

1. TERMODINAMICA

SISTEMA TERMODINAMICO: quantità di materia che occupa una limitata porzione di spazio.

AMBIENTE ESTERNO: tutto ciò che è al di fuori del sistema termodinamico.

SUPERFICIE DI CONTROLLO: superficie (reale o ideale) che separa il sistema termodinamico dall'ambiente esterno.

SISTEMI APERTI scambio di energia e di massa con l'ambiente esterno.

SISTEMI CHIUSI scambio di energia, ma non di massa con l'ambiente esterno.

SISTEMI ISOLATI nessun tipo di scambio con l'ambiente esterno.

Lo scambio di energia può avvenire sotto forma di calore o di lavoro.

CALORE scambio di energia indotto da una differenza di temperatura.

LAVORO scambio di energia per effetto di una forza che produce uno spostamento del suo punto di applicazione lungo la direzione della forza stessa.

VARIABILI TERMODINAMICHE ESTENSIVE Dipendono dalla quantità di materia (massa) contenuta nel sistema: *massa, volume, energia interna, entalpia*

VARIABILI TERMODINAMICHE INTENSIVE Non dipendono dalla quantità di massa del sistema: *pressione, temperatura* e grandezze estensive riferite all'unità di massa (es. massa volumica, volume specifico)

Un sistema si dice in **EQUILIBRIO TERMODINAMICO** quando è contemporaneamente in:

- equilibrio meccanico
- equilibrio chimico
- equilibrio termico

La **TEMPERATURA** è una variabile di stato intensiva che rappresenta l'energia cinetica posseduta dalle molecole che compongono il sistema.

-misura per via indiretta—variazione grandezza che dipende dalla temperatura (termometro, variazione liquido)

L'ampiezza del **KELVIN (K)** corrisponde a quella del grado Celsius, ma lo zero è posto al valore minimo di temperatura ottenibile (zero assoluto), pari a -273.15 °C.

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

ENERGIA INTERNA (U) [J]

L'energia interna di un sistema comprende le energie cinetiche e potenziali di tutte le particelle che compongono il sistema. Non comprende invece l'energia cinetica e potenziale macroscopica del sistema.

ENTALPIA (H) [J]

L'entalpia esprime la quantità di energia interna che un sistema termodinamico può scambiare con l'ambiente. somma dell'energia interna U e del prodotto della pressione p per il volume V.

$$H = U + p \cdot V$$

ENERGIA INTERNA SPECIFICA (u) [J/Kg]

Data dal rapporto tra energia interna U e la massa m.

$$u = U/m$$

ENTALPIA SPECIFICA (h) [J/Kg]

Data dal rapporto tra l'entalpia H e la massa m.

$$h = H/m$$

CALORE (Q) [Kcal]

Il calore è una forma di energia scambiata tra le parti di un sistema o tra il sistema e l'ambiente esterno per effetto di una differenza di temperatura. Lo scambio di energia termica avviene spontaneamente dalle zone a temperatura maggiore verso le zone a temperatura minore.

Il calore scambiato si misura per via indiretta, attraverso le variazioni di temperatura che ne derivano. Lo strumento utilizzato per la misura del calore è il CALORIMETRO. L'unità tradizionalmente usata per misurare il calore è la kilocaloria, definita come la quantità di calore che viene fornita ad un kilogrammo di acqua distillata alla pressione di 1 atm per innalzare la sua temperatura da 14.5 a 15.5 °C. Il calore è un'energia, quindi può essere misurato in joule

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

CAPACITA' TERMICA (C) [J/°C] / [J/K]

calore necessario ad aumentare di un grado centigrado la temperatura di un corpo, dipende dal tipo di materiale costituente il corpo e dalle dimensioni del corpo. Data dal rapporto tra il calore Q e la differenza di temperatura ΔT

$$C = Q/\Delta T$$

CALORE SPECIFICO (c) [J/°C Kg] / [J/K Kg]

calore necessario ad aumentare di un grado centigrado la temperatura dell'unità di massa di una sostanza, dipende solo dal tipo di sostanza o materiale costituente il corpo. Data dal rapporto tra il calore Q e la differenza di temperatura ΔT per la massa m.

$$c = Q/(\Delta T \cdot m)$$

aria: $c = 1000 \text{ J}/(\text{°C kg})$

CLS: $c = 900 \text{ J}/(\text{°C kg})$

acqua: $c = 4186 \text{ J}/(\text{°C kg})$

acciaio: $c \sim 500 \text{ J}/(\text{°C kg})$

TRASMISSIONE CALORE

CONDUZIONE

La conduzione consiste nella propagazione del calore per contatto tra particelle senza alcun movimento macroscopico di materia. È l'unico modo di propagazione del calore che esiste nei solidi.

Superfici isoterme: luoghi dai punti ad eguale temperatura.

Linee di ffusso: direzioni di propagazione del calore (sono perpendicolari in ogni punto alle superfici isoterme).

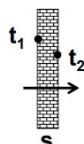
In regime **variabile** le grandezze variano nel tempo, è necessario tenere conto della capacità di accumulo dei corpi.

In regime **stazionario** le grandezze sono indipendenti dal tempo: l'energia entrante è pari all'energia uscente.

LEGGE DI FOURIER

permette di stabilire il flusso termico per unità di area che attraversa una parete. In regime **stazionario** (temperature e flussi termici costanti nel tempo) e con flusso **unidimensionale** (in direzione perpendicolare alle isoterme) nel caso di parete **monostrato** omogenea si può scrivere:

$$\frac{\dot{Q}}{A} = \lambda \frac{t_1 - t_2}{s}$$



Q = flusso termico [W]
A = area attraversata dal flusso termico [m²]
t₁, t₂ = temperature delle due facce della parete [K], [°C]
s = spessore della parete [m]
λ = conducibilità termica della parete [W/(m·K)], [W/(m·°C)]

CONDUCIBILITÀ TERMICA (λ)

Attitudine di un materiale a trasmettere il calore per conduzione. È funzione della temperatura e del contenuto di umidità.

Nei solidi $1 < \lambda < 400 \text{ W}/(\text{m °C})$

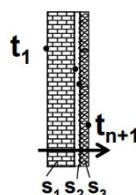
Nei liquidi $0.1 < \lambda < 1 \text{ W}/(\text{m °C})$

Nei gas $0.01 < \lambda < 0.3 \text{ W}/(\text{m °C})$

RESISTENZA TERMICA (R)

Il termine s/λ è una resistenza termica R [(m² K)/W], [(m² °C)/W]. Nel caso di parete multistrato il flusso termico, per unità di area, che la attraversa è calcolabile come:

$$\frac{\dot{Q}}{A} = \frac{t_1 - t_{n+1}}{\sum_{i=1}^n \frac{s_i}{\lambda_i}}$$



t_1, t_{n+1} = temperature superficiali delle facce esterne n = numero degli strati

La resistenza termica (R) della parete multistrato vale:

$$R = \sum_{i=1}^n \frac{s_i}{\lambda_i}$$

CONDUTTANZA TERMICA (C)

La conduttanza termica è una grandezza che misura la facilità con cui il calore passa attraverso di essa. Si indica con il simbolo C ed è l'inverso della resistenza termica. Per calcolare la conduttanza complessiva di una parete composta da più strati, si sommano le resistenze termiche (R) dei singoli strati, e poi si prende l'inverso della somma.

CONVEZIONE TERMICA

La propagazione del calore per convezione comporta un macroscopico spostamento di massa. La convezione è caratteristica degli scambi termici fra una parete e un fluido (liquido o aeriforme). È il processo di trasferimento di calore tra la parete e l'aria. La convezione comporta:

- conduzione termica tra parete e primo strato di fluido a contatto;
- accumulo di calore nelle particelle del fluido;
- movimento e miscelazione delle particelle di fluido a diversa temperatura;

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

t_p = temperatura parete [K], [°C]
 t_a = temperatura aria [K], [°C]

h_c = coeff. di scambio termico convettivo
[W/m²°C]

La convezione può essere:

• **naturale** o libera, h_c dipende da:

- proprietà termofisiche del fluido
 - massa volumica
 - viscosità
 - conducibilità termica
 - calore specifico
 - coefficiente di dilatazione termica
- dimensione caratteristica della superficie di contatto
- differenza di temperatura tra parete e fluido
- accelerazione di gravità ($g = 9.81 \text{ m/s}^2$)

h_c (aria) da 0.1 a 30 W/(m²K) h_c (acqua) da 300 a 12000 W/(m²K)

• **forzata** (attraverso un dispositivo meccanico, es. ventilatore o pompa, oppure una causa naturale, es. vento), h_c dipende da:

- proprietà termofisiche del fluido
 - massa volumica
 - viscosità
 - conducibilità termica
 - calore specifico
 - coefficiente di dilatazione termica
- dimensione caratteristica della superficie di contatto
- differenza di temperatura tra parete e fluido
- accelerazione di gravità ($g = 9.81 \text{ m/s}^2$)

h_c (aria) da 30 a 300 W/(m²K) h_c (acqua) da 3000 a 60000 W/(m²K)

IRRAGIAMENTO TERMICO

La propagazione del calore per irraggiamento avviene perché ogni corpo a temperatura maggiore dello zero assoluto emette "radiazioni elettromagnetiche". La radiazione si propaga in modo ondulatorio attraverso onde elettromagnetiche, definite da:

- **Lunghezza d'onda** λ (μm o nm): distanza percorsa dall'onda durante un'oscillazione completa.
- **Frequenza** f (1/s=Hz): numero di oscillazioni complete nell'unità di tempo.
- **Velocità di propagazione** c (m/s): velocità con cui si propaga l'onda elettromagnetica.

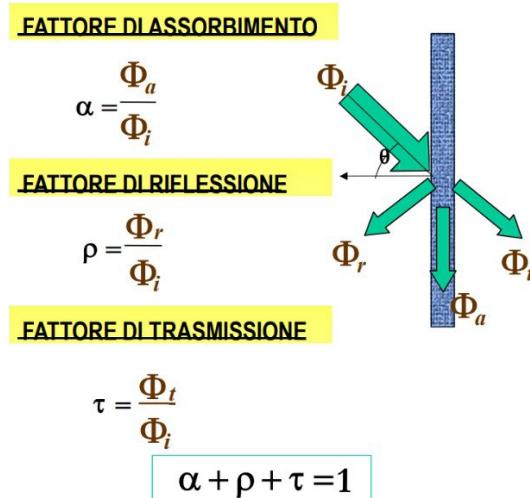
Sussiste il seguente legame: $c = \lambda \cdot f$

N.B. la propagazione del calore per irraggiamento avviene anche nel vuoto (a differenza della conduzione e della convezione). Velocità di propagazione nel vuoto $c = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$.

Si distinguono le radiazioni elettromagnetiche in funzione della lunghezza d'onda. Il campo compreso tra:

- < 0.38 μm radiazione ultravioletta
- 0.38- 0.78 μm radiazione visibile (**luce**)
- 0.8 - 100 μm radiazione infrarossa (**radiazione termica**)

Il flusso di radiazione (Φ_i) che incide su una superficie viene in parte trasmesso, in parte riflesso e in parte assorbito



EMISSIONE SUPERFICIALE

Il **potere emissivo (E)** di una superficie è il flusso di radiazione emesso per unità di superficie:

$$E = \frac{d\Phi}{dA}$$

Il **potere emissivo spettrale (E_λ)** di una superficie è il flusso di radiazione emesso per unità di superficie per unità di lunghezza d'onda:

$$E_{\lambda} = \frac{d^2\Phi}{dA \, d\lambda}$$

CORPO NERO

- Per ogni temperatura, a qualunque valore della lunghezza d'onda e per qualunque direzione, il corpo nero assorbe tutta l'energia radiante che incide su di esso ed emette la massima quantità di energia possibile.
- Il corpo nero emette in maniera uniforme in tutte le direzioni.
- L'emissione (globale e spettrale) del corpo nero obbedisce alle leggi di Planck, Stefan-Boltzmann, Wien.

LEGGE DI PLANCK

Il potere emissivo spettrale (E_λ) si ricava dalla lunghezza d'onda (λ) e dalla temperatura assoluta (T):

$$E_{\lambda} = \frac{C_1}{\lambda^5 (e^{C_2/\lambda \cdot T} - 1)}$$

LEGGE DI STEFAN-BOLTZMANN

Il potere emissivo globale (E) si ricava come:

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

dove $\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$

LEGGE DI WIEN

La lunghezza d'onda alla quale è massimo il potere emissivo spettrale si ricava da:

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

CORPO GRIGIO

corpi che emettono (e assorbono), in modo indipendente dalla lunghezza d'onda e dalla direzione, una frazione costante dell'energia che il corpo nero emette (e assorbe) a pari temperatura. Tale frazione, detta **emissività (ϵ)**, ha valori compresi tra 0 (riflettore ideale) e 1 (corpo nero). Per i corpi grigi valgono le medesime leggi del corpo nero, ma nelle leggi di Planck e Stefan Boltzmann si introduce ϵ come fattore moltiplicativo (riduttivo).

Per la legge di Kirchoff l'emissività coincide con il coefficiente di assorbimento (rapporto tra l'energia assorbita e l'energia incidente): $\epsilon = \alpha$

Lo scambio di calore tra due corpi grigi può essere espresso come:

$$F_{\epsilon} \cdot F_{1,2} \cdot A_1 \cdot \sigma \cdot (T_1^4 - T_2^4) \quad [\text{W}]$$

$F_{1,2}$ è il fattore di vista (o di forma), $0 \leq F_{1,2} \leq 1$

F_{ϵ} è funzione delle emissività dei due corpi, nonché della loro geometria.

Nei casi di interesse per l'edilizia, la suddetta espressione può essere opportunamente semplificata (linearizzazione):

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

Il coefficiente di scambio termico per irraggiamento (h_r), espresso in $[W/m^2K]$, dipende da:

- emissività dei due corpi;
- posizione reciproca dei corpi (fatt. di vista):
- temperature assolute dei corpi.

SCAMBIO TERMICO LIMINARE

Considerando la faccia di una parete a contatto della quale c'è dell'aria, lo scambio termico che si instaura è di due tipi: per convezione (con il fluido) e per irraggiamento (con i corpi solidi "visti" dalla parete).

Questo fenomeno di scambio (convezione + irraggiamento) si chiama scambio termico liminare (o superficiale).

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

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

$$\frac{Q_{(\text{conv+irr})}}{A} = (h_c + h_r) (t_p - t_s)$$

t_p = temperatura superficiale

t_a = temperatura dell'aria

t_s = temperatura media dei corpi "visti" dalla superficie

$$h = h_c + h_r$$

h = coefficiente di scambio termico liminare o adduttanza $[W/m^2C]$, $[W/m^2K]$

h assume differenti valori in relazione alla posizione della parete (orizzontale, verticale) e alle condizioni climatiche (vento, soleggiamento, temperatura). In una parete si ha quindi un coefficiente di scambio termico liminare interno h_i e coefficiente di scambio termico liminare esterno h_e .

TRASMITTANZA TERMICA

La trasmittanza termica della parete (U) è il flusso termico che in condizioni stazionarie attraversa l'unità di area di parete per differenza unitaria di temperatura interna (t_i) ed esterna (t_e):

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

Il flusso di calore per unità di superficie vale:

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

Il flusso di calore che attraversa complessivamente la parete:

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

PARETE MONOSTRATO OMOGENEA

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

t_i, t_e = temperature dell'aria interna ed esterna $[^{\circ}C]$, $[K]$

h_i, h_e = coefficiente di scambio termico liminare interno ed esterno $[W/m^2C]$, $[W/m^2K]$

s = spessore della parete $[m]$

λ = conducibilità termica della parete $[W/m^{\circ}C]$, $[W/mK]$

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

U = trasmittanza termica della parete monostrato $[W/m^2C]$, $[W/m^2K]$

PARETE MULTISTRATO

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

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

n = numero di strati costituiti da materiale omogeneo

m = numero di strati costituiti da materiale non omogeneo o intercapedini d'aria

DETERMINAZIONE DELLE TEMPERATURE

Note le temperature (t_i e t_e) degli ambienti e le caratteristiche della parete, è possibile calcolare il flusso termico e, successivamente, le temperature in corrispondenza delle superfici di separazione fra i diversi strati.

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

COMFORT TERMICO:

- stato psicofisico di soddisfazione – provate da individuo per condizioni termoigrometriche
- stato neutralità termica:
 - accumulo termico in corpo umano è NULLO
 - inattivi meccanismi termoregolazione comportamentale / vasomotrice
- neutralità termica dipende da microclima

AMBIENTI MODERATI E AMBIENTI SEVERI

- MODERATI: obiettivo condizioni di benessere termico (residenze, uffici, negozi)
- SEVERI: non si possono raggiungere condizioni benessere
 - ma occuparsi di tutela salute operatori—soggetti a stress termici (ambienti industriali, laboratori artigianali, cantieri)

SISTEMA DI TERMOREGOLAZIONE:

- corpo umano in 2 zone principali:
 - esterna—pelle e tessuti t: 33,7 C
 - interna --- nucleo con organi vitali t: 37 C
- corpo umano genera energia termica in maniera continua --- tra 100 W e 1000 W
- necessario che corpo sia mantenuto entro valori di temperatura – per evitare discomfort
- corpo umano deve dissipare una certa quantità di energia termica, per mantenere valori temperatura – funzione svolta da SISTEMA DI TERMOREGOLAZIONE corpo umano

FUNZIONAMENTO SISTEMA DI CONTROLLO:

- recettori termici --- segnali A IPOTALAMO --- confronta con valori riferimento – da segnali di errore
- determinano i SEGNALI EFFETTORI (ATTIVAZIONE meccanismi TERMOREGOLAZIONE)

MECCANISMI DI TERMOREGOLAZIONE:

-VASOMOTORIA:

in amb freddi --- diminuzione afflusso sangue verso periferia
amb caldi – aumento afflusso

-COMPORTAMENTALE

- freddi—brivido
- caldi—sudorazione

BILANCIO DI ENERGIA:

- corpo= sistema termodinamico --- scambia calore e lavoro con amb esterno
- lav + --- da sistema a ambiente
- calore - - - in uscita da sistema

PARAMETRI BENESSERE TERMOIGROMETRICO:

- 6 parametri
- 2 individuali – utenza
- metabolismo energetico
- resistenza termica abbigliamento
- 4 ambientali
- temp aria
- temp media radiante
- velocità aria
- umidità relativa aria

TEMPERATURA MEDIA RADIANTE

- temp uniforme ideale ---- in cui soggetto scambierebbe = calore per irraggiamento che scambia in ambiente reale
- media temp superficiali interne pareti --- su aree superficiali interne parete

METABOLISMO ENERGETICO:

- trasformazioni chimiche
- energia metabolica--- unità MET : 58,2 W/m²
- area sup uomo medio--- 1,8 m²
- 3 livelli – energetico basale/ riposo/ lavoro lordo

INDICI PMV E PPD

PMV

- funz matematica dei 6 parametri --- valore medio di un campione di persone
- scala sensazioni da -3 a +3

PPD

- percentuale persone soddisfatte da condizioni climatiche
- è un indice medio --- anche se = 0 non significa che tutti sono soddisfatti (5%)
- amb confortevole :

INDICI DI TEMPERATURA:

- temperatura operante:
temp uniforme in cui soggetto scambierebbe per convezione e irraggiamento --- = energia che scambia in ambiente reale non uniforme
- media temp aria e media radiante

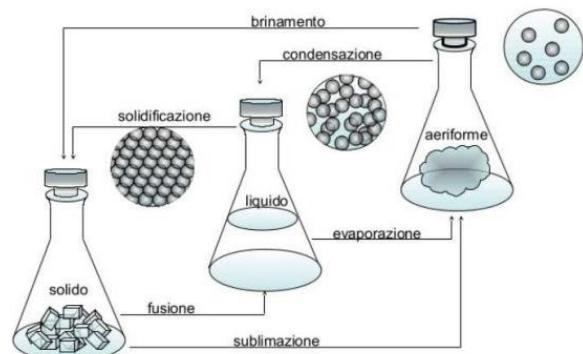
IL DISCOMFORT TERMICO LOCALE:

- causa:
- diff verticale di temperatura
- pavimento troppo caldo o freddo
- assimetria temp piana radiante
- correnti aria

2. PSICROMETRIA

Ogni sostanza è caratterizzata da stati di aggregazione (detti anche fasi) dipendenti dalle condizioni termodinamiche, cioè dai valori di pressione, volume e temperatura della sostanza stessa. Le fasi sono caratterizzate da alcune proprietà:

- **Fase solida** è caratterizzata da forma e volume propri, le forze intermolecolari sono talmente forti da determinare una struttura cristallina che ingabbia le molecole in posizioni ben determinate.
- **Fase liquida** è caratterizzata da volume proprio e forma variabile, le forze intermolecolari hanno intensità minore rispetto alla fase solida; tale intensità non è sufficiente a conferire una forma propria alla sostanza che, perciò, assume la forma del recipiente in cui è contenuta.
- **Fase aeriforme** è caratterizzata da volume e forma variabili, le forze intermolecolari sono talmente deboli (la minore intensità fra le tre fasi) da non poter vincere l'agitazione termica delle molecole; la sostanza tende ad occupare il maggior volume possibile; perciò, la forma ed il volume sono imposte dal contenitore. In genere si distinguono in gas e vapori a seconda delle condizioni termodinamiche.



REGOLA DELLE FASI O GIBBS

Il numero di gradi di libertà di un sistema (numero di coordinate indipendenti) V è dato da:

$$V = C - F + 2$$

C = n. componenti

F = n. fasi compresenti

Per una specifica sostanza si può osservare che se è presente un unico stato di aggregazione si ottiene $V=2$, cioè è possibile variare solo due coordinate termodinamiche e la terza è univocamente determinata; se sono presenti due stati di aggregazione contemporaneamente si ottiene $V=1$, cioè è possibile variare una unica coordinata e le altre due sono univocamente determinate; se sono presenti tutti e tre gli stati si ottiene $V=0$, cioè la condizione è determinata da una terna di valori ben precisi.

LEGGE DI GIBBS-DALTON

La pressione totale e l'energia interna totale di una miscela di gas sono pari alla somma, rispettivamente, delle pressioni e delle energie interne che ogni singolo gas avrebbe qualora occupasse, nelle stesse condizioni di temperatura, il volume totale della miscela.

Nel caso in cui si miscelino due o più gas ideali, si perviene ad una miscela ideale di gas ideali (che si comporta nuovamente come un gas ideale).

$$p = \sum_{i=1}^N p_i \quad U = \sum_{i=1}^N U_i$$

PSICROMETRIA

La psicrometria tratta le proprietà dell'ARIA UMIDA miscela bicomponente composta da aria secca + vapore acqueo.

GRANDEZZE PSICRONOMETRICHE

- Temperatura (t) [$^{\circ}\text{C}$]
- umidità specifica o umidità massica (x) [$\text{kg}_v / \text{kg}_a$]
- umidità relativa (f) (UR o RH) [%]
- entalpia specifica (h) [kJ/kg]

UMIDITA' SPECIFICA (x)

$$x = \frac{m_v}{m_a} \quad x = 0.622 \cdot \frac{p_v}{p - p_v} = 0.622 \cdot \frac{\varphi \cdot p_{vs}(t)}{p - \varphi \cdot p_{vs}(t)}$$

m_v = massa del vapore [kg]

m_a = massa di aria secca [kg]

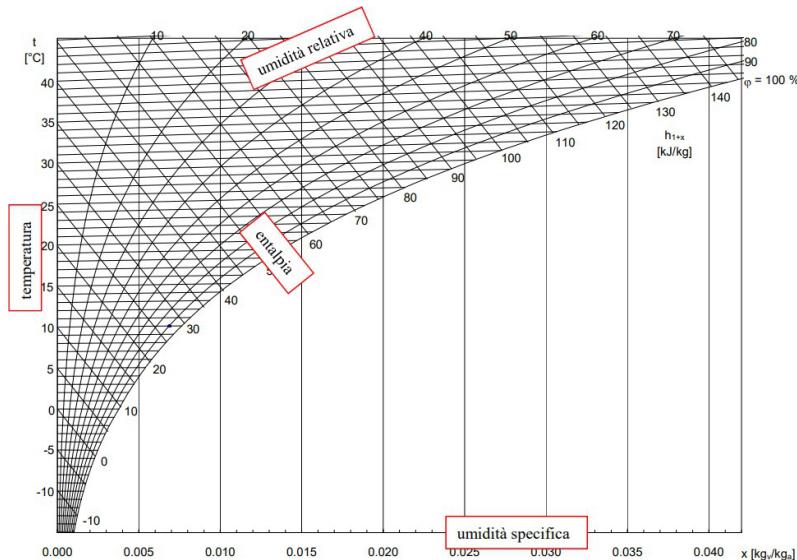
Dalla legge dei gas perfetti:

$$p \cdot V = m \cdot R^* \cdot T$$

- p = pressione del gas [Pa]
- V = volume occupato dal gas [m^3]
- m = massa del gas [kg]
- R^* = costante del gas [J/kg K]
- T = temperatura assoluta del gas [K]

DIAGRAMMA DI MOLLIER

Diagramma psicrometrico per rappresentare gli stati e le trasformazioni dell'aria umida. Note due qualsiasi delle variabili si possono leggere sul diagramma i valori delle altre due variabili.



TEMPERATURA DI RUGIADA

La temperatura di rugiada (t_{ru}) di una miscela (punto A) si legge sulla curva di saturazione e sulla iso-umidità specifica passante per A.

TEMPERATURA DI BULBO UMIDO

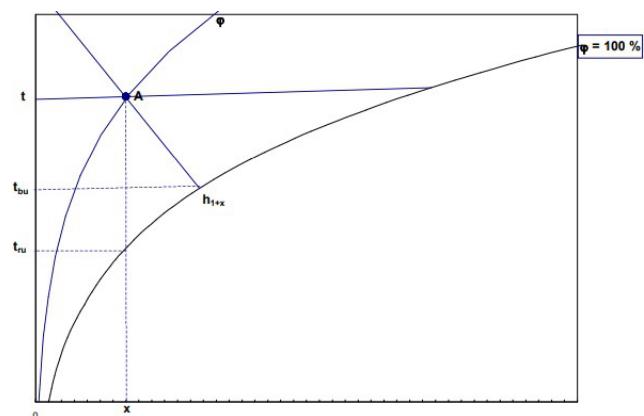
La temperatura a bulbo umido è la temperatura più bassa che può essere raggiunta per evaporazione dell'acqua, mantenendo costante la pressione atmosferica. Misurando con un termometro, il bulbo è avvolto in una garza umido ed esposto a un flusso d'aria.

La temperatura di bulbo umido (t_{bu}) di una miscela (punto A) si legge sulla curva di saturazione e sulla isoentalpica passante per A.

Per ogni trasformazione (da uno stato A a uno stato B) alla quale è soggetta una quantità (m_a) di aria umida, è possibile ricavare la variazione del contenuto di vapore (Δm_v) e la quantità di calore ceduta o sottratta alla miscela (Q):

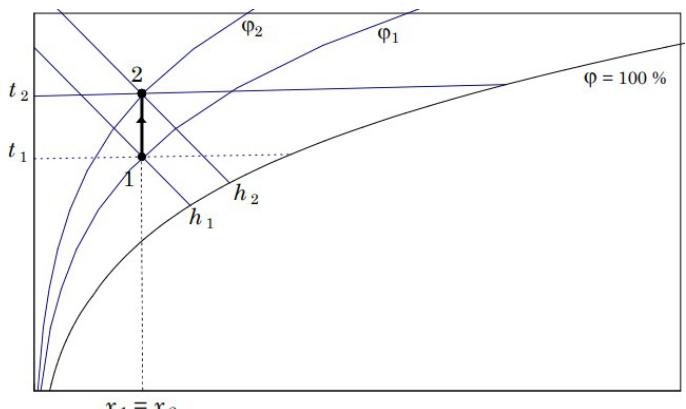
$$m_{H_2O} = \Delta m_v = m_a \cdot (x_B - x_A)$$

$$Q = m_a \cdot (h_B - h_A)$$



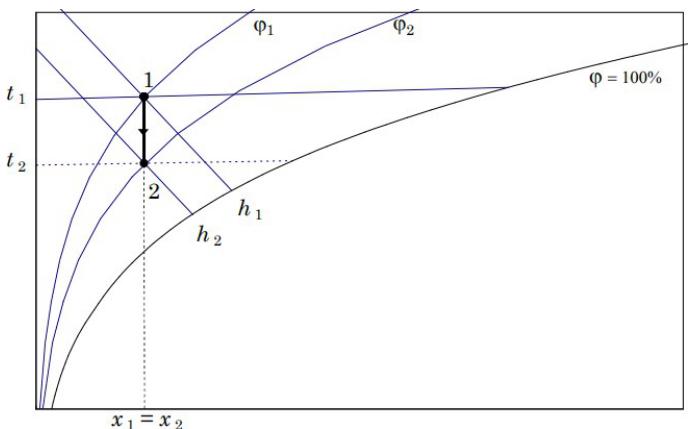
RISCALDAMENTO A UMIDITA' SPECIFICA COSTANTE

- t aumenta
- x resta costante
- h aumenta
- f diminuisce



RAFFREDDAMENTO A UMIDITA' SPECIFICA COSTANTE

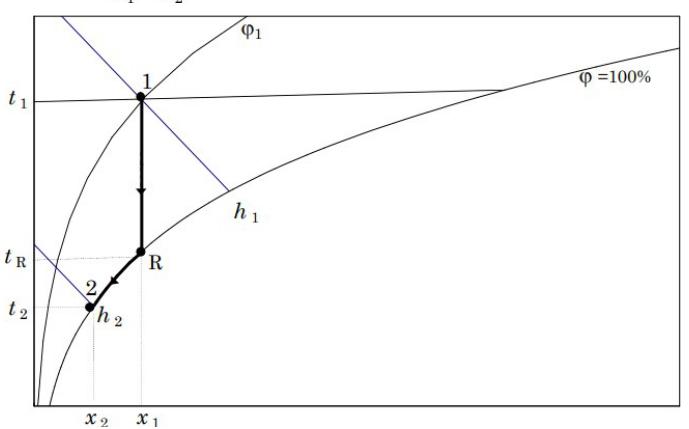
- t diminuisce
- x resta costante
- h diminuisce
- f aumenta (ma resta al di sotto del 100 %)



RAFFREDDAMENTO E DEUMIDIFICAZIONE

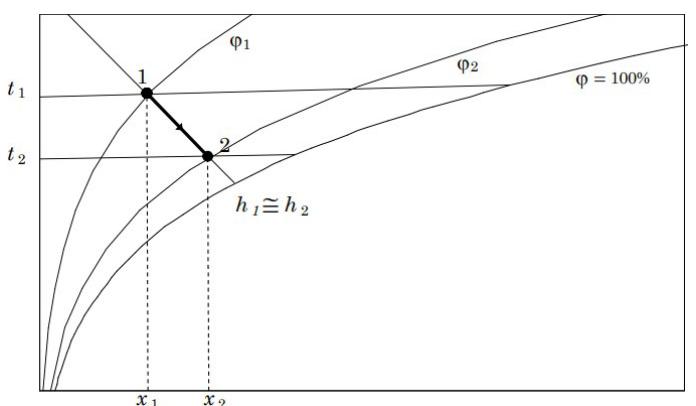
Si verifica quando il raffreddamento prosegue oltre il punto di rugiada (sulla curva di saturazione):

- t diminuisce
- x diminuisce
- h diminuisce
- f aumenta fino al 100 %



UMIDIFICAZIONE ADIABATICA ($h_l \approx 0$)

- t diminuisce
- x aumenta
- h resta costante
- f aumenta



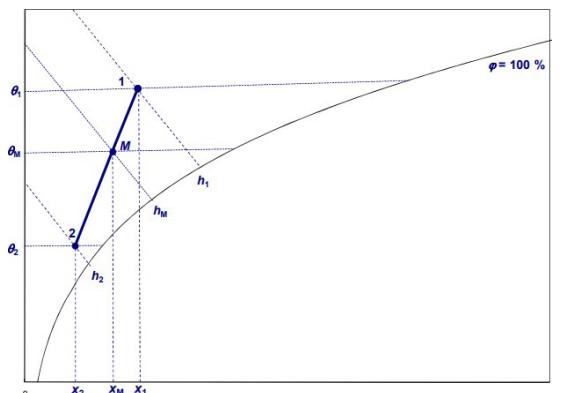
MISCELAZIONE DI PIÙ PORTATE

Si applicano i principi di conservazione della massa e dell'energia:

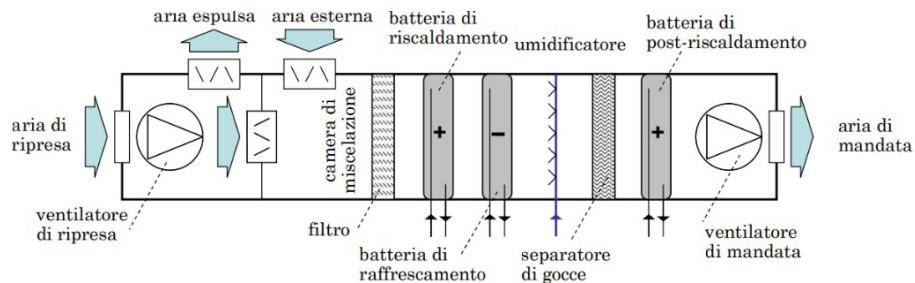
$$x_M = \frac{\dot{m}_{a,1}x_1 + \dot{m}_{a,2}x_2}{\dot{m}_{a,1} + \dot{m}_{a,2}}$$

$$h_M = \frac{\dot{m}_{a,1}h_1 + \dot{m}_{a,2}h_2}{\dot{m}_{a,1} + \dot{m}_{a,2}}$$

Il punto di miscelazione si trova sulla congiungente dei due punti che rappresentano le due portate.

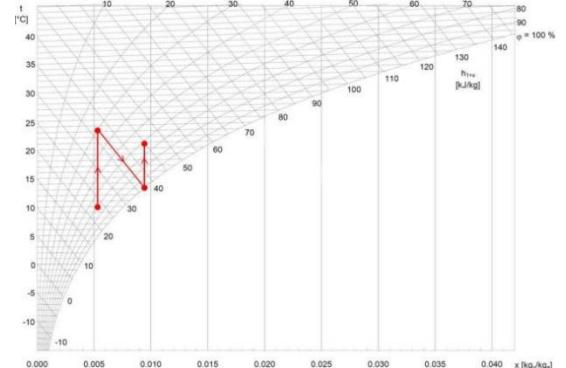


U.T.A.



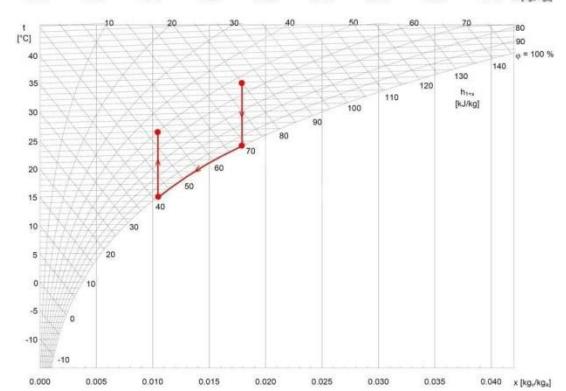
CONDIZIONE INVERNLE

- Riscaldamento (batteria di riscaldamento)
- Umidificazione (umidificatore)
- Post-riscaldamento (batteria di post-riscaldamento)



CONDIZIONE ESTIVA

- Raffreddamento e deumidificazione (batteria di raffreddamento)
- Post-riscaldamento (batteria di post-riscaldamento)



POTENZA BATTERIA

$$Q = m_a * (h_1 - h_2) = [\text{Kw}]$$

5. ILLUMINOTECHNICA

LUCE energia raggiante emessa in quantità discrete (quanta o fotoni di energia) la cui propagazione avviene per onde elettromagnetiche.

ONDA ELETROMAGNETICA generata dall'alternarsi ciclico di campi elettrici e campi magnetici.

GRANDEZZE CARATTERIZZANTI

- **LUNGHEZZA D'ONDA (λ)** distanza percorsa dall'onda durante un'oscillazione completa.
- **FREQUENZA (f)** numero di oscillazioni complete effettuate nell'unità di tempo.
- **VELOCITA' DI PROPAGAZIONE (C)** velocità con cui si propaga l'onda elettromagnetica.

$$C = \lambda * f$$

nel vuoto

$$C_0 = \lambda * f = 3 * 10^8$$

negli altri mezzi materiali

$$C = C_0 / n$$

(con n = indice di rifrazione del mezzo)

FLUSSO ENERGETICO

Energia emessa, trasportata o ricevuta sotto forma di radiazione nell'unità di tempo.

$$\Phi \quad [W]$$

INTENSITA' ENERGETICA

Flusso energetico emesso da una sorgente puntiforme per unità di angolo solido $d\omega$ in una data direzione.

$$I_e = \frac{d\Phi}{d\omega}$$

ANGOLO SOLIDO

Spazio racchiuso da un cono, che ha il vertice nel centro di una sfera di raggio R e che intercetta sulla stessa sfera un'area di estensione A .

$$\omega = \frac{A}{R^2}$$

LUCE FENOMENO PERCETTIVO

Ricettori:

- CONI: reagiscono a stimoli di una certa intensità e permettono la percezione dei colori.
- BASTONCELLI: reagiscono anche a stimoli di bassa intensità ma sono insensibili al colore.

PERCEZIONE DEI COLORI

L'organo visivo è stimolato differentemente a seconda della lunghezza d'onda della radiazione incidente. In un insieme di radiazioni monocromatiche non è possibile percepire le singole tonalità di colore.

Per una radiazione luminosa l'intensità soggettiva è funzione sia dell'intensità energetica (I_e) che della lunghezza d'onda (λ). In particolare, a parità di intensità energetica, essa è variabile a seconda della lunghezza d'onda. Per caratterizzare la variabilità dell'intensità soggettiva in funzione della lunghezza d'onda è stato determinato statisticamente il **FATTORE DI VISIBILITA' $K(\lambda)$** . In condizioni di intensità soggettiva equivalente vale la seguente relazione:

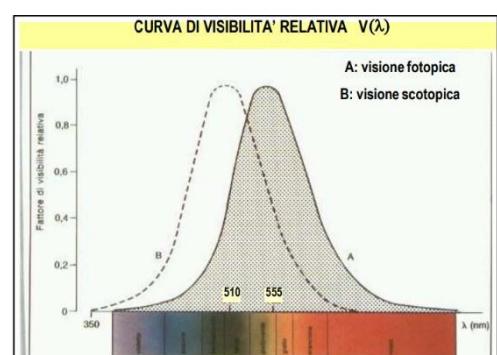
$$K_1(\lambda_1) \Phi_e(\lambda_1) = K_2(\lambda_2) \Phi_e(\lambda_2)$$

VISIONE FOTOPICA in presenza di intensità energetiche di una certa entità (visione diurno).

VISIONE SCOTOPICA in presenza di intensità energetiche molto scarse (visione notturna).

FATTORE DI VISIBILITA' RELATIVA $V(\lambda)$

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



LE GRANDEZZE FOTOMETRICHE

- **FLUSSO LUMINOSO** quantità di energia luminosa emessa da una sorgente nell'unità di tempo.

- LUCE MONOCROMATICA

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

- LUCE ETEROCROMATICA

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

$$= K_{\max} \cdot \Delta\lambda \cdot \sum_{i=1}^n V_i \cdot \Phi_{e,i}$$

$K_{\max} = 683 \text{ Im/W}$ Fattore di conversione da grandezze energetiche a grandezze luminose.

- **INTENSITA' LUMINOSA** flusso luminoso emesso da una sorgente puntiforme, per unità di angolo solido in una determinata direzione (densità angolare del flusso).

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

N.B. L'indicatore di emissione è un **diagramma fotometrico** che mostra la **distribuzione dell'intensità luminosa** (misurata in candela, cd) di una sorgente in funzione dell'angolo rispetto all'asse del fascio luminoso.

- **LUMINANZA** rapporto tra flusso luminoso emesso o riflesso da una superficie luminosa, per unità di angolo solido in una determinata direzione, e la superficie emettente proiettata su un piano perpendicolare alla direzione stessa.

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

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

- **ILLUMINAMENTO** rapporto tra il flusso luminoso incidente su una superficie elementare e l'area della superficie elementare stessa.

$$E = \frac{d\Phi}{dA} \quad \left[\frac{\text{Im}}{\text{m}^2} = \text{lx} \right]$$

- **EMETTENZA LUMINOSA** rapporto tra il flusso luminoso emesso da un elemento di superficie e l'area dell'elemento stesso.

$$M = \frac{d\Phi}{dA} \quad \left[\frac{\text{Im}}{\text{m}^2} \right]$$

- **TEMPERATURA DI COLORE CORRELATA** esprime la tonalità di colore della luce confrontandola in modo diretto con la temperatura assoluta di un corpo nero che irradia luce con la stessa tonalità di colore emessa dalla sorgente in esame.

INTERAZIONE LUCE-SUPERFICI

Il flusso luminoso incidente su una superficie viene in parte **assorbito**, in parte **riflesso** ed in parte **trasmesso**

FATTORE DI ASSORBIMENTO

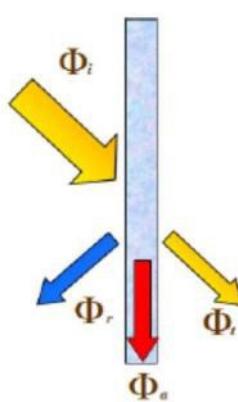
$$\alpha_i = \frac{\Phi_a}{\Phi_i} \quad \%$$

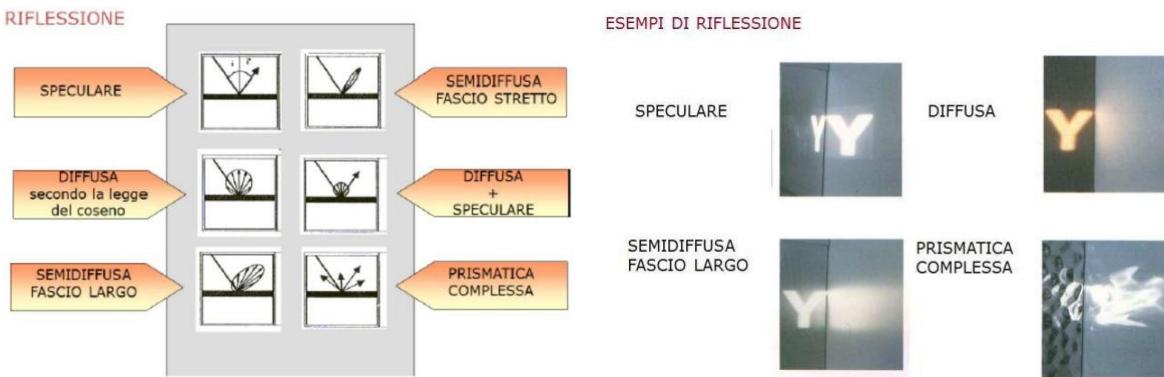
FATTORE DI RIFLESSIONE

$$\rho_i = \frac{\Phi_r}{\Phi_i} \quad \%$$

FATTORE DI TRASMISSIONE

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





L'ILLUMINAZIONE NATURALE DI UN AMBIENTE CONFINATO

IL SOLE radiazione diretta

LA VOLTA CELESTE radiazione diffusa e riflessa dal terreno

EFFICIENZA LUMINOSA DELLA RADIAZIONE SOLARE

$$\eta_n = \frac{\Phi_l}{\Phi_e} = \frac{\text{FLUSSO LUMINOSO}}{\text{FLUSSO ENERGETICO}} \quad [\text{lm/W}]$$

dipende da:

- altezza solare
- copertura nuvolosa
- contenuto di vapor acqueo in atmosfera

valori caratteristici

radiazione globale a cielo sereno 80 - 115 lm/W

radiazione globale a cielo coperto 100 - 130 lm/W

radiazione diffusa a cielo sereno 110 - 150 lm/W

radiazione diretta 50 - 120 lm/W

In funzione dell'efficienza luminosa, nota l'irradianza solare I , si determina l'illuminamento sulla superficie terrestre:

$$\eta_n = \frac{\Phi_l}{\Phi_e} = \frac{E}{I} \quad E = \eta_n \cdot I$$

VOLTA CELESTE

L'illuminamento prodotto dalla volta celeste su una superficie varia in relazione alla sua luminanza. La distribuzione della luminanza dipende da vari fattori:

- posizione del sole
- condizioni metereologiche
- torbidità

Per descrivere le diverse situazioni che si possono verificare sono stati proposti dei MODELLI DI CIELO:

- **CIELO SERENO** Distribuzione di luminanza variabile in funzione della posizione del sole.
- **CIELO COPERTO A LUMINANZA COSTANTE** Distribuzione di luminanza uniforme.
- **CIELO COPERTO A LUMINANZA VARIABILE** Distribuzione di luminanza variabile in funzione dell'angolo solare zenitale.

IL PROGETTO DELL'ILLUMINAZIONE NATURALE

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).

$$\Phi_d$$

- dal flusso luminoso riflesso proveniente dalle ostruzioni e dalle superfici esterne (terreno, edifici adiacenti).

$$\Phi_{r,e}$$

- dal flusso luminoso indiretto generato dalle riflessioni multiple che si verificano sulle superfici interne dell'ambiente.

$$\Phi_{r,i}$$

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

METODI DI CALCOLO

I metodi di calcolo possono essere suddivisi in due categorie:

- Metodi basati sul concetto di **FATTORE DI LUCE DIURNA**

Forniscono un valore adimensionale, costante nel tempo, che caratterizza le condizioni di illuminamento interno rispetto all'esterno.

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

$$FLD = SC + ERC + IRC \quad [\%]$$

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

$SC = E_d / E_{e,h}$ = 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

Consente il calcolo simultaneo della componente diretta, riflessa esternamente e riflessa internamente

$$FLD_m = \frac{E_{i,med}}{E_{e,h}}$$

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

$$FLD_m = \frac{A_f \cdot \tau_i}{(1 - \rho_{i,m}) \cdot A_{tot}} \cdot \varepsilon \cdot \psi \quad [\%]$$

A_f = superficie vetrata netta della finestra [m^2]

τ_i = fattore di trasmissione luminosa del vetro

$\rho_{i,m}$ = fattore di riflessione luminosa medio ponderato delle superfici interne dell'ambiente

ε = fattore finestra: $\varepsilon = 1$ per superfici orizzontali prive di ostruzioni

$\varepsilon = 0,5$ per superfici verticali prive di ostruzioni

$\varepsilon < 0,5$ per superfici verticali in presenza di ostruzioni

ψ = fattore di riduzione del fattore finestra

	FLD _m ≥ 1%	FLD _m ≥ 2%	FLD _m ≥ 3%	FLD _m ≥ 5%
Edilizia residenziale	—	tutti i locali di abitazione	—	—
Edilizia scolastica	uffici, spazi di distribuzione, scale, servizi igienici	palestre, refettori, e aule comuni	ambienti a uso didattico, laboratori	aule giochi, aule nido
Edilizia ospedaliera	come edilizia scolastica	palestre e refettori	ambienti di degenza, diagnostica, laboratori	—

- Metodi basati sul concetto di **FATTORE DI UTILIZZAZIONE**

Forniscono un valore di illuminamento, variabile nel tempo e in rapporto alle condizioni esterne di cielo, in alcuni punti dell'ambiente interno.

METODO DEL FLUSSO TOTALE LUCE NATURALE

Per finestre verticali:

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

E_i = illuminamento interno

$E_{e,f}$ = illuminamento esterno sul piano della finestra

τ_i = fattore di trasmissione luminosa

CU = fattore di utilizzazione (da tabelle) • finestra verticale • lucernario

FATTORE DI UTILIZZAZIONE

Rapporto tra il flusso luminoso utile che raggiunge il punto in esame rispetto al flusso luminoso totale entrante.

METODO DEL FLUSSO TOTALE LUCE ARTIFICIALE

$$\Phi_t = \frac{E_m \cdot A}{U \cdot M}$$

U = fattore di utilizzazione

rapporto tra il flusso luminoso che raggiunge il piano utile ed il flusso luminoso totale emesso. Dipende da:

- rendimento degli apparecchi.
- modalità di distribuzione della luce da parte degli apparecchi.
- dimensioni, proporzioni dell'ambiente e altezza di sospensione degli apparecchi (indice del locale).
- fattori medi di riflessione delle superfici dell'ambiente.

M = fattore di manutenzione

Dipende da:

- grado di invecchiamento delle lampade.
- frequenza della pulizia.
- caratteristiche dell'attività svolta.

A = area del piano utile

Φ_t = flusso luminoso totale emesso dalle sorgenti

Corrisponde al numero degli apparecchi per il flusso nominale delle sorgenti stesse (Φ_n).

$$\Phi_t = N \cdot \Phi_n$$

CARATTERISTICHE SORGENTI LUMINORE

- **EFFICIENZA LUMINOSA** Rapporto tra il flusso luminoso emesso e la potenza elettrica assorbita.
- **DURATA MEDIA** Periodo di funzionamento dopo il quale, in un lotto di sorgenti in condizioni di prova, il 50% cessa di funzionare.
- **TEMPO DI ACCENSIONE E RIACCENSIONE** Tempo che intercorre tra la chiusura del circuito elettrico e l'emissione del flusso luminoso.

CRITERI DI PROGETTO

- Profondità --- ambienti illuminati
- garantire vista verso esterno
- considerare effettomodellato---risultante da direzionalità luce naturale
- valutare colore luce trasmessa da vetro

INTERAZIONE LUCE/ SUPERFICE:

- energia luminosa su superficie --- in parte assorbita, riflessa, trasmessa

FATTORE DI ASSORBIMENTO LUMINOSO, RIFLESSIONE, TRASMISSIONE

VETRI ASSORBENTI:

- consentono grazie a elevato—coefficiente assorbimento sole --- controllo apporti solari
- valori coeff assorbimento varia--- per spessore lastra e colore
- parsol verde

VETRI RIFLETTENTI:

- ottenuti tramide ossidi metallici su lastra vetrata
- elevato coeff riflessione solare --- varia per spessore, tipo ossido/ metallo, tecnologia deposizione

VETRI SELETTIVI SPETTRALI:

- comportamento diverso per diverse lunghezze d'onda
- per ossidi metallici su superficie--- elevata trasmissione luminosa, - coeff trasmissione solare totale, - trasmittanza termica

COMPONENTE SCHERMANTE:

- veneziane / microlamelle in vetro camera/ schermi ombreggianti

COMPONENTE DI CONDUZIONE

- camini di luce

LE SORGENTI LUMINOSE, CLASSIFICAZIONE

-in base principio **PRODUZIONE LUCE**:

-incandescenza

-scarica nei gas

-solid state lighting

INCANDESCENZA:

-irrag termico --- corpo con temp > 0 emette radiazione elettromagneticca

-principio funzionamento:

-filamento metallico --- percorso da corrente

--metallo si surriscalda --- per effetto Joule emette radiazioni, anche in spettro visibile

-gas inerte---- ritarda evaporazione tungsteno --- porta filamento a elevata temperatura

-vapore tungsteno condensa su pareti bulbo + fredde --- anneriscono

-sublimazione atomi tungsteno --- riduzione sezione del filamento fino a rottura

INCANDESCENTI: ALOGENE

-con bulbo in quarzo – dim + ridotte

-con filamento tungsteno spiralizzato – miscela gas inerti con sostanze alogene

funzionamento:

-filamento tungsteno --- a incandescenza sublima

-vapori verso parete interna bulbo – temp 700 C

-tungsteno si combina con alogeni – in parete bulbo, forma alogenuri

-alogenuri verso il filamento

-elevata temperatura ---alogenuri si dissociano in alogeni e tungsteno

-tungsteno si rideposita su filamento --- parzialmente si rigenera

PRINCIPIO PRODUZIONE LUCE: SCARICA GAS

-1atomo—nucleo intorno elettroni con orbite determinate

ogni orbita—un livello energetico

-2 con quantità energia – elettrone salta da orbita all’altra, liv energetico superiore

-3 condizione instabile, breve --- elettrone ritorna a stato iniziale --- libera energia, emissione energia elettromagnetica

LA SORGENTE A SCARICA NEI GAS, FUNZIONAMENTO

-tubo scarica --- tubo con elettrodi sigillati --- riempito di gas, tra cui un metallo

-scarica elettrica --- su elettroni liberi, li mette in moto

-provoca—collisioni atomi del metallo--- avviene ionizzazione

-scarica—trasferita a gas d’innesto al metallo

-scarica luogo sia in bassa che alta pressione

SORGENTI FLUORESCENTI

-proprietà materiale --- emette radiazioni visibili quando eccitato da radiazioni ultraviolette

-due estremi bulbo – elettrodi

-scarica innescata da gas ausiliari

-tubo con vapore di mercurio --- eccitato produce radiaz ultraviolette

---radiaz trasformata in radiaz visibile --- da polveri fluorescenti in rivestim tubo

SOLID STATE LIGHTING:

-COMPOSIZIONE LED

-substrato --- strato di tipo n (ricco di atomi che rilasciano elettroni) e uno di tipo p (ricco di atomi che catturano elettroni --- lasciano buche di carica positiva)

-tra due strati --- strato attivo neutro

-se tensione tra strati p e n --- elettroni e buche confluiscono in strato attivo—emettono luce

DIODO: funzione: flusso corrente in un verso e bloccarla nell’altro

I LED:

-è un diodo – da materiale semiconduttore --- in grado di produrre fotoni per emissione

-diodo è drogato --- crea congiunzione p-n

Funzionamento

-con tensione diretta---elettroni in strato n – si ricombinano con strato p

-elettroni cedono energia --- in forma di luce – a frequenza che dipende da elementi per drogare mat semiconduttore

--in base elementi droganti – luce div lunghezze d’onda e colori

SORGENTI LUMINOSE CRITERI SCELTA

-minimizzare danno

-cromaticità

-comfort

-min consumi energetici

-min costi manutenzione

PARAMETRI VALUTAZIONE PRESTAZIONI

-aspetti illuminotecnici:

flusso luminoso

decadimento flusso luminoso

indice cromatico

temp colore

-economici

efficienza

durata

-funzionali

tempo accensione

ASPETTI ILLUMINOTECNICI:

FLUSSO LUMINOSO: quantità luce emessa da sorgente, in unità tempo

DECADIMENTO: diminuità capacità di emettere flusso luminoso

RESA CROMATICA: grado fedeltà restituire colori in rapporto sorgente riferimento

TEMPERATURA COLORE: cromacità luce emessa --- temp in kelvin in cui occorre portare corpo nero – affinchè emetta radiaz cromatica = a emessa da sorgente

ASPETTI VALUTAZIONI PRESTAZIONI

ECONOMICI

EFFICIENZA LUMINOSA: rendimento sorgente, rapp flusso e potenza elettrica assorbita

DURATA MEDIA: periodo funzionamento --- dopo quanto 50% non funziona

FUNZIONALI

TEMPO ACCENSIONE RIACCENSIONE: tempo tra chiusura circuito e emissione flusso

CLASSIFICAZIONE PER RIPARTIZIONE FLUSSO LUMINOSO

-6 gruppi – funzione flusso emesso da apparecchio --- sopra e sotto piano orizzontale per asse lampada

-diretto / diffuso – indiretto – semi

CLASSIFICAZIONE PER MODALITÀ CONTROLLO E DISTRIBUZIONE FLUSSO LUMINOSO

-elem per diffondere, concentrare, sagomare, colorare, schermare luce

-riflettori

-diffusori

-lenti

-schermi

-rifrattori

-litri

PARAMETRI CARATTERIZZANTI APPARECCHI

-indicatore emissione

-apertura fascio luminoso

-rendimento luminoso

-grado protezione

-classe protezione elettrica

-sicurezza termica

INDICATRICE EMISSIONE:

-- curva—rappresenta distribuzione intensità luminosa in piano passante per centro luminoso

APERTURA FASCIO LUMINOSO

-angolo – in piano passante per asse fascio – in cui intensità luminosa è al 50% del valore massimo

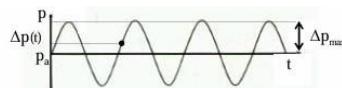
-stretto < 20 medio 20-40 largo > 40

RENDIMENTO LUMINOSO

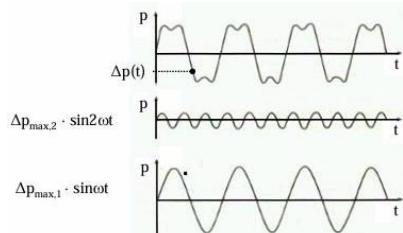
-indicatore resa luminosa --- rispetto sorgente

4. ACUSTICA

Suono puro Fenomeno sonoro sinusoidale.



Suono complesso Fenomeno sonoro periodico decomponibile in componenti sinusoidali elementari dette armoniche.



La potenza sonora emessa da una sorgente si irradia in tutte le direzioni dando origine in ogni punto dello spazio circostante ad una intensità sonora.

GRANDEZZE CARATTERIZZANTI

- **PERIODO (T)** tempo necessario a compiere una oscillazione completa (una di compressione più una di depressione).

$$T = 1/f$$

- **FREQUENZA (f)** numero di oscillazioni complete effettuate dalla sorgente sonora nell'unità di tempo.
- **LUNGHEZZA D'ONDA (λ)** distanza percorsa dall'onda sonora in un periodo.
- **VELOCITA' DEL SUONO (c)** velocità con cui si propagano le onde sonore, varia in funzione della natura del mezzo, della sua struttura molecolare, della sua densità, ecc.

$$c = \lambda * f$$

INTENSITA' SONORA (I)

Rappresenta la potenza sonora che attraversa l'unità di superficie normale alla direzione di propagazione dell'energia sonora.

ONDE PIANE

Fascio di onde sonore che si propagano tutte nella stessa direzione, caratterizzato da una sezione normale costante, con fronti d'onda piani

$$I = \frac{W}{S} \quad \left[\frac{W}{m^2} \right]$$

ONDE SFERICHE

L'energia sonora viene diffusa su superfici sferiche il cui centro è la sorgente sonora ed il cui raggio cresce con il propagarsi del suono. In un campo di onde sferiche l'intensità varia inversamente al quadrato della distanza dalla sorgente.

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

Nello spazio libero (campo libero), per un'onda piana o un fronte d'onda sferico a sufficiente distanza dalla sorgente, si dimostra che l'intensità sonora è proporzionale al quadrato della pressione sonora.

$$I = \frac{p^2}{\rho c} \quad \left[\frac{W}{m^2} \right]$$

p [kg/m³] = massa volumica del mezzo nel quale si propaga l'onda sonora

ρc = impedenza acustica del mezzo, per l'aria a $t = 20$ °C $p_a = 101300$ Pa

$\rho c = 412$ kg/m²s

DENSITA' SONORA

È l'energia sonora localizzata nell'unità di volume all'intorno di un punto nel campo sonoro.

$$U = \frac{E}{V} \quad \left[\frac{J}{m^3} \right]$$

SUONO FENOMENO PERCETTIVO

Livello di **intensità** sonora $I_0 = 10^{-12} \text{ W/m}^2$. Al raddoppio dell'intensità sonora si ha un incremento del livello di intensità sonora di 3 dB

$$L_I = 10 \log \frac{I}{I_0} \quad [\text{dB}]$$

I = intensità sonora in esame $[\text{W/m}^2]$
 I_0 = intensità sonora di riferimento, assunta pari a 10^{-12} W/m^2

Livello di **pressione** sonora $p_0 = 2 \cdot 10^{-5} \text{ Pa}$. Al raddoppio della pressione sonora si ha un incremento del livello di pressione sonora di 6 Db

$$L_p = 10 \log \frac{p^2}{p_0^2} = 20 \log \frac{p}{p_0} \quad [\text{dB}]$$

p = pressione sonora in esame $[\text{Pa}]$
 p_0 = pressione di riferimento, assunta pari a $2 \cdot 10^{-5} \text{ Pa}$, corrispondente alla soglia di udibilità a 1000 Hz

Somma di livelli sonori:

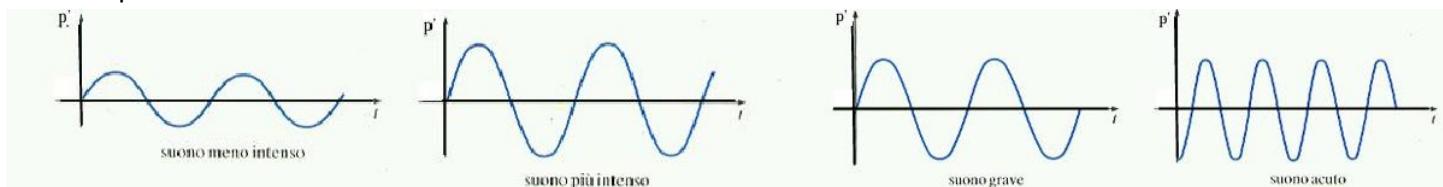
$$L_{p_{\text{TOT}}} = 10 \log \left(\frac{\sum_{i=1}^n p_i^2}{p_0^2} \right) = 10 \log \left(\sum_{i=1}^n 10^{\frac{L_{p_i}}{10}} \right) \quad [\text{dB}]$$

Livello di **potenza** sonora $W_0 = 10^{-12} \text{ W}$.

$$L_w = 10 \log \frac{W}{W_0} \quad [\text{dB}]$$

W = potenza sonora in esame $[\text{W}]$
 W_0 = potenza sonora di riferimento, assunta pari a 10^{-12} W

I suoni si distinguono in **DEBOLI** e **FORTI** in ragione del livello sonoro ed in **ACUTI** e **GRAVI** (o **ALTI** e **BASSI**) in ragione della frequenza.



Per un suono puro l'intensità soggettiva è funzione sia del livello sonoro che della frequenza.

LIVELLO SONORO GLOBALE

È un suono, formato dall'energia contenuta in ciascuna banda di frequenze.

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

LIVELLO SONORO GLOBALE PONDERATO

con: $L^{*125,250,\dots}$ = Livello sonoro ponderato per ciascuna banda di frequenze.

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

I CAMPI SONORI

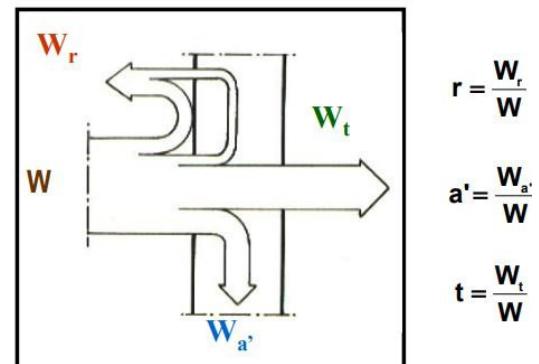
Porzione di spazio interessata dalle variazioni di pressione.

- **Il campo libero** campo sonoro che si genera in assenza di ostacoli riflettenti. Sussiste solo il contributo delle onde dirette. (Si riproduce in laboratorio nelle camere anechoiche)
- **Il campo riverberato** Campo sonoro che si genera in un ambiente chiuso quando il contributo delle onde riflesse è largamente prevalente su quello delle onde dirette. La densità di energia sonora è uniforme. (Si riproduce in laboratorio nelle camere riverberanti)
- **Il campo semiriverberato** Campo sonoro che si genera negli ambienti chiusi quando per ogni punto del campo non si ha una prevalenza netta delle onde dirette (campo libero) o di quelle riflesse (campo riverberato). (Il modello di campo semiriverberato sostituisce quello di campo riverberato per elevati valori di a_m (indicativamente per $a_m > 0,4$))

IL SUONO NEGLI AMBIENTI CONFINATI

Quando un'onda sonora che si propaga nell'aria incide su una parete l'energia sonora ad essa associata viene in parte riflessa, in parte assorbita e in parte trasmessa. Le frazioni di energia riflessa, assorbita e trasmessa vengono denominate rispettivamente fattore di riflessione (r), assorbimento (a') e trasmissione (t). Si tratta di tre quantità adimensionate.

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



FATTORE DI ASSORBIMENTO ACUSTICO (APPARENTE) O POTERE FONOASSORBENTE

Rappresenta l'energia sonora assorbita e trasmessa da un materiale ad una determinata frequenza.

Dipende da:

- tipologia della parete (materiale, finitura, installazione)
- frequenza dell'onda incidente
- angolo di incidenza dell'onda

$$a = a' + t$$

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_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

FATTORE DI ASSORBIMENTO ACUSTICO MEDIO DI UN AMBIENTE

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

SORGENTE SFERICA IN CAMPO LIBERO

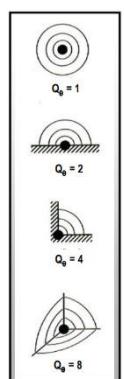
Nel caso di propagazione per onde sferiche l'intensità sonora è uguale per tutti i punti aventi la stessa distanza dalla sorgente.

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

SORGENTE OMNIDIREZIONALE IN PRESENZA DI SUPERFICI RIFLETTENTI

Fattore di direttività per una sorgente sonora omnidirezionale in diverse posizioni, in prossimità di superficie riflettenti.

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



Le riflessioni rinforzano il suono diretto se però sono eccessive o troppo deboli si ha una cattiva ricezione. La qualità della percezione può essere valutata grazie al tempo di riverberazione.

TEMPO CONVENZIONALE DI RIVERBERAZIONE

È il tempo necessario affinché il livello sonoro si riduca di 60 dB rispetto al valore che si ha nell'istante in cui la sorgente sonora cessa di funzionare.

Relazione di sabine:

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

A_{TOT} = unità assorbenti [m^2]

V = volume della sala [m^3]

Il valore ottimale del tempo convenzionale di riverberazione alla frequenza di 1000 Hz si può desumere dalla formula empirica:

$$t_{OTT, 1000} = k \cdot G \cdot V = [s]$$

$k = 0,3 - 0,4$ linguaggio parlato

$0,5 - 0,8$ musica

Il valore ottimale del tempo convenzionale di riverberazione cambia con la frequenza.

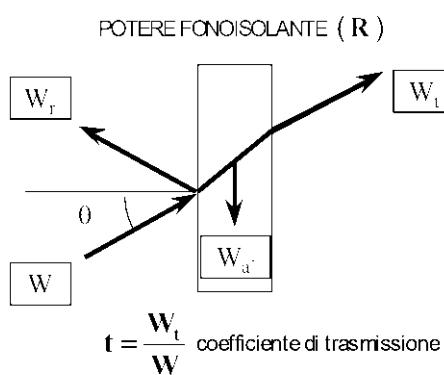
DISTANZA CRITICA

È la distanza, rispetto alla sorgente, alla quale il contributo di energia dovuto al campo diretto uguaglia quello dovuto al campo riverberato.

$$d_c = \sqrt{\frac{Q_\theta \cdot R}{16 \cdot \pi}}$$

POTERE FONOISOLANTE (R)

Rappresenta il grado di isolamento di una parete piana, sia orizzontale che verticale, nei confronti dei rumori aerei che incidono su di essa si definisce.



dove: W_t / W_i = potenza sonora trasmessa oltre il divisorio
 W_i / W_i = potenza sonora incidente sul divisorio

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

R dipende dalle proprietà geometriche e fisiche della parete, varia con la frequenza e l'angolo θ di incidenza del suono.

LEGGE DELLA MASSA

Secondo la legge della massa il potere fonoisolante cresce con la frequenza del suono e la massa frontale. N.B. raddoppiando la frequenza o la massa frontale il potere fonoisolante R aumenta di 6 Db.

INCIDENZA NORMALE

$$R_0 = 20 \log(f \cdot m) - 42.5 \quad [dB]$$

dove:

f = frequenza [Hz]

m = massa frontale [kg/m^2]

INCIDENZA DIFFUSA

La legge della massa deve essere corretta per tenere conto dell'incidenza caotica delle onde sonore

$$R = 20 \log(f \cdot m) - 48 \quad [dB]$$

FENOMENI DI RISONANZA

Quando la frequenza del suono incidente coincide con la frequenza di risonanza propria della parete, quest'ultima oscilla con un'ampiezza nettamente maggiore che alle altre frequenze e trasmette quasi tutta l'energia sonora che riceve. R diminuisce alle frequenze di risonanza. Fattori di influenza:

- condizioni di vincolo
- densità ed elasticità del materiale
- dimensioni e spessore della parete

EFFETTO DI COINCIDENZA

L'effetto di coincidenza si verifica quando esistono onde acustiche incidenti che hanno lunghezza d'onda λ_a la cui proiezione sul pannello è pari alla lunghezza d'onda λ_f . In tali situazioni la parete irradia onde acustiche nell'aria circostante. fattori di influenza:

- densità ed elasticità del materiale
- spessore della parete

MATERIALI FONOASSORBENTI

Meccanismo di dissipazione	Tipo di materiale
Assorbimento per porosità	Materiali porosi a struttura cellulare o fibrosa - Espansi a cella aperta di origine minerale (vetro cellulare, argilla espansa) - Resine espansate a cella aperta (poliuretano, ecc.) - Fibre minerali (lana di vetro / roccia) - Fibre vegetali (legno mineralizzato) - Fibre sintetiche (poliestere)
Assorbimento per risonanza di membrana	Pannelli vibranti - Lastre in legno - Lastre in gesso
Assorbimento per risonanza di cavità	Risonatori acustici (pannelli forati a parete o controsoffitto) - In legno - In gesso - In metallo