

# Formulario completo fisica tecnica ambientale

Fisica Tecnica Ambientale  
Politecnico di Torino (POLITO)  
36 pag.

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

## FORMULARIO FISICA TECNICA AMBIENTALE

---

Kelvin:

$$T(K) = t(^{\circ}C) + 273.15 \quad [K]$$

Fahrenheit:

$$t(^{\circ}F) = \frac{9}{5} \cdot t(^{\circ}C) + 32 \quad [^{\circ}C]$$

Entalpia:

$$H = U + p \cdot V \quad [J]$$

Energia interna specifica:

$$u = \frac{U}{m} \quad [J/Kg]$$

Entalpia specifica:

$$h = \frac{H}{m} \quad [J/Kg]$$

Calore:

$$1 \text{ kcal} = 4186 \text{ J}$$

Capacità termica:

$$C = \frac{Q}{\Delta t} \quad \text{o} \quad C = c \cdot m \quad [J/^{\circ}C \text{ o } J/K]$$

Calore specifico:

$$c = \frac{Q}{\Delta t \cdot m} \quad [J/(^{\circ}CKg) \text{ o } J/(KKg)] \quad \text{aria: } c=1000 \text{ J}/(^{\circ}CKg) \quad \rho=1.2 \text{ Kg}/m^2$$

$$Q = c \cdot m \cdot \Delta t \quad [J] \quad \text{acqua: } c=4186 \text{ J}/(^{\circ}CKg) \quad \rho=1000 \text{ Kg}/m^2$$

$$m = \rho(\text{densità}) \cdot V(\text{volume del fluido})$$

CONDUZIONE TERMICA

Legge di Fourier:

$$\frac{\dot{Q}}{A} = \lambda \cdot \frac{t_1 - t_2}{s} \quad [W/m^2]$$

Conducibilità o conduttività termica della parete:

$$\lambda = \frac{\dot{Q}}{A} \cdot \frac{s}{t_1 - t_2} \quad [\text{W/mK o W/m}^{\circ}\text{C}] \quad \lambda_{\text{isolanti}} = 0.04 \text{ W/mK} \quad \lambda_{\text{aria}} q = 0.026 \text{ W/mK}$$

Flusso termico:

$$\frac{\dot{Q}}{A} = \frac{t_1 - t_{n+1}}{\sum_{i=1}^n \frac{s_i}{\lambda_i}} = \frac{1}{\sum_{i=1}^n R_i} \cdot (t_1 - t_{n+1}) \quad [\text{W/m}^2]$$

Resistenza termica:

$$R = \sum_{i=1}^n \frac{s_i}{\lambda_i} \quad [(\text{m}^2\text{K})/\text{W} \text{ o } (\text{m}^2\text{C})/\text{W}]$$

Conduttanza:

$$C = \frac{1}{R} = \Lambda \quad [\text{W}/(\text{m}^2\text{K}) \text{ o } \text{W}/\text{m}^2\text{C}]$$

Profilo delle temperature:

$$t_2 = t_1 - \frac{\dot{Q}}{A} \cdot \frac{s_{12}}{\lambda_{12}} \quad [{}^{\circ}\text{C} \text{ o K}]$$

## CONVENZIONE TERMICA

Legge di Newton:

$$\frac{\dot{Q}}{A} = h_c \cdot (t_p - t_a) \quad [\text{W}/\text{m}^2] \quad h_c = \text{coefficiente di scambio termico convettivo} \quad [\text{W}/\text{m}^2\text{C}]$$

Convezione naturale

$h_c$  (aria) da 0.1 a 30  $[\text{W}/\text{m}^2\text{K}]$

$h_c$  (acqua) da 300 a 12000  $[\text{W}/\text{m}^2\text{K}]$

Convezione forzata

$h_c$  (aria) da 30 a 300  $[\text{W}/\text{m}^2\text{K}]$

$h_c$  (acqua) da 3000 a 60000  $[\text{W}/\text{m}^2\text{K}]$

$$\dot{Q}_{\text{conv}} = A \cdot h_c \cdot (t_{sp} - t_{ai})$$

## IRRAGGIAMENTO TERMICO

Fattore di assorbimento:

$$\alpha = \frac{\Phi_\alpha}{\Phi_i} \quad [\%]$$

Fattore di riflessione:

$$\rho = \frac{\Phi_r}{\Phi_i} \quad [\%]$$

Fattore di trasmissione:

$$\tau = \frac{\Phi_t}{\Phi_i} \quad [\%]$$

$$\alpha + \rho + \tau = 1$$

Potere emissivo:

$$E = \frac{d\Phi}{dA} \quad [W/m^2]$$

Potere emissivo spettrale:



vale la seguente relazione:  $E = \int_0^\infty E_\lambda d\lambda$

$$E_\lambda = \frac{d^2\Phi}{dA d\lambda} \quad [W/m^2 nm]$$

Corpo nero:

$$\frac{\forall \lambda (\text{lunghezza d'onda})}{\forall \theta (\text{direzione})}$$

Legge di Planck:

$$E_\lambda = \frac{c_1}{\lambda^5 (e^{c_2/\lambda T} - 1)} \quad [W/m^2 nm]$$

Legge di Stefan-Boltzmann:

$$E = \sigma \cdot T^4$$

$$\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8} \quad [W/m^2 K^4]$$

Legge di Wien:

$$\lambda_{max} \cdot T = 2898 \mu m \cdot K$$

Legge di Kirchoff:

$\varepsilon = \alpha \quad \Rightarrow \quad$  l'emissività coincide con il coefficiente di assorbimento:  $\varepsilon = \alpha = 1$  corpo nero

$\varepsilon = \alpha < 1$  corpo grigio

Emissività:

$$\varepsilon = \frac{E_{CG}}{E_{CN}} \quad [\%]$$

Scambio di calore tra corpi grigi:

$$\frac{\dot{Q}_{irr}}{A} = F_{12} \cdot F_\varepsilon \cdot \sigma \cdot (T_1^4 - T_2^4) \quad [W/m^2]$$

$$\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8} \quad [W/m^2 K^4]$$

$$F_\varepsilon = \left( \frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1 \right)^{-1}$$

$$Q = A \cdot h_r \cdot (t_1 - t_2) \quad [W]$$

$h_r$  = coefficiente di scambio termico per irraggiamento o adduttanza [ $\text{W}/\text{m}^2\text{K}$ ]

Scambio termico liminare (convezione + irraggiamento):

$$\frac{\dot{Q}_{conv}}{A} = h_c \cdot (t_p - t_a)$$

$$\frac{\dot{Q}_{irr}}{A} = h_r \cdot (t_p - t_s)$$

 Ponendo  $t_a = t_s$

$$\frac{\dot{Q}_{conv+irr}}{A} = (h_c + h_r) \cdot (t_p - t_s) \quad \Rightarrow \quad h = h_c + h_r \quad [\text{W}/(\text{m}^2\text{K}) \text{ o } \text{W}/\text{m}^2\text{C}]$$

$h$ =coefficiente di scambio termico liminare o  
adduttanza

Trasmittanza termica:

$$U = \frac{\dot{Q}}{A \cdot (t_i - t_e)} \quad [\text{W}/\text{m}^2\text{K}]$$

Flusso di calore per unità di superficie:

$$\frac{\dot{Q}}{A} = U \cdot (t_i - t_e) \quad [\text{W}/\text{m}^2]$$

Flusso di calore che attraversa complessivamente la parete:

$$\dot{Q} = U \cdot A \cdot (t_i - t_e) \quad [\text{W}]$$

Parete monostrato omogenea:

$$\frac{\dot{Q}}{A} = \frac{t_i - t_e}{\frac{1}{h_i} + \frac{s}{\lambda} + \frac{1}{h_e}} \quad [\text{W}/\text{m}^2]$$

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_i} + \frac{s}{\lambda} + \frac{1}{h_e}} \quad [\text{W}/(\text{m}^2\text{K}) \text{ o } \text{W}/\text{m}^2\text{C}]$$

Parete multistrato (trasmissione del calore)

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_i} + \sum_{J=1}^n \frac{s_i}{\lambda_i} + \sum_{j=1}^m R_j + \frac{1}{h_e}} \quad [\text{W}/(\text{m}^2\text{K})]$$

$$\frac{\dot{Q}}{A} = \frac{t_i - t_e}{\frac{1}{h_i} + \sum_{J=1}^n \frac{s_i}{\lambda_i} + \sum_{j=1}^m R_j + \frac{1}{h_e}} \quad [\text{W}/\text{m}^2]$$

Determinazione delle temperature

$$\frac{\dot{Q}}{A} = U \cdot (t_i - t_e) = h_i \cdot (t_i - t_{pi}) \quad \Rightarrow \quad t_{pi} = t_i - \frac{\dot{Q}}{A} \cdot \frac{1}{h_i} = t_i - \frac{U}{h_i} \cdot (t_i - t_e)$$

Bilancio termico del componente opaco:

In assenza di radiazione solare:  $\Phi_{OP} = U \cdot A \cdot (t_e - t_i)$

In presenza di radiazione solare:  $\Phi_{OP} = U \cdot A \cdot (t_{sa} - t_i)$

$$t_{sa} = t_e + \frac{\alpha \cdot I}{h_e}$$

I=irradianza solare [W/m<sup>2</sup>]

$\alpha$ = coefficiente assorbimento solare

$h_e$ = coefficiente di scambio termico liminare esterno

# PSICOMETRIA

## FASE SOLIDA

- **RELAZIONE LUNGHEZZA – TEMPERATURA**

$$l = l_0 * (1 + \delta t)$$

$$\frac{\Delta L}{L_0} = \delta \Delta T \quad [\delta] = \frac{1}{K}$$
$$\Delta L = \delta * \Delta T * L_0$$

$l_0$ = lunghezza del corpo a 0°C  
 $\delta$  = coefficiente di dilatazione lineare  
(dipende dal materiale)

$$L_{finale} = L_0 + \Delta L$$

- **RELAZIONE VOLUME – TEMPERATURA**

$$V = V_0 * (1 + \alpha t) \quad \alpha = 3\delta$$

$V_0$ = volume del corpo a 0°C  
 $\alpha$  = coefficiente di dilatazione volumica  
(dipende dal materiale)

## FASE LIQUIDA

### RELAZIONE VOLUME – TEMPERATURA

$$V = V_0 * (1 + \alpha t)$$

$$V_0 = \alpha * \Delta T * V_{iniziale}$$

## FASE AERIFORME

$$V = V_0 * (1 + \alpha t)$$

$$V_0 = \alpha * \Delta T * V_{iniziale}$$



vale solo per l'aria a  
pressione costante

## TABELLA COEFFICIENTI DI DILATAZIONE LINEARE ( $\delta$ )

Materiale	Coefficiente di dilatazione	Punto di fusione
Acciaio al carbonio	0,000012	$1,2 \times 10^{-5}$
Acciaio inox	0,000017	$1,7 \times 10^{-5}$
Alluminio	0,000024	$2,4 \times 10^{-5}$
Alluminio leghe	0,000023	$2,3 \times 10^{-5}$
Antimonio	0,000011	$1,1 \times 10^{-5}$
Argento	0,000019	$1,9 \times 10^{-5}$
Bismuto	0,000013	$1,3 \times 10^{-5}$
Bronzo (7,9%)	0,000018	$1,8 \times 10^{-5}$
Bronzo (14%)	0,000018	$1,8 \times 10^{-5}$
Bronzo fosforoso	0,000018	$1,8 \times 10^{-5}$
Cadmio	0,000031	$3,1 \times 10^{-5}$
Cobalto	0,000018	$1,8 \times 10^{-5}$
Conglomerato cementizio	0,000012	$1,2 \times 10^{-5}$
Cromo	0,000008	$0,8 \times 10^{-5}$
Ferro	0,000012	$1,2 \times 10^{-5}$
Ghisa comune	0,000011	$1,1 \times 10^{-5}$
Granito	0,000009	$0,9 \times 10^{-5}$
Legname fibra dolce	0,000004	$0,4 \times 10^{-5}$
Legname forte	0,000058	$5,8 \times 10^{-5}$
Magnesio	0,000022	$2,2 \times 10^{-5}$
Marmi	0,000007	$0,7 \times 10^{-5}$
Mattoni	0,000006	$0,6 \times 10^{-5}$
Mercurio	0,000181	$18,1 \times 10^{-5}$
Molibdeno	0,000005	$0,5 \times 10^{-5}$
Nichel	0,000013	$1,3 \times 10^{-5}$
Oro	0,000015	$1,5 \times 10^{-5}$
Ottone	0,000019	$1,9 \times 10^{-5}$
Piombo	0,000029	$2,9 \times 10^{-5}$
Platino	0,000009	$0,9 \times 10^{-5}$
Polietilene AD	0,00020	$20 \times 10^{-5}$
Polietilene BD	0,00020	$20 \times 10^{-5}$
Polipropilene	0,00012	$12 \times 10^{-5}$
PVC	0,00007	$7 \times 10^{-5}$
Rame	0,000017	$1,7 \times 10^{-5}$
Silicio	0,000008	$0,8 \times 10^{-5}$
Stagno	0,000027	$2,7 \times 10^{-5}$
Tungsteno	0,000005	$0,5 \times 10^{-5}$
Vetro	0,000008	$0,8 \times 10^{-5}$
Vetro Pyrex	0,000003	$0,3 \times 10^{-5}$
Vetro temperato	0,000009	$0,9 \times 10^{-5}$
Volframio	0,000005	$0,5 \times 10^{-5}$
Zinco	0,000031	$3,1 \times 10^{-5}$

L'allungamento (metri) si ottiene moltiplicando la lunghezza (metri) per il coefficiente di dilatazione e per i gradi °C di incremento della temperatura

## ARIA UMIDA

### ARIA SECCA + VAPORE ACQUEO

- Temperatura  $\longrightarrow t [^{\circ}\text{C}]$
- Umidità specifica (o umidità massica)  $\longrightarrow x [\text{kg}_v/\text{kg}_a]$
- Umidità relativa  $\longrightarrow \varphi [\%]$
- Entalpia  $\longrightarrow h [\text{kJ}/\text{kg}]$

### UMIDITÀ SPECIFICA

- $x = m_v / m_a \quad [\text{kg}_v/\text{kg}_a]$

$m_v$  = massa del vapore [kg]  
 $m_a$  = massa di aria secca [kg]

- Dalla legge dei gas perfetti:  $p * V = m * Rm_v * T$

$p$  = pressione del gas [Pa]  
 $V$  = volume occupato dal gas [ $\text{m}^3$ ]  
 $m$  = massa del gas [kg]  
 $R$  = costante del gas [J/kg K]  
 $T$  = temperatura assoluta del gas [K]

- $p_a + p_v = p$

$$p_a * V = m_a * R_a * T \quad R_a = 287,2 \text{ J/kgK}$$

$$p_v * V = m_v * R_v * T \quad R_v = 461,9 \text{ J/kgK}$$

$R_a$  = costante gas per l'aria secca [J/kgK]  
 $R_v$  = costante gas per il vapore acqueo [J/kgK]  
 $V$  = volume della miscela [ $\text{m}^3$ ]  
 $T$  = temperatura assoluta miscela [K]  
 $p_a$  = pressione parziale aria secca [Pa]  
 $p_v$  = pressione parziale vapore acqueo [Pa]

$$x = \frac{m_v}{m_a} \longrightarrow x = 0,622 * \frac{p_v}{p - p_v} = 0,622 * \frac{\varphi * p_{vs}(t)}{p - \varphi * p_{vs}(t)}$$

( $p = 101325$ )

### UMIDITÀ RELATIVA

- $\varphi = m_v / m_{vs} \quad [\%]$

$m_v$  = massa del vapore [kg]  
 $m_{vs}$  = massa di vapore alla saturazione a pari temperatura [kg]

- Dalle leggi dei gas perfetti:  $\varphi = p_v / p_{vs} \quad [\%]$

$p_v$  = pressione del vapore [Pa]  
 $p_{vs}$  = pressione del vapore alla saturazione a pari temperatura [kg]

## PRESSIONE DI SATURAZIONE DEL VAPORE ACQUEO IN FUNZIONE DELLA TEMPERATURA

<i>pressione di saturazione in funzione della temperatura (Pa)</i>										
<i>θ in °C</i>	<b>0</b>	<b>0,1</b>	<b>0,2</b>	<b>0,3</b>	<b>0,4</b>	<b>0,5</b>	<b>0,6</b>	<b>0,7</b>	<b>0,8</b>	<b>0,9</b>
<b>30</b>	4241	4265	4289	4314	4339	4364	4389	4414	4439	4464
<b>29</b>	4003	4026	4050	4073	4097	4120	4144	4168	4192	4216
<b>28</b>	3778	3800	3822	3844	3867	3889	3912	3934	3957	3980
<b>27</b>	3563	3584	3605	3626	3648	3669	3691	3712	3734	3756
<b>26</b>	3359	3379	3399	3419	3440	3460	3480	3501	3522	3542
<b>25</b>	3166	3185	3204	3223	3242	3261	3281	3300	3320	3340
<b>24</b>	2982	3000	3018	3036	3055	3073	3091	3110	3128	3147
<b>23</b>	2808	2825	2842	2859	2876	2894	2911	2929	2947	2964
<b>22</b>	2642	2659	2675	2691	2708	2724	2741	2757	2774	2791
<b>21</b>	2486	2501	2516	2532	2547	2563	2579	2594	2610	2626
<b>20</b>	2337	2351	2366	2381	2395	2410	2425	2440	2455	2470
<b>19</b>	2196	2210	2224	2238	2252	2266	2280	2294	2308	2323
<b>18</b>	2063	2076	2089	2102	2115	2129	2142	2155	2169	2182
<b>17</b>	1937	1949	1961	1974	1986	1999	2012	2024	2037	2050
<b>16</b>	1817	1829	1841	1852	1864	1876	1888	1900	1912	1924
<b>15</b>	1704	1715	1726	1738	1749	1760	1771	1783	1794	1806
<b>14</b>	1598	1608	1619	1629	1640	1650	1661	1672	1683	1693
<b>13</b>	1497	1507	1517	1527	1537	1547	1557	1567	1577	1587
<b>12</b>	1402	1411	1420	1430	1439	1449	1458	1468	1477	1487
<b>11</b>	1312	1321	1330	1338	1347	1356	1365	1374	1383	1393
<b>10</b>	1227	1236	1244	1252	1261	1269	1278	1286	1295	1303
<b>9</b>	1147	1155	1163	1171	1179	1187	1195	1203	1211	1219
<b>8</b>	1072	1080	1087	1094	1102	1109	1117	1124	1132	1140
<b>7</b>	1001	1008	1015	1022	1029	1036	1043	1050	1058	1065
<b>6</b>	935	941	948	954	961	967	974	981	988	994
<b>5</b>	872	878	884	890	897	903	909	915	922	928
<b>4</b>	813	819	824	830	836	842	848	854	860	866
<b>3</b>	757	763	768	774	779	785	790	796	801	807
<b>2</b>	705	710	715	721	726	731	736	741	747	752
<b>1</b>	656	661	666	671	676	680	685	690	695	700
<b>0</b>	611	615	619	624	629	633	638	642	647	652
<b>-1</b>	562	567	571	576	581	586	591	596	601	605
<b>-2</b>	517	521	526	530	535	539	544	548	553	557
<b>-3</b>	475	479	484	488	492	496	500	504	509	513
<b>-4</b>	437	441	444	448	452	456	460	464	468	471
<b>-5</b>	401	405	408	412	415	419	422	426	430	433
<b>-6</b>	368	371	375	378	381	384	388	391	394	398
<b>-7</b>	338	341	344	347	350	353	356	359	362	365
<b>-8</b>	309	312	315	318	320	323	326	329	332	335
<b>-9</b>	283	286	288	291	294	296	299	301	304	307
<b>-10</b>	259	262	264	266	269	271	274	276	278	281
<b>-11</b>	237	239	241	244	246	248	250	252	255	257
<b>-12</b>	217	219	221	223	225	227	229	231	233	235
<b>-13</b>	198	200	202	203	205	207	209	211	213	215
<b>-14</b>	181	182	184	186	187	189	191	193	194	196
<b>-15</b>	165	166	168	169	171	173	174	176	177	179

## ENTALPIA SPECIFICA

- $$\bullet \quad h = \frac{H}{m_a} = \frac{m_a}{m_a} * h_a + \frac{m_v}{m_v} * h_v = h_a + x * h_v \quad \left[ \frac{kJ}{kg} \right]$$

- $$\bullet \quad h_{1+x} = C_{p,a} * t + x * (C_{p,v} * t + r_0) = (C_{p,a} + x * C_{p,v}) * t + r_0 * x$$



$$h_{1+x} = 1,006 * t + x * (1,875 * t + 2501) = (1,01 + x * 1,9) * t + 2500 * x$$

## FORMULE INVERSE

$$t = \frac{h - 2500 * x}{1,01 + 1,9 * x}$$

$$x = \frac{h - 1,01 * t}{2500 + 1,9 * t}$$

## TRASFORMAZIONE DELL'ARIA UMIDA

- $\dot{m}_v = \dot{m}_a * (x_B - x_A)$
- $\dot{Q} = \dot{m}_a * (h_B - h_A)$



quantità di calore ceduta o sottratta alla miscela

## MISCELAZIONE A PIÙ PORTATE

$$\begin{cases} x_M = \frac{\dot{m}_{a,1} * x_1 + \dot{m}_{a,2} * x_2}{\dot{m}_{a,1} + \dot{m}_{a,2}} \\ h_M = \frac{\dot{m}_{a,1} * h_1 + \dot{m}_{a,2} * h_2}{\dot{m}_{a,1} + \dot{m}_{a,2}} \end{cases}$$

$$t_M = \frac{h_M - 2500 * x_M}{1,01 + 1,9 * x_M}$$

# ILLUMINOTECNICA

## VELOCITÀ DI PROPAGAZIONE

$$c = \lambda \cdot f \quad [\text{m/s}]$$

$$c_o = \lambda \cdot f = 3 \cdot 10^8 \quad [\text{m/s}] \quad \rightarrow \quad \text{nel vuoto}$$

$$c = \frac{c_o}{n} \quad [\text{m/s}] \quad \rightarrow \quad \text{negli altri mezzi} \quad n = \text{indice di rifrazione del mezzo}$$

## INTENSITÀ ENERGETICA

$$I_e = \frac{d\Phi_e}{d\omega} \quad [\text{W/sr}] \quad \omega = \text{omega} = \text{angolo solido}$$

## ANGOLO SOLIDO

$$\omega = \frac{A}{R^2} \quad [\text{sr}] \quad \text{sr} = \text{ste radiante}$$

## FATTORE DI VISIBILITÀ RELATIVA

$$V(\lambda) = \frac{K(\lambda)}{K_{max}} \quad \rightarrow \quad K_{max} = 683 \text{ lm/W}$$

## FLUSSO LUMINOSO

Luce monocromatica:

$$\Phi_\lambda = K(\lambda) \cdot \Phi_{e,\lambda} \quad [\text{lm/nm}]$$

$$K(\lambda) = K_{max} \cdot V(\lambda)$$

$$\Phi_\lambda = K_{max} \cdot \Phi_{e,\lambda} \cdot V(\lambda) = K(\lambda) \cdot \Phi_{e,\lambda} \quad [\text{lm/nm}]$$

Luce eterocromatica:

$$\Phi = K_{max} \cdot \int_{380 \text{ nm}}^{780 \text{ nm}} \Phi_{e,\lambda} \cdot V(\lambda) \cdot d\lambda \quad [\text{lm}]$$

$$\Phi = K_{max} \cdot \int_{380 \text{ nm}}^{780 \text{ nm}} V \cdot \Phi_{e,\lambda} \cdot d\lambda = K_{max} \cdot \sum_{i=1}^n V_i \cdot \Phi_{e,\lambda i} \cdot \Delta\lambda \quad [\text{lm}]$$

COLORE	$\lambda$ (nm)
VIOLA	< 425
INDACO	425 - 486
BLU	486 - 493
BLU-VERDE	493 - 510
VERDE	510 - 552
VERDE-GIALLO	552 - 573
GIALLO	573 - 587
ARANCIO	587 - 645
ROSSO	> 645

## INTENSITÀ LUMINOSA

$$I = \frac{d\Phi}{d\omega} \quad [\text{cd}]$$

## LUMINANZA

$$L = \frac{d^2\Phi}{dA \cos\beta \cdot d\omega} \quad [\text{cd}/m^2=\text{nit}]$$

$$L = \frac{dI}{dA \cdot \cos\beta} \quad [\text{cd}/m^2=\text{nit}]$$

## ILLUMINAMENTO

$$E = \frac{d\Phi}{dA} \quad [\text{lm}/m^2=\text{lumen}]$$

## EMETTENZA LUMINOSA

$$M = \frac{d\Phi}{dA} \quad [\text{lm}/m^2]$$

## INTERZIONE LUCE-SUPERFICI

Fattore di assorbimento:

$$\alpha_i = \frac{\Phi_\alpha}{\Phi_i} \quad [\%]$$

Fattore di riflessione:

$$\rho_i = \frac{\Phi_r}{\Phi_i} \quad [\%] \quad \Rightarrow \quad M = \frac{\rho_i \cdot d\Phi_i}{A} = \rho_i \cdot E \quad \rho = \frac{d\Phi_r}{d\Phi_i} \quad d\Phi_r = \rho \cdot d\Phi_i$$

Fattore di trasmissione:

$$\tau_i = \frac{\Phi_t}{\Phi_i} \quad [\%]$$

## INTERZIONE LUCE-SUPERFICI (COMPORTAMENTO SPETTRALE)

Fattore di assorbimento:

$$\alpha_{\lambda,i} = \frac{\Phi_{a,\lambda}}{\Phi_{i,\lambda}} \quad [\%]$$

Fattore di riflessione:

$$\rho_{\lambda,i} = \frac{\Phi_{r,\lambda}}{\Phi_{i,\lambda}} \quad [\%]$$

Fattore di trasmissione:

$$\tau_{\lambda,i} = \frac{\Phi_{t,\lambda}}{\Phi_{i,\lambda}} \quad [\%]$$

## INTERZIONE LUCE-SUPERFICI (COMPORTAMENTO SPETTRALE)

Fattore di riflessione:

$$\rho_{\beta,\theta,I} = \frac{\Phi_{r,\beta,\theta}}{\Phi_{i,\beta}} \quad [\%]$$

Fattore di trasmissione:

$$\tau_{\beta,\theta,I} = \frac{\Phi_{t,\beta,\theta}}{\Phi_{i,\beta}} \quad [\%]$$

## LUMINANZA → ILLUMINAMENTO

$$L = \frac{d^2\Phi}{dA \cdot \cos\alpha \cdot d\omega}$$

$$I_\alpha = I_0 \cdot \cos\alpha$$

$$L_\alpha = \frac{I_\alpha}{A \cdot \cos\alpha} = \frac{I_0 \cdot \cos\alpha}{A \cdot \cos\alpha} = \frac{I_0}{A}$$

$$L_\alpha = L_0 = L$$

$$\Phi_r = E \cdot \rho_I \cdot A = \pi \cdot I_0 \quad \rightarrow \quad \Phi_r = \text{flusso luminoso riflesso dalla superficie elementare}$$

$$\Phi_i = \text{flusso luminoso incidente dalla superficie elementare}$$

$$\rho_I = \text{fattore di riflessione luminosa della superficie}$$

$$L = \frac{I_0}{A} = \frac{\Phi_r}{\pi \cdot A} = \frac{M}{\pi} = \frac{E \cdot \rho_I}{\pi}$$

## ILLUMINAMENTO PUNTUALE DA SORGENTI PUNTIFORMI

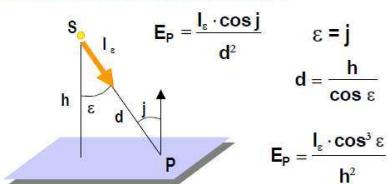
$$E_P = \frac{d\Phi}{dA} \quad d\Phi = I_\varepsilon \cdot d\omega \quad \varepsilon = \text{angolo di emissione}$$

$$E_P = \frac{I_\varepsilon \cdot d\omega}{dA} \quad d\omega = \frac{dA \cdot \cos j}{d^2} = \frac{A}{r^2} \quad j = \text{angolo di incidenza}$$

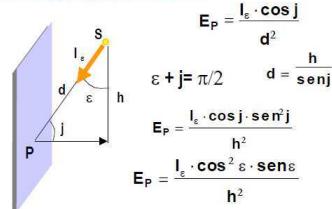
$$E_P = \frac{I_\varepsilon \cdot \cos j}{d^2}$$

## ALCUNE APPLICAZIONI

### ILLUMINAMENTO SU SUPERFICIE ORIZZONTALE DA LAMPADA AD ASSE VERTICALE



### ILLUMINAMENTO SU SUPERFICIE VERTICALE DA LAMPADA AD ASSE VERTICALE



## METODO DEL FLUSSO TOTALE

$$\Phi_t = \frac{E_m \cdot A}{U \cdot M} \quad [\text{lm}] \quad \rightarrow \quad U = \text{fattore di utilizzazione} \quad E_m = \text{illuminamento medio}$$

M=fattore di manutenzione

$$E_m = \frac{\Phi_t \cdot U \cdot M}{A} \quad A = \text{area di piano utile}$$

$\Phi_t$ =flusso luminoso totale emesso dalle sorgenti

$$E_m = \frac{\Phi_{lm,tot}}{A} \quad [\text{lx}]$$

$$\Phi_t = N \cdot \Phi_n \quad \Phi_n = \text{flusso nominale dalle sorgenti stesse}$$

$$\Phi_n = \text{Potenza [w]} \cdot \eta \text{ efficienza luminosa [lm]}$$

$$N = \frac{\Phi_t}{\Phi_n} \quad N = \text{numero di apparecchi necessari}$$

## FATTORE DI UTILIZZAZIONE

$$U = \frac{\Phi_u}{\Phi_t}$$

## INDICE DEL LOCALE

Illuminazione diretta:

$$i = \frac{a \cdot b}{h \cdot (a+b)} \quad a \text{ e } b = \text{larghezza e lunghezza locale}$$

h=altezza di sospensione degli apparecchi rispetto al piano utile

Illuminazione indiretta:

$$i = \frac{a \cdot b}{h \cdot (a+b)} \quad h = \text{distanza soffitto-piano utile}$$

FATTORE DI MANUTENZIONE

parametro rappresentativo della riduzione del flusso luminoso emesso dagli apparecchi per invecchiamento e sporco

	M
ordinario	0,8
forte	0,7
molto elevato	0,6

## DECADIMENTO DEL FLUSSO LUMINOSO

$$D = \frac{\Phi_t}{\Phi_i} \cdot 100 \quad [\%]$$

## EFFICIENZA LUMINOSA

$$\eta = \frac{\Phi}{\Phi_e} = \frac{\text{flusso luminoso emesso}}{\text{potenza elettrica assorbita}} \quad [\text{ln/W}]$$

## RENDIMENTO LUMINOSO

$$\eta = \frac{\Phi_a}{\Phi_s} = \frac{\text{flusso emesso dell'apparecchio}}{\text{flusso emesso dalla sorgente}} \quad [\%]$$

## ILLUMINAZIONE NATURALE

### EFFICIENZA LUMINOSA DELLA RADIAZIONE SOLARE

$$\eta_n = \frac{\Phi_I}{\Phi_e} = \frac{\text{flusso luminoso}}{\text{flusso energetico}} = \frac{E}{I} \quad [\text{ln/W}] \quad E = \text{illuminamento}$$

$$E = \eta_n \cdot I$$

L'illuminamento naturale in un punto di un ambiente interno è determinato:

- dal flusso luminoso diretto proveniente dalle sorgenti primarie esterne (sole e volta celeste)  $\rightarrow \Phi_d$
- dal flusso luminoso riflesso proveniente dalle ostruzioni e dalle superfici esterne (terreno, edifici adiacenti)  $\rightarrow \Phi_{r,e}$
- dal flusso luminoso indiretto generato dalle riflessioni multiple che si verificano sulle superfici interne dell'ambiente  $\rightarrow \Phi_{r,i}$

#### VALORI CARATTERISTICI

RADIAZIONE GLOBALE - CIELO SERENO	80 - 115 lm/W
RADIAZIONE GLOBALE - CIELO COPERTO	100 - 130 lm/W
RADIAZIONE DIFFUSA - CIELO SERENO	110 - 150 lm/W
RADIAZIONE DIRETTA	50 - 120 lm/W

$$E_i = E_d + E_{r,e} + E_{r,i} \quad [\text{lux}]$$

## FATTORE DI LUCE DIURNA

$$FLD = \frac{E_i}{E_{e,h}} = \frac{E_d + E_{r,e} + E_{r,i}}{E_{e,h}} \quad [\%]$$

E i = illuminamento in un punto interno all'ambiente

E e,h = illuminamento su un piano orizzontale esterno, dovuto all'intera volta celeste, escludendo il contributo della radiazione solare diretta

$$FLD = SC + ERC + IRC$$

SC = E d / E e,h = componente diretta

ERC = E r,e / E e,h = componente riflessa esternamente

IRC = E r,i / E e,h = componente riflessa internamente

## FATTORE MEDIO DI LUCE DIURNA

$$FLD_m = \frac{E_{i,med}}{E_{e,h}} = \frac{E_{e,h} \cdot \varepsilon \cdot A_f \cdot \tau_I}{E_{e,h} \cdot (1 - \rho_{I,m}) \cdot A_{tot}} = \frac{\varepsilon \cdot A_f \cdot \tau_I}{(1 - \rho_{I,m}) \cdot A_{tot}} [\%]$$

$E_{i,med}$ = illuminamento medio all'interno dell'ambiente

$$E_{i,med} = \frac{E_{e,h} \cdot \varepsilon \cdot A_f \cdot \tau_I}{(1 - \rho_{I,m}) \cdot A_{tot}}$$

$$\Phi_{en} = \Phi_a \quad \quad \quad \Phi_a = E_{i,med} \cdot \alpha_{l,m} \cdot A_{tot} = E_{i,med} \cdot (1 - \rho_{I,m}) \cdot A_{tot}$$

$\Phi_{en}$ = flusso luminoso entrante in ambiente

$\Phi_a$ = flusso luminoso assorbito dall'ambiente

$$\Phi_{en} = E_{e,h} \cdot \varepsilon \cdot A_f \cdot \tau_I$$

$A_f$ = superficie vetrata netta della finestra

$\tau_I$ =fattore di trasmissione luminosa del vetro

$$\varepsilon = \text{fattore finestra} = \frac{E_{e,f}}{E_{e,h}}$$

## FATTORE MEDIO DI LUCE DIURNA SECONDO LA NORMATIVA ITALIANA

$$FLD_m = \frac{A_f \cdot \tau_I}{(1 - \rho_{I,m}) \cdot Area_{tot}} \cdot \varepsilon \cdot \psi [\%]$$

$$\tau_I = -\rho_v + 1 - \alpha_v = \frac{FLD_m - A_{tot} \cdot (1 - \rho_{I,m})}{A_f \cdot \varepsilon \cdot \psi}$$

$$A_f = \frac{FLD_m - A_{tot} \cdot (1 - \rho_{I,m})}{\tau_I \cdot \varepsilon \cdot \psi}$$

$$\rho_v = +1 - \tau_I - \alpha_v$$

$$\rho_{I,m} = \frac{\rho_{pareti} \cdot (S_{pareti} - S_{finestre}) + \rho_{soff} \cdot S_{soff} + \rho_{finestre} \cdot S_{finestre}}{A_{tot}}$$

$$SC = \frac{\text{area di cielo vista attraverso la superficie vetrata}}{2 \cdot \text{area totale del diagramma}} \cdot \tau_I [\%]$$

$$ERC = \frac{\text{area di ostruzione vista attraverso la superficie vetrata}}{2 \cdot \text{area totale del diagramma}} \cdot C \cdot \tau_I [\%] \quad (\text{no con ostruzioni})$$

C=costante di riduzione che tiene conto del fattore di riflessione luminosa della superficie dell'ostruzione (C=0.1-0.2)

## CALCOLO DELLA COMPONENTE DIFFUSA (IRC)

$$IRC = \frac{A_f \cdot \tau_I \cdot \rho_{I,m}}{(1 - \rho_{I,m}) \cdot A_{tot}} \cdot \varepsilon \cdot \psi \quad [\%]$$

Illuminamento prodotto dal campo diffuso:

$$E_{r,i} = \frac{\Phi_{en} \cdot \rho_{I,m}}{(1 - \rho_{I,m}) \cdot A_{tot}}$$

## METODO DEL FLUSSO TOTALE (FINESTRE VERTICALI)

$$E_i = E_{e,f} \cdot \tau_I \cdot CU \quad [\text{lux}]$$

CU=fattore di utilizzazione (da tabelle)

## RISPARMIO DI ENERGIA GIORNALIERO

$$Q_e = \Phi_{lum} / P \cdot N \cdot ore$$

$$\Delta Q_e = Q_{e1} - Q_{e2} \quad [\text{Wh}]$$

VALORI DI ILLUMINAMENTO RICHIESTI IN RAPPORTO ALLE ATTIVITA'					
TIPO DI INTERNO, COMPITO E ATTIVITA'	ILLUMINAMENTO MEDIO DI ESERCIZIO (lux)	FLD <sub>m</sub> ≥ 1%	FLD <sub>m</sub> ≥ 2%	FLD <sub>m</sub> ≥ 3%	FLD <sub>m</sub> ≥ 5%
<b>UFFICI</b>					
scrittura, dattilografia, lettura, elaborazione dati	500				
disegno tecnico	750				
<b>EDIFICI SCOLASTICI</b>					
aule educazione artistica in scuola d'arte	750				
aule scolastiche	300				
<b>EDIFICI DI CURA</b>					
corsie, illuminazione per visita semplice	300				
chirurgia, illuminazione area operatoria	da 10.000 a 100.000				
<b>AMBIENTI COMUNI</b>					
area di circolazione, corridoi	100				
scales, pianerottoli, ascensori	150				

• Circolare del Ministero dei Lavori pubblici n° 3151 del 22/5/1967 indirizzata all'edilizia civile sovvenzionata  
 • Circolare del Ministero dei Lavori pubblici n° 13011 del 22/12/1974 indirizzata all'edilizia ospedaliera  
 • Decreto del Ministero della Sanità del 5/7/1975 indirizzato all'edilizia residenziale  
 • Decreto Ministeriale del 18/12/1975 indirizzato all'edilizia scolastica  
 • Normativa Tecnica della regione Emilia Romagna n°48 del 3/11/1984 per l'edilizia residenziale pubblica  
 • UNI 10840 "Locali scolastici - criteri generali per l'illuminazione artificiale e naturale", marzo 2000

Da lm a Klm →  $\frac{\text{numero}}{1000}$

# ACUSTICA

## PRESSIONE SONORA

$$\Delta p(t) = p(t) - p_a \quad [\text{Pa}] \quad \rightarrow \quad p(t)=\text{pressione in un dato istante t}$$

$p_a=\text{pressione statica (per la propagazione in aria)}$   
 $p_a=\text{pressione atmosferica}$ )

$\Delta p(t)=\text{variazione di pressione}$

Valore efficace:

$$p_{eff} = \left[ \frac{1}{T} \int_0^T [\Delta p(t)]^2 dt \right]^{\frac{1}{2}} \quad [\text{Pa}]$$

$$p_{eff} = \frac{\Delta p_{max}}{\sqrt{2}} \quad [\text{Pa}]$$

## PERIODO

$$T = \frac{1}{f} \quad [\text{s}] \quad \rightarrow \quad f=\text{frequenza} \quad [\text{Hz}]$$

## VELOCITÀ DEL SUONO

$$c = \lambda \cdot f \quad [\text{m/s}] \quad \rightarrow \quad c \text{ (aria a } 20^\circ\text{C)}=340 \text{ m/s}$$

$\lambda=\text{lunghezza d'onda}$

## INTENSITÀ SONORA

Onde piane:

$$I = \frac{W}{s} = \frac{\text{potenza}}{\text{superficie}} \quad [W/m^2]$$

Onde sferiche:

$$I = \frac{W}{4\pi r^2} \quad [W/m^2]$$

$$I = \frac{p^2}{\rho \cdot c} = \frac{\text{pressione}^2}{\rho \cdot \text{velocità di propagazione}} \quad [W/m^2]$$

$\rho=\text{massa volumica del mezzo nel quale si propaga l'onda sonora}$   $[Kg/m^3]$

$$\rho \cdot c=421 \quad [Kg/m^2s]$$

## DENSITÀ SONORA

$$U = \frac{E}{V} = \frac{\text{energia sonora localizzata}}{\text{volume}} \quad [J/m^3]$$

## LIVELLO DI INTENSITÀ SONORA

$$L_I = 10 \log \frac{I}{I_0} \quad [\text{dB}] \quad \Rightarrow \quad I_0 = 10^{-12} \quad [W/m^2]$$

## LIVELLO DI PRESSIONE SONORA

$$L_p = 10 \log \frac{p^2}{p_0^2} = 20 \log \frac{p}{p_0} \quad [\text{dB}] \quad \Rightarrow \quad p_0 = 2 \cdot 10^{-5} \text{ Pa}$$

## SOMMA DEI LIVELLI SONORI

$$L_{ITOT} = 10 \log \left( \frac{\sum_{i=1}^n I_i}{I_0} \right) = 10 \log \left( \sum_{i=1}^n 10^{\frac{L_{I,i}}{10}} \right) \quad [\text{dB}]$$

$$L_{pTOT} = 10 \log \left( \frac{\sum_{i=1}^n p_i^2}{p_0^2} \right) = 10 \log \left( \sum_{i=1}^n 10^{\frac{L_{p,i}}{10}} \right) \quad [\text{dB}]$$

## LIVELLO DI POTENZA SONORA

$$L_W = 10 \log \frac{W}{W_0} \quad [\text{dB}] \quad \Rightarrow \quad W_0 = 10^{-12} \quad [W]$$

## LIVELLO SONORO GLOBALE LINEARE

$$L_{LIN} = 10 \cdot \log \left[ 10^{\frac{L_{125}}{10}} + 10^{\frac{L_{250}}{10}} + \dots + 10^{\frac{L_{4000}}{10}} \right]$$

## LIVELLO SONORO GLOBALE PONDERATO

$$L_{POND} = 10 \cdot \log \left[ 10^{\frac{L*125}{10}} + 10^{\frac{L*250}{10}} + \dots + 10^{\frac{L*4000}{10}} \right]$$

## SUONO NEGLI AMBIENTI CONFINATI

Fattore di riflessione:

$$r = \frac{W_r}{W}$$

Fattore di assorbimento:

$$a' = \frac{W_{a'}}{W}$$

Fattore di trasmissione:

$$t = \frac{W_t}{W}$$

$$r + a' + t = 1$$

### FATTORE DI ASSORBIMENTO ACUSTICO

$$a = a' + t = \text{energia dissipata} + \text{energia trasmessa}$$

### ASSORBIMENTO ACUSTICO TOTALE DI UN AMBIENTE

$$A_{TOT} = \sum_{i=1}^k a_i \cdot s_i + \sum_{j=1}^m n_j \cdot A_j \quad [m^2]$$

$$A_{TOT1} = \text{assorbimento medio} \cdot \text{superficie totale}$$

$a_i$  [-] = fattore di assorbimento dell'i-esima superficie

$S_i$  [ $m^2$ ] = area dell'i-esima superficie

$k$  [-] = numero di superfici

$n_j$  [-] = numero di unità assorbenti del j-esimo tipo

$A_j$  [ $m^2$ ] = assorbimento di una unità del j-esimo tipo

$m$  [-] = numero di tipi di unità assorbenti

$$A_{TOT,ott} = 0,16 \cdot \frac{V}{t_{60,ott}}$$

### FATTORE DI ASSORBIMENTO ACUSTICO MEDIO DI UN AMBIENTE

$$a_m = \frac{\sum a_i \cdot s_i + \sum n_j \cdot A_j}{\sum S_i} = \frac{A_{TOT}}{\sum S_i}$$

### SORGENTE SFERICA IN CAMPO LIBERO

$$I = \frac{W}{4\pi d^2} \quad [W/m^2]$$

### SORGENTE OMNIDIREZIONALE IN PRESENZA DI SUPERFICI RIFLETTENTI

$$I = Q_\theta \cdot \frac{W}{4\pi d^2} \quad [W/m^2]$$

### TEMPO CONVENZIONALE DI RIVERBERAZIONE

$$T_{60} = \frac{0,16 \cdot V}{A_{TOT}} \quad [\text{s}]$$

## VALORE OTTIMALE DEL TEMPO CONVENZIONALE DI RIVERBERAZIONE

$$\tau_{OTT,1000} = K \cdot \sqrt[9]{V} \quad [\text{s}]$$

## FREQUENZA DI RISONANZA

$$f_0 = 60 \cdot \sqrt{\frac{1}{m \cdot d}} \quad [\text{Hz}]$$

## RISUONATORE ACUSTICO

$$f_0 = \frac{c}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{S}{V(l+0.8d)}} \quad [\text{Hz}]$$

## PANNELLO FORATO RISONANTE

$$f_0 = \frac{c}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{p}{Dh}} \quad [\text{Hz}]$$

## POTERE FONOISOLANTE

$$R = 10 \log \frac{1}{t} = 10 \log \frac{W}{W_t} \quad [\text{dB}]$$

## INCIDENZA NORMALE

$$R_0 = 20 \log(fm) - 42.5 \quad [\text{dB}]$$

## INCIDENZA DIFFUSA

$$R = 20 \log(fm) - 48 \quad [\text{dB}] \quad m = \text{massa volumica} \cdot \text{spessore}$$

## POTERE FONOISOLANTE MEDIO

$$R_m = 10 \log \frac{1}{t_m} \quad [\text{dB}]$$

$$t_m = \frac{t_1 \cdot s_1 + t_2 \cdot s_2 + t_3 \cdot s_3}{s_1 + s_2 + s_3}$$

$$R_m = 10 \log \frac{s_1+s_2+s_3}{t_1 \cdot s_1 + t_2 \cdot s_2 + t_3 \cdot s_3}$$

$$t_1 = 10^{\left(-\frac{R_1}{10}\right)}$$

$$t_2 = 10^{\left(-\frac{R_2}{10}\right)}$$

$$t_n = 10^{(-\frac{R_n}{10})}$$

## POTERE FONOISOLANTE APPARENTE

$$R' = 10 \log \frac{1}{t'} = 10 \log \frac{W}{W_{t,d} + W_{t,l}}$$

W = potenza sonora incidente sul divisorio

W<sub>t,l</sub> = potenza sonora trasmessa attraverso gli elementi laterali

W<sub>t,d</sub> = potenza sonora trasmessa attraverso il divisorio

$$R' = R - \frac{2}{4} \quad [\text{dB}]$$

$$R' = L_{p1} - L_{p2} + 10 \log \cdot \frac{S_{dv}}{A_{TOT,2}}$$

$$L_2 = L_1 - R' + 10 \log \frac{S}{A_{TOT,2}} \quad (\text{per } R' \text{ posso usare anche } R_m)$$

L<sub>1</sub> [dB] = livello sonoro o intensità nell'ambiente disturbante

L<sub>2</sub> [dB] = livello sonoro nell'ambiente disturbato

R' [dB] = potere fonoisolante apparente del tramezzo

S [m<sup>2</sup>] = superficie del tramezzo

A<sub>TOT,2</sub> [m<sup>2</sup>] = assorbimento totale dell'ambiente disturbato

## ISOLAMENTO ACUSTICO

$$D = L_1 - L_2 = R' - 10 \log \frac{S}{A_{TOT,2}}$$

## SUPERFICIE PANNELLI E %

$$S_{pann} = \frac{A_{TOT,ott} - \alpha_{pav} \cdot S_{pav} - \alpha_{par} \cdot S_{par} - \alpha_{sof} \cdot S_{sof}}{\alpha_{pann} - \alpha_{soff}}$$

$$\%_{pann} = \frac{S_{pann}}{S_{soff}}$$

## PER TROVARE LIVELLO PONDERATO A

f (Hz)	125	200	500	1000	2000	4000
valori di correzione curva A	-16,1	-8,6	-3,2	0	1,2	1

Livello..Hz – valori di correzione curva A

# INVOLUCRO TRASPARENTE

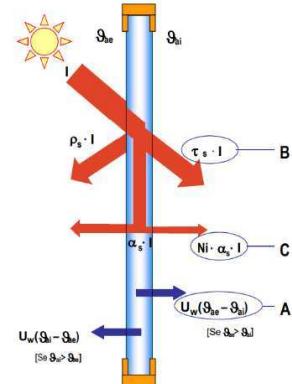
## BILANCIO ENERGETICO

$$\Phi = A + B + C$$

A=flusso termico dovuto alla differenza di temperatura tra interno ed esterno

B=energia radiante solare trasmessa attraverso il componente trasparente

C=frazione dell'energia solare incidente assorbita e successivamente riemessa all'interno



$$\Phi_{globale\ trasmesso\ vetrata} = \Phi_{\Delta t} + \Phi_{sol,diretto} + \Phi_{sol,assorbito} \quad [W]$$

$$\Phi_{\Delta t} = U_W \cdot A_W \cdot (t_{ai} - t_{ae})$$

$$\Phi_{sol,diretto} = \tau_{sol} \cdot A_g \cdot I$$

$$\Phi_{sol,assorbito} = N_i \cdot \alpha_{sol} \cdot I \cdot A_g$$

$$\Phi = U_W \cdot A_W \cdot (\vartheta_{ae} - \vartheta_{ai}) + \tau_{sol} \cdot A_g \cdot I + N_i \cdot \alpha_{sol} \cdot I \cdot A_g$$

$$U_W/K = \text{trasmittanza termica} \quad [W/m^2 K]$$

$\vartheta_{ai}$  = temperatura dell'aria interna

$\vartheta_{ae}$  = temperatura dell'aria esterna

I=irradianza solare  $[W/m^2]$

$\tau_{sol}$ =coefficiente di trasmissione solare

$N_i$ =frazione dell'energia solare assorbita e ceduta all'ambiente per irraggiamento e convezione

$$\Phi = \Phi_W + \Phi_S$$

$$\Phi_W = U_W \cdot A_W \cdot (\vartheta_{ae} - \vartheta_{ai})$$

$$\Phi_S = \tau_{sol} + N_i \cdot \alpha_{sol} \cdot I \cdot A_g = TSET \cdot I \cdot A_g$$

$A_W$ =area della finestra

$$TSET = \tau_{sol} + N_i \cdot \alpha_{sol}$$

$A_g$ =area della vetrata (senza telaio)

TSET/g/FS=coefficiente di trasmissione solare totale

- Usiamo la differenza di temperatura se si parla di bilancio sensibile

$$\Phi_{vent,sens} = \dot{m}_a \cdot c_{pa}(t_e - t_i)$$

- Usiamo la differenza di entalpia se trattiamo sia la quota sensibile sia quella latente

$$\Phi_{vent,TOT} = \dot{m}_a(h_e - h_i)$$

## TRASMITTANZA TERMICA DELLA FINESTRA

$$U_W = \frac{A_g \cdot U_g + A_f \cdot U_f + I_g \cdot \psi_g}{A_g + A_f} \quad [W/m^2K] \quad A_g + A_f = A_W$$

Vetro singolo:

$$U_W = \frac{A_g \cdot U_g + A_f \cdot U_f}{A_g + A_f}$$

$U_g$ =trasmittanza termica del componente trasparente

$A_g$ =area del componente trasparente

$A_f$ =area del telaio

$U_f$ =trasmittanza termica del telaio

$I_g$ =perimetro totale della vetrata

$\psi_g$ =trasmittanza termica lineare

## TRASMITTANZA TERMICA DELL'ELEMENTO TRASPARENTE

$$U_g = \frac{1}{\frac{1}{h_e} + \sum_{j=1}^n \frac{s_j}{\lambda_j} + \sum_{j=1}^{n-1} R_j + \frac{1}{h_i}} \quad [W/m^2K]$$

$h_e$ =coefficiente di scambio termico liminare esterno

$\lambda_j$ =conducibilità termica del vetro (pari a circa 1 W/mK)

$s_j$ =spessore del vetro

$h_i$ =coefficiente di scambio termico liminare interno

$R_j$ =resistenza termica dell'intercapedine

$n$ =numero di lastre costituenti il componente trasparente

I valori di  $h_e$  ed  $h_i$  dipendono dalla velocità del vento. Per le pareti interne si assume normalmente un valore di 8.3 W/m<sup>2</sup>K, per le pareti esterne:

$h_e$ [W/m <sup>2</sup> K]	velocità del vento		
	2 m/s	4 m/s	6 m/s
14,7	21,0	26,8	

Se si vogliono confrontare prestazioni di componenti diversi si utilizzano i seguenti valori:

PERIODO INVERNALE
$h_e = 25$ [W/m <sup>2</sup> K]
$h_i = 3,6 + 4,4 \cdot \varepsilon_i / 0,84$ [W/m <sup>2</sup> K]

PERIODO ESTIVO
$h_e = 14,5$ [W/m <sup>2</sup> K]
$h_i = 2,7 + 5,5 \cdot \varepsilon_i / 0,84$ [W/m <sup>2</sup> K]

Nel caso di lastra non trattata si assume l'emissività  $\varepsilon_i = 0,84$

## TRASMITTANZA TERMICA DELLA FINESTRA

$$U_{WS} = \left( \frac{1}{U_w} + \Delta R \right)^{-1}$$

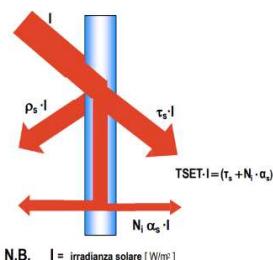
$$R_w = \frac{1}{U_w}$$

$\Delta R$ =resistenza aggiuntiva a dovuta alla eventuale presenza della schermatura abbassata, che crea un'ulteriore intercapedine (ventilata) e un ulteriore strato resistente

Valori della resistenza termica aggiuntiva [ $m^2K/W$ ] dovuta a schermi o a tapparelle completamente abbassate[ Norma UNI 10077-1]

Tipo di chiusura	Resistenza termica caratteristica della chiusura	Resistenze termiche addizionali per una specifica permeabilità all'aria delle chiusure		
		Alta permeabilità all'aria	Media permeabilità all'aria	Bassa permeabilità all'aria
Chiusure avvolgibili in alluminio	0.01	0.09	0.12	0.15
Chiusure avvolgibili in legno e plastica senza riempimento in schiuma	0.10	0.12	0.16	0.22
Chiusure avvolgibili in plastica con riempimento in schiuma	0.15	0.13	0.19	0.26
Chiusure in legno da 25 mm a 30 mm di spessore	0.20	0.14	0.22	0.30

## COEFFICIENTE DI TRASMISSIONE SOLARE TOTALE TSET



## PROPRIETÀ OTTICO SOLARI

$$\tau_s + \rho_s + \alpha_s = 1$$

Coefficiente di trasmissione solare

$$\tau_s = \frac{\Phi_{s,t}}{\Phi_{s,i}} \quad [\%]$$

Coefficiente di riflessione solare

$$\rho_s = \frac{\Phi_{s,r}}{\Phi_{s,i}} \quad [\%]$$

Coefficiente di assorbimento solare

$$\alpha_s = \frac{\Phi_{s,a}}{\Phi_{s,i}} \quad [\%]$$

## FATTORE DI TRASMISSIONE SOLARE TOTALE $g_{tot}$

Per schermo collocato all'interno:

$$g_{gs} = g \left( 1 - g \cdot \rho_{e,B} - \alpha_{e,B} \cdot \frac{G_{int}}{G_3} \right)$$

$g$ =fattore di trasmissione solare totale del sistema vetrato

$\rho_{e,B}$ =fattore di riflessione solare della schermatura

$\alpha_{e,B}$ =fattore di assorbimento solare della schermatura

$G_3$ =coefficiente di scambio termico equivalente pari a  $30 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$

$G_{int}$ =trasmittanza termica equivalente, ricavabile dalla relazione  $\left(\frac{1}{U_g} + \frac{1}{G_3}\right)^{-1}$

Per schermo collocato all'esterno:

$$g_{gs} = \tau_{e,B} \cdot g + \alpha_{e,B} \cdot \frac{G_{ext}}{G_2} + \tau_{e,B} \cdot (1 - g) \cdot \frac{G_{ext}}{G_1}$$

$\tau_{e,B}$ =fattore di trasmissione solare della schermatura

$g$ =fattore di trasmissione solare totale del sistema vetrato

$\alpha_{e,B}$ =fattore di assorbimento solare della schermatura

$G_1, G_2$ =coeffienti di scambio termico equivalenti, determinati con modelli complessi e pari rispettivamente a  $5 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$  e  $10 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$

$G_{ext}$ =trasmittanza termica equivalente, ricavabile dalla relazione  $\left(\frac{1}{U_g} + \frac{1}{G_1} + \frac{1}{G_2}\right)^{-1}$

## FATTORE DI RIDUZIONE PER OMBREGGIATURA

$$F_{sh,ob} = F_{hor} \cdot F_{ov} \cdot F_{fin}$$

## VALORI DI RIFERIMENTO $\psi_g \rightarrow$ DISTANZIATORE

Frame type	Linear thermal transmittance for different types of glazing $\psi_g$	
	Double or triple glazing uncoated glass air- or gas-filled	Double <sup>a</sup> or triple <sup>b</sup> glazing low-emissivity glass air- or gas-filled
Wood or PVC	0.06	0.08
Metal with a thermal break	0.08	0.11
Metal without a thermal break	0.02	0.05

<sup>a</sup> One pane coated for double glazed.  
<sup>b</sup> Two panes coated for triple glazed.

## BILANCIO TERMICO E CARICO TERMICO

### BILANCIO DI MASSA

$$\dot{m}_{v,I} + \dot{m}_{v,H} + \dot{m}_a \cdot x_e - \dot{m}_a \cdot x_i \approx 0 \quad \dot{m}_{v,I} + \dot{m}_{v,H} + \dot{m}_a \cdot (x_e - x_i) \approx 0$$

$\dot{m}_{v,I}$ =portata in massa di vapore acqueo o di acqua nebulizzata prodotta dalle sorgenti interne [kg/s]

$\dot{m}_{v,H}$ =portata in massa di vapore acqueo o di acqua nebulizzata prodotta dall'impianto termico [kg/s]

$\dot{m}_a$ =portata in massa di aria secca introdotta in ambiente per infiltrazioni o ventilazione naturale [kg/s]

$x_e$ =umidità specifica dell'aria esterna [kgv/kg]

$x_i$ =umidità specifica dell'aria interna [kgv/kg]

$$\dot{m}_{v,vent} = \dot{m}_a \cdot (x_e - x_i)$$

## CARICHI SENSIBILI E LATENTI

$$\Phi_I = \Phi_{I,s} + \Phi_{I,l} = \Phi_{I,s} + \dot{m}_{v,I} \cdot h_{v,I}$$

PRODUZIONE TERMICA DEL CORPO UMANO

$$\dot{m}_v = \frac{\text{temperatura latente tabella [w] } \cdot \text{numero persone}}{1,9 \cdot \text{temperatura} + 2500} \quad [\text{kg}_v/\text{s}]$$

Attività	Emissione termica (W)	Temperatura ambiente (°C)					
		15 sens. (W)	20 lat. (W)	22 sens. (W)	24 lat. (W)	26 sens. (W)	lat. (W)
Seduto	115	100	15	90	25	80	35
Lavoro in ufficio	140	110	30	100	40	90	50
In cammino	160	120	40	110	50	100	60
Lavoro leggero	235	150	85	130	105	115	120
Lavoro medio	265	160	105	140	125	125	140
Lavoro pesante	440	220	220	190	250	165	275

per determinare la portata di vapore acqueo  $\dot{m}_v$  prodotto alle diverse temperature e in diverse condizioni di metabolismo si può scrivere:

$$\dot{m}_v = \frac{Q_L}{2538}$$

dove 2538 kJ/kg è il valore assunto per l'entalpia del vapore a temperatura ambiente 20 °C, in condizioni di lavoro di ufficio  $h_v=1,9 \cdot t + 2500$

## BILANCIO DI ENERGIA

Carico termico sensibile:

$$\Phi_T + \Phi_S + \Phi_{I,s} + \Phi_H$$

Carico termico latente:

+

$$\dot{m}_{v,I} \cdot h_{v,I} + \dot{m}_{v,H} \cdot h_{v,H} \rightarrow \text{solo se c'è umidificatore}$$

Carico di ventilazione:

+

$$\dot{m}_a \cdot h_e - \dot{m}_a \cdot h_i = 0$$

$h_{v,I}$ =entalpia specifica del vapore acqueo o di acqua nebulizzata prodotta dalle sorgenti interne [kJ/kg]

$h_{v,H}$ =entalpia specifica del vapore acqueo o di acqua nebulizzata prodotta dall'impianto termico [kJ/kg]

$h_e$ =entalpia specifica dell'aria esterna [kJ/kg]

$h_i$ =entalpia specifica dell'aria interna [kJ/kg]

$$\Phi_T + \Phi_S + \Phi_{I,s} + \Phi_H + \Phi_{vent} = 0$$

-  $\Phi_T = \Phi_{Tr}$  = flusso trasmesso  $\rightarrow$  solo sensibile / o positivo (entrante se  $t_e > t_i$ )

o negativo (uscente se  $t_e < t_i$ )

$\Phi_{Tr} = U \cdot A \cdot (\Delta t \text{ più alta} - \text{più bassa})$

$t_{sole/aria} = t_e + \frac{I \cdot \alpha}{h_e}$  (non bisogna calcolarla per le finestre perché non c'è irradianza  $t_e - t_i$ )

-  $\Phi_S = \Phi_{sol}$  = flusso solare  $\rightarrow$  solo sensibile / sempre positivo (entrante)

$\Phi_{sol} = A \cdot \tau \cdot I$

-  $\Phi_{I,s} = \Phi_{I,persone}$  = flusso trasmesso dalle persone  $\rightarrow$  sia sensibile che latente / sempre positivo (entrante)

$I$ = irradianza

$\alpha$ = coefficiente di assorbimento

$h_e$ = entalpia specifica esterna

$\tau$  o TSET = fattore solare

-  $\Phi_H$  = flusso degli apparecchi → sia sensibile che latente / positivo (se il calore è fornito)

negativo (se il calore è sottratto)

$$\Phi_H = \Phi_T + \Phi_S + \Phi_{I,S} + \Phi_{vent}$$

-  $\Phi_{vent} = \Phi_{cond} = \dot{m}_a(h_e - h_i)$  = flusso di ventilazione → sia sensibile sia latente/ negativo

$$\Phi_{vent} = \dot{m}_a \cdot c_p \text{ aria } (\Delta t \text{ più alta} - \text{più bassa})$$

$$\Phi_{vent} = 0.35 \cdot \text{numero ricambi per ora} \cdot V \cdot (t_i - t_e)$$

$$c_{pa} = \text{calore specifico}$$

$$\text{Aria} \rightarrow c = 1000 \text{ J}/\text{°C Kg} \quad \rho = 1,2 \text{ Kg}/\text{m}^3$$

$$\text{Acqua} \rightarrow c = 4186 \text{ J}/\text{°C Kg} \quad \rho = 1000 \text{ Kg}/\text{m}^3$$

Per trovare  $h$  aria esterna o interna

$$(h_e - h_i) = \frac{-(\Phi_T + \Phi_S + \Phi_{I,S} + \Phi_H + \Phi_{vent})}{\dot{m}_a} \rightarrow h_i = h_e - \frac{-(\Phi_T + \Phi_S + \Phi_{I,S} + \Phi_H + \Phi_{vent})}{\dot{m}_a}$$

### BILANCIO DI ENERGIA SENSIBILE

Nel caso di ventilazione con aria esterna:

$$\dot{m}_a \cdot c_a \cdot (t_e - t_i) + \Phi_T + \Phi_S + \Phi_{I,S} + \Phi_H = 0 \quad [\text{kW}]$$

Nel caso di ventilazione con aria trattata:

$$\dot{m}_a \cdot c_a \cdot (t_{su} - t_i) + \Phi_T + \Phi_S + \Phi_{I,S} + \Phi_H = 0 \quad [\text{kW}]$$

### CALCOLO INVERNALE DI PROGETTO

$$\Phi_H = \Phi_D + \Phi_V$$

$$\Phi_D = \Phi_{OP} + \Phi_{PT} + \Phi_W$$

$\Phi_{OP}$ =flusso termico per trasmissione attraverso i componenti opachi esterni

$$\Phi_{OP} = \sum_{j=1}^n U_{OP,j} \cdot A_j \cdot (\vartheta_{ai} - \vartheta_{ae}) \cdot e_j$$

$e_j$  = correzione per esposizione, che permette di tener conto della diversa irradianza solare che incide sulle superfici, della diversa umidità delle pareti, della diversa velocità e temperatura dei venti.  
[UNI EN 12831/2006]

Valori correttivi $e$							
N	NE	E	SE	S	SO	O	NO
1.20	1.20	1.15	1.10	1.00	1.05	1.10	1.15

$\Phi_{PT}$ =flusso termico per trasmissione attraverso i ponti termici

$$\Phi_{PT} = \sum_{j=1}^n \psi_{l,j} \cdot L_j \cdot (\vartheta_{ai} - \vartheta_{ae}) \cdot e_j$$

$\Phi_W$ =flusso termico per trasmissione dovuta alla differenza di temperatura attraverso l'elemento di involucro trasparente

$$\Phi_W = \sum_{j=1}^n U_{w,j} \cdot A_j \cdot (\vartheta_{ai} - \vartheta_{ae}) \cdot e_j$$

## PROGETTO RISCALDAMENTO INVERNALE DISPERSIONI TERMICHE PER VENTILAZIONE

$$|\Phi_V| = \dot{m}_a \cdot c_a \cdot (t_i - t_e) \quad [\text{kJ/s}=\text{kW}]$$

$\dot{m}_a = \rho_a \cdot \dot{V}_o$ =portata di aria esterna

$\rho_a$ =massa volumica dell'aria  $[\text{kg}/\text{m}^3]$

$\dot{V}_o$ =portata volumica di aria immessa in ambiente  $[\text{m}^3/\text{s}]$

$$\dot{m}_a = \frac{n}{3600} \cdot V \cdot \rho_a$$

$$|\Phi_V| = \frac{n}{3600} \cdot V \cdot \rho_a \cdot c_a \cdot (t_i - t_e) = 0.35 \cdot n \cdot V \cdot (t_i - t_e)$$

V=volume netto dell'ambiente

## FABBISOGNO ENERGETICO DEGLI EDIFICI

$$Q_H = Q_T + Q_V - \eta_u \cdot (Q_I + Q_S)$$

$\eta_u$ =fattore di utilizzazione degli apporti gratuiti [%]

$Q_V$  = carico termico per ventilazione  $\rightarrow 0,34 \cdot \text{numero ricambi ora} \cdot \text{volume} \cdot (t_e - t_i)$

$$0,34 = \frac{\rho \cdot cp}{3600} \rightarrow \rho=\text{densità aria}=1.2 \text{ kg/m}^3 \quad cp=\text{calore specifico aria}=1000 \text{ J/kgK}$$

$n \cdot V = \dot{m} \rightarrow \dot{m}=\text{portata m}^3/\text{h}$

# TERMODINAMICA

## LAVORO TERMODINAMICO

Per una trasformazione termodinamica reversibile:

$$L = \int_{stato\ iniz}^{stato\ fin} p \cdot dV$$

Per una trasformazione irreversibile:

$$L = \int_{stato\ iniz}^{stato\ fin} p \cdot dV - R$$

R=lavoro compiuto dalle forze di attrito

## 1° PRINCIPIO DELLA TERMODINAMICA SISTEMI CHIUSI

$$Q - L = U_{fin} - U_{iniz} = \Delta U$$

## 1° PRINCIPIO DELLA TERMODINAMICA SISTEMI APERTI (REGIME STAZIONARIO)

$$Q - L_a = H_u - H_e = m_u \cdot h_u - m_e \cdot h_e = m \cdot (h_u - h_e)$$

In termini istantanei si ottiene:

$$\dot{Q} - \dot{L}_a = \dot{m}_u \cdot h_u - \dot{m}_e \cdot h_e = \dot{m} \cdot (h_u - h_e)$$

## MACCHINE TERMICHE

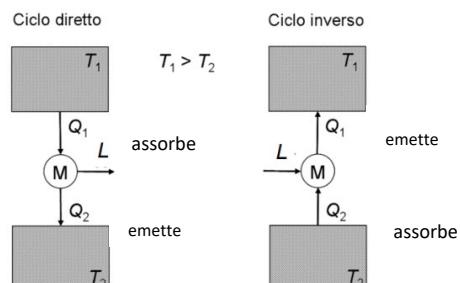
Ciclo diretto

Motore termico

$$\eta = \frac{L}{Q_1} < 1$$

$$\eta = \frac{L}{Q_1} = \frac{Q_1 - |Q_2|}{Q_1} = 1 - \frac{|Q_2|}{Q_1} \quad Q_1 = \frac{L + Q}{\eta}$$

$$\dot{m} = \frac{Q_1}{\dot{Q} \text{ o potere calorifico}}$$



Calcolo inverso

Macchina frigorifera, Pompa di calore

$$\varepsilon/E_\eta = \frac{Q_2}{L}$$

$\eta$ =rendimento termico

Macchina frigorifera

$$\varepsilon = \frac{Q_2}{|L|} = \frac{Q_2}{|Q_1| - Q_2} \quad |L| = \frac{Q_2}{\varepsilon} \quad [\text{Kw}]$$

$\varepsilon$ =effetto frigorifero specifico

$\varepsilon^*$ =fattore di moltiplicazione termica o COP

$$L = Q_1 - Q_2$$

$L$ = lavoro, potenza utile, potenza elettrica, potenza motore, potenza minima

Pompa di calore

$$\varepsilon^* = \frac{|Q_1|}{|L|} = \frac{|Q_1|}{|Q_1| - Q_2} \quad |L| = \frac{|Q_1|}{\varepsilon^*}$$

$Q$  = potenza termica

Potere calorifero = energia ricavata dalla combustione completa di un gas [ $\text{m}^3$ ] e un liquido [Kg]

Calore necessario per raffreddare

$$Q = \text{massa} \cdot \text{calore specifico} \cdot \Delta T \quad [\text{J}]$$

$$\dot{Q}_2 = \varepsilon \cdot \text{Lavoro}$$

$$\dot{Q} = \frac{Q}{\text{tempo}}$$

$$\text{Tempo} = \frac{Q}{\dot{Q}}$$

$$\text{volume}_{\text{gas}} = \frac{Q_1}{\text{potere calorifero}}$$

$$\text{temperatura media} = \frac{t_1 \cdot \text{quantità}_1 + t_2 \cdot \text{quantità}_2}{\text{quantità}_1 + \text{quantità}_2}$$

## MACCHINA DI CARNOT

Motore termico:

$$\eta = 1 - \frac{T_2}{T_1}$$

$T_1$  e  $T_2 \rightarrow$  espressi in K + 273,15

Macchina frigorifera

$$\varepsilon = \frac{T_2}{T_1 - T_2}$$

Pompa di calore

$$\varepsilon^* = \frac{T_1}{T_1 - T_2}$$

$$\frac{|Q_1|}{T_1} = \frac{|Q_2|}{T_2}$$

$$\frac{|Q_1|}{|Q_2|} = \frac{T_1}{T_2}$$

## CONVERSIONI

$$N [1 \text{ vol}/h] \rightarrow \dot{m}_a = \frac{N \cdot \text{Volume stanza}}{3600} \cdot \rho_{aria} \quad \rho_{aria} = 1,2$$

$$m^3 \rightarrow \text{Kg} \cdot 1,2$$

$$\text{L} \rightarrow \text{Kg} \rightarrow \times 0,001 m^3 \rightarrow \times 1,2 \text{ Kg}$$

$$\text{h} \rightarrow \frac{\text{minuti}}{60} \rightarrow \frac{\text{secondi}}{3600}$$

# TERMOIGROMETRIA

## TRASMITTANZA TERMICA

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_i} + \sum_{j=1}^{n_1} \frac{s_j}{\lambda_j} + \sum_{j=1}^{n_2} R_j + \frac{1}{h_e}} \quad [W/m^2K] \quad U = \frac{1}{\frac{1}{h_i} + \frac{1}{C} + \frac{1}{h_e}}$$

$R_j$  = per strati non omogenei (aria/solette/latrizi forati)

$\frac{s_j}{\lambda_j}$  = per strati omogenei

$$R_{si} = \frac{1}{h_i} \quad h_i = \frac{1}{R_{si}}$$

$$R_{se} = \frac{1}{h_e}$$

### Flusso orizzontale (parete verticale):

$$h_i = 7,7 \quad [W/m^2K]$$

$$h_e = 25 \quad [W/m^2K]$$

$$R_{si} = 0,13 \quad [m^2K/W]$$

$$R_{se} = 0,04 \quad [m^2K/W]$$

### Flusso verticale:

- ascendente (soletta di copertura)

$$R_{si} = 0,10 \quad [m^2K/W]$$

$h_i = 10 \text{ W/m}^2\text{K}$  (flusso ascendente)

$$R_{se} = 0,04 \quad [m^2K/W]$$

$h_i = 7,7 \text{ W/m}^2\text{K}$  (flusso orizzontale)

- descendente (pavimento verso il terreno)

$h_i = 5,9 \text{ W/m}^2\text{K}$  (flusso discendente)

$$R_{si} = 0,17 \quad [m^2K/W]$$

$h_e = 25 \text{ W/m}^2\text{K}$  (flusso orizzontale, ascendente e discendente)

$$R_{se} = 0,04 \quad [m^2K/W]$$

## COEFFICIENTE DI ASSORBIMENTO

$$\alpha = \frac{\phi_\alpha}{\phi_i}$$

## BILANCIO TERMICO DEL COMPONENTE OPACO IN REGIME STAZIONARIO:

### IN ASSENZA DI RADIAZIONE SOLARE (PERIODO INVERNALE):

$$\Phi_{OP} = U \cdot A \cdot (\vartheta_{ai} - \vartheta_{ae}) \quad [W]$$

$\Phi_{OP}$  = flusso termico trasmesso attraverso il componente opaco confinante con l'esterno

U = trasmittanza termica del componente

A = superficie del componente

$\vartheta_{ai}$  = temperatura dell'aria interna

$\vartheta_{ae}$  = temperatura dell'aria esterna

#### IN PRESENZA DI RADIAZIONE SOLARE:

$$\Phi_{OP} = U \cdot A \cdot (\vartheta_{ai} - \vartheta_{sa}) \quad [W]$$

$\vartheta_{sa} = t_{sa}$  = temperatura sole-aria dovuta all'irradianza solare I

$$\vartheta_{sa} = \vartheta_{ae} + \frac{\alpha \cdot I}{h_e}$$

I = irradianza solare  $[W/m^2]$

$\alpha$  = coefficiente di assorbimento solare

$h_e$  = coefficiente di scambio termico liminare esterno

#### DIFFUSIVITÀ TERMICA

$$a_t = \frac{\lambda}{\rho \cdot c} \quad [m^2/s]$$

#### MASSA FRONTALE

$$MF = \sum_{j=1}^n \rho_j \cdot s_j \quad [Kg/m^2]$$

#### CAPACITÀ TERMICA FRONTALE

$$CF = \sum_{j=1}^n \rho_j \cdot s_j \cdot c_j \quad [KJ/m^2K]$$

#### DIFFUSIONE DEL VAPORE

#### LEGGE DI FICK

$$\frac{G}{A} = \delta \cdot \frac{p_{v1} - p_{v2}}{s} \quad R_V = \frac{s}{\delta}$$

G = portata di vapore acqueo  $[Kg/s]$

A = area frontale della parete  $[m^2]$

$\delta$  = permeabilità al vapore acqueo  $[Kg/msPa]$

$p_{v1} p_{v2}$  = pressioni parziali del vapore rispettivamente sulla faccia interna e quella esterna della parete  $[Pa]$

s = spessore della parete  $[m]$

$R_V$  = resistenza alla diffusione del vapore acqueo [ $m^2 sPa/Kg$ ]

#### DIFFUSIONE DEL VAPORE PER UNA PARETE MULTISTRATO

$$\frac{G}{A} = M \cdot (p_{vi} - p_{ve})$$

M = permeanza [ $\text{Kg}/m^2 \text{sPa}$ ]

$p_{vi}$   $p_{ve}$  = pressioni parziali del vapore rispettivamente dell'ambiente interno e dell'ambiente esterno

#### PERMEANZA

$$M = \frac{1}{\frac{1}{\beta_i} + \sum_{j=1}^n \frac{s_j}{\delta_j} + \frac{1}{\beta_e}}$$

$\beta_i$  e  $\beta_e$  = coefficienti di adduzione superficiale del vapore rispettivamente interno ed esterno

$$M = \frac{1}{\sum_{j=1}^n \frac{s_j}{\delta_j}} \quad [\text{Kg}/m^2 \text{sPa}]$$

$$M = \frac{1}{R_v}$$

#### CONDENSA SUPERFICIALE

$$\vartheta_{pi} = \vartheta_{ai} - \frac{U}{h_i} \cdot (\vartheta_{ai} - \vartheta_{ae})$$

$$\vartheta_{pi} > \vartheta_R$$

$\vartheta_R$  = temperatura di rugiada

$\vartheta_{pi}$  = temperatura parete interna

$\vartheta_{ai}$  = temperatura dell'aria interna

U = trasmittanza termica della parete

$h_i$  = coefficiente di scambio termico liminare interno

$\vartheta_{ae}$  = temperatura dell'aria esterna

$$X_R = 0,622 \cdot \frac{\varphi \cdot p_{vs}(t)}{101325 - \varphi \cdot p_{vs}(t)}$$

$$p_{vs}(t_R) = \frac{101325 \cdot X_R}{0,622 + X_R}$$

#### VERIFICA TERMOIGROMETRICA: Condensazione superficiale

Se la temperatura di una qualsiasi superficie dell'involucro di un ambiente è inferiore o uguale alla temperatura di rugiada dell'aria in esso contenuta, si ha la formazione di condensa superficiale.

In termini di temperatura si ha:

condensa superficiale:  $\vartheta_{pi} \leq \vartheta_r$

assenza di condensa:  $\vartheta_{pi} > \vartheta_r$

per sicurezza meglio:  $\vartheta_{pi} > \vartheta_r + 1 - 2^\circ C$

La stesso fenomeno può essere descritto in termini di pressioni parziali:

condensa superficiale:  $p_{vi} \geq p_{vs,pi}$

assenza di condensa:  $p_{vi} < p_{vs,pi}$  per

sicurezza meglio:  $p_{vi} < 0,8 p_{vs,pi}$

#### RESISTENZA TERMICA ADDIZIONALE RA O RESISTENZA TERMICA DELLA PARETE

$$\vartheta_{pi} = \vartheta_R$$

$$U_{max} = \frac{\vartheta_{ai} - \vartheta_R}{\vartheta_{ai} - \vartheta_{ae}} \cdot h_i \quad [W/m^2 K]$$

$$\Delta R = R_a = \frac{1}{U_{max}} - \frac{1}{U} \quad [m^2 K/W]$$

$$Spessore = R \cdot \lambda \quad \lambda = \frac{spessore \text{ in } m}{R} \quad [W/mK]$$

#### MINIMO INCREMENTO RESITENZA TERMICA

$$R_{finale} - R_{iniziale} (-R_{intercapedine})$$

$$R_{iniziale} = \frac{1}{U_{iniziale}}$$

$$R_{finale} = \frac{1}{U_{max}} \rightarrow R_a$$

#### CONDENSAZIONE INTERSTIZIALE

$$p_v < p_{vs}$$

## PROFILO DELLA PRESSIONE DI VAPORE

$$p_{v,j} = p_{vi} - M \cdot (p_{vi} - p_{ve}) \cdot \sum_{j=1}^n R_{v,j}$$

$p_{vi}$  =  $p_{vsi} \cdot \varphi_{ai}$

$p_{ve}$  =  $p_{vse} \cdot \varphi_{ae}$

$p_{v,j}$  = pressione di vapore allo strato jesimo

$p_{vi}$  = pressione di vapore sulla superficie interna

M = permeanza della parete

$p_{ve}$  = pressione di vapore sulla superficie esterna

$R_{v,j}$  = resistenza al vapore dello strato jesimo

$p_{vsi}$  = pressione di saturazione sulla superficie interna

$\varphi_{ai}$  = umidità relativa dell'aria interna

$p_{vse}$  = pressione di saturazione sulla superficie esterna

$\varphi_{ae}$  = umidità relativa dell'aria esterna

## PROFILO DELLA PRESSIONE DI SATURAZIONE

$$\vartheta_j = \vartheta_{ai} - U \cdot (\vartheta_{ai} - \vartheta_{ae}) \cdot \left( \frac{1}{h_i} + \sum_{j=1}^n R_j \right)$$

$\vartheta_j$  = temperatura dello strato jesimo

$\vartheta_{ai}$  = temperatura dell'aria interna

$\vartheta_{ae}$  = temperatura dell'aria esterna

$h_i$  = coefficiente di scambio termico liminare interno

$R_j$  = resistenza termica dello strato jesimo

## CONDENSAZIONE INTERSTIZIALE

### 1- PROFILO DELLE TEMPERATURE

$$t_{pi}(t_1) = t_{ai} - \frac{U}{h_i} \cdot (t_{ai} - t_{ae})$$

$$t_2 = t_1 - U \cdot (t_{ai} - t_{ae}) \cdot R$$

$$t_3 = t_{ae} + \frac{U}{h_e} \cdot (t_{ai} - t_{ae})$$

## 2- VERIFICA TERMOIGROMETRICA

$\delta$  o  $\pi$  [Kg/msPa]: permeabilità al vapore acqueo

$\mu$ : coefficiente di resistenza alla diffusione del vapore  $\frac{\delta_{aria}}{\delta_{materiale}}$

$S_d$  [m]: spessore di aria equivalente

$$s_d = \mu \cdot d$$

$d$ = spessore in metri

$\pi_{aria}$  = permeabilità al vapore dell'aria pari a  $192 \cdot 10^{-12}$  [Kg/msPa]

$\mu$  = fattore di resistenza al vapore del materiale; è il rapporto tra la resistenza al vapore dello strato di materiale considerato e la resistenza di uno strato di aria di eguale spessore

$$\mu = \frac{R_{v,mat}}{R_{aria}} = \frac{\frac{s}{\pi_{aria}}}{\frac{s}{\pi_{aria}}} = \frac{\pi_{aria}}{\pi_{aria}}$$

$$\pi_{mat} = \frac{\pi_{aria}}{\mu}$$

$S_d$ =spessore equivalente; spessore di uno strato d'aria di resistenza pari a quella dello strato di materiale considerato di spessore s [m]

## 3- TABELLA

temperatura	sd	$p_{vs}(t)$
<b>t. amb. interno</b>	/	$\varphi \cdot p_{vs}(t)$
$t_{pi} - t_1$	0	da tabella
$t_2$	Sd $t_2$	da tabella
$t_3$	Sd $t_2 +$ Sd $t_3$	da tabella
<b>t. amb. esterno</b>	0	$\varphi \cdot p_{vs}(t)$

## 4- METODO DI GLASER

