

# Il microclima del museo



Gli ambienti interni, nei quali di solito sono conservati le opere d'arte e i beni culturali in generale, possono essere caratterizzati attraverso tipologie o categorie di parametri ambientali come quelli fisici che sono certamente i più conosciuti e adottati. Questi parametri sono misurabili con apparecchiature specifiche e con procedure codificate.

I principali parametri fisici utilizzati per il rilevamento delle caratteristiche microclimatiche sono: la temperatura e l'umidità dell'aria; la ventilazione o spostamento di masse d'aria all'interno degli ambienti e lo scambio fra ambiente interno e ambiente esterno; la radiazione luminosa naturale e artificiale. A questi parametri principali ne possiamo aggiungere altri come le vibrazioni alle quali le strutture e gli oggetti vengono sottoposti e la polverosità degli ambienti.

acqua contenuta nel materiale e in equilibrio con l'aria ambiente. Nel legno possiamo verificare che se l'umidità relativa varia fra 10 e 90% il valore di EMC sarà fra 2 e 20% a seconda del tipo e delle condizioni del legno (fig. 1.7).

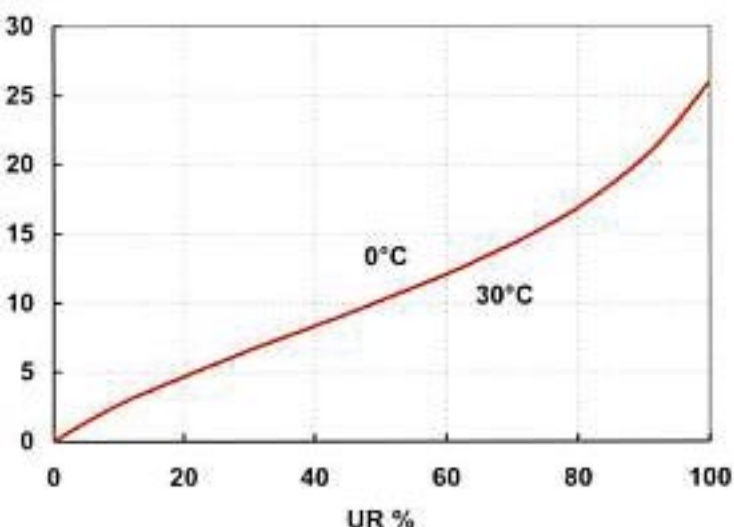


**Fig 1.7** Equilibrio del contenuto percentuale (EMC%) di acqua nel legno (curva rossa) in relazione all'umidità relativa (UR%) dell'aria circostante.

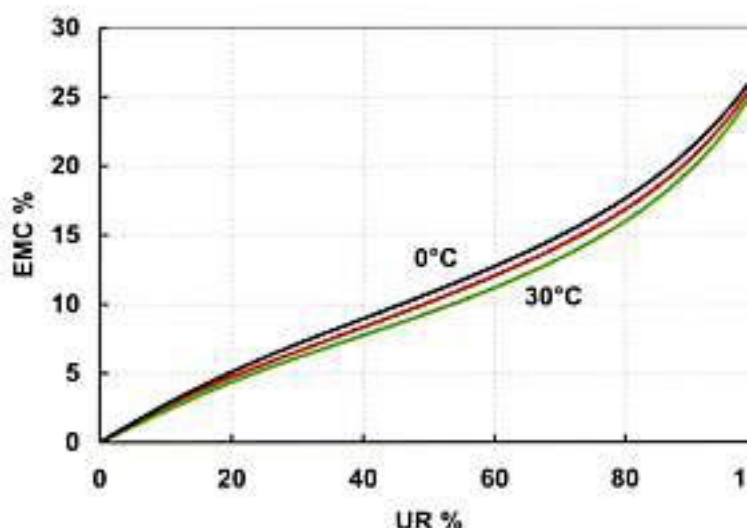
## Sintesi

### L'UMIDITÀ

- La **bassa umidità relativa** negli ambienti di esposizione e di deposito è pericolosa tanto quanto l'eccessiva umidità soprattutto quando sono presenti materiali nei quali l'acqua entra a far parte della struttura del materiale stesso come acqua di imbibizione o acqua legata a livello molecolare come nel caso della cellulosa nella carta o nelle fibre del legno. Disidratati, questi materiali perdono la loro elasticità.
- Generalmente misuriamo l'**umidità relativa UR** come indice di presenza di vapore nell'ambiente e la utilizziamo per le strategie di conservazione. L'**umidità assoluta UA** e l'**umidità specifica US** vengono maggiormente usate in termotecnica per la progettazione di impianti di climatizzazione. Ovviamente tutte e tre le grandezze sono correlate tra loro.
- UR e UA dipendono dalla temperatura, mentre US è indipendente.
- L'umidità relativa non è distribuita uniformemente in un ambiente, poiché è legata alla distribuzione della temperatura. Dove si verificheranno sensibili differenze di temperatura, come in prossimità di pareti, porte, finestre, sorgenti di calore, avremo sensibili variazioni di umidità relativa.

Referenze: [7,18,21,27,28]

**Fig 1.8** Equilibrio del contenuto percentuale (EMC%) di acqua nel legno in relazione alla umidità relativa (UR%) dell'aria e alle temperature 0°, 15°, 30° C.



Anche la temperatura dell'ambiente contribuisce a modificare il reale contenuto d'acqua nel legno come possiamo vedere dal grafico della fig. 1.8 che presenta le percentuali di EMC a 0, 15 e 30 °C. Come è possibile notare, nell'intervallo 40 - 60% di UR la differenza di EMC raggiunge il 10% quando il legno passa dalla temperatura di 0° a 30 °C.

L'acqua all'interno del legno normalmente è presente in 4 forme:

- acqua di imbibizione (libera)
- acqua di saturazione delle pareti cellulari (legata)
- acqua di costituzione (chimica)
- vapore acqueo presente nelle cavità del legno

L'acqua di imbibizione e di saturazione sono soggette a variazioni di equilibrio con l'umidità dell'aria; l'acqua di costituzione, no. Anche altri materiali come cotone, lino, lana, gel di silice ed intonaco si comportano alla stessa maniera e di conseguenza il controllo della temperatura risulta altrettanto importante quanto l'umidità relativa e fornisce spunti per un intelligente impiego delle sostanze e dei materiali per l'assorbimento dell'umidità.

### 1.2.3 Ventilazione

La ventilazione degli ambienti può essere attuata naturalmente attraverso la regolazione dell'apertura di porte e finestre, oppure per mezzo di apparecchiature per la circolazione dell'aria spesso collegate a sistemi di climatizzazione. Nel primo caso il controllo dell'effetto di queste manovre, apertura e chiusura finestre, risulta piuttosto difficoltoso e quel che più conta, viene spesso effettua-

to con decisioni basate su sensazioni personali: aver caldo o freddo, sentire odori o semplicemente sentire la necessità del "ricambio d'aria". Molto raramente queste operazioni vengono fatte con termometro e igrometro alla mano per correzioni microclimatiche. Nel secondo caso, la ventilazione degli ambienti rispetterà un preciso progetto che punterà su un certo numero di ricambi d'aria nel tempo (es. 1 ricambio dell'intero volume della sala ogni ora) e sarà accompagnata da un trattamento dell'aria convogliata che sarà riscaldata, raffreddata, umidificata, deumidificata e filtrata rispettando valori prefissati.

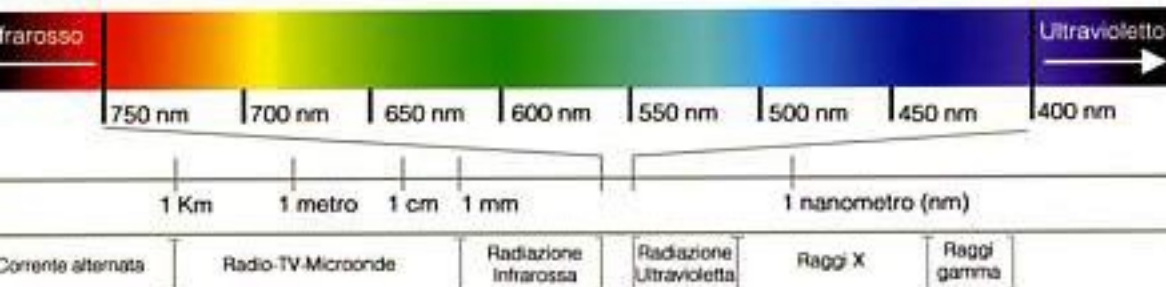
La circolazione dell'aria negli ambienti può essere misurata con l'anemometro a filo caldo che permette misure di velocità molto basse come le velocità prescritte dalle norme di sicurezza negli ambienti di lavoro, velocità che si aggirano attorno a 0.1 - 0.3 metri al secondo [7, 30].

Anche nei musei possono esservi esigenze di misure della ventilazione motivate dal controllo del benessere del personale, ma certamente questo tipo di misura può essere sollecitato da situazioni ambientali interne non idonee per la conservazione come ad esempio la correzione delle immissioni di aria dalle bocchette del sistema di ventilazione o, nel caso di ventilazione naturale, la necessità di regolare le aperture che possono introdurre negli ambienti interni l'aerosol inquinante della atmosfera urbana.

## 1.2.4 Luce

La luce è come sappiamo la parte dello spettro elettromagnetico che il nostro occhio può vedere. La lunghezza d'onda della luce visibile va indicativamente da 400 nanometri a 700 nanometri (fig. 1.9). La massima sensibilità dell'occhio è all'incirca a 555 nm, in corrispondenza del colore verde.

**Fig 1.9** Lo spettro della radiazione visibile dall'occhio umano e ai lati la banda dell'infrarosso e dell'ultravioletto. In basso, la gamma più estesa di tutte le altre radiazioni elettromagnetiche.



La luce viene misurata attraverso le seguenti unità di misura:

*Flusso luminoso* è misurato in **lumen** (lm) e indica la quantità di energia luminosa emessa nell'unità di tempo (il secondo) da una sorgente. Per energia luminosa si intende, per convenzione, quella emessa nell'intervallo da 380 e 780 nanometri che comprende quindi la radiazione infrarossa e ultravioletta.

*Intensità luminosa* la cui unità di misura è la **candela** (cd), indica la quantità di flusso luminoso emessa da una sorgente all'interno dell'angolo solido in direzione data. Una sorgente luminosa puntiforme emette radiazione della stessa intensità, in tutte le direzioni quindi il suo flusso luminoso si propaga uniformemente come generato dal centro di una sfera. Le sorgenti luminose artificiali non emettono luce in modo uniforme in tutte le direzioni dello spazio. I cataloghi degli apparecchi di illuminazione riportano spesso le curve fotometriche la cui conoscenza è molto importante in quanto in base ad essa è possibile verificare se l'apparecchio di illuminazione scelto distribuisce la luce nel modo richiesto.

*Illuminamento* la cui unità di misura è il **lux** (lx) rappresenta il rapporto tra il flusso luminoso ricevuto da una superficie e l'area stessa. In altre parole indica la quantità di luce che colpisce un'unità di superficie.

Ecco alcuni dati di illuminamento per dare un'idea di quanto vale un lux:

- la luce del Sole mediamente varia fra i 32.000 lx (32 klx) e i 100.000 lx (100 klx);
- sotto i riflettori degli studi televisivi si hanno circa 1.000 lx (1 klx);
- in un ufficio luminoso si hanno circa 400 lx;
- in un ufficio illuminato secondo l'attuale normativa europea Uni En 12464 vi sono 500 lx
- le opere esposte in un museo non dovrebbero ricevere più di 50 lx

Lux e lumen sono due diverse misure del *flusso luminoso*, ma mentre il lumen è una misura assoluta della "quantità di luce", il lux è una misura relativa ad un'area. Così 1 lumen su un'area di 1 m<sup>2</sup> corrisponde ad 1 lux, mentre lo stesso lumen concentrato in 1 cm<sup>2</sup> corrisponde a 10.000 lux.

*Luminanza* la cui unità di misura è la **candela per metro quadrato** (cd/m<sup>2</sup>) è il rapporto tra l'intensità luminosa emessa da una superficie in una data direzione e l'area apparente di tale superficie. È importante sottolineare la differenza esistente tra illuminamento e luminanza: se la prima grandezza indica la quantità di luce emessa da una sorgente che colpisce la superficie considerata, la

seconda indica la sensazione di luminosità che riceviamo da questa superficie; ciò significa che su due superfici, una bianca e l'altra nera, possiamo avere lo stesso valore d'illuminamento, ad esempio 500 lux, ma la sensazione di luminosità ricevuta e quindi la luminanza sarà completamente differente in quanto le due superfici riflettono la luce in modo diverso.

L'intensità luminosa di una lampada e l'illuminamento, cioè la quantità di luce che arriva sull'oggetto, sono i parametri principali per la progettazione di un sistema di illuminazione di sale e di vetrine che in ogni caso dovrà tenere in considerazione la natura degli oggetti da illuminare, le raccomandazioni di conservazione e le norme di impianto e sicurezza (fig. 1.10) [4, 53, 54].

**Fig 1.10** La progettazione dell'illuminazione di una sala richiede la conoscenza delle esigenze di conservazione degli oggetti e le caratteristiche illuminotecniche dell'impianto che dovrà essere installato. **a** e **b** sorgenti luminose a LED prive di emissioni IR e UV; **c** sorgente alogena a basso voltaggio, molto utilizzata per illuminazione spot.

## Sintesi

### RIASSUNTO DELLE UNITÀ DI MISURA CHE RIGUARDANO LA MISURAZIONE DELLA RADIAZIONE LUMINOSA

| GRANDEZZA           | UNITÀ DI MISURA   | APPLICAZIONE                                                                                                                                                                                                                                                    |
|---------------------|-------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Flusso energetico   | Watt W            | Energia radiante elettromagnetica, per lo più rappresentata suddivisa sullo spettro (a seconda della lunghezza d'onda)                                                                                                                                          |
| Sensibilità visiva  | V                 | Definisce quali sezioni dello spettro (gamme di lunghezza d'onda) vengono percepite dall'occhio sotto forma di luce                                                                                                                                             |
| Flusso luminoso     | lumen lm          | È il flusso energetico percepito con la sensibilità visiva e rappresenta una delle più importanti proprietà delle lampade: per quest'ultima ragione viene sempre indicato nei listini dei fabbricanti di lampade                                                |
| Efficienza luminosa | lm/W              | È proporzionale al rendimento del processo di trasformazione della potenza elettrica assorbito in flusso luminoso, ed è perciò uno stimolo continuo a sviluppare lampade con una maggiore efficienza luminosa e con un minor consumo d'energia                  |
| Intensità luminosa  | candela cd        | Rappresenta la percentuale di flusso luminoso di una sorgente luminosa in una determinata direzione. Serve per calcolare la distribuzione della luce.                                                                                                           |
| Illuminamento       | lux lx            | Rappresenta il flusso luminoso per m <sup>2</sup> di una superficie illuminata (1 lx = 1 lm/m <sup>2</sup> ). Grazie alla sua estrema semplicità è il riferimento più usato nei progetti d'impianti d'illuminazione                                             |
| Luminanza           | cd/m <sup>2</sup> | Rappresenta la luminosità di lampade ed oggetti illuminati come viene recepita dagli occhi ed è il riferimento più importante per un'accurata progettazione di impianti di illuminazione per ambienti di lavoro dove è importante assicurare una visione ottima |



## Approfondimento

### LA TEMPERATURA DI COLORE

Nella scelta dell'illuminazione artificiale dobbiamo tenere conto della "temperatura di colore" (Fig.1.11) e della "tonalità" che caratterizzano ogni tipo di sorgente luminosa. La temperatura di colore, la cui unità di misura è il grado Kelvin (K), ha come riferimento l'emissione del corpo nero. La parte della radiazione visibile preponderante è funzione diretta della temperatura di colore " $T_c$ ", cioè tanto più grande è  $T_c$  tanto più si accentua la parte azzurra della radiazione, mentre per valori piccoli di  $T_c$  si accentua la parte rossa della radiazione visibile.

Ad esempio, la luce emessa da una lampada ad incandescenza ha  $T_c$  pari a circa 2.700 K, mentre la luce diurna a mezzogiorno presenta un valore di  $T_c$  pari a 6.000 K.

La tonalità della luce è funzione della temperatura di colore come possiamo vedere dai dati riportati di seguito:

- tono caldo < 3.300 K
- tono neutro 3.300 - 5.000 K
- tono bianchissimo K 5.500
- luce diurna > K 5.600



**Fig. 1.11** Una superficie riscaldata all'incandescenza emette prevalentemente nella gamma della luce visibile. La luce calda corrisponde alle temperature più basse, mentre la luce fredda corrisponde alle temperature più alte.

Abbiamo indicato come caratterizzare una sorgente luminosa attraverso una serie di misure. Dobbiamo ora valutare quale tipo di illuminazione si adatti meglio alle nostre esigenze per poi scegliere fra i prodotti che sono disponibili sul mercato, suddivisi nelle seguenti categorie:

- lampade ad incandescenza
- lampade ad incandescenza ad alogeni
- lampade a scarica
- lampade fluorescenti
- diodi a emissione luminosa (LED)

L'illuminazione con fibre ottiche non va considerata come tipo di lampada ma come modo per trasportare la luce su di un oggetto.

Tab 1.1

## PRINCIPALI TIPI DI LAMPADE A CONFRONTO

| TIPO DI LAMPADA                                              | VANTAGGI                                                                                                                                                                      | SVANTAGGI                                                                                                                                   |
|--------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Incandescenza                                                | Costo d'acquisto basso<br>Dimensioni contenute<br>Ottimo indice di resa cromatica<br>Regolazione possibile                                                                    | Breve durata<br>Elevati costi di esercizio<br>Elevato sviluppo di calore<br>Bassa efficienza                                                |
| Fluorescenza                                                 | Elevata efficienza<br>Lunga durata<br>Sviluppo modesto di calore<br>Possibile scegliere la temperatura di colore<br>Costo di esercizio basso                                  | Costo iniziale elevato<br>Sensibile alla temperatura<br>Controllo ottico limitato<br>È necessario un alimentatore<br>Luce con componente UV |
| Alogene                                                      | Elevata efficienza<br>Lunga durata<br>Ottimo indice di resa cromatica<br>Piccole dimensioni<br>Regolazione possibile<br>Luce bianca brillante                                 | Elevato sviluppo di calore<br>È necessario un alimentatore<br>Luce con componente UV                                                        |
| Alogenuri metallici                                          | Elevata efficienza<br>Lunga durata<br>Buona resa cromatica<br>Buon controllo ottico<br>Costo di esercizio basso                                                               | Costo iniziale elevato<br>Lungo periodo di accensione<br>È necessario un alimentatore                                                       |
| Modio ad alta pressione<br>(grandi ambienti<br>spazi aperti) | Elevata efficienza<br>Lunga durata<br>Buon controllo ottico<br>Basso decadimento del flusso<br>Costo di esercizio basso                                                       | Costo iniziale elevato<br>È necessario un alimentatore<br>Lungo periodo di accensione<br>Bassa resa cromatica                               |
| LED (diodi a emissione<br>luminosa)                          | Luce pulita priva di componente IR e UV<br>Scelta della temperatura di colore<br>Assenza di costi di manutenzione<br>Bassa tensione<br>Lunga durata<br>Costo d'acquisto basso | È necessario un alimentatore                                                                                                                |

mantenendo lontana la sorgente. Questo sistema viene spesso utilizzato per evitare il riscaldamento da illuminazione all'interno di vetrine.

Di seguito riportiamo le principali caratteristiche operative delle lampade più diffuse per l'illuminazione di ambienti, dalle grandi sale alle vetrine.

Come tutti sappiamo il tipo di illuminazione da adottare all'interno di un museo deve soddisfare le seguenti caratteristiche:

- essere privo della componente ultravioletta che provoca alterazione dei pigmenti colorati
- essere privo o a bassa emissione della componente infrarossa (calore)
- essere regolabile in intensità luminosa.

## Sintesi

### LA LUCE

- La radiazione luminosa naturale e artificiale è comunque dannosa ai fini della conservazione e pertanto va limitata e controllata al pari della umidità e della temperatura.
- La progettazione e l'utilizzo dei sistemi di illuminazione debbono essere trattati con professionalità da operatori esperti nelle problematiche del settore museale e specificatamente nella conservazione. Non sempre questi criteri vengono rispettati e spesso sono sacrificati a criteri estetici o impiantistici.
- I danni provocati dalla radiazione luminosa sono spesso associati alla presenza di elevata umidità ambientale.
- Nella scelta della sorgente luminosa vanno considerate sia l'intensità che la qualità (spettro di emissione) della luce, non solo per ragioni di resa cromatica ma soprattutto di effetto dannoso sull'oggetto illuminato.

Referenze: [1,2,3,4,5,6,10,12,43,53,54]

Altre caratteristiche illuminotecniche possono essere aggiunte, come la possibilità di regolazione del fascio luminoso, l'orientabilità della sorgente luminosa o l'aggiunta di schermi e filtri.

La tabella 1.1 riporta le lampade che non dovrebbero essere utilizzate per l'illuminazione di sale e vetrine, e quelle che meglio si prestano per gli allestimenti museali.

Da evitare sono le lampade a incandescenza per la grande emissione di calore oltre che per il basso rendimento energetico, le lampade a fluorescenza e quelle alogene che emettono radiazione ultravioletta. Queste ultime, soprattutto quando sono utilizzate per l'illuminazione di vetrine, debbono essere installate al di fuori per evitare il riscaldamento dei ridotti volumi e debbono essere opportunamente schermate con vetro per diminuire l'emissione UV.

Dagli anni '90 sono disponibili nuovi sistemi di illuminazione basati sui LED ad alta emissione luminosa e privi sia della componente IR che UV, oltre ad offrire il vantaggio di bassi consumi e alimentazione a bassa tensione.

Riguardo all'impiego delle lampade o tubi a fluorescenza (erroneamente dette "al neon" che sono tutt'altra cosa) va esercitato un controllo accurato anche nei depositi, nei magazzini e nei locali di consultazione, spesso considerati erroneamente locali di minor importanza rispetto alle sale di esposizione.

## 1.2 I PARAMETRI FISICI DELL'AMBIENTE

### 1.2.1 Temperatura e Calore

**"La temperatura è la grandezza fisica che esprime lo stato termico di un sistema e descrive la sua attitudine a scambiare calore con l'ambiente o con altri corpi"**

Quando due sistemi sono posti a contatto termico, il calore fluisce dal sistema a temperatura maggiore a quello a temperatura minore, fino al raggiungimento dell'equilibrio termico, in cui i due sistemi si trovano alla stessa temperatura.

Il trasferimento di calore può avvenire per conduzione, convezione o irraggiamento. Le proprietà formali della temperatura sono studiate dalla termodinamica. La temperatura è correlata alla quantità di energia termica o calore di un sistema. Se viene aggiunto calore la temperatura sale e nello stesso modo un decremento di temperatura corrisponde a una perdita di calore del sistema. Su scala microscopica, questo calore corrisponde al movimento casuale degli atomi e delle molecole del sistema. Quindi un incremento di temperatura corrisponde a un incremento del movimento degli atomi o delle molecole del sistema.

## Sintesi

### LA TEMPERATURA

- è una grandezza di cui tutti abbiamo una percezione fisica e tutti sappiamo che si misura con uno strumento chiamato termometro.
- è una proprietà caratteristica dei corpi (variabile di stato), dipende cioè dallo stato del sistema/oggetto che stiamo esaminando e non dalla sua storia precedente.
- varia in relazione alla temperatura dei corpi vicini (equilibrio termico), può variare in presenza di interazioni con altri fenomeni come il riscaldamento per attrito, il riscaldamento o il raffreddamento da reazioni chimiche o da emissione o cessione di radiazioni infrarosse.
- è una grandezza "statistica", è legata cioè all'energia media di un alto numero di particelle che fanno parte del sistema, dell'oggetto, del materiale che stiamo esaminando.
- è singolare la modalità di misura e di determinazione dell'unità di misura (scale termometriche); misuriamo infatti con diversi tipi di termometro e con differenti scale termometriche come la scala Celsius, che usiamo noi, e la scala Fahrenheit usata negli Stati Uniti.

Referenze: [7,13,14,15,52]





Molte proprietà fisiche dei materiali, inclusi lo stato (gas, liquido, solido), la densità, la solubilità, la pressione del vapore e la conducibilità elettrica dipendono dalla temperatura. La temperatura gioca inoltre un ruolo importante nel determinare la velocità delle reazioni chimiche. La temperatura è una proprietà intrinseca di un sistema, intendendo con ciò che non dipende dalle dimensioni o dalla quantità di materia del sistema. Altre proprietà intrinseche includono pressione e densità. Per contro, massa e volume sono proprietà estrinseche, e dipendono dalla quantità di materia presente nel sistema.

Il concetto di temperatura è associato all'idea di fornire una misura relativa di quanto i corpi risultano freddi o caldi al tatto. I termini temperatura e calore sono quindi correlati, ma si riferiscono a concetti diversi come abbiamo già accennato: la temperatura è una proprietà di un corpo, mentre il calore è una forma di energia che fluisce da un corpo a un altro, per colmare una differenza di temperatura.

Per ottenere misure di temperatura si sfruttano generalmente metodi indiretti, basati sugli effetti di processi di riscaldamento o raffreddamento; il metodo più usato consiste nella misurazione della dilatazione termica subita dai corpi. Il convenzionale termometro a mercurio misura la variazione di volume del mercurio posto in un capillare di vetro, quando è messo in contatto termico con un corpo di temperatura ignota. L'allungamento della colonna di mercurio è proporzionale alla temperatura del corpo.

## Approfondimento

### LE SCALE TERMOMETRICHE

Una delle prime scale di temperatura fu ideata nel 1720 dal fisico tedesco Gabriel Daniel Fahrenheit. Nella scala Fahrenheit, alla pressione di 1 atmosfera, la temperatura di congelamento dell'acqua corrisponde al valore di temperatura di  $32^{\circ}\text{F}$ , mentre al suo punto di ebollizione si attribuisce il valore di  $212^{\circ}\text{F}$ . Nella scala centigrada, o Celsius, introdotta dall'astronomo svedese Anders Celsius (1701-1744) e impiegata nella maggior parte dei paesi, il punto di fusione dell'acqua corrisponde a  $0^{\circ}\text{C}$ , quello di ebollizione a  $100^{\circ}\text{C}$ . Le due scale differiscono dunque sia per i valori assegnati al

punto di congelamento e di ebollizione dell'acqua, sia per il numero di gradi in cui tale intervallo di riferimento resta suddiviso. Nella scala Fahrenheit, l'intervallo si estende da  $32^{\circ}\text{F}$  a  $212^{\circ}\text{F}$  e corrisponde a un'escursione termica di 180 gradi, mentre nella scala Celsius l'intervallo, da  $0^{\circ}\text{C}$  a  $100^{\circ}\text{C}$ , corrisponde a 100 gradi. In ambito scientifico è invece più diffuso l'uso della cosiddetta scala assoluta, o Kelvin, inventata dal matematico e fisico britannico William Thomson Kelvin. In questa scala, lo zero assoluto è collocato a  $-273,15^{\circ}\text{C}$  (pari dunque a  $0\text{ K}$ ), mentre l'unità di misura della scala, il

grado Kelvin, corrisponde all'escursione termica di un grado centigrado. La conversione fra queste due scale richiede perciò solo un cambiamento dello zero di riferimento: a  $0^{\circ}\text{C}$  corrispondono  $273,15\text{ K}$ . Il fattore di conversione fra le scale e alcuni valori esemplificativi sono mostrati nella tabella "Conversione fra scale di temperatura: da gradi Celsius a gradi Kelvin". Va ricordato che lo zero assoluto è un valore di temperatura che non può essere fisicamente raggiunto: a esso comunque ci si può avvicinare, mediante tecniche speciali di raffreddamento, che vanno sotto il nome di criogenia.

**"Il calore è quel tipo di energia che viene scambiata fra corpi a temperatura diversa o in transizioni di fase (es. un liquido che diventa un gas)"**

Il calore trasferito ad un corpo, attraversata la superficie di contorno che separa il corpo dall'ambiente, si trasforma in energia accumulata.

Il calore è energia in transito: fluisce sempre dai punti a temperatura maggiore a quelli a temperatura minore, finché non viene raggiunto l'equilibrio termico. Un poco come l'acqua che naturalmente scende dai livelli superiori a quelli inferiori, e mai al contrario.

La quantità di calore richiesta per produrre la trasformazione di fase, detta anche cambiamento di stato, per unità di massa di una sostanza è detta calore latente; vi sono quindi calori latenti di fusione, di vaporizzazione e di sublimazione. Se si porta a ebollizione dell'acqua in un recipiente aperto alla pressione di 1 atmosfera, la temperatura non sale oltre i 100 °C, indipendentemente dalla quantità di calore fornito. Il calore assorbito dall'acqua è il calore latente, che viene speso per trasformare l'acqua in vapore ed è pertanto immagazzinato come energia nel vapore stesso. Servono circa 540 calorie per trasformare 1 grammo di acqua in vapore. Analogamente, se si riscalda un miscuglio di ghiaccio e

acqua, la temperatura non varia fino a quando il processo di fusione del ghiaccio non è completo. Il calore latente assorbito in questo caso serve a vincere le forze che tengono unite le particelle di ghiaccio. Servono 80 calorie per sciogliere 1 grammo di ghiaccio in acqua.

**"Un parametro caratteristico delle sostanze è il calore specifico che è la quantità di calore necessaria ad innalzare di un grado centigrado la temperatura dell'unità di massa di una certa sostanza"**

Ad esempio per innalzare di 1 °C 1 grammo d'acqua occorre 1 caloria, mentre basta 1/2 caloria per innalzare di 1 °C la stessa quantità di alcol etilico e ancora meno calore serve per scaldare 1 grammo di ferro poiché è sufficiente 1/10 di caloria per innalzarne la temperatura di 1 grado. A questo punto vi sarete accorti che abbiamo introdotto una nuova unità di misura: la caloria. A dire la verità l'abbiamo "inventata" in questo momento poiché la caloria è una unità di misura dell'energia che viene definita attraverso l'esempio precedente ovvero, la caloria è la quantità di calore necessaria per innalzare di 1 grado 1 grammo di acqua distillata.

Esaminiamo ora come "l'energia calore" si trasmette da un punto all'altro dell'ambiente. La propagazione o trasmissione di calore può avvenire all'interno di un corpo, in aria tra corpi distinti e anche nel vuoto. Sebbene il calore che fluisce non possa essere misurato o osservato in maniera diretta, se ne possono misurare ed osservare gli effetti prodotti. La propagazione del calore avviene per conduzione, convezione e irraggiamento.

Nella trasmissione di calore per *conduzione* (fig. 1.4) possiamo esaminare il caso di due corpi a diretto contatto e a temperatura diversa, vedendo come l'energia di vibrazione delle molecole o atomi del corpo più caldo si trasferisca al secondo corpo, facendone aumentare la temperatura.

**Fig. 1.4** Trasferimento di calore ( $Q$ ) per conduzione dal corpo a temperatura maggiore  $T_1$  a quello a temperatura minore  $T_2$ .



## Approfondimenti

### CALORIA E JOULE

Fino agli inizi del XIX secolo l'effetto del calore era spiegato postulando l'esistenza di un fluido invisibile detto "calorico", capace di trasferirsi dai corpi più caldi a quelli più freddi. Sebbene la teoria del calorico spiegasse bene alcuni fenomeni di propagazione del calore, alcuni esperimenti condotti nel 1798 da Benjamin Thompson e nel 1799 da Humphry Davy suggerirono che il calore fosse una forma di energia. Questa ipotesi venne confer-

mata dalle ricerche compiute tra il 1840 e 1849 dal fisico James Prescott Joule. In fisica, si adotta per il calore la stessa unità di misura valida per il lavoro e l'energia, cioè il joule, usato oggi nel Sistema Internazionale. Spesso tuttavia si fa uso di un'altra unità, detta caloria, che è definita come la quantità di calore necessaria a portare la temperatura di 1 grammo di acqua da 14,5 °C a 15,5 °C in condizioni di pressione ordinaria, e vale 4,185 joule.

La trasmissione di calore per *convezione* è caratterizzata da moti, detti moti convettivi, e si ha quando due corpi non sono a contatto diretto tra loro ma sono separati da un fluido, ad esempio l'aria o l'acqua. Sono proprio le molecole della sostanza frapposta a trasmettere il calore. Il trasporto di energia avviene mediante l'azione combinata della conduzione, dell'accumulo di energia e del mescolamento; è il meccanismo di scambio termico più importante tra una superficie solida e un fluido (fig. 1.5).

La trasmissione di calore per *irraggiamento* si manifesta tra corpi a differente temperatura che non sono a contatto tra loro (fig. 1.6). Esso non richiede necessariamente la presenza di un mezzo materiale tra i corpi stessi e avviene anche nel vuoto. Ogni corpo, emettendo radiazioni elettromagnetiche, disperde nello spazio circostante energia termica anche, e specialmente, fuori dallo spettro del visibile. Noi stessi avvertiamo in particolari condizioni la vicinanza di persone o di oggetti attraverso la percezione del calore che essi emettono. I moderni termometri all'infrarosso si basano su sensori che rilevano l'emissione di calore invisibile ai nostri occhi.



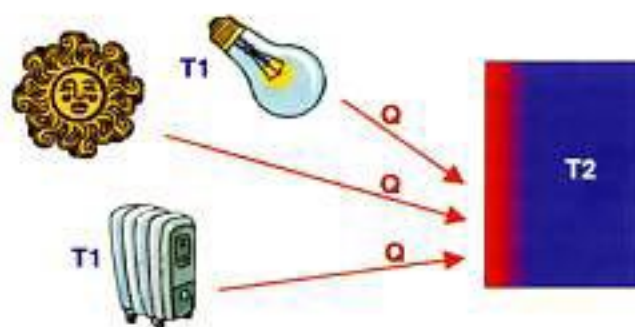
**Fig 1.5** Trasferimento di calore per convezione dal corpo a temperatura maggiore  $T1$  in basso a quello a temperatura minore  $T2$  in alto attraverso la circolazione dell'aria calda che sale dal centro a riscaldare il corpo in colore blu.

## Sintesi

### IL CALORE E LA QUANTITÀ DI CALORE

- Il calore è energia che viene scambiata fra corpi a temperatura diversa in contatto o distanti fra loro, immersi in un fluido (aria, acqua) o nel vuoto, utilizzando i meccanismi di *conduzione*, *convezione* e *irraggiamento* o durante le transizioni di fase (es. un liquido che diventa un gas tende a raffreddarsi, un vapore che condensa cede calore).
- La quantità di calore non è una caratteristica del corpo ma è la caratteristica di un processo, misura cioè la quantità di energia che entra o che esce dal corpo in un processo di scambio di energia termica.
- Il *calore latente* e il *calore specifico* sono caratteristici per ogni sostanza e dipendono dalla struttura chimico-fisica della materia.
- Calore e quantità di calore si misurano in *calorie* e in *Joule*.

**Fig 1.6** Trasferimento di calore ( $Q$ ) per irraggiamento dal corpo a temperatura notevolmente elevata  $T_1$  a quello a temperatura minore  $T_2$  attraverso l'emissione di onde elettromagnetiche.



### 1.2.2 Umidità

Parlare di umidità significa parlare di acqua sia allo stato di vapore che allo stato liquido: infatti, in aria è presente il vapor d'acqua che viene normalmente misurato come umidità relativa ma, allo stesso modo, usiamo il termine "umidità" anche se ci riferiamo alla presenza di acqua, in questo caso liquida, all'interno dei materiali o delle sostanze, definendo questa umidità come "contenuto di acqua per unità di peso o volume". Nelle problematiche della conservazione ci interessano entrambe le forme di umidità poiché quasi sempre esse si trovano in equilibrio fra loro.

È quindi importante per noi conoscere le caratteristiche dell'acqua e i modi per misurarla nelle diverse forme che incontriamo più frequentemente: l'acqua vapore e l'acqua liquida.

Come vedremo rapidamente, non potremo parlare di vapor d'acqua senza coinvolgere la temperatura, poiché in aria questi due fattori, oltre alla pressione, sono strettamente dipendenti fra loro. Mentre la pressione la considereremo costante e quindi la utilizzeremo raramente, l'umidità e la temperatura dovranno essere trasformate in parametri termoigrometrici che ci serviranno per analizzare le caratteristiche del microclima e la sua interazione con i materiali presenti.

Ecco di seguito i principali parametri termoigrometrici.

**L'umidità relativa**, indicata con UR (in inglese RH) è il rapporto fra la pressione parziale di vapor d'acqua e la pressione di vapore saturo ad una data temperatura.

In altri termini è il rapporto fra la quantità  $m_v$  di vapore presente in un volume d'aria ad una certa temperatura e la quantità  $m_s$  di vapore necessaria per saturare lo stesso volume d'aria:

$$UR = m_v / m_s$$

Meteorologi e conservatori moltiplicano per 100 questo risultato perciò se la quantità di vapore presente è uguale alla quantità di saturazione, ci troveremo con 100% di UR.

La percentuale di UR ci dice che fino a quando non avremo raggiunto il valore di saturazione 100%, l'acqua liquida presente nell'ambiente potrà evaporare e unirsi al vapore già contenuto nell'aria.

Un altro modo per esprimere l'umidità dell'aria è l'**umidità assoluta** UA che è la quantità di vapor d'acqua  $m_v$  contenuto nell'unità di volume V:

$$UA = m_v / V$$

Poiché la quantità di vapore è espressa in grammi e il volume è espresso in metri cubi, UA viene misurata in  $g/m^3$ .

Abbiamo detto che la quantità di vapore presente in un volume d'aria dipende dalla temperatura alla quale si trova l'aria in quell'istante. Vi è un altro modo di esprimere l'umidità dell'aria senza che il valore dipenda dalla temperatura attraverso l'**umidità specifica** US che rappresenta il rapporto fra la massa di vapore  $m_v$  e la massa d'aria ( $m_v + m_a$ ) in cui il vapore è disperso:

$$US = [ m_v / (m_v + m_a) ]$$

L'umidità specifica si esprime in grammi di vapore per chilogrammi di aria ( $g/kg$ ) ed è indipendente dalla temperatura dell'aria.

Nella pratica possiamo misurare l'umidità relativa dell'aria attraverso opportuni sensori che assorbendo l'acqua atmosferica modificano alcune loro proprietà come la lunghezza, il peso, la resistenza elettrica, la costante dielettrica. Misurando la variazione di queste proprietà abbiamo il valore di UR. Un esempio: l'indice mobile che si muove sulla scala graduata dell'igrometro a capello misura l'allungamento o l'accorciamento di un fascio di capelli sensibili all'umidità circostante, mentre il valore che leggiamo sul display dell'igrometro elettronico indica la variazione di conducibilità o di costante dielettrica di un sensore elettronico. Entrambe le misure sono convertite, attraverso opportune tarature, in umidità relativa percentuale.

Esiste uno strumento che misura indirettamente la UR senza essere basato sull'assorbimento di acqua da parte del sensore come nei due esempi precedenti: è lo psicrometro che è costituito da

due termometri dei quali uno è ricoperto da una calza bagnata. Al momento della misura il termometro asciutto indicherà la temperatura dell'aria, il termometro bagnato indicherà una temperatura inferiore dovuta all'energia termica che gli è stata sottratta dalla evaporazione dell'acqua della calza bagnata. Attraverso una tabella psicrometrica, come quella riportata in tab. 2.1, sarà possibile conoscere l'umidità relativa percentuale inserendo i valori del termometro asciutto e del termometro bagnato. Lo psicrometro, che sarà descritto nel capitolo riguardante il monitoraggio microclimatico, viene utilizzato come riferimento per la taratura degli altri tipi di igrometri ad assorbimento prima accennati.

Un importante problema, fra i tanti che la conservazione preventiva pone, è l'assorbimento della umidità dell'ambiente da parte dei materiali come ad esempio il legno e la carta [23, 34, 35, 41, 42, 46].

Il legno che viene utilizzato per arredamenti contiene mediamente 10% di acqua in peso, ma l'esatta quantità di acqua assorbita dipende dalle condizioni di temperatura e umidità dell'ambiente in cui si trova, condizioni che provocano continuo aumento e diminuzione di volume e accelerano la decomposizione del legno. In quali circostanze il legno scambia acqua con l'aria? Per comprendere il processo dobbiamo introdurre un nuovo parametro detto *EMC* (*equilibrium moisture content*) che rappresenta la quantità d'

## Approfondimento

### IL VAPOR D'ACQUA

Il vapor d'acqua si disperde abbastanza rapidamente in un ambiente, se paragoniamo la sua velocità di diffusione con quella all'interno di materiali porosi o di solidi e ciò principalmente perché l'aria negli ambienti non è mai ferma: 0.1 m/s è la tipica velocità dell'aria in una sala con finestre e porte chiuse. La conseguenza di questo rapido movimento di vapore è che la sua concentrazione tende a rimanere costante anche quando, nello stesso ambiente, non è costante la temperatura. Il risultato è che avremo una distribuzione non uniforme di umidità relativa nello spazio come nel caso di presenza di macchine come umidificatori e deumidificatori, o bocchette di immissione,

generatrici di aria a umidità controllata. A livello pratico questa caratteristica può rivelarsi un inconveniente per tutte quelle aree superficiali o oggetti della sala che si trovano a temperatura inferiore a quella del vapore immesso e che si troveranno in condizione di valori di UR superiori a quelli dell'ambiente circostante. In altri termini, quando siamo in presenza di non uniformità termica nell'ambiente dobbiamo aspettarci una non uniformità igrometrica. Ciò vale anche in caso di circolazione naturale dell'aria negli ambienti poiché con l'aria spostiamo il vapor d'acqua in essa contenuto.