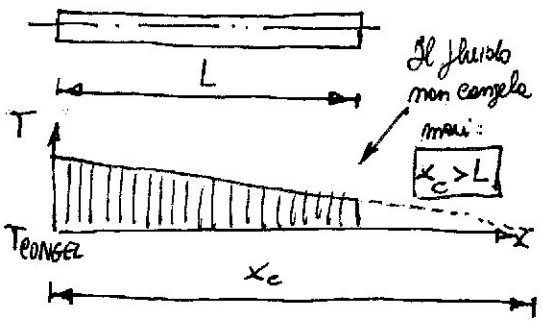
$s = 30\ mm$

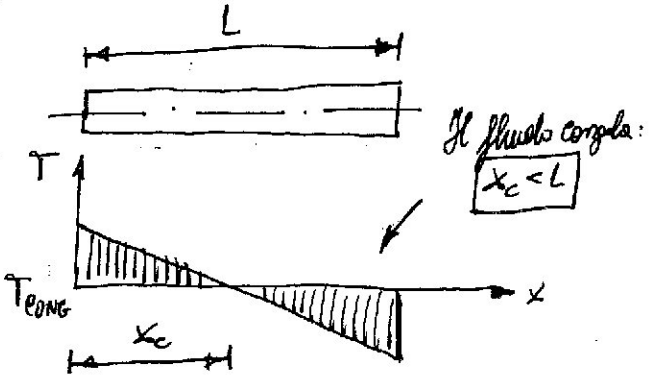
$$\boxed{\frac{2\pi \lambda L}{c_p G \ln \frac{r_{e_{ISOLAM}}}{r_{i_{ISOLAM}}}} = \ln \frac{T_i - T_e}{T_u - T_e}}$$

Verifichiamo che non avvenga congelamento:

METODO:
- a) CALCOLARE $\boxed{T_u}$ e VERIFICARE che $\boxed{T_u > T_{CONGELAMENTO}}$;
- b) FISSARE $\boxed{T_u = T_{CONGELAMENTO}}$ $\Rightarrow$ valutare la distanza $\boxed{x_c}$ a cui il fluido congelerebbe, verificare $\boxed{x_c > L}$

Il calcolo in questo caso è molto più semplice.





Dalla formula inversa della (*) calcolo

$$\boxed{x_c = \frac{c_p G \ln \frac{r_{e_{ISOLAM}}}{r_{i_{ISOLAM}}} \ln \frac{T_i - T_e}{T_u - T_e}}{2\pi\lambda}}$$

con $\boxed{T_u = T_{CONGELAMENTO}}$

avendo posto $\boxed{r_{e_{ISOLAM}} = \left(\frac{D_e}{2}\right)_{TUBAZIONE} + s}$

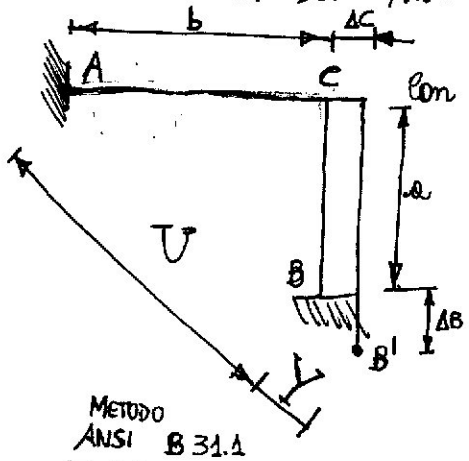
ANALISI DI FLESSIBILITÀ DI UNA LINEA SECONDO ANSI B 31.1

L'80% degli impianti sono destinati a funzionare a differenti temperature; se non previsti particolari componenti o configurazioni, si può andare incontro alla dilatazione e al collasso delle tubazioni.

È necessario valutare lo stato tensionale di un sistema:

prima di effettuare una VALUTAZIONE SULLO STATO TENSIONALE del SISTEMA $[\sigma_{MAX} < \sigma_{AMM}]$ è possibile effettuare una VERIFICA PRELIMINARE DI FLESSIBILITÀ secondo la ANSI B 31.1.

PER LA VERIFICA DI FLESSIBILITÀ DI UNA LINEA COSTITUITA DA DUE TRATTI IN POSIZIONE ORTOGONALE E COMPRESA TRA DUE PUNTI FISSI, LA NORMATIVA ANSI B 31.1 FORNISCE LA RELAZIONE



$\boxed{L = a + b}$ = LUNGHEZZA EFFETTIVA DEI DUE TRATTI COSTITUENTI LA LINEA

D = DIAMETRO ESTERNO TUBAZIONE

Y = RISULTANTE DELLA DILATAZIONE LIBERA CHE LA TUBAZIONE AVREBBE SE NON FOSSE VINCOLATA

U = DISTANZA MINIMA TRA I DUE PUNTI FISSI [PIEDI]

Ricorda $1[\text{INCH}] = 2{,}54\,[\text{cm}]$
$1\,[\text{FEET}] = 12\,[\text{INCH}]$

METODO ANSI B 31.1

$$\boxed{\frac{Y \cdot D_e}{(L-U)^2} \leq 0{,}03}$$

$\begin{cases} Y\,[\text{INCH}] \\ D_e\,[\text{INCH}] \\ L\,[\text{FEET}] \\ U\,[\text{FEET}] \end{cases}$

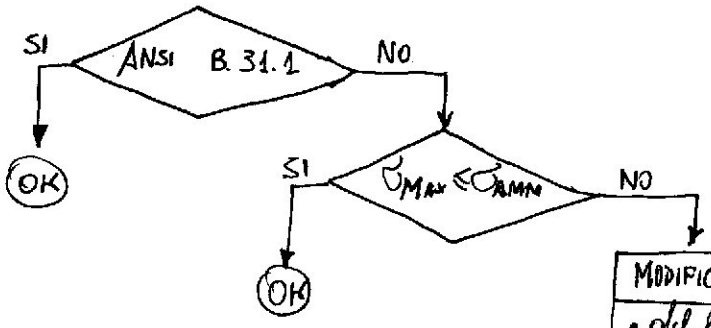
$\begin{cases} Y\,[m] \\ D_e\,[m] \\ L\,[m] \\ U\,[m] \end{cases}$

$$\left.\begin{aligned} \Delta B &= L_{AC}\,\alpha_{AC}\,\Delta T = L_{AC}\,\alpha\,\Delta T \\ \Delta C &= L_{BC}\,\alpha_{BC}\,\Delta T = L_{BC}\,\alpha\,\Delta T \end{aligned}\right\} \overline{BB'} = \sqrt{\overline{\Delta B}^2 + \overline{\Delta C}^2} = \alpha\,\Delta T\sqrt{L_{AC}^2 + L_{BC}^2} = \alpha\,\Delta T\,U$$

$$\overline{BB'} = \boxed{Y = \alpha\,\Delta T\,U}$$

$$\boxed{U = \sqrt{L_{AC}^2 + L_{BC}^2}}$$

Se la verifica non è soddisfatta →
- VALUTAZIONE PRECISA dello STATO TENSIONALE
- MODIFICA del LAYOUT della LINEA (* preferibile per ragioni economiche, migliore soluzione tecnicamente)
- COMPENSATORI DI DILATAZIONE



MODIFICA della LINEA
• del layout della linea (aumento L)
• inserimento COMPENSATORI di DILATAZIONE

Il metodo ANSI B 31.1 è molto conservativo, dell'ordine di 6,7; è molto sicuro