

ESERCIZI SVOLTI di SCAMBIO TERMICO

versione#B1 - Prof.A.Tonini – www.andytonini.com

[vedi anche, per la risoluzione, il programma excel CONDUZ_1.xls sul CD 3CHIMICA]

INDICE: PARTE 1° **CONDUZIONE** – PARTE 2° **CONVEZIONE** –
PARTE 3° **IRRAGGIAMENTO** – **APPENDICE TABELLE** -

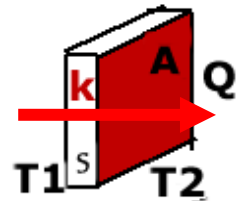
► **parte 1° - CONDUZIONE** -----

- **CASO PARETI SINGOLE:**

Es.1* – parete di **mattoni**; date le seguenti caratteristiche, determinare il flusso di calore Q.

Dati: superficie $A=10 \text{ m}^2$; spessore $s = 30 \text{ cm}$; $T_1=28^\circ\text{C}$; $T_2=4^\circ\text{C}$; mattoni $k=0,4 \text{ W/m}^\circ\text{C}$.

Soluzione: $\rightarrow Q = k A \Delta T / s = 320 \text{ W}$.



Es.2* – piastra in **vetroceramica** ($k=1,3 \text{ W/m}^\circ\text{C}$) trasmette un flusso di calore

$Q=700 \text{ W}$ attraverso una superficie $A=0,0144 \text{ m}^2$ e spessore $s=1 \text{ cm}$, raggiungendo una T esterna $T_2=600^\circ\text{C}$; determinare la T_1 interna piastra.

Soluzione: $\rightarrow T_1 = T_2 - s Q / (k A) = 974^\circ\text{C}$.



Es.3* – parete di mattoni di **magnesite** ($k_M=3,1 \text{ W/m}^\circ\text{C}$), spessore $s=40 \text{ cm}$,

$T_1=600^\circ\text{C}$, $T_2=400^\circ\text{C}$;

a) determinare il flusso di calore per unità di superficie.

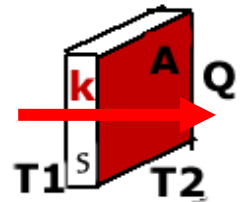
b) se parete di mattoni refrattari in **argilla** ($K_a = 1,3 \text{ W/m}^\circ\text{C}$) operanti tra

le stesse temperature e con lo stesso flusso termico Q e superficie, determinarne lo spessore;

Soluzione:

a) $s=0,40 \text{ m}$; $\rightarrow Q/A = k_M \Delta T / s = 1550 \text{ W/m}^2$;

b) $\rightarrow Q/A = 1550 \text{ W/m}^2$; $Q/A = k_a \Delta T / s$; $s = k_a \Delta T / (Q/A) = 0,168 \text{ m}$;



Es.4 - Calcolare lo spessore da dare a una parete di **pietra** ($k=0,935 \text{ W/m}^\circ\text{C}$) che trasmette un flusso di calore $Q=5,816 \text{ kW}$ da una temperatura interna $T_1=600^\circ\text{C}$ a una esterna $T_2=60^\circ\text{C}$ attraverso una superficie di 11 m^2 .

Risoluzione: $Q = k \times \text{Sup.} \times \Delta T / s$; $\rightarrow s = k \times \text{Sup.} \times (T_1 - T_2) / Q = 0,955 \text{ m}$



Es.5 - **Forno** con parete interna alla temperatura $T_1=240^\circ\text{C}$ che trasmette flusso termico

$Q/A=800 \text{ W/m}^2$; si hanno due casi:

a) pannello-1 di isolante spessore $s=2 \text{ cm}$ e conducibilità $K_1 = 0,08 \text{ W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$

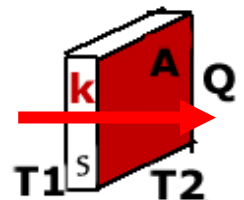
b) pannello-2 di isolante stesso spessore $s=2 \text{ cm}$ e conducibilità $K_2 = 0,16 \text{ W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$.

determinare la temperatura T_2 nei due casi, con stesso flusso termico.

Soluzione:

a) $Q/A = k_1 \Delta T / s \rightarrow T_2 = T_1 - [sQ/k_1A] = 40^\circ\text{C}$;

b) $Q/A = k_2 \Delta T / s \rightarrow T_2 = T_1 - [sQ/k_2A] = 140^\circ\text{C}$.



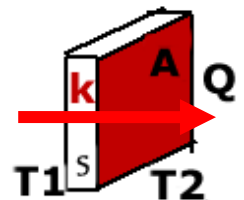
Es.6 – parete **piana** con le seguenti caratteristiche:

flusso di calore trasmesso $Q/A=1000 \text{ W/m}^2$, $k=0,3 \text{ W/m}^\circ\text{C}$, $\Delta T=50^\circ\text{C}$;

determinare lo spessore.

Soluzione:

$Q/A = k \Delta T / s$; $\rightarrow s = k \Delta T / Q/A = 0,015 \text{ m}$.



- CASO PARETI MULTIPLE:

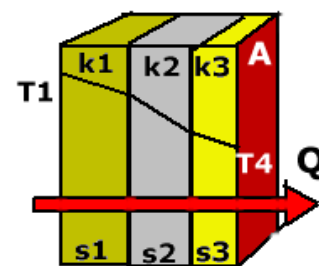
Es.7 - Calcolare la temperatura interna T1 di un **forno** che sviluppa un flusso di calore Q attraverso una superficie $A=4,5m^2$ trasmesso per conduzione attraverso una parete **multipla** avente le seguenti caratteristiche: (vedi fig)

materiale	1	2	3
k (W/m°C)	1,395	0,21	0,7
s (cm)	35	30	8
T4 = 45°C		Q=436 W	

Risoluzione:

$$Req. = (s1/k1 + s2/k2 + s3/k3)/Sup = 0,399 \text{ °C/W}$$

$$T1 = Req. \times Q + T4 = 218,8^\circ\text{C}$$



Es.8* - **PARETE** di un edificio costituita da **4 strati** di materiale; calcolare il flusso di calore Q/A per unità di superficie trasmesso verso l'esterno, sapendo che la temperatura interna T1 = 28°C e esterna T2 = 4°C; caratteristiche della parete multipla:

materiale	1	2	3	4
	cartongesso	isolante	calcestruzzo	intonaco
k (W/m°C)	0,21	0,033	0,9	0,9
s (cm)	2	8	10	2

Risoluzione:

$$Req. = (s1/k1 + s2/k2 + s3/k3 + s4/k4)/Sup = 2,65 \text{ °C/W}$$

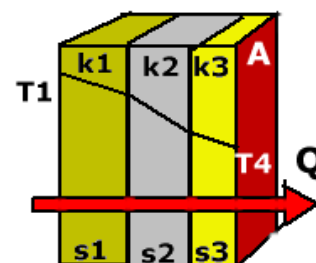
$$\rightarrow Q/A = \Delta T/Req = 9,1 \text{ W/m}^2;$$

Es.9 - Calcolare la temperatura esterna T4 di un **forno** che sviluppa un flusso di calore Q attraverso 18 m2 di superficie per conduzione attraverso una parete multipla avente le seguenti caratteristiche: (vedi fig)

materiale	1	2	3
k (W/m°C)	0,233	388,4	0,233
s (cm)	3	1	3
T1=300°C		Q=18522 W	

soluzione:

$$Req. = (s1/k1 + s2/k2 + s3/k3)/Sup = 0,0143 \text{ °C/W}; T4 = T1 - Req. \times Q = 35^\circ\text{C}$$



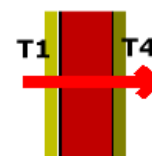
Es.10 - Calcolare il calore Q disperso per conduzione dalle pareti di un **forno** attraverso superficie $A=0,5m^2$ a parete multipla, con salto complessivo di temperatura $\Delta T=(T1-T4)=200^\circ\text{C}$; caratteristiche: (vedi fig)

materiale	1	2	3
	acciaio	lana di vetro	acciaio
k (W/m°C)	55	0,055	55
s (cm)	0,2	3	0,2

soluzione:

$$Req. = (s1/k1 + s2/k2 + s3/k3)/Sup \cong 1,1 \text{ °C/W};$$

$$\rightarrow Q = \Delta T/Req = 181,8 \text{ W};$$



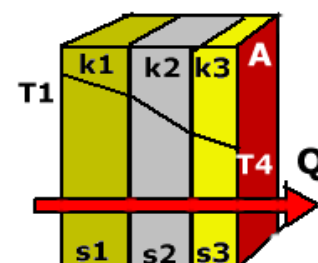
Es.11 - Calcolare la quantità di calore attraverso una superficie $A= 5,4 m^2$ trasmesso per conduzione attraverso una parete **multipla** avente le seguenti caratteristiche: (vedi fig)

materiale	1	2	3
k (W/m°C)	1,395	0,21	0,7
s (cm)	25	30	10
T4 = 45°C	T1=650°C		

Risoluzione:

$$Req. = (s1/k1 + s2/k2 + s3/k3)/Sup = 0,324 \text{ °C/W}$$

$$\rightarrow Q = (T1 - T4)/Req. = 1866 \text{ W}$$



Es.12 - Calcolare la temperatura esterna T4 di un forno che sviluppa un flusso di calore Q attraverso A=6,5 m2 di superficie per conduzione attraverso una parete **multipla** avente le seguenti caratteristiche: (vedi fig.sotto)

materiale	1	2	3
k (W/m°C)	1,63	0,442	0,93
s (cm)	37	43	10
	T1=800	Q= 3664 W	

Risoluzione:

$$\text{Req.} = (s_1/k_1 + s_2/k_2 + s_3/k_3) / \text{Sup} = 0,2011 \text{ } ^\circ\text{C/W}$$

$$\rightarrow T_4 = T_1 - \text{Req.} \cdot Q = 63^\circ\text{C}$$

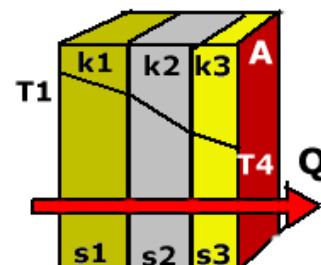
Es.13 - Calcolare la quantità di calore Q trasmesso per conduzione attraverso una parete **multipla** di superficie A=5,6 m2, avente le seguenti caratteristiche:

materiale	1	2	3
k (W/m°C)	1,63	0,442	0,93
s (cm)	37	43	10
	T1=800	Q= 3664 W	

Risoluzione:

$$\text{Req.} = (s_1/k_1 + s_2/k_2 + s_3/k_3) / \text{Sup} = 0,1766 \text{ } ^\circ\text{C/W}$$

$$Q = (T_1 - T_4) / \text{Req.} = 4106 \text{ W}$$

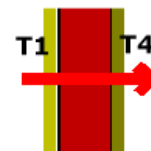


Es.14 - Una lamiera di **rame** (s2=3 cm; k2=388,4 W/m °C) trasmette calore da una T interna T1=120°C a una esterna T4=20°C con una superficie A= 0,075m2; sapendo che c'è uno strato di **sporco** rispettivamente all'interno con s1=0,1 cm, K1=0,23 W/m °C, e all'esterno con s3=0,3 cm, K3=0,174 W/m°C, determinare la resistenza equivalente e il flusso di calore trasmesso Q.

Risoluzione:

$$\text{Req.} = (s_1/k_1 + s_2/k_2 + s_3/k_3) / A = 0,289 \text{ } ^\circ\text{C/W};$$

$$\rightarrow Q = (T_1 - T_4) / \text{Req.} = 346 \text{ W}$$

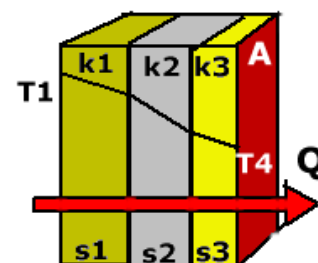


Es.15 - Calcolare la quantità di calore Q attraverso 0,075 m2 di superficie trasmesso per conduzione attraverso una parete **multipla** avente le seguenti caratteristiche:

materiale	1	2	3
k (W/m°C)	0,233	388,4	0,174
s (cm)	0,1	3	0,3
	T1=120	T4=20°C	

Risoluzione:

$$\text{Req.} = (s_1/k_1 + s_2/k_2 + s_3/k_3) / \text{Sup} = 0,288 \text{ } ^\circ\text{C/W}; Q = (T_1 - T_4) / \text{Req.} = 348 \text{ W}$$

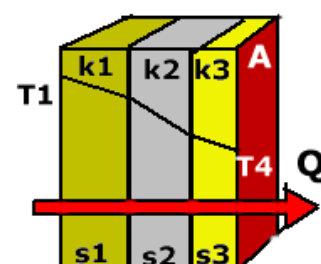


Es.16 - Calcolare la quantità di calore Q attraverso 100 m2 di superficie trasmesso per conduzione attraverso una parete **multipla** avente le seguenti caratteristiche:

materiale	1	2	3
k (W/m°C)	0,233	58,14	0,233
s (cm)	1	0,5	1
	T1=120°C	T4=100°C	

Risoluzione:

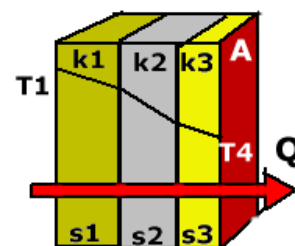
$$\text{Req.} = (s_1/k_1 + s_2/k_2 + s_3/k_3) / \text{Sup} = 0,00086 \text{ } ^\circ\text{C/W}; Q = (T_1 - T_4) / \text{Req.} = 23277 \text{ W}$$



Es.17 - Calcolare la quantità di calore Q attraverso 40 m² di superficie trasmesso per conduzione attraverso una **parete** multipla avente le seguenti caratteristiche:

materiale	1	2	3
k (W/m°C)	2	0,13	1,8
s (cm)	10	30	20
T ₁ = 25°C	T ₄ = 3°C		

Risoluzione: Req.= (s₁/k₁ + s₂/k₂ + s₃/k₃)/ Sup = 0,0617 °C/W ; Q=(T₁ -T₄)/Req.=356,45 W

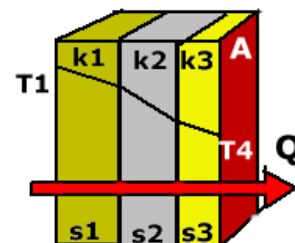


Es.18 - Calcolare la quantità di calore Q attraverso 27 m² di superficie trasmesso per conduzione attraverso una **parete** multipla avente le seguenti caratteristiche:

materiale	1	2	3
k (W/m°C)	1,8	0,1	1,9
s (cm)	12	30	25
T ₁ = 20°C	T ₄ = 5°C		

Risoluzione:

Req.= (s₁/k₁ + s₂/k₂ + s₃/k₃)/ Sup = 3,198 m²°C/W ; Q = (T₁ - T₄)/Req. = 4,69 W/m²



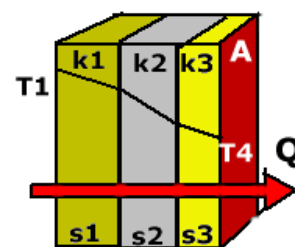
Es.19 - Una **parete** piana, T_{interna} T₁=24°C esterna T₄=-4°C, è composta dai seguenti strati:

materiale	1	2	3
	cartongesso	vermiculite	mattoni
k (W/m°C)	0,21	0,04	1
s (cm)	1,5	10	20
T ₁ = 24°C	T ₄ = -4°C		

Determinare il flusso di calore trasmesso per m² di superficie.

Soluzione:

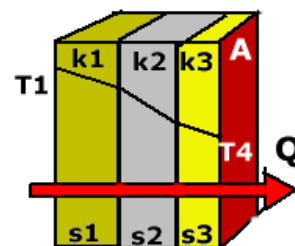
Req.= (s₁/k₁ + s₂/k₂ + s₃/k₃)/Sup = 2,77 m²°C/W ; →Q/A = (T₁ - T₄)/Req. = 10,1 W/m²



Es.20 - **FORNO** industriale a parete multipla: determinare il flusso di calore disperso per m² superficie. DATI: interno T_i=900°C; pareti: 1-**mattoni** [s₁=22,5cm k₁=1,4W/m°C]; 2-**isolante** [s₂=12cm k₂=0,2W/m°C]; 3-**mattoni** [s₃=22,5cm k₃=0,7W/m°C]; esterno aria T_a=60°C.

Req.= (s₁/k₁ + s₂/k₂ + s₃/k₃)/Sup = 1,082 m²°C/W ;

→Q/A = (T_i - T_a)/Req. = 776 W/m²



- CASO PARETI CILINDRICHE:

Es.21 - Un tratto di TUBO DI **ACCIAIO** (k=52,3 W/m°C) di scambiatore di calore lungo L=5m trasmette calore da una T interna T₁=240°C a una esterna T₄=80°C, con un diametro interno D_i=25,4 mm e uno esterno D_e=33,78 mm. Calcolare la quantità di calore trasmessa per conduzione nel caso tubo **pulito** (spessore s=4,191 mm).

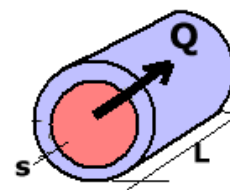
soluzione: N.B.: ΔT=240-80 = 160°C!!

● CASO1 -diametro medio D_m= (D_i + D_e)/2 = 0,0296 m; area media A_m=π D_m L = 0,465 m²;

flusso →Q= k.A_m.ΔT/s= 928,4 kW.

● CASO2 -considerando la variazione rΔT/Δr:

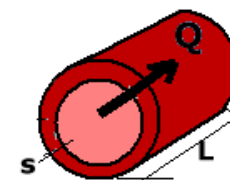
Q=k $2\pi L \Delta T / (\ln R_e / R_i)$ = 52,3 x 2x3,14x5x(240-80)/ln(0,03378/0,0254)=921,6kW



Es.21B - come es.precedente ma TUBO DI **RAME** (k=380 W/m°C)

● CASO2 -considerando la variazione rΔT/Δr: [D_i=2,54cm; D_e=3,378cm]

Q=k $2\pi L \Delta T / (\ln R_e / R_i)$ = 380 x 2x3,14x5x(240-80)/ln(0,03378/0,0254)= 6696kW



Es.22 - Un tratto di TUBO DI RAME ($k_2=388 \text{ W/m}^\circ\text{C}$) lungo $L=1\text{m}$ trasmette calore da una T_1 interna $=120^\circ\text{C}$ a una esterna $T_4=20^\circ\text{C}$, con un diametro interno $D_i=80 \text{ cm}$ e uno esterno $D_e=86 \text{ cm}$ e spessore $s_2=3 \text{ cm}$.

Calcolare la quantità di calore trasmessa per conduzione nel caso (1) tubo pulito e nel caso (2) con sporco interno ($s_1=0,1 \text{ mm}$ $K_1=0,233\text{W/m}^\circ\text{C}$) e esterno ($s_3=0,3 \text{ mm}$ $K_3=0,174 \text{ W/m}^\circ\text{C}$).

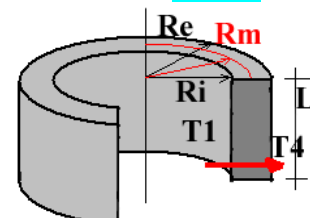
Si adottino i 2 sistemi di calcolo (a) (b) e i casi pulito (caso 1) e sporco (caso 2).

a) soluzione: diametro medio $D_m = (D_i + D_e)/2 = 0,83 \text{ m}$; area media $A_m = \pi D_m L = 2,61 \text{ m}^2$

caso 1 - $R = s/(A_m \cdot k) = 0,0000296 \text{ }^\circ\text{C/W}$; $\rightarrow Q = (T_1 - T_4)/R_{eq} = 3370 \text{ kW}$;

caso 2 - $R_{eq} = (s_1/k_1 + s_2/k_2 + s_3/k_3) / A_m = 0,000856 \text{ }^\circ\text{C/W} = 0,856 \text{ }^\circ\text{C/kW}$

$\rightarrow Q = (T_1 - T_4)/R_{eq} = 117 \text{ kW}$.



b) soluzione: variazione di T nel diametro; resistenza (sup.cilindrica) $R = \ln(D_e/D_i)/(k_2 \pi L)$;

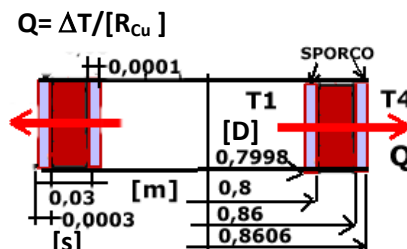
caso 1 - PULITO; $R_{Cu} = \ln(86/80)/(388 \times 2 \times 3,14 \times 1) = 2,97 \cdot 10^{-5} \text{ m}^\circ\text{C/W}$;

$\rightarrow Q = (T_1 - T_4)/R_{Cu} = 3369,2 \text{ kW}$.

caso 2- SPORCO INT.(1): $D_i = 799,8 \text{ mm}$, $D_e = 800 \text{ mm}$, $R_{d1} = \ln(800/799,8)/(0,233 \times 2 \times 3,14 \times 1) = 1,71 \cdot 10^{-4} \text{ m}^\circ\text{C/W}$;

-SPORCO EXT.(2): $D_i = 86 \text{ cm}$, $D_e = 86,06 \text{ cm}$; $R_{d2} = \ln(86/86,06)/(0,174 \times 2 \times 3,14 \times 1) = 6,38 \cdot 10^{-4} \text{ m}^\circ\text{C/W}$;

$R_{tot} = R_{Cu} + R_{d1} + R_{d2} = 8,39 \cdot 10^{-4}$; $\rightarrow Q = (T_1 - T_4)/R_{tot} = 119,2 \text{ kW}$



Es.23* - TUBO DI RAME COIBENTATO - Cu//PU

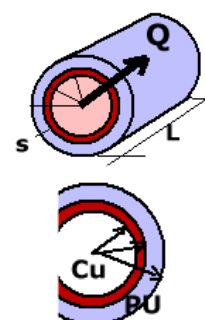
caratteristiche: TUBO DI Cu: $D_i=34 \text{ mm}$, $D_e=40 \text{ mm}$ $s=3 \text{ mm}$ $k=300 \text{ W/m}^\circ\text{C}$, $L=1 \text{ m}$; $T_{interna} T_1=132^\circ\text{C}$; COIBENTAZIONE POLIURETANO: $k=0,034 \text{ W/m}^\circ\text{C}$; $T_{esterna} T_4=30^\circ\text{C}$, $D_i=40 \text{ mm}$, $s=30 \text{ mm}$, $D_e=40+2 \times 30 \text{ mm}=100 \text{ mm}$; determinare il flusso di calore trasmesso.

soluzione:

$Q = \Delta T / [R_{Cu} + R_{PU}]$; resistenza (caso cilindro) $R = \ln(D_e/D_i)/(k_2 \pi L)$; $\Delta T = T_1 - T_4$;

$R_{Cu} = \ln(40/34)/(2 \pi \cdot 300 \cdot 1) = 8,63 \cdot 10^{-5} \text{ m}^\circ\text{C/W}$; $R_{PU} = \ln(100/40)/(0,034 \cdot 2 \pi \cdot 1) = 4,29 \text{ m}^\circ\text{C/W}$; $R_{tot} = 4,290086 \text{ m}^\circ\text{C/W}$.

$\rightarrow Q = (132 - 30)/R_{tot} = 23,776 \text{ W}$. (N.B.: contributo R_{Cu} trascurabile!).



[INIZIO]

► **parte 2°: SCAMBIO TERMICO per CONVEZIONE e CONDUZIONE** -----

Es.1 - data una parete tra 2 fluidi, di superficie $A=12 \text{ m}^2$, spessore $s=30 \text{ cm}$, materiale con $k=0,6 \text{ W/m.K}$; il primo fluido interno con $T_1=20^\circ\text{C}$ e $h_1=7 \text{ W/m}^2\text{.K}$, il secondo esterno con $T_2=0^\circ\text{C}$ e $h_2=21 \text{ W/m}^2\text{.K}$; determinare il flusso complessivo di calore trasmesso a regime.

Soluzione:

coeff. globale $U = 1/(1/h_1 + s/k + 1/h_2) = 1,448 \text{ W/m}^2\text{.K}$;

flusso $\rightarrow Q = U \times A \times \Delta T = 347,6 \text{ W}$.

Es.2 - forno industriale, con temperatura alla parete esterna $T_1=70^\circ\text{C}$, ambiente aria $T_2=15^\circ\text{C}$ e $h_2=0,025 \text{ kW/m}^2\text{.}^\circ\text{C}$, superficie $A=60 \text{ m}^2$; determinare il flusso di calore trasmesso per convezione.

Soluzione:

flusso $\rightarrow Q = h \times A \times \Delta T = 0,025 \times 60 \times (70 - 15) = 82,5 \text{ kW}$.

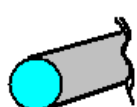
Es.3 - tubazione di scambiatore di calore con portata di toluene $F=200 \text{ kg/min}$, $T_{media}=60^\circ\text{C}$, diametro interno $D_i=10 \text{ cm}$; dati del fluido: $\rho=879 \text{ kg/m}^3$; $k=3 \cdot 10^{-6} \text{ kcal/mh}^\circ\text{C}$; $\mu = 0,37 \cdot 10^{-3} \text{ kg/m.s}$; $c_p = 0,445 \text{ kcal/kg}^\circ\text{C}$; determinare il coefficiente di convezione h .

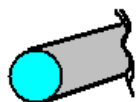
Soluzione:

$F = 3,33 \text{ kg/s} = 0,0038 \text{ m}^3/\text{s}$; $A = \pi D^2/4 = 0,00785 \text{ m}^2$; $v = F/A = 0,48 \text{ m/s}$;

$Re = \rho v D / \mu = 114032$; $Pr = c_p \mu / k = 54,88$;

$\rightarrow h = 0,027 \text{ k/D} \cdot (Re)^{0,8} \cdot (Pr)^{0,33} = 0,03374 \text{ kcal/m}^2 \text{ s }^\circ\text{C} = 121,5 \text{ kcal/m}^2 \text{ h }^\circ\text{C} = 0,141 \text{ kW/m}^2\text{.}^\circ\text{C}$.





Es.4 – tubazione con portata di **benzene** $F=300 \text{ kg/min}$, $T_{\text{media}}=60^\circ\text{C}$, diametro interno $D_i=10 \text{ cm}$; dati del fluido: $\rho=876 \text{ kg/m}^3$; $k=0,151 \text{ J/m s}^\circ\text{C}$; $\mu = 0,4 \text{ E-3 kg/m.s}$; $c_p= 1,88 \text{ kJ/kg}^\circ\text{C}$ ($=1880\text{J/kg}^\circ\text{C}$); determinare il coefficiente di convezione h.

Soluzione:

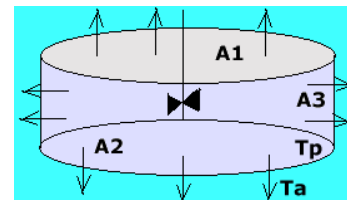
$F=5 \text{ kg/s} = 0,0057 \text{ m}^3/\text{s}$; $A= \pi D^2/4 = 0,00785 \text{ m}^2$; $v = F/A = 0,73 \text{ m/s}$; N.B.: $1\text{W} \equiv 1\text{J/s}$;
 $Re = \rho v D / \mu = 159870$; $Pr = c_p \mu / k = 4,98$; $[Pr = (\text{J/kg}^\circ\text{C}) \cdot (\text{kg/m.s}) \cdot (\text{m.s}^\circ\text{C/J}) = \text{adimensionale!}]$
 $\rightarrow h = 0,027 \text{ k/D} \cdot (Re)^{0,8} \cdot (Pr)^{0,33} = 1008 \text{ J/m}^2 \text{ s}^\circ\text{C} = 1 \text{ kW/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$.

Es.5 – determinare il calore disperso nell'ambiente per un **reattore** cilindrico, dove avviene reazione esotermica, con le seguenti caratteristiche:

Dati: diametro $d=2\text{m}$; altezza $H=2\text{m}$; T parete esterna $T_p=160^\circ\text{C}$; T aria esterna $T_a=24^\circ\text{C}$; superficie A_1 tetto: $h_1=8,53\text{W/m}^2\text{C}$; superficie A_2 fondo: $h_2=3,87\text{W/m}^2\text{C}$; superficie A_3 laterale[come se piana]: $h_3=3,92\text{W/m}^2\text{C}$;

Soluzione:

Superfici $A_1= A_2= \pi d^2/4=3,14\text{m}^2$; $A_3=\pi d \times H=12,56\text{m}^2$; $\Delta T = 160-24 = 136^\circ\text{C}$;
 Flusso totale $\rightarrow Q = (h_1 \times A_1 + h_2 \times A_2 + h_3 \times A_3) \times \Delta T = 11991 = 12 \text{ kW}$.



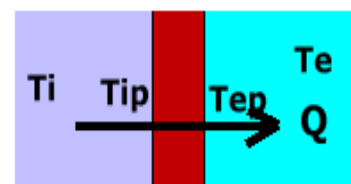
Es.6 – **PARETE DI UNA STANZA** – spessore $s=40\text{cm}$; conducib. $K=0,93\text{W/m}^\circ\text{C}$; T interna $T_i=25^\circ\text{C}$; coefficiente di convez.interno $h_i=6\text{W/m}^2\text{C}$; **aria** esterna: $T_e=0^\circ\text{C}$, coeff. $h_e=12\text{W/m}^2\text{C}$; determinare le temperature alle pareti interne ed esterne;

Soluzione: $[A = 1\text{m}^2]$; $Q = [Q_{\text{conv}}]_i + Q_{\text{conduz}} + [Q_{\text{conv}}]_e$;

$Q = h_i \times A \times (T_i - T_{ip}) = k \times A \times (T_{ip} - T_{ep})/s = h_e \times A \times (T_{ep} - T_e) = U \times A \times (T_i - T_e)$;

$U = 1/(1/h_i + s/k + 1/h_e) = 1,47 \text{ W/m}^2\text{C}$; $\rightarrow Q = 1,47 \times 1 \times (25-0) = 36,75 \text{ W}$;

$\rightarrow T_{ip} = (h_e A T_i - Q)/(h_e A) = 19^\circ\text{C}$; $\rightarrow T_{ep} = (Q - h_e A T_e)/(h_e A) = 3,1^\circ\text{C}$;

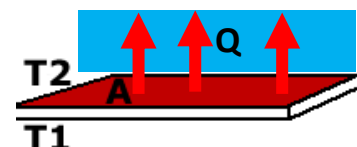


Es.7 – **LASTRA** orizzontale a contatto con **aria**: determinare il calore trasferito per convezione;

DATI: superficie $A=4\text{m}^2$; $T_p=50^\circ\text{C}$ [T_1]; **aria** $T_a=20^\circ\text{C}$ [T_2]; $h_a= 2,498 \Delta T^{0,25} \text{ W/m}^2\text{C}$;

soluzione:

$h_a = 5,85 \text{ W/m}^2\text{C}$; $\rightarrow Q = h_a \times A \times \Delta T = 702 \text{ W}$.



[INIZIO]

► **parte 3°: SCAMBIO TERMICO per IRRAGGIAMENTO** -----

Es.1 – **PARETE** di **alluminio**: determinare energia irradiata/tempo; dati: superficie $A=10\text{m}^2$; $T=70^\circ\text{C}$ [343K], emissività $\epsilon_{Al}=0,04$; $\sigma=\text{cost. Boltzman} = 5,7 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2\text{K}^4)$;

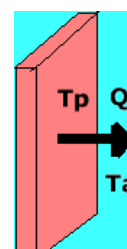
Soluzione:

flusso irradiato dalla parete: $\rightarrow Q_{\text{irr}} = \epsilon \times \sigma \times T^4 \times A = 315,6 \text{ W}$.

Es.2 – **PIASTRA** di **acciaio** scaldante: determinare il calore irradiato in atmosfera; dati: superficie $A=250\text{cm}^2$; $T_p=200^\circ\text{C}$ [473K], $T_{\text{aria}}=18^\circ\text{C}$ [291K], $\epsilon_{Fe}=0,14$; $\sigma=\text{cost. Boltzman} = 5,7 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2\text{K}^4)$;

Soluzione: $A= 0,024 \text{ m}^2$; $(T_p^4 - T_a^4) = 42.883.797 \text{ K}$;

flusso irradiato dalla parete: $\rightarrow Q_{\text{irr}} = \epsilon \times \sigma \times (T_p^4 - T_a^4) \times A = 8,21 \text{ W}$.

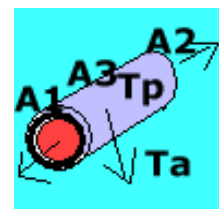


Es.3 – TUBO SCAMBIATORE di calore isolato da lana di vetro e esterno in lamiera Al; determinare il calore disperso per irraggiamento nell'aria; dati: diametro $d=1,2m$; lung. $L=6m$; $T[Al]=60^{\circ}C$ [333K]; $T[aria]=15^{\circ}C$ [288K]; $\epsilon_{Al}=0,04$; $\sigma=cost.$ Boltzman = $5,7 \times 10^{-8} W/(m^2 K^4)$;

Soluzione:

Superfici $A_1 = A_2 = \pi d^2/4 = 1,12 m^2$; $A_3 = \pi d \times L = 22,61 m^2$; $A_{tot} = 23,73 m^2$;

$\rightarrow Q_{irr} = \epsilon \times \sigma \times (T_p^4 - T_a^4) \times A_{tot} = 293 W$.



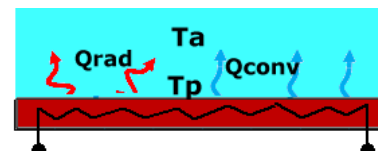
Es.4 – PIASTRA SCALDANTE in aria- DATI: superficie $A=0,137 m^2$; potenza $N=2400 W$, emissività $\epsilon=0,85$; $\sigma=cost.$ Boltzman = $5,7 \times 10^{-8} W/(m^2 K^4)$; aria $T_a=28^{\circ}C$ [301K]; coeff.convezione $h=11,23 W/m^2 \text{ } ^{\circ}C$; determinare la T piastra.

soluzione:

$Q_{conv} = h \times A \times (T_p - T_a) = 11,23 \times 0,137 \times (T_p - 28) W$;

$Q_{rad} = \epsilon \times \sigma \times (T_p^4 - T_a^4) \times A = 0,85 \times 0,137 \times 5,7 \times 10^{-8} \times (T_p^4 - 301^4)$;

Potenza $N=2400 W = Q_{conv} + Q_{rad}$; per tentativi $\rightarrow T_p \cong 449,5^{\circ}C$ [722,5 K]; $Q_{conv} = 648 W$; $Q_{rad} = 1754 W$.



Es.5 – FORNO INDUSTRIALE – determinare la T parete Tp e il calore dissipato per m^2 superficie $A=1 m^2$; DATI: forno $T_f=1500^{\circ}C$; materiali: 1-mattoni [$s_1=20cm$ $k_1=2 W/m^{\circ}C$]; 2-isolante [$s_2=10 cm$ $K_2=0,05 W/m^{\circ}C$]; 3-lamiera Al [$s_3 \ll k_3=380 W/m^{\circ}C$; $\epsilon=0,1$]; aria $T_a=10^{\circ}C$ [283K]; coeff.convezione lato forno $h_f=30 W/m^2 \text{ } ^{\circ}C$, lato aria $h_a=15 W/m^2 \text{ } ^{\circ}C$.

Soluzione: [$\sigma=cost.$ Boltzman = $5,7 \times 10^{-8} W/(m^2 K^4)$]

Bilancio globale: = Q_{tot} forno = $Q_{rad} + Q_{conv}$.

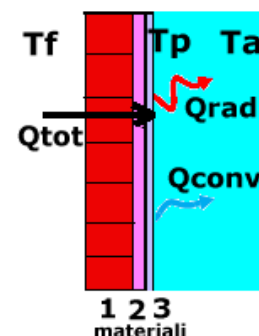
$U = 1/(1/h_f + s_1/k_1 + s_2/k_2) = 0,47 W/m^2 \text{ } ^{\circ}C$; [contributo Al trascurabile]

$-Q_{tot}$ forno = $U \times A \times (T_f - T_p) = 0,47 \times 1 \times (1500 - T_p) W$;

$-Q_{conv} = h_a \times A \times (T_p - T_a) = 15 \times 1 \times (T_p - 10) W$;

$-Q_{rad} = \epsilon \times \sigma \times (T_p^4 - T_a^4) \times A = 0,1 \times 1 \times 5,7 \times 10^{-8} \times (T_p^4 - 283^4) W$;

$Q_{tot} = Q_{rad} + Q_{conv}$; per tentativi $\rightarrow T_p \cong 53,4^{\circ}C$ [326,4K]; $Q_{tot} = 680 W$; $Q_{conv} \cong 652 W$; $Q_{rad} = 28 W$;



--- parte 4°: SCAMBIO TERMICO in APPARECCHIATURE -----

Es.1 – TERMOSIFONE – portata acqua $F=20 dm^3/h$ entrante a $T_1=80^{\circ}C$; determinare T_2 uscita acqua, noti i seguenti dati: parete termosifone a $T_p=65^{\circ}C$ [338K], aria ambiente a $T_a=22^{\circ}C$ [295K]; $hc[convez]=4 W/m^2 \text{ } ^{\circ}C$; $\epsilon=0,45$; $\sigma=cost.$ Boltzman = $5,7 \times 10^{-8} W/(m^2 K^4)$; superficie convettiva $A_c=3 m^2$, superficie radiante $A_r=2 m^2$; cal.specif. $caq=4,18 kJ/kg^{\circ}C$;

Soluzione:

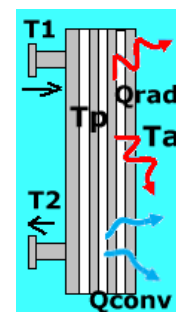
Acqua: portata $F=0,02 \times 1000/3600 = 0,0056 kg/s$; $Q_{aq} = F \times caq \times (T_1 - T_2) kW$; [T in $^{\circ}C$]

Bilancio termico apparecchiatura: $E_{in} = E_{usc}$; **$Fcaq T_1 = Fcaq T_2 + Q_{rad} + Q_{conv}$** ;

$\rightarrow Q_{rad} = \epsilon \times \sigma \times (T_p^4 - T_a^4) \times A_r = 281 W = 0,281 kW$; [T in gradi K]

$\rightarrow Q_{conv} = hc \times A_{conv} \times \Delta T = 516 W = 0,516 kW$; [T in $^{\circ}C$]

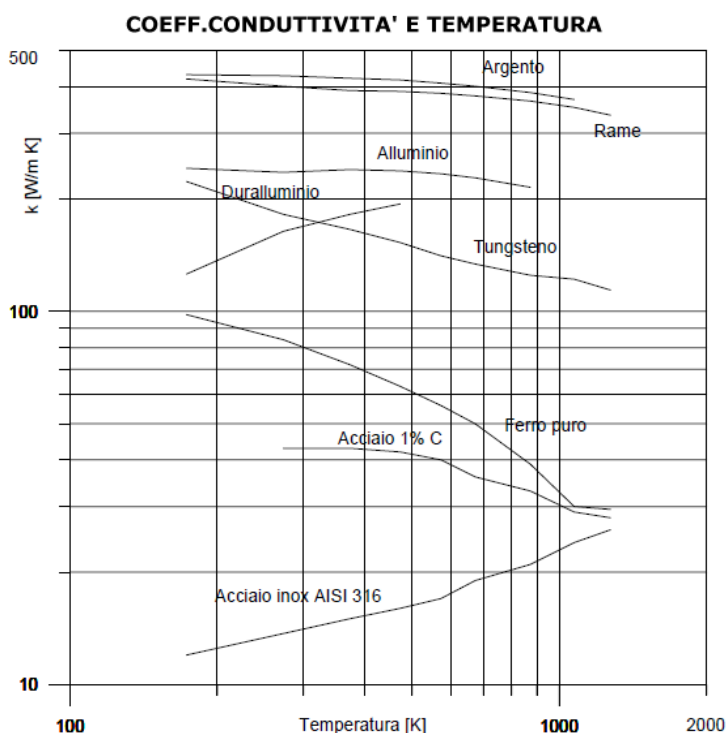
$T_1=80^{\circ}C$; $\rightarrow T_2 = (Fcaq T_1 - Q_{rad} - Q_{conv})/Fcaq = 46^{\circ}C$.



APPENDICE:

-TABELLE:

A1 – CONDUTTIVITA' TERMICA DI ALCUNI MATERIALI:



Conduttività termica per alcuni materiali k [W/(m K)]

Acqua liquido	0,6	W (m K)	Materiali da costruzione	
ghiaccio	1,8	W (m K)	Calcestruzzo	0,8 ÷ 1,4 W (m K)
Legno	0,15	W (m K)	Mattoni di argilla	1,0 ÷ 1,2 W (m K)
Balsa	0,055	W (m K)	Marmo	2,8 W (m K)
Aria	0,026	W (m K)	Sabbia	0,27 W (m K)
			Terreno	0,52 W (m K)
			Rame	300 " "
			Alluminio	200 W (m K)
			Vetro	1,4 W (m K)
			Grafite	1950 W (m K)
			Diamante	2300 W (m K)
			Acciaio	52 " "
Materiali isolanti				
Polistirolo espanso	0,024	W (m K)		
Sughero espanso	0,036	W (m K)		
Lana di vetro	0,04	W (m K)		
Fibra di vetro	0,035	W (m K)		

A2- COEFFICIENTI DI CONVEZIONE E GLOBALE:

VALORI DEL COEFFICIENTE h [W/m² K]




Meccanismo	
Convezione naturale	5-25
Convezione forzata	
Gas	25-250
liquidi	50- 20000
Ebollizione e condensazione	2500- 100000

VALORI TIPICI DI U [W/m² K]



combinazione di fluidi	U [W/m ² K]
ACQUA/ACQUA	850 - 1500
ACQUA/OLIO	110 - 350
VAP.CONDENSANTE/ACQUA	1000 - 6000
NH3.CONDENSANTE/ACQUA	800 - 1400
ALCOL CONDENS./ACQUA	250 - 700
ACQUA/ARIA	25 - 50

STATO	h W/m ² °C
Aria, convezione libera	6 ÷ 30
Vapore d'acqua surriscaldato o aria. convezione forzata	30 ÷ 300
Olio, convezione forzata	60 ÷ 1.700
Acqua, convezione forzata	300 ÷ 12.000
Acqua, ebollizione	3.000 ÷ 60.000
Vapore d'acqua, condensazione	6.000 ÷ 120.000

MATERIALI IN ARIA: coeff. CONVEZIONE

	h [W/m ² °C]
 1-CILINDRI ORIZZ.	$3,58 (\Delta T/D)^{1/4}$
 2-PIANI VERTIC.	$3,72 (\Delta T/L)^{1/4}$
 3-PIANI ORIZZ.	
SUP.	$2,149 \Delta T^{1/4}$
INFER.	$1,131 \Delta T^{1/4}$

MATERIALI IN ACQUA:

 CIL.ORIZZ.	$62,87 (\Delta T/D)^{1/4}$
 PIANI VERTIC.	$345,47 (\Delta T/L)^{1/4}$