

---

Tecnica del controllo ambientale:  
Il benessere Termoisgrometrico  
Parte II – Gli ambienti moderati

Marco Dell'isola



---

# Indice

---

## PARTE 2 – Gli ambienti moderati

- Generalità
- Gli indici di benessere
  - Indici di sensazione (PMV-PPD)
  - Indici di temperatura (temperatura operativa, effettiva TE e TE\*)
- Fattori di discomfort locale
  - Differenza temperatura testa-caviglia
  - Temperatura pavimento
  - Asimmetria radiante (pareti, soffitto)
  - Correnti d'aria
- Misura dei parametri ambientali
  - Gli strumenti di misura
- Il controllo ambientale
  - Le tipologie edilizie
  - Gli impianti termici
  - Le specifiche normative degli impianti



# Bilancio di energia sul corpo umano

Il corpo umano può essere considerato come un sistema termodinamico sul quale è possibile fare un **bilancio** di energia:

$$S = M - W - E_{res} - C_{res} - E - C - R - K$$

$M$  = potenza sviluppata per attività metabolica, (W);

$W$  = potenza meccanica dissipata per attività lavorativa, (W);

$E$  = potenza termica per evaporazione nella traspirazione, (W);

$E_{res}$  = potenza termica per evaporazione nella respirazione, (W);

$C$  = potenza termica scambiata per convezione, (W).

$C_{res}$  = potenza termica scambiata per convezione nella respirazione, (W).

$R$  = potenza termica scambiata per irraggiamento, (W);

$K$  = potenza termica scambiata per conduzione, (W);

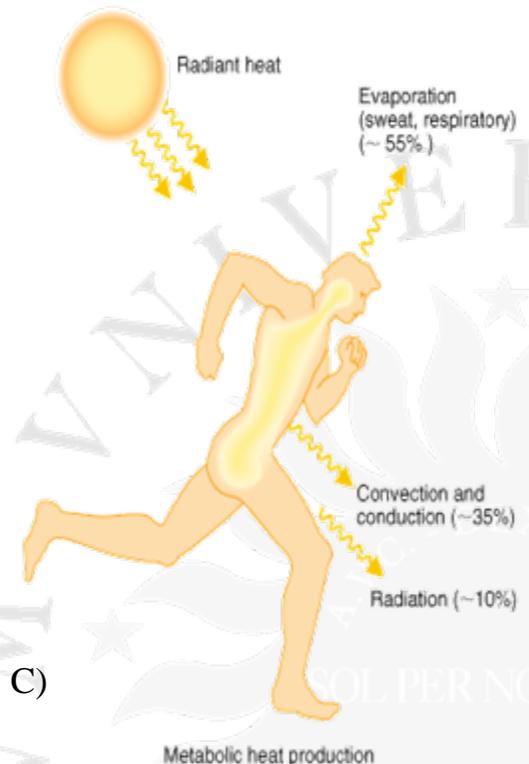
L'organismo tende a permanere in condizioni di **equilibrio omeotermo**

( $S = 0$ ), ovvero che:

- potenza ceduta all'ambiente = potenza generata dai processi metabolici
- la temperatura interna si mantenga stabile su valori ottimali ( $36,7 \pm 0,3$  C)

Gli ambienti termici vengono convenzionalmente distinti in:

- **moderati** (in cui l'obiettivo è il raggiungimento del benessere termogrometrico)
- **severi caldi/ freddi** (in cui l'obiettivo è la sicurezza e la riduzione dello stress termico).



# Parametri benessere termoisometrico

Dall'equazione di bilancio è possibile dimostrare che, esplicitando tutti i termini del bilancio, l'equazione di benessere è una funzione di:

$$S=f(M, I_{cl}, t_a, t_{mr}, v_a, U.R., )$$

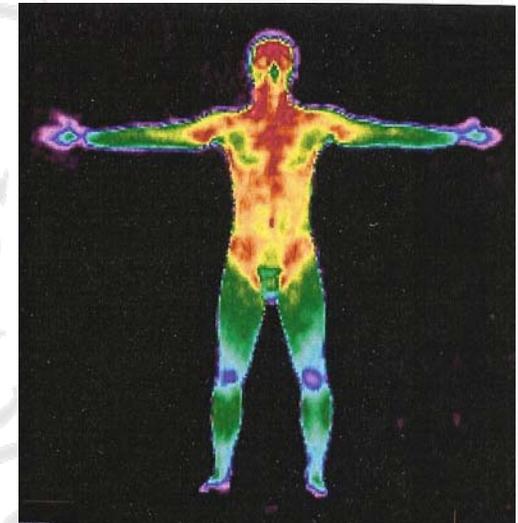
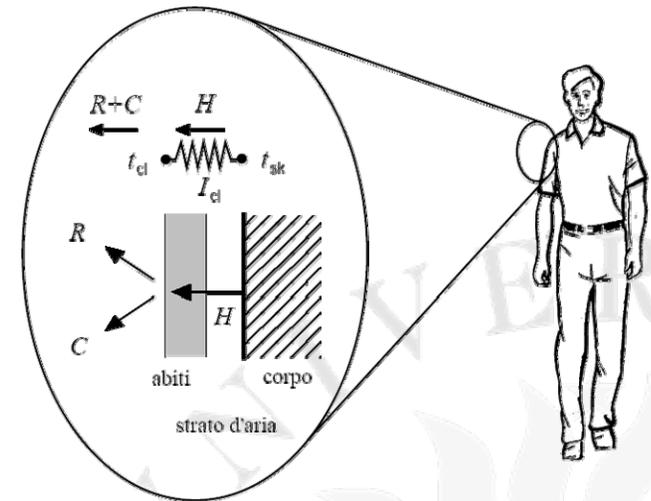
I parametri che, influenzando gli scambi termici tra individuo e ambiente, determinano le condizioni di benessere, sono quindi:

## • 4 parametri ambientali

- la **temperatura dell'aria ambiente**, che influenza gli scambi termici convettivi;
- la **temperatura media radiante**, che influenza gli scambi termici radiativi;
- la **velocità relativa dell'aria**, che influenza gli scambi termici convettivi;
- l'**umidità relativa dell'aria**, che influenza lo scambio evaporativo dal corpo.

## • 2 parametri individuali

- il **dispendio metabolico M** (correlato all'attività svolta)
- la **resistenza termica conduttiva ed evaporativa del vestiario**



# Ambienti termici moderati: Indici di benessere

## Teoria di Fanger (UNI EN ISO 7730)

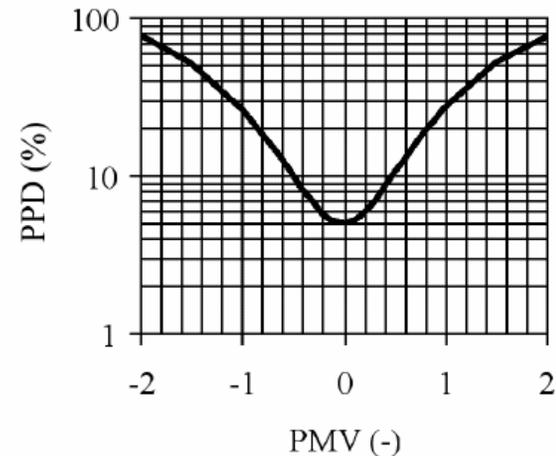
- L'indice **PMV** (Voto Medio Previsto), proposto da Fanger, è definito sulla scala bipolare ASHRAE a 7 punti riportata in Tabella I e si basa su due assunzioni analizzando le esperienze condotte su circa 1300 individui:
  - a) la sensazione di caldo o di freddo che prova un individuo è proporzionale al “carico termico”,  $L$ , definito con il valore reale dell'attività svolta;
  - b) la relazione tra l'indice PMV, ovvero la sensazione di caldo o di freddo avvertita da un individuo medio espressa come voto sulla scala a sette punti, ed il carico termico ora definito è la seguente:

$$PMV = [0,303 \exp(-0,036 M) + 0,028] L$$

- dalla quale si perviene all'equazione che permette la valutazione dell'indice PMV (a partire dalle sei grandezze esaminate) come media pesata utilizzando come coefficienti di peso le conduttanze radiative e convettive;
- L'indice **PPD** (Percentuale prevista di insoddisfatti) definita come la percentuale prevista di insoddisfatti correlata al PMV, ottenendo il diagramma di Figura
  - da esso si evince che la percentuale di insoddisfatti, ovvero l'indice PPD, è pari al 5% per PMV uguale a 0, diventa il 10% ai limiti dell'intervallo di benessere (+0,50-0,50) e cresce rapidamente all'allontanarsi del PMV dai valori di comfort.

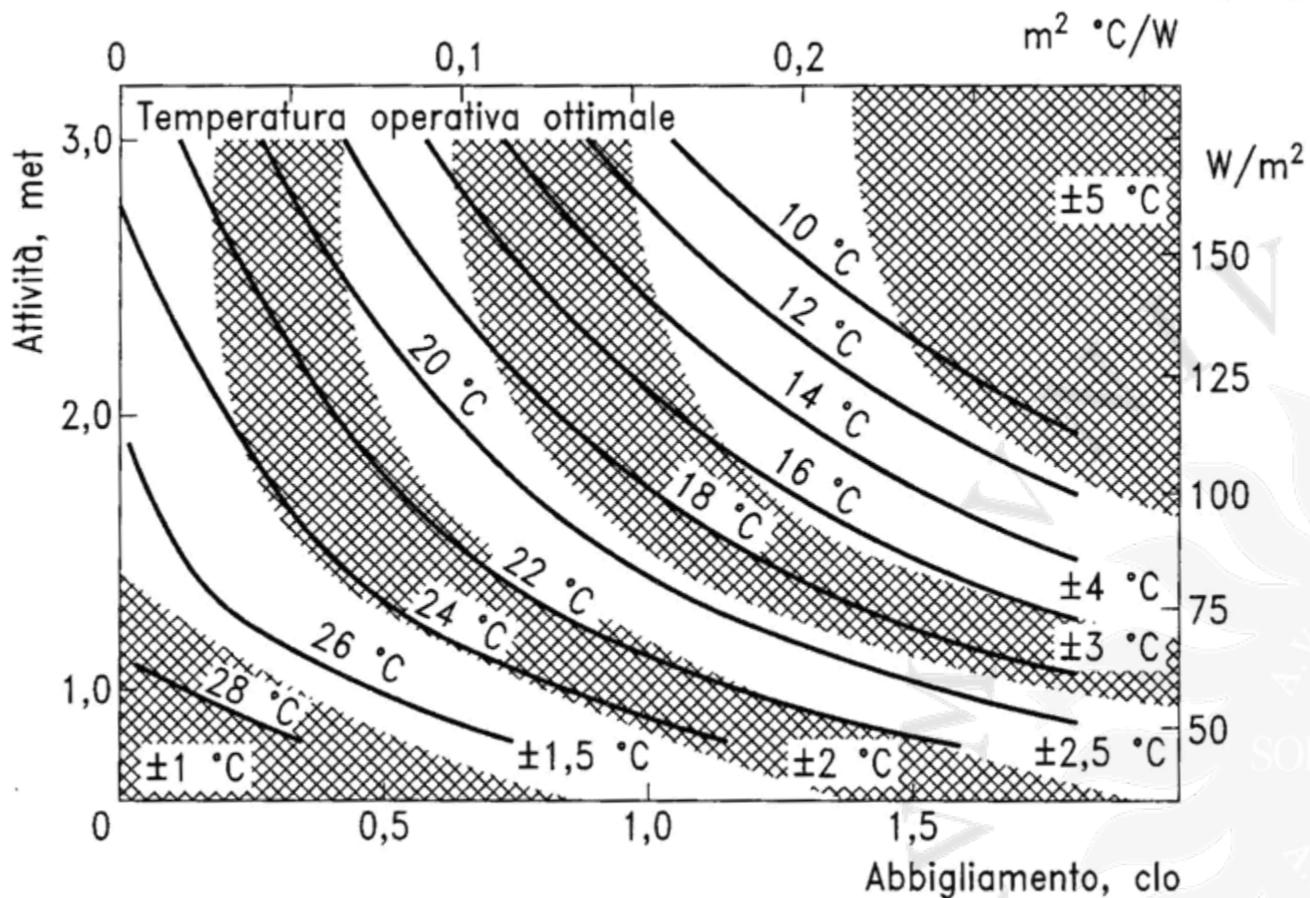
Tabella I. Scala di sensazione ASHRAE (American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers)

| voto | sensazione         |
|------|--------------------|
| +3   | molto caldo        |
| +2   | caldo              |
| +1   | leggermente caldo  |
| 0    | né caldo né freddo |
| -1   | leggermente freddo |
| -2   | freddo             |
| -3   | molto freddo       |



# Ambienti termici moderati (UNI EN ISO 7730)

## Temperatura operativa ottimale (PMV=0)



# Diagramma ASHRAE

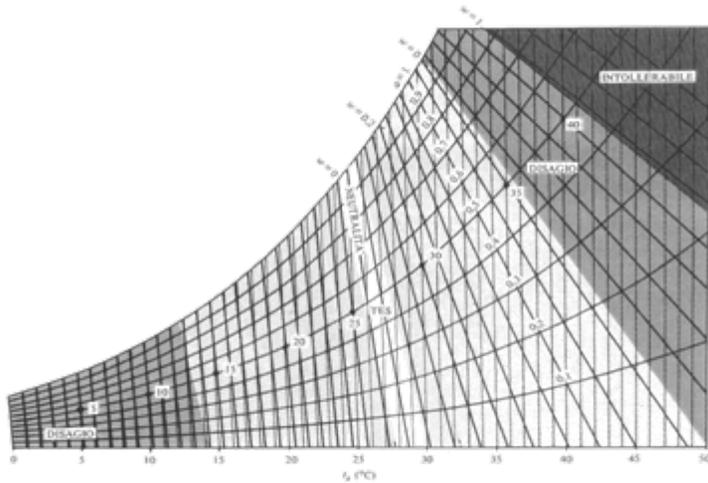


Diagramma psicrometrico con sovrapposte rette a grado di bagnatura costante ( $w$ ), valutate anche in termini di temperatura equivalente standard (TES), e zone caratterizzate da ugual sensazione termica.

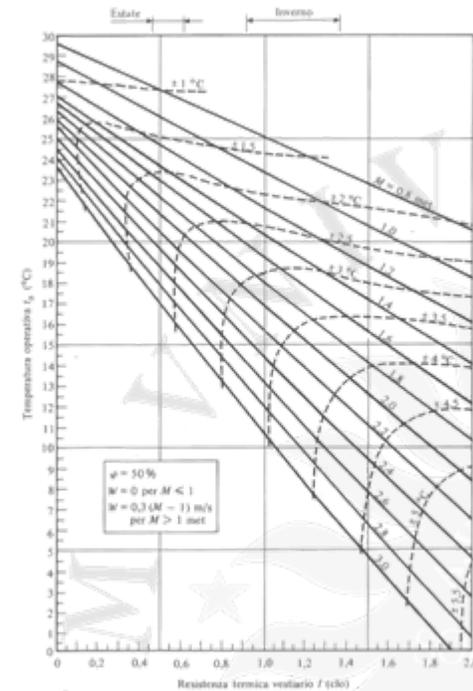
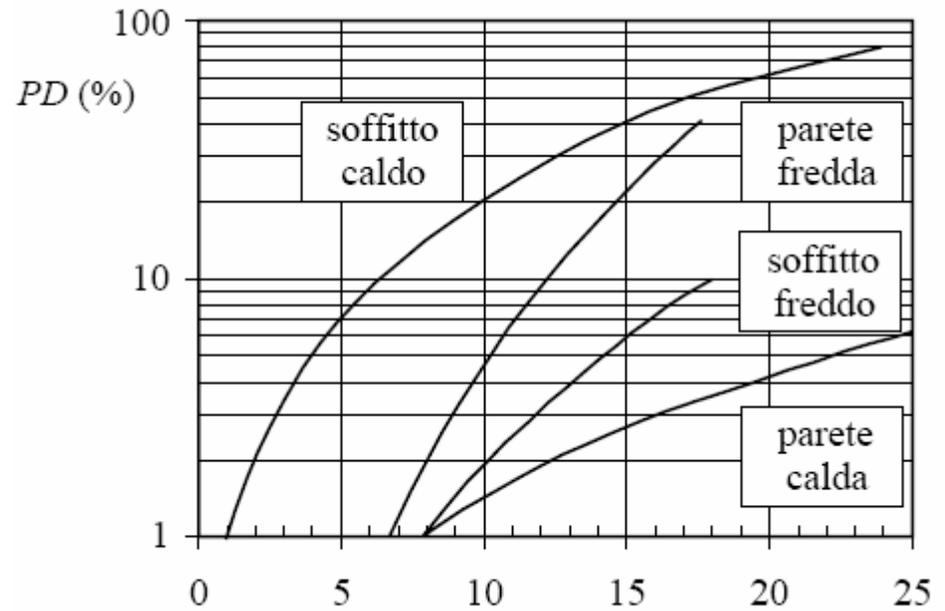
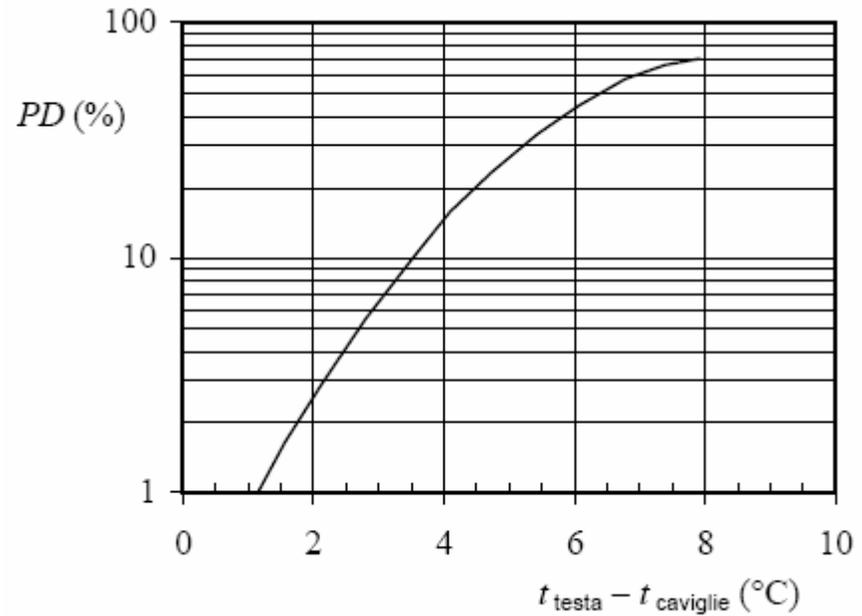


Diagramma del benessere termico, tracciato secondo la teoria di Fanger. Le curve a tratto continuo rappresentano le condizioni ottimali di benessere; quelle tratteggiate indicano lo scostamento possibile della temperatura operativa dal valore ottimale nella zona accettabile per il benessere ( $-0,5 \leq PMV \leq 0,5$ ).

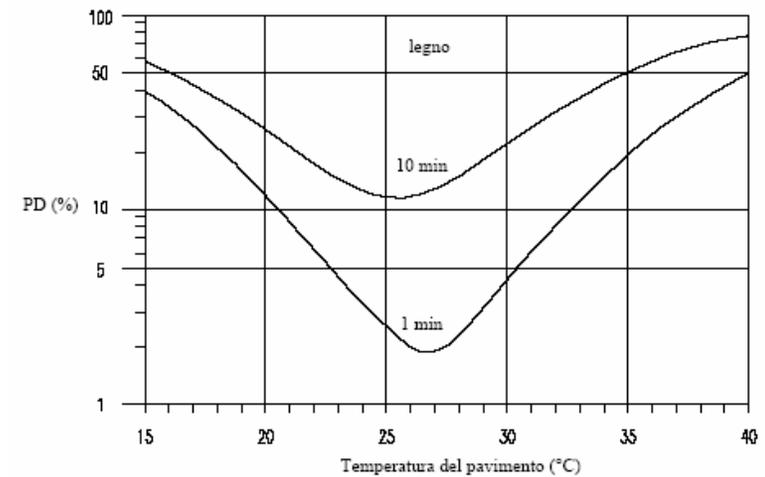
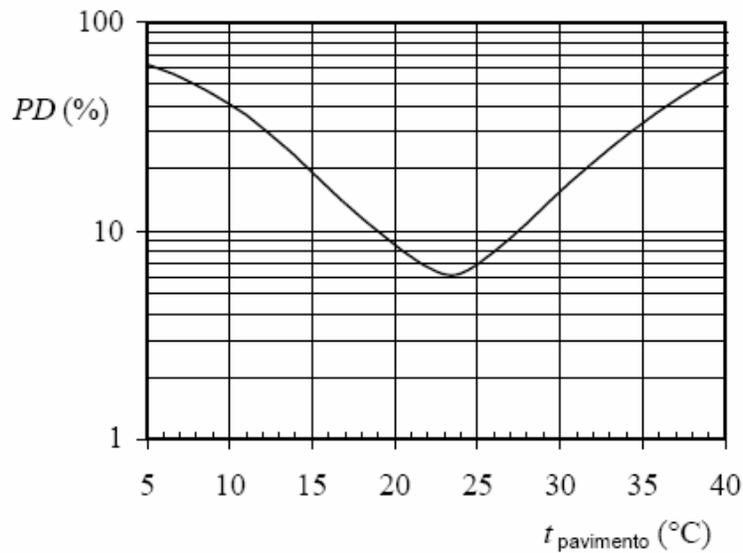
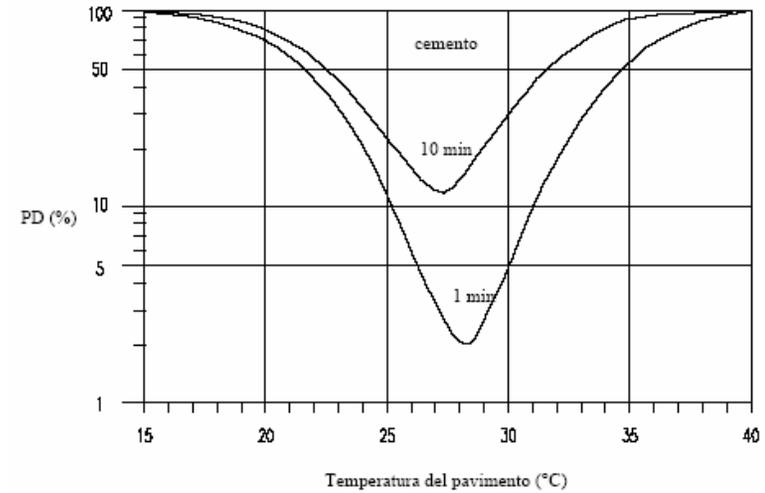
# *Fattori di Discomfort:* *Asimmetria temperatura media radiante*



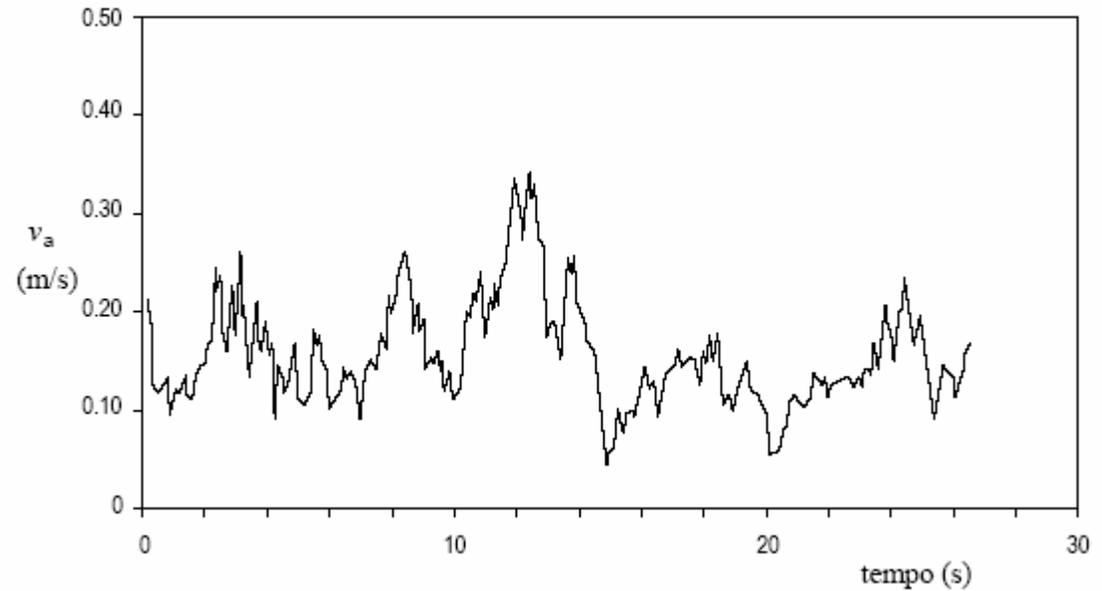
# *Fattori di Discomfort:* *differenza temperatura testa-caviglie*



# *Fattori di Discomfort: temperatura pavimento*



# *Fattori di Discomfort: temperatura pavimento*



# *Il discomfort locale (prEN 7730)*

*Tabella IV. Condizioni limite di accettabilità per gli ambienti delle categorie A, B e C secondo la (13)*

| Grandezza               | Categoria A                  |           | Categoria B                  |           | Categoria C                  |           |
|-------------------------|------------------------------|-----------|------------------------------|-----------|------------------------------|-----------|
|                         | Condizione                   | PD(%)     | Condizione                   | PD(%)     | Condizione                   | PD(%)     |
| PMV                     | $-0,20 \div 0,20$            | $\leq 6$  | $-0,50 \div 0,50$            | $\leq 10$ | $-0,70 \div 0,70$            | $\leq 15$ |
| $t_{a,1.1} - t_{a,0.1}$ | $< 2^{\circ}\text{C}$        | $\leq 3$  | $< 3^{\circ}\text{C}$        | $\leq 5$  | $< 4^{\circ}\text{C}$        | $\leq 10$ |
| $\Delta t_{pr,0.6h}$    | $< 10^{\circ}\text{C}$       | $\leq 5$  | $< 10^{\circ}\text{C}$       | $\leq 5$  | $< 13^{\circ}\text{C}$       | $\leq 10$ |
| $\Delta t_{pr,0.6lv}$   | $< 5^{\circ}\text{C}$        | $\leq 5$  | $< 5^{\circ}\text{C}$        | $\leq 5$  | $< 7^{\circ}\text{C}$        | $\leq 10$ |
| $v_a$                   | $\text{DR} < 10$             | $\leq 10$ | $\text{DR} < 10$             | $\leq 10$ | $\text{DR} < 15$             | $\leq 15$ |
| $T_p$                   | $19 \div 29^{\circ}\text{C}$ | $\leq 10$ | $19 \div 29^{\circ}\text{C}$ | $\leq 10$ | $17 \div 31^{\circ}\text{C}$ | $\leq 15$ |

# Strumenti e metodi di misura

## (UNI EN ISO 7726)

| Grandezza  | Simbolo         | Classe C (benessere) |   | Classe S (stress termico) |   |
|--|-----------------|----------------------|---|---------------------------|---|
|  |                 | Campo di misura      | Precisione  | Campo di misura           | Precisione  |
| Temperatura dell'aria  | $t_a$           | 10°C ÷ 30°C          | Richiesta: ± 0,5 °C<br>Desiderabile: ± 0,2 °C<br>Per $ t_r - t_a  = 10^\circ\text{C}$   | -40°C ÷ +120°C            | Richiesta:<br>-40°C ÷ 0°C: ± (0,5 + 0,01 $ t_a $ )°C<br>>0°C ÷ 50°C: ± 0,5°C<br>>50°C ÷ 120°C: ± [0,5 + 0,04( $t_a - 50$ )]°C<br>Desiderabile: Precisione richiesta/2<br>Per $ t_r - t_a  = 20^\circ\text{C}$   |
| Temperatura media radiante   | $t_r$           | 10°C ÷ 40°C          | Richiesta: ± 2 °C<br>Desiderabile: ± 0,2 °C<br>Quando non possono essere raggiunti indicare il valore effettivo della precisione                          | -40°C ÷ +150°C            | Richiesta:<br>-40°C ÷ 0°C: ± (5 + 0,02 $ t_r $ )°C<br>>0°C ÷ 50°C: ± 5°C<br>>50°C ÷ 150°C: ± [5 + 0,08( $t_r - 50$ )]°C<br>Desiderabile:<br>-40°C ÷ 0°C: ± (0,5 + 0,01 $ t_r $ )°C<br>>0°C ÷ 50°C: ± 0,5°C<br>>50°C ÷ 150°C: ± [0,5 + 0,04( $t_r - 50$ )]°C |
| Asimmetria della temperatura radiante                                | $\Delta t_{pr}$ | 0 K ÷ 20 K           | Richiesta: ± 1 K<br>Desiderabile: ± 0,5 K   | 0 K ÷ 200 K               | Richiesta:<br>0 K ÷ 20 K: ± 2 K<br>>20 K ÷ 200 K: ± 0,1 $\Delta t_{pr}$<br>Desiderabile:<br>0 K ÷ 20 K: ± 1 K<br>>20 K ÷ 200 K: ± 0,5 $\Delta t_{pr}$   |
| Velocità dell'aria   | $v_a$           | 0,05 m/s ÷ 1 m/s     | Richiesta:<br>±  0,05+0,05 $v_a$   m/s<br>Desiderabile:<br>±  0,02+0,07 $v_a$   m/s<br>Per direzione del flusso interna ad un angolo solido pari a 3 π sr | 0,2 m/s ÷ 10 m/s          | Richiesta:<br>±  0,1+0,05 $v_a$   m/s<br>Desiderabile:<br>±  0,05+0,05 $v_a$   m/s<br>Per direzione del flusso interna ad un angolo solido pari a 3 π sr  |
| Umidità assoluta espressa come pressione parziale del vapore d'acqua | $p_a$           | 0,5 kPa ÷ 2,5 kPa    | ± 0,15 kPa<br>Anche per temperature dell'aria e delle pareti uguali o maggiori di 30°C per una differenza $ t_r - t_a $ di almeno 10°C                    | 0,5 kPa ÷ 6,0 kPa         | ± 0,15 kPa<br>Anche per temperature dell'aria e delle pareti uguali o maggiori di 30°C per una differenza $ t_r - t_a $ di almeno 10°C  |
| Temperatura di bulbo umido a ventilazione naturale                   | $t_{nw}$        | Uso non raccomandato |   | 0,5 °C ÷ 40 °C            | ± 0,5 °C  |
| Temperatura di globo   | $t_g$           | Uso non raccomandato |   | 20 °C ÷ 120 °C            | 20 °C ÷ 50 °C: ± 0,5 °C<br>>50 °C ÷ 120 °C: ± 1 °C  |
| Temperatura di globo umido   | $t_{wg}$        | Uso non raccomandato |   | 0 °C ÷ 80 °C              | ± 0,5 °C  |

# Situazione Nazionale e locale

- **Recepimento legislazione e normativa**

- le diverse necessarie **professionalità** raramente vengono integrate e spesso sono confuse (tecnico di misura, ingegnere, medico, ...); non esiste tra l'altro un albo specifico;
- scarso **interesse** verso la problematica salvo nelle situazioni di stress (con conseguente perdita di produttività)
- i **protocolli** di valutazione termoigrometrica degli ambienti termici moderati quando applicati si limitano al calcolo degli indici di comfort (senza analisi soggettiva);
- gli **strumenti di misura** raramente sono a norma e quasi mai tarati (1 Centri di taratura S.I.T nel Lazio sulle grandezze ambientali)
- i **DPI** (dispositivi di protezione individuali) sono molto spesso non utilizzati e talvolta insufficienti;
- l'**incertezza di misura** non viene generalmente valutata.

Tavola n. 18 - Malattie professionali manifestatesi nel periodo 1999-2003

## INDUSTRIA E SERVIZI

| Tipo di malattia                    | 1999          | 2000          | 2001          | 2002          | 2003          |
|-------------------------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| <b>Malattie tabellate</b>           | 10.467        | 9.858         | 9.523         | 7.287         | 4.991         |
| <i>di cui</i>                       |               |               |               |               |               |
| 50-Ipocusia e sordità               | 5.753         | 5.339         | 4.784         | 3.447         | 2.177         |
| 42-malattie cutanee                 | 1.207         | 1.062         | 1.028         | 804           | 562           |
| 91-asbestosi                        | 631           | 627           | 777           | 639           | 415           |
| 90-silicosi                         | 701           | 669           | 576           | 439           | 353           |
| 56-neoplasie da asbesto             | 374           | 431           | 588           | 587           | 484           |
| 52-malattie osteoarticolari         | 347           | 355           | 377           | 330           | 225           |
| 40-asma bronchiale                  | 245           | 272           | 257           | 189           | 155           |
| 43-pneumoconiosi da silicati        | 232           | 223           | 170           | 117           | 68            |
| <b>99 - Malattie non tabellate</b>  | 13.555        | 14.492        | 16.217        | 14.115        | 12.137        |
| <i>di cui</i>                       |               |               |               |               |               |
| Ipocusia                            | 6.316         | 6.017         | 5.499         | 2.804         | 2.244         |
| Malattie dell'apparato respiratorio | 1.121         | 1.166         | 1.138         | 1.073         | 475           |
| Sindrome del tunnel carpale         | 734           | 838           | 865           | 542           | 388           |
| Tendiniti                           | 564           | 791           | 1.001         | 927           | 777           |
| Tumori                              | 363           | 362           | 433           | 287           | 228           |
| <b>Indeterminate</b>                | 72            | 426           | 1.393         | 3.926         | 6.103         |
| <b>Totale Industria e Servizi</b>   | <b>24.094</b> | <b>24.776</b> | <b>27.133</b> | <b>25.328</b> | <b>23.231</b> |

