

2. BILANCIO DI ENERGIA TERMICA SUL CORPO UMANO

2.1. Equazione di bilancio

Il bilancio di energia termica sul corpo umano puo' essere scritto nel seguente modo:

$$S = M - W - E_d - E_{sw} - E_{ve} - C_{ve} - C - R - C_k \quad (2.1)$$

con:

S = variazione di energia interna del corpo umano nell'unita' di tempo, W;

M = metabolismo energetico, W;

W = potenza meccanica scambiata tra il corpo e l'ambiente, W;

E_d = potenza termica dispersa per diffusione attraverso la pelle, W;

E_{sw} = potenza termica dispersa per sudorazione attraverso la pelle, W;

E_{ve} = potenza termica dispersa nella respirazione come "calore latente", W;

C_{ve} = potenza termica dispersa nella respirazione come "calore sensibile", W;

C = potenza termica dispersa per convezione, W;

R = potenza termica dispersa per irraggiamento, W;

C_k = potenza termica dispersa per conduzione, W.

Spesso i termini che compaiono nella (2.1) sono riferiti all'unita' di area della superficie del corpo umano nudo, A_b , ricavabile dalla relazione dovuta a Du Bois:

$$A_b = 0.202 m^{0.425} h^{0.725} \quad (2.2)$$

con:

A_b = area della superficie del corpo umano nudo, m^2 ;

m = massa del soggetto, kg;

h = altezza del soggetto, m.

o, in alternativa, dal diagramma di figura 2.1., anch'esso derivato dalla (2.2). Come si vede, per un uomo di 70 kg e di 1.70 m di altezza e' $A_b = 1.80 m^2$.

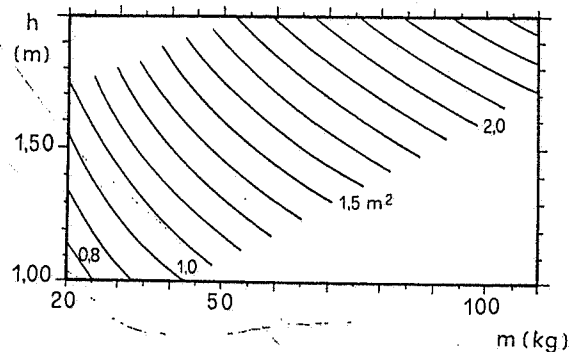


Fig. 2.1. - Valori dell'area della superficie del corpo umano nudo, A_b , in funzione della massa corporea, m , per vari valori dell'altezza del soggetto, h ; dalla (2.2).

Qui di seguito sara' brevemente illustrato il significato fisico e/o fisiologico di ciascuno dei termini che compaiono nella (2.1). E' da sottolineare, a questo proposito, che per alcuni dei termini della (2.1), ovvero per E_d e E_{sw} , esistono due diverse impostazioni: quella della scuola danese dell'Universita' di Copenhagen - che fa capo a Fanger, e quella della scuola americana - della J.B. Pierce Foundation - che fa capo a Gagge. Delle due impostazioni, quella di Gagge - ASHRAE (1985) -, che ha ispirato l'ASHRAE Standard 55-81 riportato nell'allegato 2, e' piu' rigorosa ma piu' complessa; quella di Fanger - Fanger (1970) -, che ha avuto un'enorme diffusione proprio per la sua semplicita', ha ispirato la norma ISO 7730 riportata nell'allegato 1.

2.2. Metabolismo energetico

I cibi e le bevande ingeriti, oltre che le sostanze di riserva, subiscono nel corpo umano un enorme numero di trasformazioni chimiche, spesso molto complesse, che nel loro insieme costituiscono il metabolismo.

I processi metabolici, essenzialmente ossidativi, sono complessivamente esoenergetici; pertanto, gran parte dell'energia potenziale chimica dei cibi, delle bevande e, eventualmente, delle sostanze di riserva, si trasforma in energia termica all'interno del corpo umano. Se l'energia termica generata non e' uguale a quella complessivamente scambiata con l'ambiente sotto forma di lavoro meccanico e di calore, si ha accumulo (negativo o positivo) di energia termica, con conseguente diminuzione o aumento della temperatura corporea. La quantita' di energia potenziale chimica che si trasforma in energia termica costituisce l'energia metabolica, generalmente riferita all'unita' di tempo, quindi espressa come potenza, e spesso, come si e' detto, anche all'unita' di superficie corporea, quindi espressa in W/m^2 .

L'energia metabolica, che viene chiamata in modi diversi, quali per esempio metabolismo energetico e tasso metabolico, puo' essere distinta in due aliquote:

- l'energia metabolica basale, che e' quella necessaria per il funzionamento degli organi vitali e che si misura nel soggetto a riposo fisico e mentale, digiuno da 12-18 ore, in condizioni di neutralita' termica (cfr. 3.1.); vale all'incirca $43 W/m^2$;
- l'energia metabolica legata all'attivita'.

Per la valutazione dell'energia metabolica, che spesso viene misurata nell'unita' incoerente "met" ($1 \text{ met} = 50.0 \text{ kcal/hm}^2 = 58.2 \text{ W/m}^2$), esistono essenzialmente due metodi - ISO (1987a) -:

1. la misura diretta;
2. la valutazione da tabelle.

La misura diretta, che si basa principalmente sulla valutazione del consumo di ossigeno - ISO (1987a) -, pur fornendo valori precisi dell'energia metabolica, e' pero' lunga e complessa; qualora siano sufficienti valori approssimati, o non sia possibile effettuare la misura, si puo' ricorrere alle tabelle riportate da alcune norme - ISO (1982), ISO (1987a), UNI (1986) -.

Nell'appendice B dell'allegato 1 e nella tabella 3 dell'allegato 2 sono riportati i valori dell'energia metabolica per un certo numero di attivita'.

Cenni sui metodi di valutazione dell'energia metabolica verranno dati al paragrafo 5.2.

2.3. Potenza meccanica

La potenza meccanica rappresenta l'energia che nell'unita' di tempo l'uomo scambia con l'ambiente sotto forma di lavoro: si parla di potenza meccanica positiva se l'uomo compie lavoro sull'ambiente, negativa se l'ambiente compie lavoro sull'uomo.

Si definisce rendimento meccanico, η , il rapporto tra la potenza meccanica e il metabolismo energetico, cioè:

$$\eta = W/M$$

ovviamente risulta:

$$M - W = M (1 - \eta) \quad (2.3)$$

Il valore del rendimento è molto basso, oscillando tra 0.00 e 0.20 ed è leggermente crescente al crescere della potenza meccanica: per esempio, un soggetto che al cicloergometro compie un lavoro cui corrisponde una potenza meccanica di 20 W ha un metabolismo energetico di 200 W, con rendimento del 10%; passando ad una potenza di 40 W, il suo metabolismo energetico sale mediamente a 260 W, con un rendimento del 15%. Cioè un uomo che, come si è detto, spende in condizioni basali 43 W/m^2 , a cui corrispondono 77 W per $A_b = 1.8 \text{ m}^2$, se compie un lavoro di 20 W non ha un'energia metabolica di 97 W ma di ben 200 W, che aumentano a 260 W per un lavoro di 40 W. L'uomo può pertanto essere visto come una macchina termica: per compiere lavoro ha bisogno di energia termica che viene in piccola percentuale trasformata in lavoro e in gran parte riversata nella "sorgente" ambiente.

Va infine sottolineato che sia il metabolismo energetico che la potenza meccanica sono funzioni unicamente dell'attività svolta.

2.4. Potenza termica dispersa attraverso la pelle come "calore latente"

La potenza termica dispersa come "calore latente" attraverso la pelle, E_d , è somma di due termini: la potenza termica dispersa per diffusione, E_d e la potenza termica dispersa per sudorazione, E_{sw} .

2.4.1. Potenza termica dispersa per diffusione di vapore attraverso la pelle, E_d

La diffusione attraverso la pelle è un fenomeno indipendente dal sistema di termoregolazione; secondo Fanger - Fanger (1970) - la E_d , per la legge di Fick, è proporzionale alla permeanza della pelle, μ , ed alla differenza tra la tensione di vapore dell'acqua alla temperatura della pelle e la pressione parziale del vapore d'acqua nell'aria. Risulta pertanto:

$$E_d = \lambda \mu A_b (p_{sk} - \phi p_{as}) \quad (2.4)$$

con:

λ = calore latente di vaporizzazione dell'acqua alla temperatura della pelle, kJ/kg;

μ = permeanza della pelle alla diffusione del vapore d'acqua, kg/sm²Pa;

p_{sk} = tensione di vapore dell'acqua alla temperatura della pelle, Pa;

ϕ = grado igrometrico, adim.;

p_{as} = tensione di vapore dell'acqua alla temperatura dell'aria ambiente, Pa.

Assumendo per λ il valore di $2.41 \cdot 10^3$ kJ/kg (a 35°C) e per μ il valore di $1.27 \cdot 10^{-3}$ kg/sm²Pa, e considerando per p_{sk} l'espressione lineare (valida nel campo di temperatura 27-37°C):

$$p_{sk} = 256 t_{sk} - 3373$$

con t_{sk} temperatura media della pelle (°C), la (2.4) può essere scritta nella forma:

$$E_d = 3.05 \cdot 10^{-3} A_b (256 t_{sk} - 3373 - \phi p_{as}) \quad (2.5)$$

Il termine E_d risulta in definitiva funzione delle seguenti variabili:

- grado igrometrico dell'aria;
- temperatura dell'aria;
- temperatura della pelle.

2.4.2. Potenza termica dispersa per sudorazione, E_{sw}

La sudorazione consiste in varie fasi:

1. Le ghiandole sudoripare, che sono situate immediatamente sotto la pelle e che sono sotto il controllo dell'ipotalamo, secernono il sudore, costituito prevalentemente da una soluzione acquosa di cloruro di sodio.

2. Il sudore arriva sulla superficie esterna della pelle attraverso appositi condotti.
3. Il sudore si sparge sulla superficie della pelle ricoprendola di un film sottile.
4. A regime permanente ed in assenza di gocciolamento, tutto il sudore passa come vapore nell'aria per evaporazione.

La produzione oraria di sudore dipende dai segnali di temperatura che giungono all'ipotalamo sia dalla pelle che dal nucleo; la relazione e' piuttosto complessa ed esula da questo testo. In ogni caso la quantita' evaporata puo' essere espressa in funzione delle seguenti variabili:

- temperatura della pelle;
- temperatura dell'aria;
- velocita' relativa soggetto-aria (cfr. (2.16));
- grado igrometrico dell'aria;
- abbigliamento;
- percentuale di pelle bagnata dal sudore.

Fanger, invece, come si vedra' al 3.1., fornisce un'espressione di E_{sw} valida solo in condizioni di benessere, nelle quali E_{sw} risulta essere funzione unicamente dell'attivita'.

2.5. Potenza termica dispersa nella respirazione

L'aria inspirata in seguito al processo di respirazione scambia calore e vapor d'acqua con le mucose del tratto respiratorio; una volta giunta negli alveoli polmonari, l'aria si trova satura di vapor d'acqua e ad una temperatura praticamente uguale a quella del nucleo. Pertanto, quando l'aria viene espirata ha un'entalpia e un titolo maggiori che nelle condizioni di inspirazione, e cioe' nelle condizioni ambientali.

La potenza termica connessa alla respirazione puo' essere vista come somma di due aliquote: quella per "calore latente" e quella per "calore sensibile". Il vantaggio di questa impostazione, molto seguita, e' quello di scindere le due aliquote, il che risulta utile ai fini del calcolo del carico termico dell'impianto di climatizzazione.

2.5.1. Potenza termica dispersa nella respirazione come "calore latente", E_{ve}

La relazione proposta da Fanger - Fanger (1970) - per la valutazione di questo termine (relazione utilizzata anche da Gagge) e' la seguente:

$$E_{ve} = \lambda \dot{m}_{a,ve} (x_{ex} - x_a) \quad (2.6)$$

con:

$\dot{m}_{a,ve}$ = ventilazione polmonare, ovvero portata massica di aria respirata dall'individuo, kg/s;

λ = calore latente di vaporizzazione dell'acqua alla temperatura del nucleo, J/kg;

x_{ex} = titolo dell'aria espirata, kg acqua/kg aria secca;

x_a = titolo dell'aria ambiente, kg acqua/kg aria secca.

La ventilazione polmonare puo' essere espressa in funzione del metabolismo energetico con la relazione - Fanger (1970) -:

$$\dot{m}_{a,ve} = 1.43 \cdot 10^{-6} M \quad (2.7)$$

La differenza $(x_{ex} - x_a)$ per una pressione totale di 1 atm si puo' esprimere - Fanger (1970) - con la relazione:

$$x_{ex} - x_a = 0.029 - 4.94 \cdot 10^{-6} \phi p_{as} \quad (2.8)$$

Con la (2.7) e la (2.8) e assumendo per λ il valore $2.41 \cdot 10^3$ kJ/kg si ottiene:

$$E_{ve} = 1.72 \cdot 10^{-5} M (5867 - \phi p_{as}) \quad (2.9)$$

con p_{as} in Pa.

Spesso la (2.9) si trova nella forma:

$$E_{ve} = 0.0023 M (44 - \phi p_{as}) \quad (2.10)$$

con p_{as} in mmHg.

2.5.2. Potenza termica dispersa nella respirazione come "calore sensibile", C_{ve}

Dal primo principio della termodinamica per sistemi aperti applicato all'apparato respiratorio risulta:

$$C_{ve} = \dot{m}_{a,ve} c_{p,a} (t_{ex} - t_a) \quad (2.11)$$

con:

$c_{p,a}$ = calore specifico a pressione costante dell'aria, kJ/kg°C;

t_{ex} = temperatura dell'aria espirata, °C.

Con la (2.7), e assumendo in prima approssimazione - Fanger (1970) - $t_{ex} = 34^\circ\text{C}$, la (2.11) diventa:

$$C_{ve} = 0.0014 M (34 - t_a) \quad (2.12)$$

2.5.3. Dipendenza funzionale

Dalla (2.10) e dalla (2.12), che vengono utilizzate anche dalla trattazione di Gagge, la potenza termica dispersa nella respirazione e' in definitiva funzione delle seguenti variabili:

- attivita' svolta dall'individuo;
- grado igrometrico dell'aria;
- temperatura dell'aria.

2.6. Potenza termica dispersa per convezione

La potenza termica che il corpo umano scambia per convezione con l'ambiente puo' essere espressa come:

$$C = f_{cl} h_c A_b (t_{cl} - t_a) \quad (2.13)$$

con:

- f_{cl} = coefficiente di area dell'abbigliamento, adim.;
- h_{cl} = conduttanza termica convettiva unitaria abiti-aria, W/m^2K ;
- t_{cl} = temperatura media della superficie esterna del corpo umano vestito, $^{\circ}C$;
- t_a = temperatura dell'aria ambiente, $^{\circ}C$.

Il coefficiente di area dell'abbigliamento e' definito come il rapporto tra l'area della superficie del corpo umano vestito, A_{cl} , e l'area della superficie del corpo umano nudo, A_b - Fanger (1970), ASHRAE (1985), Olesen (1982) -; per la sua valutazione si utilizzano generalmente relazioni empiriche che forniscono f_{cl} in funzione della resistenza termica dell'abbigliamento (cfr. 2.9.2.). Al punto 3.1 dell'allegato I sono riportate le relazioni proposte dall'ISO.

Per il calcolo della conduttanza termica convettiva unitaria abiti-aria si adoperano le seguenti relazioni:

in convezione naturale:

$$h_c = 2.38 (t_{cl} - t_a)^{0.25} \quad (2.14)$$

in convezione forzata:

$$h_c = 12.1 \sqrt{v_{ar}} \quad (2.15)$$

con:

v_{ar} = velocita' relativa soggetto-aria, m/s.

Capitolo secondo - Bilancio di energia termica sul corpo umano

La velocita' relativa dipende dal movimento e quindi dall'attivita' del soggetto; in generale e' calcolabile in maniera approssimativa con relazioni empiriche; qui di seguito se ne riporta una delle piu' usate - ISO (1984) -:

$$v_{ar} = v_a + 0.005(M/A_b - 58.15) \quad (2.16)$$

con:

v_a = velocita' misurata, m/s.

Evidentemente la relazione (2.16) e' utilizzabile per $M/A_b \geq 1$ met.

Per un'immediata applicazione della (2.16) nella figura 2.2. e' diagrammato il termine dovuto all'attivita', $(v_{ar} - v_a)$, in funzione di (M/A_b) .

Tra le due relazioni (2.14) e (2.15) si utilizza quella che comporta il valore di h_c piu' alto.

Ovviamente, se il soggetto e' nudo, e' $f_{cl} = 1$ e $t_{cl} = t_{sk}$.

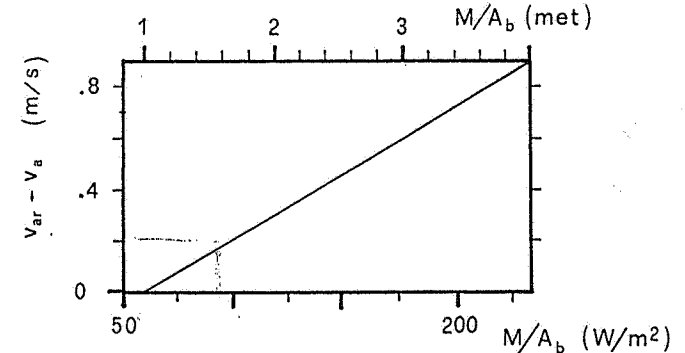


Fig. 2.2. - Diagramma per il calcolo della componente della velocita' relativa dell'aria dovuta all'attivita', $(v_{ar} - v_a)$, in funzione del metabolismo energetico, M/A_b .

In definitiva, la potenza termica dispersa per convezione e' funzione delle seguenti variabili:

- temperatura della superficie esterna del corpo vestito;
- temperatura dell'aria;
- velocita' relativa soggetto-aria (variabile quest'ultima che scompare nel caso di convezione naturale).
- coefficiente di area dell'abbigliamento, che a sua volta dipende essenzialmente dall'abbigliamento.

2.7. Potenza termica dispersa per irraggiamento

La potenza termica che il corpo umano scambia per irraggiamento con l'ambiente circostante può essere valutata con la nota relazione, valida per lo scambio radiativo tra due corpi, 1 e 2, con $A_2 \gg A_1$ e con il corpo 1 grigio:

$$\dot{Q}_{1 \rightarrow 2} = A_1 \epsilon_1 \sigma (T_1^4 - T_2^4) \quad (2.17)$$

Se il corpo 1 è delimitato da una superficie convessa, A_1 è proprio l'area della superficie del corpo 1; se il corpo 1 è delimitato da una superficie che presenta delle parti concave, A_1 è l'area della più piccola superficie tutta convessa che avvolge il corpo 1 e prende il nome di "area della superficie efficace".

Per lo scambio uomo-ambiente, indicando con R la potenza scambiata, la (2.17) diventa:

$$R = A_{\text{eff}} \epsilon \sigma \left[(t_{\text{cl}} + 273)^4 - (t_{\text{mr}} + 273)^4 \right] \quad (2.18)$$

con:

R = potenza termica dispersa dal corpo umano per irraggiamento, W;

A_{eff} = area della superficie efficace del corpo umano, m^2 ;

ϵ = emittanza totale del corpo umano, adim;

σ = costante di Stefan-Boltzmann, $= 5.67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ K}^4$;

t_{mr} = temperatura media radiante, ovvero temperatura di un ambiente fittizio termicamente uniforme che scambierebbe con l'uomo la stessa potenza termica radiante scambiata nell'ambiente reale, °C. La t_{mr} è data con ottima approssimazione dalla seguente relazione:

$$t_{\text{mr}} = \sum_i t_i F_{p-i} \quad (2.19)$$

con:

t_i = temperatura della generica superficie isoterma di solido (parete, suppellettile, altra persona, ecc.) che vede il soggetto, °C;

F_{p-i} = fattore di vista tra il soggetto e la generica superficie isoterma di solido, adim.

La (2.19) serve soprattutto per chiarire il concetto di temperatura media radiante, la cui misura si effettua invece con il globotermometro (cfr. 5.4.).

L'area della superficie efficace si può correlare all'area del corpo nudo, A_b , con la relazione:

$$A_{\text{eff}} = A_b f_{\text{cl}} f_{\text{eff}} \quad (2.20)$$

con:

f_{eff} = coefficiente di area efficace, $= A_{\text{eff}}/A_b$, adim.

Il coefficiente di area efficace è stato valutato - Fanger (1970) - pari a 0.696 per soggetti seduti e 0.725 per soggetti in piedi; se non è fissata la posizione delle persone, o se sono possibili entrambe le posizioni, si assume il valore di 0.71.

Per ϵ viene generalmente usato il valore 0.97, intermedio tra 0.95 (valore medio dell'emittanza degli abiti) e 1 (valore dell'emittanza della pelle).

Con questi valori di ϵ e f_{eff} e con la (2.20), la (2.18) si può scrivere:

$$R = 3.96 \cdot 10^{-8} f_{\text{cl}} A_b \left[(t_{\text{cl}} + 273)^4 - (t_{\text{mr}} + 273)^4 \right] \quad (2.21)$$

Poiché, come è noto, la potenza termica scambiata per irraggiamento tra due corpi si può sempre esprimere come prodotto della differenza delle temperature per una conduttanza radiativa, h_r , la (2.21) può anche scriversi:

$$R = f_{\text{cl}} A_b h_r (t_{\text{cl}} - t_{\text{mr}}) \quad (2.22)$$

Ovviamente per persona nuda è $f_{\text{cl}} = 1$ e $t_{\text{cl}} = t_{\text{sk}}$.

In definitiva la potenza termica dispersa per irraggiamento è funzione delle seguenti variabili:

- temperatura della superficie esterna del corpo vestito;
- temperatura media radiante;
- coefficiente di area dell'abbigliamento, che a sua volta dipende essenzialmente dall'abbigliamento.

2.8. Potenza termica dispersa per conduzione

Il termine C_k rappresenta la potenza termica dispersa per conduzione attraverso i solidi a contatto con il corpo umano. Rientrano quindi in C_k la potenza termica che si scambia tra i piedi e il pavimento, C_k la potenza termica che si scambia con la sedia nel caso di soggetto seduto, ecc. Rientra in C_k anche la potenza termica che il soggetto scambia con gli oggetti tenuti in mano.

Quasi sempre il termine C_k è trascurabile e pertanto nella pratica generalmente non se ne tiene conto; inoltre è di difficile valutazione. In ogni caso, se C_k non è trascurabile o se se

ne vuole comunque tener conto, si può variare opportunamente il valore della resistenza termica dell'abbigliamento (cfr. 2.9.).

2.9. Altre espressioni per calcolare la potenza termica dispersa per convezione e irraggiamento

La somma della potenza termica dispersa per convezione e di quella dispersa per irraggiamento rappresenta la potenza termica dispersa come "calore sensibile" attraverso la pelle e viene anche chiamata potenza termica "secca" in contrapposizione alla potenza termica globalmente dispersa attraverso la pelle come "calore latente", E_{sk} , che rappresenta quella "evaporativa".

2.9.1. Temperatura operativa

La potenza termica secca, dalla (2.13) e dalla (2.22), può anche essere scritta nella forma:

$$R + C = f_{cl} A_b [h_r (t_{cl} - t_{mr}) + h_c (t_{cl} - t_a)] \quad (2.23)$$

che ponendo:

$$t_o = \frac{h_r t_{mr} + h_c t_a}{h} \quad (2.24)$$

e:

$$h = h_r + h_c \quad (2.25)$$

diventa:

$$R + C = f_{cl} A_b h (t_{cl} - t_o) \quad (2.26)$$

La t_o , definita proprio dalla (2.26), viene detta temperatura operativa e rappresenta la media pesata di t_{mr} e t_a con h_c e h_r coefficienti di peso.

Negli ambienti termicamente moderati per $t_{cl} - t_a < 4^\circ C$ si può assumere t_o pari alla media aritmetica di t_{mr} e t_a . Volendo una maggiore precisione, si può usare la relazione:

$$t_o = A t_a + (1-A) t_{mr} \quad (2.27)$$

Capitolo secondo - Bilancio di energia termica sul corpo umano

con:

$$\begin{aligned} A &= 0.5 \text{ per } v_a < 0.2 \text{ m/s;} \\ A &= 0.6 \text{ per } v_a \text{ (0.2 + 0.6) m/s;} \\ A &= 0.7 \text{ per } v_a \text{ (0.6 + 1.0) m/s;} \end{aligned}$$

2.9.2. Resistenza termica dell'abbigliamento

La relazione

$$R + C = \frac{A_b (t_{sk} - t_{cl})}{R_{cl}} \quad (2.28)$$

definisce la resistenza termica dell'abbigliamento, R_{cl} . Concettualmente nell'abbigliamento lo scambio termico avviene secondo diversi meccanismi: i diversi capi non sono sempre perfettamente a contatto, ed i tessuti di cui essi sono fatti sono costituiti da fibre: lo scambio avviene per conduzione attraverso le parti solide, per convezione ed irraggiamento negli spazi occupati dall'aria. Pertanto R_{cl} rappresenta una resistenza termica unitaria conduttiva equivalente. Relativamente alla (2.28) ci sono da fare anche altre osservazioni:

- t_{sk} e t_{cl} sono valori medi, essendo abbastanza variabili localmente;
- la (2.28) presuppone la condizione di regime permanente, e cioè che la potenza termica che attraversa l'abbigliamento sia uguale a quella che si disperde nell'ambiente.
- la (2.28) presuppone che il corpo sia interamente coperto dall'abbigliamento, mentre generalmente ciò non è vero.

In definitiva possiamo dire che R_{cl} rappresenta la resistenza termica unitaria di un solido ideale che, disposto uniformemente su tutto il corpo - a temperatura della pelle uniforme e pari a t_{sk} - in condizioni di regime permanente farebbe disperdere una potenza termica pari a quella effettiva ($R + C$), essendo la temperatura della superficie esterna uniforme e pari a t_{cl} .

Generalmente, per la resistenza termica unitaria dell'abbigliamento viene usata un'unità di misura incoerente, il "clo", essendo

$$1 \text{ clo} = 0,155 \text{ m}^2 \text{ K/W} \quad (2.29)$$

$$1 \text{ clo} = 0,180 \text{ m}^2 \text{ Kh/kcal} \quad (2.30)$$

e quando si usa come misura il clo, la resistenza termica unitaria dell'abbigliamento si indica con I_{cl} . Pertanto nel Sistema Internazionale la (2.28) si trova generalmente nella forma:

$$R + C = A_b \frac{t_{sk} - t_{cl}}{0.155 I_{cl}} \quad (2.31)$$

Al punto 5.3. si accennera' alle misure ed alla valutazione di I_{cl} . Nell'appendice C dell'allegato 1 e nella tabella 2 dell'allegato 2 sono riportati alcuni valori di I_{cl} . Si noti che un abbigliamento tipico estivo ha una resistenza termica di 0.3 ± 0.5 clo, mentre un abbigliamento tipico invernale ha una resistenza di 1.00 ± 1.50 clo.

Infine osserviamo che dalla (2.31) e dalla (2.26) si ricava la relazione:

$$R + C = A_b \frac{t_{sk} - t_o}{0.155 I_{cl} + 1/f_{cl} h} \quad (2.32)$$

che, rispetto alle (2.13), (2.22), (2.31) e (2.26) ha il vantaggio di non contenere t_{cl} , grandezza di difficilissima misurazione.

Con la (2.32) risulta che il termine $(R + C)$ e' funzione delle seguenti variabili:

- temperatura della pelle;
- temperatura dell'aria;
- temperatura media radiante;
- abbigliamento;
- velocita' relativa soggetto-aria.

3. BENESSERE TERMOIGROMETRICO ED INDICI DI COMFORT

3.1. Benessere termoigrometrico

La condizione di benessere termoigrometrico viene definita come quello stato psicofisico in cui il soggetto esprime soddisfazione nei riguardi del microclima; oppure come la condizione in cui il soggetto non ha ne' sensazione di caldo ne' sensazione di freddo: e' cioe', come si dice anche, una condizione termoigrometricamente neutra.

Le due definizioni sono del tutto equivalenti ed abbastanza semplici. Piu' complesso e' il problema di esprimere in termini fisiologici il benessere termoigrometrico.

Una condizione necessaria di benessere e' che l'energia interna del corpo umano non aumenti ne' diminuisca, ovvero che sia nullo il termine di accumulo, S , nell'equazione (2.1) di bilancio di energia sul corpo umano. Per $S = 0$ e $C_k = 0$ la (2.1), ricordando le variabili da cui dipendono i termini che in essa compaiono, diventa una relazione del tipo:

$$f(\text{abbigliamento}, \text{attivita}', t_a, v_a, \phi, t_{mr}, t_{sk}, E_{sw}) = 0 \quad (3.1)$$

e' cioe' un'equazione che lega tra loro otto variabili: l'abbigliamento* e l'attivita' del soggetto, quattro variabili ambien-

* L'abbigliamento entra nei termini R e C , cfr. 2.9, con la sua resistenza termica. Recentemente pero' - Oohori (1984), Gagge (1985) - e' (continua alla pag. seguente)

tali (temperatura, velocità e umidità dell'aria, temperatura media radiante) e due variabili fisiologiche (temperatura della pelle e potenza termica dispersa per sudorazione o percentuale di pelle bagnata dal sudore).

In verità le due variabili fisiologiche non sono variabili indipendenti ma dipendono con legge complessa dalle altre; pertanto sono sei le variabili indipendenti da cui dipende effettivamente il benessere termoigrometrico. Ciò significa che concettualmente esistono 6 combinazioni di valori delle sei variabili per le quali è verificata la (3.1), ovvero il bilancio di energia sul corpo umano in condizioni di regime permanente. La verifica della (3.1) è però, come si è detto, condizione necessaria ma non sufficiente per il benessere termoigrometrico.

In passato si riteneva che un'altra condizione necessaria per il benessere fosse la non attivazione dei meccanismi di termoregolazione. Con lo sviluppo che ha avuto negli ultimi venti anni il settore della fisiologia della termoregolazione, si è visto che in benessere non si ha l'attivazione dei meccanismi di termoregolazione solo quando il soggetto non svolge praticamente alcuna attività: all'aumentare dell'attività anche in condizioni di benessere si innescano e si intensificano sia il meccanismo della sudorazione che quello vasomotorio.

Fanger - Fanger (1970) - ha il grande merito di aver studiato questo aspetto e di aver proposto per le condizioni di benessere le due equazioni che seguono:

$$E_{sw} = 0.42A_b ((M-W)/A_b - 58.15) \quad (3.2)$$

$$t_{sk} = 35.7 - 0.0275(M-W)/A_b \quad (3.3)$$

Dalle equazioni (3.2) e (3.3) si ricava p.e. che per $(M-W)/A_b = 3 \text{ met} = 174 \text{ W/m}^2$, si ha una produzione di sudore di 130 g/h ed una temperatura della pelle di 31°C. D'altra parte, il corpo umano che in benessere ed a riposo smaltisce 58.15 W/m² con un nucleo a 37°C, una t_{sk} di 35.7°C e senza sudorazione, per smaltire sempre in benessere 174 W/m², con un nucleo praticamente ancora a 37°C, deve necessariamente modificare i valori di altre grandezze.

In definitiva risulta allora che le combinazioni delle sei variabili indipendenti che soddisfano contemporaneamente la (3.1), la (3.2) e la (3.3) sono le possibili condizioni di benessere termoigrometrico.

* (continua dalla pag. precedente) stato verificato che l'abbigliamento, a causa della sua resistenza alla diffusione del vapore, influisce anche sul termine E_{sk} . L'argomento esula però degli scopi di questo testo.

3.2. Generalità sugli indici di comfort

Spesso, anche se si è a regime permanente, cioè se è verificata la (3.1) ma non lo sono la (3.2) e la (3.3), non ci si trova in condizioni di benessere; sorge allora il problema di valutare lo scostamento delle condizioni reali dal benessere. Questo problema si risolve mediante opportuni indici, gli indici di comfort, che siano funzione delle sei variabili di cui si è parlato e che assumano lo stesso valore per tutte le combinazioni di queste ultime che danno uguali sensazioni termiche. E la ricerca applicata in questo settore negli ultimi cinquant'anni si è svolta proprio nella direzione della ricerca di un indice ottimale.

Gli indici di comfort si dividono in due gruppi: indici di sensazione ed indici di temperatura. Si dicono indici di sensazione quelli che esprimono la votazione che un soggetto darebbe al microclima; ovviamente la votazione presuppone una scala di voti e la più diffusa è quella a sette valori:

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

Gli indici di temperatura sono invece quelli che rappresentano temperature equivalenti, concetto che sarà chiarito nei paragrafi 3.4 e 3.5. Nel seguito esamineremo gli indici PMV e PPD, che sono indici di sensazione, e gli indici ET e ET*, che sono indici di temperatura.

Infine c'è da sottolineare che gli indici esprimono la risposta media di un gran numero di soggetti, il che significa, come si vedrà accuratamente esaminando l'indice PMV, che per valori dell'indice corrispondenti a condizioni di benessere ci possono comunque essere individui che avvertono sensazione di caldo o di freddo.

3.3. L'indice PMV (Predicted Mean Vote)

L'indice PMV (Voto medio previsto) proposto da Fanger - Fanger (1970) - si basa su due posizioni:

a) La sensazione di caldo o di freddo che prova un individuo e' proporzionale al "carico termico", L, definito come la differenza tra l'energia termica che si genera all'interno del corpo umano, (M - W), e l'energia termica che l'individuo disperderebbe se fosse in benessere con il valore reale di (M - W), cioe' dell'attivita' svolta:

$$L = (M - W) - (E_d^* + E_{sw}^* + E_{ve} + C_{ve} + C^* + R^*) \quad (3.4)$$

Nella (3.4) E_{sw}^* - che per la (3.2) dipende da (M - W) -, E_d , C ed R - che dipendono da t_{sk} e quindi, per la (3.3) da (M - W) - sono state asteriscate per ricordare che non rappresentano valori reali ma i valori che si avrebbero nelle suddette condizioni di benessere.

b) La relazione tra l'indice PMV, ovvero la sensazione di caldo o di freddo di un individuo medio espressa come voto sulla scala a sette valori riportata al paragrafo 3.2., ed il carico termico ora definito e' la seguente:

$$PMV = (0.303 \exp(-0.036M) + 0.028)L \quad (3.5)$$

Le posizioni richiamate sono state fatte da Fanger analizzando le esperienze condotte su circa 1300 individui, esperienze che assicurano la validita' dell'indice e, come si dira' alla fine di questo paragrafo, ne determinano anche alcuni limiti.

Dalla (3.4) e dalla (3.5), sostituendo E_d^* con la (2.5), E_{sw}^* con la (3.2), E_{ve} con la (2.10), C_{ve} con la (2.13), C^* e R^* con la (2.14) e la (2.21), ed eliminando t_{sk} con la (3.3), si ottiene l'espressione del PMV:

$$PMV = \left[0.303 \exp(-0.036M/A_b) + 0.028 \right] \left\{ (M/A_b)(1 - n) + \right. \\ - 3.05 \cdot 10^{-3} \left[5733 - 6.99(M/A_b)(1 - n) - \phi_{p_{as}} \right] + \\ - 0.42 \left[(M/A_b)(1 - n) - 58.15 \right] + \\ - 1.7 \cdot 10^{-5} (M/A_b)(5867 - \phi_{p_{as}}) + \\ - 0.0014(M/A_b)(34 - t_a) - f_{cl} h_c (t_{cl}^* - t_a) + \\ \left. - 3.96 \cdot 10^{-8} f_{cl} \left[(t_{cl}^* + 273)^4 - (t_{mr} + 273)^4 \right] \right\} \quad (3.6)$$

che e' l'equazione (1) riportata al paragrafo 3.1 dell'allegato 1.

Nell'espressione del PMV si ritrova t_{cl}^* , calcolabile con l'equazione:

$$R^* + C^* = A_b (t_{sk}^* - t_{cl}^*) / I_{cl} \quad (3.7)$$

che non e' altro che la (2.28) scritta al solito per la richiamata condizione fittizia di benessere.

Le equazioni (3.6) e (3.7) permettono di:

1. calcolare l'indice PMV corrispondente ad una certa attivita' (M - W), ad un certo abbigliamento (I_{cl}) e ad un certo microclima (t_a , t_{mr} , v e ϕ);
2. stabilire, fissate cinque delle sei variabili indipendenti, per quale valore della sesta l'indice PMV assume un determinato valore, ovvero a quale valore della sesta variabile corrisponde una certa sensazione termica;
3. (caso particolare del 2.) stabilire, fissate cinque delle sei variabili indipendenti, per quale valore della sesta l'individuo medio e' in condizioni di benessere, ovvero e' a $PMV = 0$.

Per quanto riguarda il punto 1., nell'appendice D dell'allegato 1 e' fornito il listato del programma per il calcolo dell'indice PMV. Per i punti 2. e 3. il calcolo e' piu' complesso - Alfano (1984a) - e l'argomento esula dagli scopi di questo testo.

Analizzando le equazioni per il calcolo del PMV, risulta - Fanger (1970) - che per gli ambienti moderati l'umidita' influisce molto poco sul valore della sensazione termica. In figura 3.1. - Fulci (1984) - si riporta un diagramma che riteniamo chiarisca bene questa influenza; il diagramma e' relativo ad $n = 0$, $M/A_b = 70.0 \text{ W/m}^2$, aria stagnante, $t_a = t_{mr}$, e riporta l'andamento delle curve a $PMV = 0.00, +0.50, -0.50$ per $\phi = 0.30, 0.50$ e 0.70 . Dalla figura 3.1. si vede che a parita' di ogni altra variabile la t_a varia al massimo di 1°C passando da $\phi = 0.30$ a $\phi = 0.70$, che rappresentano i limiti entro i quali e' consigliabile rimanere.

E' comunque opportuno chiarire che i limiti di 0.30 e 0.70 per l'umidita' relativa sono dovuti a motivi indipendenti dalle sensazioni termiche: per valori minori di 0.30 si seccano le mucose con diminuzione delle difese da germi e batteri, per valori maggiori di 0.70 aumentano i rischi di allergie e le probabilita' che si formi condensa su punti freddi con conseguente sviluppo di muffe - Fanger (1983) -.

Nell'appendice E dell'allegato 1 sono poi riportate alcune tabelle che permettono di calcolare rapidamente il PMV; tali tabelle, otto complessivamente, sono tutte relative a $\phi = 0.50$

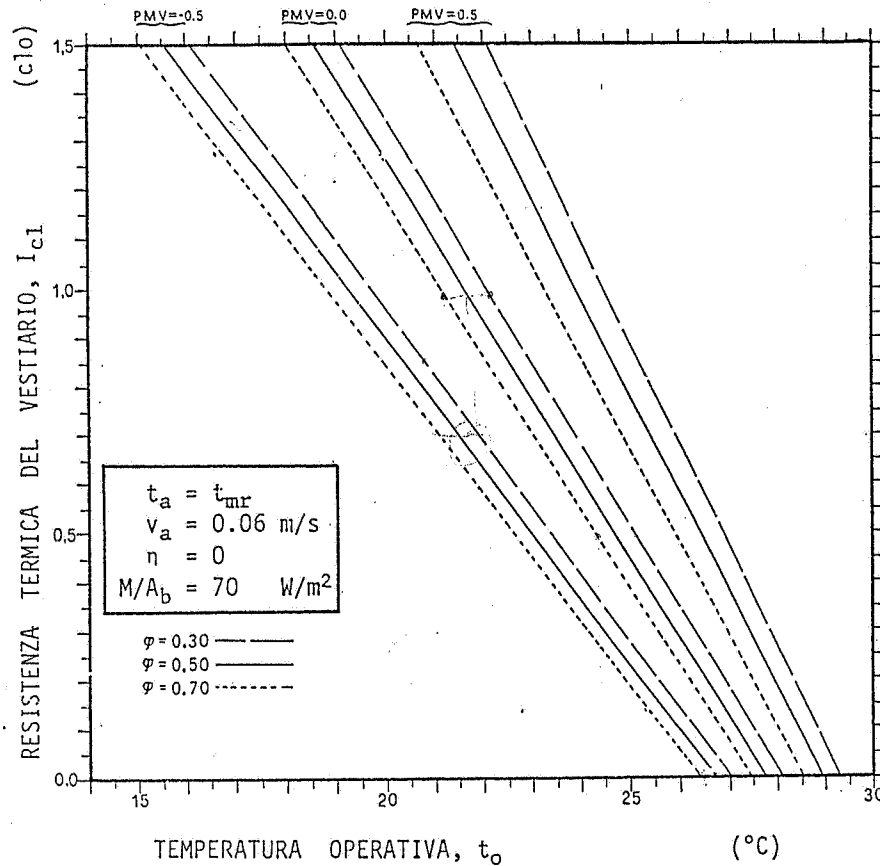


Fig. 3.1. - Curve a PMV = 0.00, +0.50 e -0.50 per attivita' leggera, aria stagnante e ambiente termico uniforme, valutate per tre diversi valori del grado igrometrico.

(ma, come si e' visto, l'umidita' relativa influisce poco sul PMV), e a rendimento meccanico, n , nullo (si noti che per la (2.3) rendimento meccanico nullo significa anche $W = 0$).

L'indice PMV si e' molto diffuso negli ultimi dieci anni e, come si vedra', e' alla base della normativa ISO per gli ambienti moderati (allegato 1); si ritiene quindi opportuno sottolinearne i limiti:

1. come si e' detto all'inizio di questo paragrafo, i valori di R , C , E_{sw} , E_{sk} , t_{sk} e t_{cl} che si utilizzano per calcolare il valore del PMV sono quelli effettivi solo in condizioni di benessere ($PMV = 0$);
2. l'equazione (3.5) e' stata ricavata da esperienze condotte su individui che svolgevano essenzialmente attivita' leggere, ne' in seguito e' stata verificata per attivita' intense; pertanto la sua validita' per valori di $(M - W)$ maggiori di 2 met e' tutta da dimostrare;
3. e' ormai accettato che l'indice PMV tende a sovrastimare il discomfort per valori dell'umidita' relativa minori di 0.20-0.30 e a sottostimare per valori maggiori di 0.70-0.80;
4. l'indice non fornisce risultati significativi per valori del PMV esterni all'intervallo $(-2, +2)$.

3.4. L'indice PPD (Predicted Percentage of Dissatisfied)

Come si e' detto, il PMV rappresenta il voto di un individuo medio ovvero la media dei voti espressi da un gran numero di persone poste nelle stesse condizioni. Sperimentalmente si e' visto che i voti dei singoli individui presentano una certa dispersione intorno al valore medio. Fanger - Fanger (1970) - defini' PPD la percentuale prevista di insoddisfatti, ritenendo insoddisfatti coloro che votavano ± 2 o ± 3 , e utilizzando i dati raccolti sui 1300 soggetti dei quali si e' parlato al 3.3. correla' il PMV al PPD. In tal modo ottenne la tabella 3.1. (simile alla tabella 1 dell'allegato 1) ed il diagramma di figura 3.2. (identico a quello di figura 1 dell'allegato 1); dalla tabella e dalla figura si evince che per PMV uguale a 0 la percentuale di insoddisfatti fu pari al 5%, mentre il 40% delle persone non ritenne di essere in condizioni di benessere, ma voto' ± 1 . Questo risultato, accettato da tutti, evidenzia come le risposte soggettive siano molto diverse tra di loro e come sia quindi impensabile realizzare condizioni che siano di comfort per tutti.

Si tenga anche presente che Fanger ricavo' la tabella 3.1. e la figura 3.2. utilizzando prove su studenti universitari vestiti

tutti allo stesso modo. E' da ritenere che nei normali ambienti moderati, dove l'eta', le condizioni psicofisiche, l'abbigliamento ecc. degli individui sono sicuramente piu' vari che non nelle condizioni del test di Fanger, la percentuale di insoddisfatti sia leggermente superiore a quella ottenibile con il diagramma di figura 3.2.

Considerazioni economiche e la quasi impossibilita' di eliminare disuniformita' negli spazi climatizzati orientarono l'ISO a ritenere accettabili ambienti con un PPD inferiore o uguale al 10%, ovvero con un PMV compreso tra - 0.5 e + 0.5.

Nelle figure 3.3. e 3.4. sono riportati due diagrammi di grande utilita' nella pratica. La figura 3.3., che e' la stessa riportata dalla norma ISO (figura 2 dell'allegato 1) riporta le curve a t_o di benessere in funzione di I_{cl} e di M/A_b . Il diagramma e' per $\phi = 0.50$ ed $\eta = W = 0$. La velocita' v_a e' calcolata con la (2.16) ponendo $v_a = 0$. In pratica il diagramma e' utilizzabile per valori di v_a compresi tra 0.0 e 0.15. Il diagramma e' diviso in zone, ciascuna caratterizzata da un Δt ammissibile, intendendo per Δt ammissibile lo scarto tra la temperatura operativa e quella di benessere con il quale, a parita' di altre variabili, si rimane nel campo dei valori ammissibili per PMV (-0.5, +0.5). Per esempio per $M/A_b = 2.0$ met ed $I_{cl} = 1.00$ clo dal diagramma di figura 3.3. si ricava innanzitutto che la t_o di benessere e' all'incirca 16.5°C; si ricava inoltre che il Δt ammissibile e' di 3°C, ovvero che per t_o compresa tra 13.5 e 19.5°C si e' nel campo di PMV -0.5, +0.5.

Tab. 3.1. - Distribuzione dei voti espressi per alcuni valori di PMV.

PMV	percentuale di persone che votano				PPD
	0	+1	+2	+3	
+2	5	20	45	30	75
+1	27	48	20	5	25
+0.5	45	45	9	1	10
0.0	55	40	5	0	5
-0.5	45	45	9	1	10
-1	27	48	20	5	25
-2	5	20	45	30	75

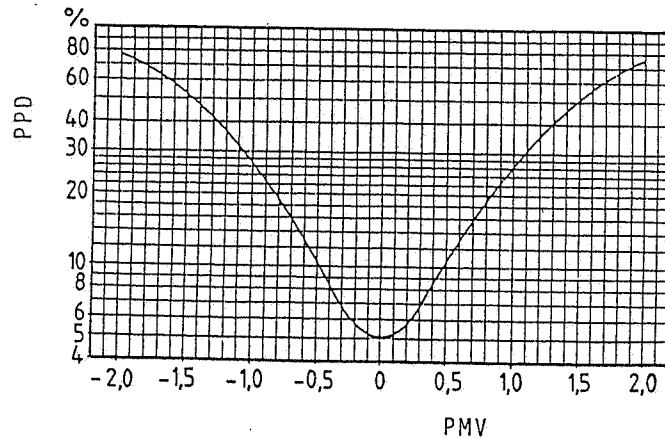


Fig. 3.2. - Percentuale prevista di insoddisfatti (PPD) in funzione del voto medio previsto (PMV). Da - ISO (1984) -.

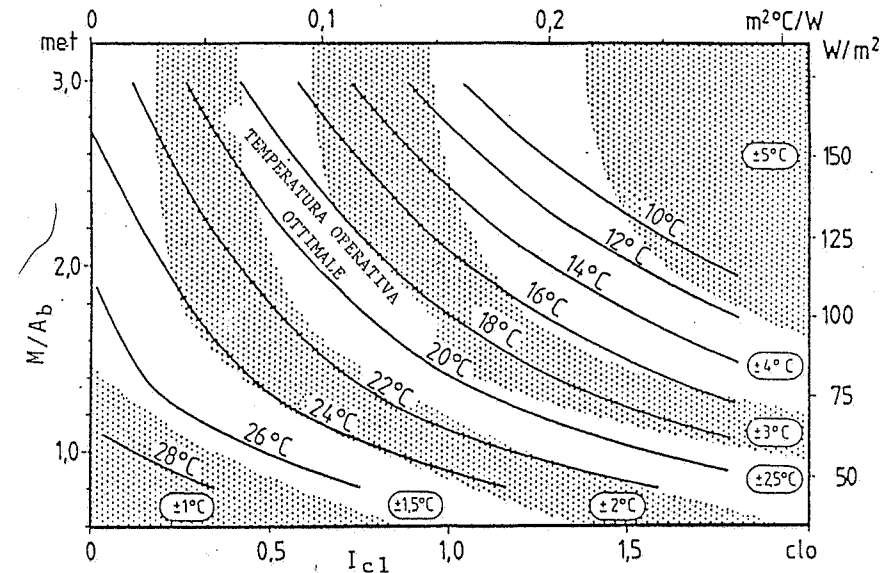


Fig. 3.3. - Curve a t_o costante e di benessere in funzione di M/A_b e di I_{cl} per $\phi = 0.50$, $\eta = W = 0$ e v_a calcolata con la (2.16) per $v_a = 0$. Da - ISO (1984) -.

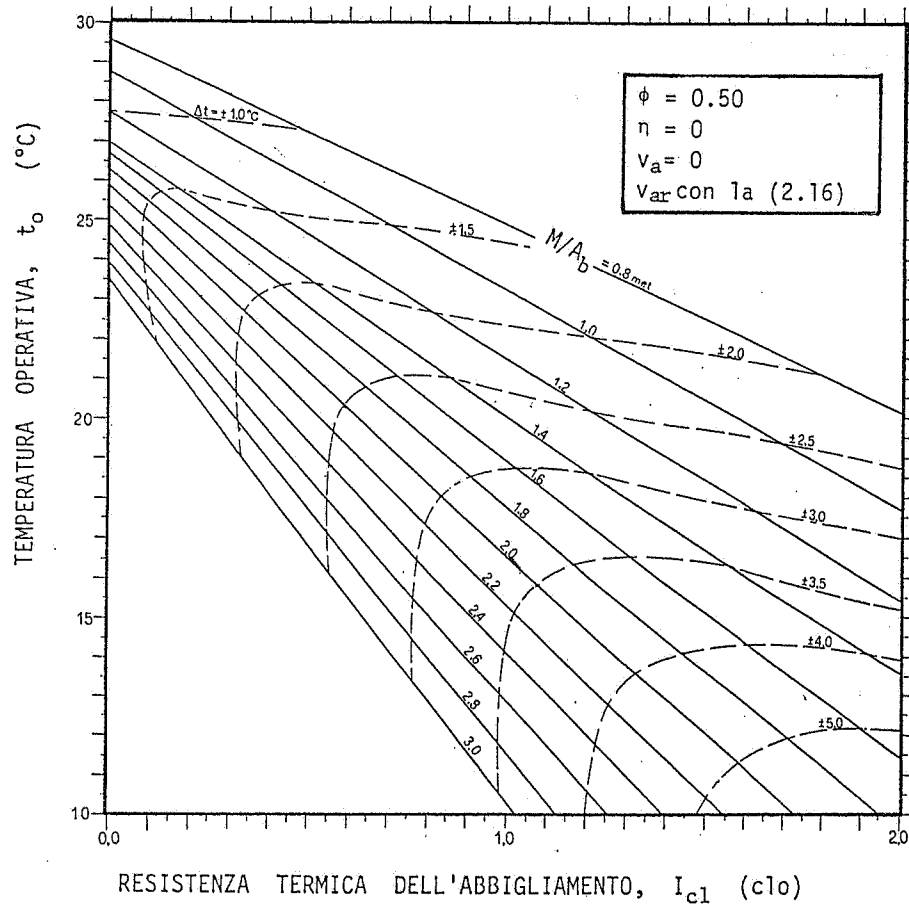


Fig. 3.4. - Diagramma generale del benessere termico. Le curve continue rappresentano il luogo delle condizioni ottimali ($PMV = 0$) in funzione di t_o e di I_{cl} per ogni valore del metabolismo energetico M/A_b espresso in met. Le curve tratteggiate rappresentano il luogo dei punti per i quali lo scostamento accettabile dalla temperatura di comfort, perché rimanga $-0.50 < PMV < +0.50$, è costante e uguale al valore indicato.

La figura 3.4. - Fulci (1984) - differisce dalla figura 3.3. solo per avere le posizioni delle variabili t_o e M/A_b invertite. I luoghi dei punti a t_o ammissibili costanti sono rappresentati da curve e non da strisce, il che forse ne facilita l'uso: per $I_{cl} = 1.00$ e $M/A_b = 2.0$ met, dal diagramma di figura 3.4. si ricava che il t_o ammissibile è di circa 3.3°C , e quindi t_a può variare tra 13.2 e 19.8°C .

Esempio 3.1.

Si vogliono realizzare condizioni di benessere termoigrometrico all'interno di un ristorante in cui sia: $v = 0.10$ m/s, $\phi = 0.50$; considerando l'ambiente termicamente uniforme ($t_a = t_{mr}$), VALUTARE LA NECESSARIA TEMPERATURA OPERATIVA.

Soluzione È possibile ritenere che nel locale in esame si svolgano attività sedentarie (e quindi M/A_b circa uguale a 1.2 met e rendimento meccanico nullo) e dalla (2.16) per $M/A_b = 1.2$ met e $v_{ar} = v + 0.06 = 0.16$ m/s. Per quanto riguarda l'abbigliamento, è possibile ipotizzare un valore di resistenza termica pari a 0.50 clo in estate (pantaloni o gonna leggeri, camicia, scarpe) e pari a 1.00 clo in inverno (abito completo maschile con pullover). Dalla tabella E.2 dell'allegato 1 interpolando si ricava che per ottenere condizioni di benessere termoigrometrico, ovvero $-0.50 < PMV < +0.50$ deve essere: in estate $23 < t < 27^\circ\text{C}$; in inverno $20 < t < 24^\circ\text{C}$. La figura 3.4. fornisce i seguenti valori: in estate neutralità termica a 25°C e benessere tra circa 23 e 27°C ; in inverno neutralità termica a 22°C e benessere tra circa 19.2 e 23.7°C . Comunque la figura 3.4., così come la 3.1. e la 3.3. (ovvero la figura 2 dell'allegato 1) che danno gli stessi risultati, è relativa ad una $v_{ar} = 0.06$ m/s.

Esempio 3.2.

A parità di velocità e grado igrometrico dell'aria ($v = 0.15$ m/s, $\phi = 0.50$) VALUTARE LA TEMPERATURA OPERATIVA di neutralità termica per una persona che svolga un'attività di 1.0 met con $\eta = 0$, per $I_{cl} = 0.50$ clo e per $I_{cl} = 1.00$ clo.

Soluzione Essendo $M/A_b = 1.0$ met, per la (2.16) è $v_{ar} = v$. Dalla tabella E.1 dell'allegato 1 interpolando si ricava che deve essere $t_o = 26^\circ\text{C}$ per $I_{cl} = 0.50$ clo e $t_o = 24^\circ\text{C}$ per $I_{cl} = 1.00$ clo. Come si è visto nell'esempio 1, è possibile usare anche le figure 3.3. e 3.4., che in questo caso sono però relative a velocità nulla (ovvero ad aria stagnante che comporta comunque moti convettivi naturali).

Esempio 3.3.

Per le condizioni di temperatura ambiente previste dalla L. 373 ($t = 20^\circ\text{C}$), per $v = 0.06$ m/s e per attività di 1.2 met ($\eta = 0$) VALUTARE I VALORI DI I_{cl} NECESSARI PERCHÉ SI VERIFICHINO CONDIZIONI DI NEUTRALITÀ TERMICA con valori di ϕ di 0.30, 0.50 e 0.70.

Soluzione Dalla Figura 3.1. si ricava: $I_{cl} = 1.20$ clo per $\phi = 0.70$, $I_{cl} = 1.26$ clo per $\phi = 0.50$ e $I_{cl} = 1.35$ clo per $\phi = 0.30$. Per $\phi = 0.50$ si possono usare anche le figure 3.3 e 3.4 e la tabella E.2 dell'allegato 1.

Esempio 3.4.

In un locale adibito ad ufficio con $\phi = 0.50$, $v_{ar} = 0.10$ m/s, viene installato un sistema di riscaldamento a pannelli radianti; supponendo di ottenere in tal modo una $t_{mr} = t_a + 10^\circ\text{C}$, CALCOLARE I VALORI DI t_{mr} E DI t_a che si devono raggiungere per avere condizioni di benessere termoigrometrico durante la stagione invernale ($I_{cl} = 1.00$ clo).

Soluzione Considerando $M/A_b = 58.15$ W/m² e ritenendo il rendimento meccanico nullo, dalla tabella E.1 dell'allegato 1 o dalle figure 3.3. e 3.4. (relative però a $v_{ar} = 0.06$ m/s) si ricava $t = 23^\circ\text{C}$; dalla definizione di temperatura operativa e dalla relazione (2.27) si ottiene che t_a^o e' proprio la media aritmetica di t_{mr} e t_a . Quindi: $t_{mr}^o = 28^\circ\text{C}$ e $t_a = 18^\circ\text{C}$.

Esempio 3.5.

VALUTARE LA RESISTENZA TERMICA DELL'ABBIGLIAMENTO da lavoro che determina condizioni di neutralità termica per degli operai che svolgono la loro attività ($M/A_b = 2$ met, $n = 0$) in ambienti con $t_o = 20^\circ\text{C}$, $v_a = 0.20$, $\phi = 0.50$.

Soluzione Dalla tabella E.6: $I_{cl} = 1.00$ clo.

Esempio 3.6.

Un capannone industriale e' riscaldato con un sistema ad infrarossi; la temperatura dell'aria e' uguale a 14°C ; il grado igrometrico dell'aria e' di 0.70. CALCOLARE LA TEMPERATURA MEDIA RADIANTE necessaria per ottenere condizioni di neutralità termica nell'ipotesi di aria stagnante, resistenza termica dell'abbigliamento pari a 1.00 clo, attività di 1.2 met e rendimento meccanico nullo.

Soluzione Dalla figura 3.1. si ricava $t_o = 21.0^\circ\text{C}$; per la (2.27) e' quindi $t_{mr} = 28^\circ\text{C}$. Dalle figure 3.3. e 3.4. e dalla tabella E.2 dell'allegato 1 si ricava un valore di t_a leggermente maggiore, che però e' relativo a $\phi = 0.50$ e non 0.70.

Esempio 3.7.

In una officina si ha necessità di mantenere la velocità dell'aria a 0.70 m/s. CALCOLARE LA TEMPERATURA OPERATIVA necessaria per la neutralità termica di soggetti che svolgano un'attività di 2 met ($n = 0.0$) e indossino un abbigliamento la cui resistenza termica sia di 1.00 clo.

Soluzione E' $v = 0.70 + 0.29 = 0.99$ m/s. Dalla tabella E.6 dell'allegato 1 si ricava $t_o = 18^\circ\text{C}$. Si noti che in questo caso ci sarà neutralità termica e benessere globale, ma può darsi che ci sia discomfort locale dovuto all'elevata velocità dell'aria (cfr. 4.4.).

4. DISCOMFORT LOCALE

4.1. Generalità

Nel capitolo 3. si e' parlato di benessere termoigrometrico e di indici di benessere. C'e' da precisare pero' che gli indici di cui si e' parlato (ET, ET* e PMV) danno una valutazione del comfort in funzione dei valori medi delle variabili ambientali, o, come suoi dirsi, valutano il "comfort globale". Le condizioni $PMV \in (-0.5, +0.5)$ e $ET^* \in (ET^*_{lim,inf}, ET^*_{lim,sup})$ rappresentano pertanto condizioni necessarie ma non sufficienti per il comfort. Perche' ci sia effettivamente comfort, infatti, deve essere anche nullo il discomfort dovuto a disuniformita' delle variabili ambientali, cioe' non deve esserci "discomfort locale".

Le cause di discomfort locale, che saranno qui di seguito esaminate, sono sostanzialmente quattro - ISO (1984), Olesen (1985a) -:

1. elevata differenza verticale di temperatura;
2. pavimento troppo caldo o troppo freddo;
3. correnti d'aria;
4. elevata asimmetria media radiante;

4.2. Elevata differenza verticale di temperatura

Generalmente negli ambienti chiusi esiste un gradiente ver-

ticale della temperatura dell'aria; in particolare la temperatura in prossimità del soffitto è maggiore di quella al pavimento. Questa differenza oltre a comportare un maggior consumo di energia, (nel caso di ambiente riscaldato), può comportare una sensazione di discomfort locale per i soggetti esposti a quel microclima, che possono avvertire caldo alla testa e/o freddo ai piedi. È da sottolineare che - Olesen (1985a) - mentre una temperatura a livello della testa maggiore di quella a livello delle caviglie può provocare discomfort locale, una temperatura a livello caviglie maggiore di quella a livello testa non comporta discomfort. Esempi di andamento della temperatura dell'aria in funzione dell'altezza dal pavimento per diversi tipi di riscaldamento ambientale sono riportati in figura 4.1.

In figura 4.2. è riportato un diagramma che permette - Fanger (1986a) - di ricavare la percentuale di insoddisfatti, PD, in funzione della differenza tra la temperatura dell'aria a livello della testa e quella a livello delle caviglie; è facile verificare che per ottenere una percentuale di insoddisfatti minore del 5% occorre che il Δt in questione sia minore di 3 °C, così come previsto sia dalla norma ISO 7730 (cfr. allegato 1, paragrafo A.1.1 e A.1.2) che dalla norma ASHRAE 55-81 (cfr. allegato 2, paragrafo 5.1.6.1.)*.

Va da sé che la percentuale di insoddisfatti di figura 4.2. non deve essere assolutamente confusa con l'indice PPD di Fanger (cfr. 3.4.) che si riferisce a condizioni di discomfort globale.

4.3. Pavimento troppo caldo o troppo freddo

La temperatura del pavimento ha una doppia influenza sulla sensazione termica: da una parte è determinante ai fini del valore della temperatura media radiante, dall'altra può causare discomfort locale ai piedi.

Per stabilire il grado di discomfort dovuto ad una temperatura del pavimento troppo bassa o troppo elevata, sono stati condotti alcuni esperimenti presso la Technical University of Denmark - Olesen (1977) - sia su persone scalze che su persone

* In verità tra le due norme c'è discordanza; infatti ambedue impongono che il massimo gradiente verticale di temperatura sia di 3°C, ma per l'ISO le temperature vanno misurate a 0.1 m e 1.1 m dal pavimento (considerando quindi il soggetto seduto), mentre per l'ASHRAE vanno misurate tra 0.1 m e 1.7 m dal pavimento (considerando il soggetto in piedi). Evidentemente il gradiente è per l'ISO di 3.0°C/m, per l'ASHRAE 1.9°C/m.

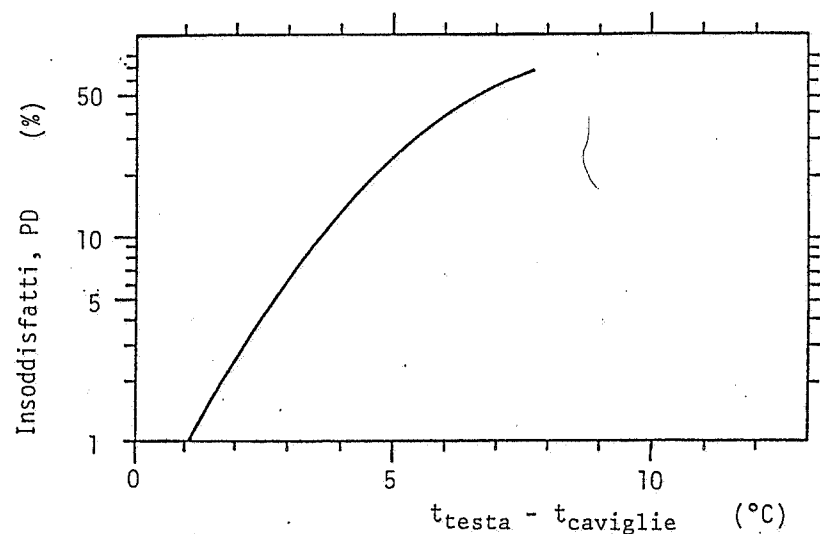
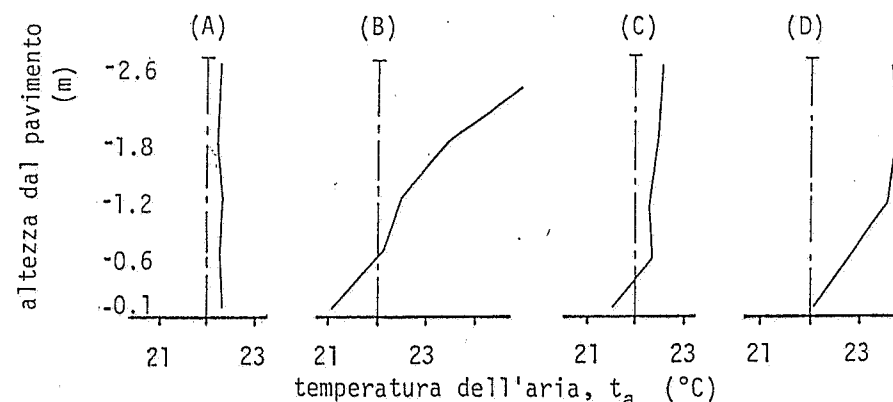


Fig. 4.2. - Percentuale di insoddisfatti in funzione della differenza tra la temperatura dell'aria a livello della testa e quella a livello delle caviglie. Da - Fanger (1986a) -.

con scarpe, estive e invernali, in condizioni di benessere globale.

4.3.1. Persone scalze

In questo caso la determinazione dei limiti di discomfort per la temperatura del pavimento e' importante nella progettazione di ambienti quali piscine coperte, palestre, spogliatoi, i cui occupanti si presuppone che restino a lungo scalzi. Le prove sperimentali furono fatte con pavimenti costituiti da diversi materiali e per due diversi tempi di esposizione; in tabella 4.1. sono riportati i diversi tipi di pavimento, le temperature ideali e gli intervalli di temperatura all'interno dei quali si dovrebbe avere una percentuale di insoddisfatti minore del 15%.

Le differenze tra i diversi tipi di materiale che risultano dalla tabella 4.1. trovano una spiegazione nel fatto che la sensazione di discomfort e' influenzata dal fatto che - Fanger (1970) - la pianta del piede appena tocca il pavimento si porta ad una temperatura il cui valore dipende dalla temperatura del pavimento e dal coefficiente di contatto, b, del materiale che costituisce la superficie del pavimento, coefficiente espresso dalla relazione:

$$b = (k\rho c)^{0.5} \quad (4.1)$$

con:

k = conducibilita', W/mK;

ρ = densita', kg/m³;

c = calore specifico, J/kgK.

In figura 4.3. sono riportati due diagrammi "percentuale di insoddisfatti - temperatura del pavimento" per i casi di pavimento in calcestruzzo e in legno e per esposizioni di 1 min e 10 min. E' evidente, come d'altra parte ci si poteva aspettare, che a parita' di temperatura un pavimento di legno comporta una percentuale di insoddisfatti minore che un pavimento di calcestruzzo. Nel caso di persone sedute, si deve tenere conto del fatto che generalmente queste preferiscono una temperatura piu' alta di circa 1°C rispetto a quelle in piedi.

Questo caso non e' previsto ne' dalla norma ISO ne' da quella ASHRAE.

4.3.2. Persone con scarpe

In questo caso il discomfort non e' piu' influenzato dal

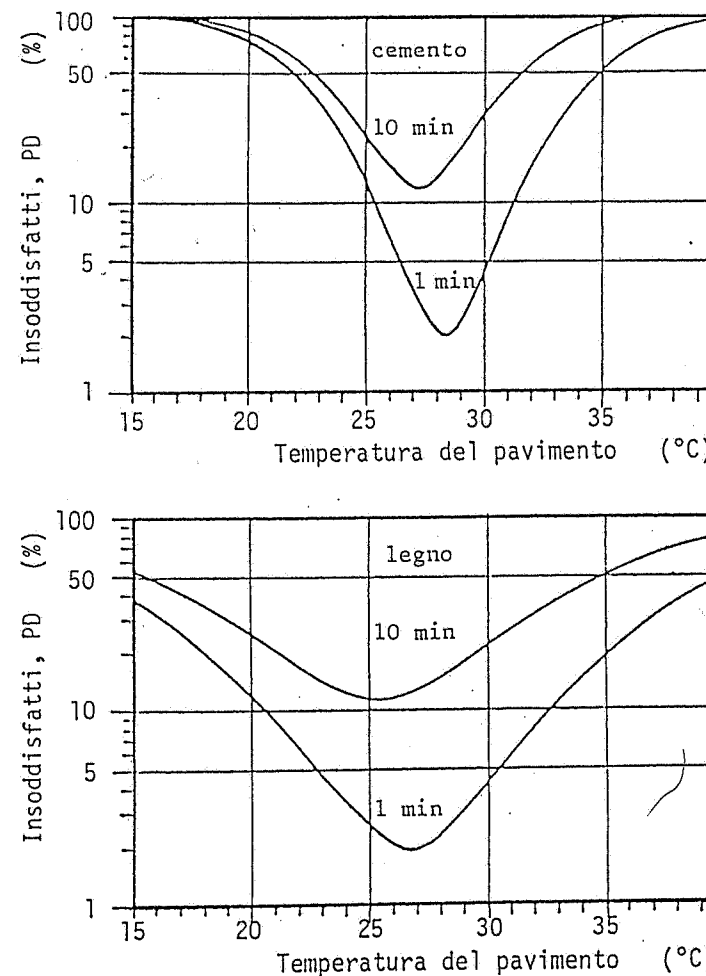


Fig. 4.3. - Percentuale di insoddisfatti in funzione della temperatura del pavimento nel caso di persone scalze e in piedi. Da - Olesen (1977) -.

Tab. 4.1. - Temperatura dei pavimenti per persone scalze. Da - Olesen (1985a) --

Materiale	Temperatura ideale del pavimento per una esposizione di		Intervallo raccomandato per la temperatura del pavimento (°C)
	1 min	10 min	
	(°C)	(°C)	
tessile (stuoie)	21	24.5	21 - 28
sughero	24	26	23 - 28
pino	25	26	22.5 - 28
quercia	26	26	24.5 - 28
foglio di PVC poggiato su feltro	28	27	25.5 - 28
linoleum	28	26	26 - 28.5
calcestruzzo	28.5	27	26 - 28.5
marmo	30	29	28 - 29.5

tipo di materiale usato per il pavimento ma dal tipo di scarpe e di calze indossate dalla persona.

In figura 4.4. e' riportato il diagramma "percentuale di insoddisfatti - temperatura del pavimento" per persone con scarpe e calze normali.

Per quanto riguarda la normativa, l'ASHRAE 55-81 (cfr. allegato 2, paragrafo 5.1.6.3) prevede, per persone con scarpe e calze idonee, un intervallo di temperatura del pavimento compreso tra 18 e 29 °C; l'ISO 7730, invece, prevede che la temperatura del pavimento possa variare tra 19 e 26 °C e che il progetto per un sistema di riscaldamento a pavimento possa essere fatto per una temperatura di 29 °C (cfr. allegato 1, paragrafo A.1.1).

4.4. Correnti d'aria

Il discomfort da corrente d'aria e' definito - Fanger (1970) - come un raffreddamento locale indesiderato del corpo umano causato dal movimento dell'aria. E' un problema molto delicato e dibattuto. E' un problema delicato perche' spesso sono proprio le correnti d'aria la causa del discomfort, soprattutto negli ambienti provvisti di impianti di climatizzazione con ven-

Capitolo quarto - Discomfort locale

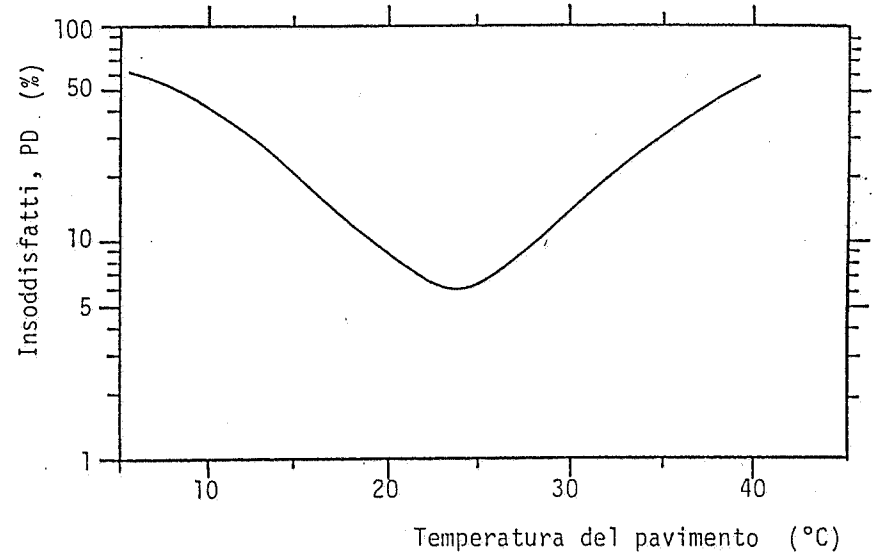


Fig. 4.4. - Percentuale di insoddisfatti in funzione della temperatura del pavimento nel caso di persone con scarpe e calze normali. Da - Fanger (1986a) --

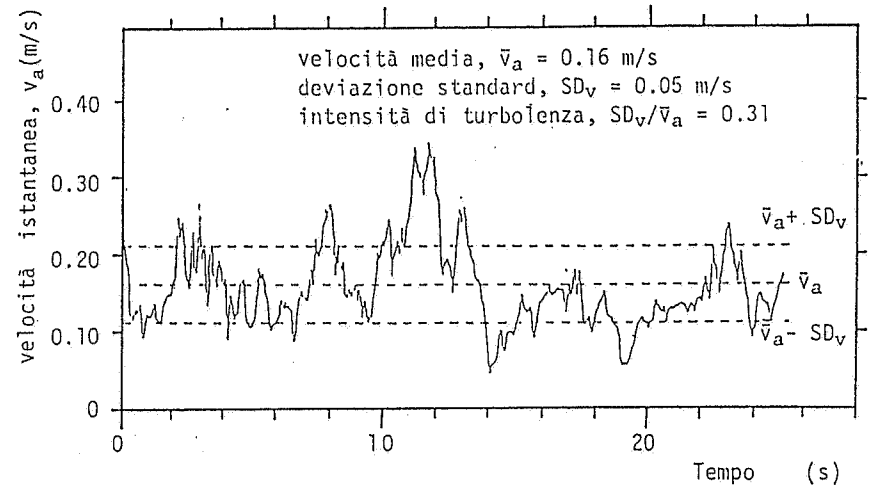


Fig. 4.5. - Fluttuazioni di velocità in uno spazio ventilato. Da - Fanger (1986a) --

tilazione forzata e nei mezzi di locomozione (auto, treni, ecc.). E' un problema dibattuto perche' sono in corso molte ricerche e non si sono ancora ottenuti risultati definitivi.

Come e' noto, il moto dell'aria negli ambienti e' turbolento, cioe' la velocita' istantanea dell'aria nel punto non e' costante nel tempo; anche nel caso in cui ci siano condizioni che farebbero pensare ad una situazione di regime permanente. In figura 4.5. sono riportate, ad esempio, le caratteristiche fluttuazioni di velocita' che si osservano nel punto di un ambiente. In figura sono indicati sia il valore della velocita' media, \bar{v}_a , che quello della deviazione standard*, SD_v ; il loro rapporto, SD_v/\bar{v}_a , e' detto intensita' di turbolenza. La velocita' dell'aria, v_a , di cui si e' parlato nei capitoli precedenti, e' in effetti proprio la velocita' media, e pertanto andrebbe indicata con \bar{v}_a . Per semplicita' generalmente si evita il soprascritto quando non c'e' rischio di confusione tra velocita' media e istantanea.

Sperimentalmente si e' verificato - Bahhidi (1985), Fanger (1977), Christensen (1984), Fanger (1986a), Fanger (1986b) - che la sensazione di discomfort da corrente d'aria e' influenzata:

- dal valore massimo e dalle fluttuazioni della velocita', che sono ben rappresentati dal valore medio e dalla deviazione standard;
- dalla temperatura della corrente (al crescere della temperatura diminuisce il discomfort);
- dalla differenza tra la temperatura media dell'aria ambiente e la temperatura della corrente (il discomfort aumenta all'aumentare di questa differenza);
- dalla zona del corpo che viene investita dalla corrente (le zone piu' sensibili sono testa, collo, spalle e caviglie);
- dall'attivita' del soggetto (la sensibilita' delle persone alle correnti d'aria diminuisce al crescere dell'attivita');
- dall'eventuale valore del discomfort globale.

Un diagramma abbastanza interessante e' quello di figura 4.6., in cui sono riportati i valori di \bar{v}_a in funzione di t_a per diversi valori della percentuale di insoddisfatti, PD. Il diagramma della figura 4.6 e' relativo a valori dell'intensita' di turbolenza compresi tra 0.30 e 0.50 (che sono i valori che piu' frequentemente si incontrano negli ambienti adibiti ad uffici), a soggetti che svolgono attivita' sedentaria in condizioni di comfort globale e a corrente d'aria che investe il soggetto tra testa e collo ad una temperatura uguale alla temperatura media dell'ambiente.

* La deviazione standard e' una misura della dispersione dei valori della variabile casuale X intorno alla media M. E' data dalla relazione: $SD = [\text{valore medio di } (X - M)^2]^{0.5}$

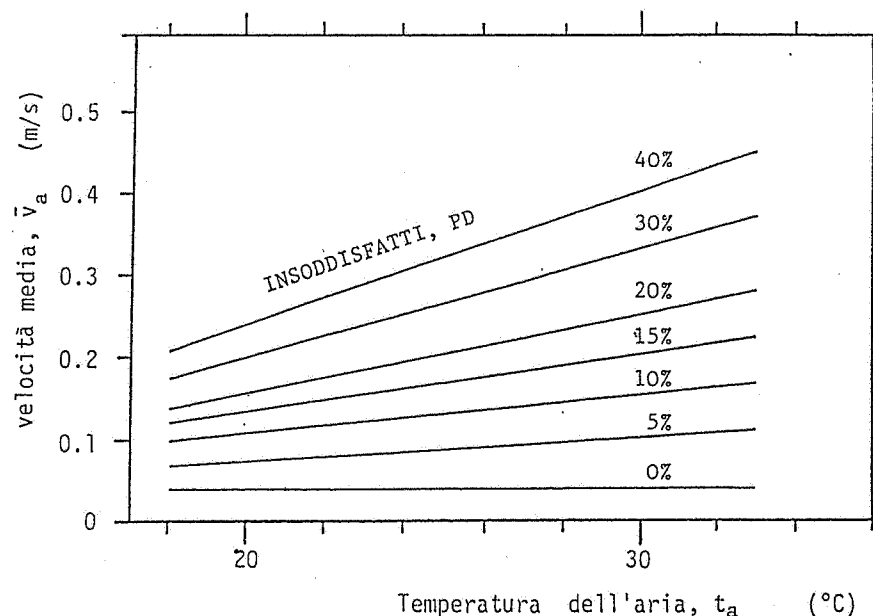


Fig. 4.6. - Percentuale di insoddisfatti per correnti d'aria a livello della parte superiore del corpo in funzione della velocita' media dell'aria per tre valori di temperatura. Da - Christensen (1984) -.

Dal diagramma di figura 4.6. si vede che a 20°C, per avere una percentuale di insoddisfatti minore del 20%, la \bar{v}_a deve essere minore di 0.15 m/s. Le curve di figura 4.6. sono esprimibili analiticamente con la relazione - Fanger (1986a) -:

$$PD = 13800 \left(\left(\frac{\bar{v}_a - 0.04}{(t_a - 13.7) + 0.0293} \right)^2 - 8.57 \cdot 10^{-4} \right) \quad (4.2)$$

con:

\bar{v}_a = velocita' media dell'aria, m/s;

t_a = temperatura dell'aria, °C.

Per quanto riguarda la normativa, l'ISO 7730 (cfr. allegato 1, paragrafi A.1.1 e A.1.2) e l'ASHRAE 55-81 (cfr. allegato 2, paragrafo 5.1.3) riportano i seguenti limiti per la velocita'

dell'aria, al fine di evitare il discomfort:

- Attività leggera, soprattutto sedentaria; condizioni invernali:

$$\bar{v}_a < 0.15 \text{ m/s};$$

- Attività leggera, soprattutto sedentaria; condizioni estive:

$$\bar{v}_a < 0.25 \text{ m/s}.$$

Per quanto riguarda le condizioni estive l'ASHRAE stabilisce che si può superare per ET* il valore di 26°C (cfr. il diagramma di figura 3.7) purché la \bar{v}_a aumenti di 0.275 m/s per ogni grado centigrado di aumento di ET*; l'intervallo di valori di ET* di comfort si può calcolare in funzione della velocità dell'aria con il diagramma di figura 3 dell'allegato 2. In ogni caso l'ASHRAE prescrive che la velocità non debba essere superiore a 0.8 m/s e che ET* non superi i 28°C.

4.5. Elevata asimmetria della temperatura media radiante

Per parlare di discomfort da asimmetria della temperatura media radiante o, come spesso si dice, di asimmetria media radiante o ancora di asimmetria della temperatura radiante, bisogna definire due grandezze: l'asimmetria della temperatura media radiante, Δt_{pr} , e la temperatura radiante piana, t_{pr} .

L'asimmetria della temperatura radiante, Δt_{pr} , è la differenza tra la temperatura piana radiante di due facce opposte di un elementino piano, laddove la temperatura radiante piana, t_{pr} , è la temperatura di una cavità isoterma in cui il flusso radiante incidente su una faccia di un elementino piano è uguale a quello che c'è nell'ambiente reale. Va sottolineato che in una cavità isoterma il flusso radiante che incide su una faccia di un elemento piano è indipendente dalla posizione dell'elemento stesso; nel caso degli ambienti reali non isotermi, invece, il flusso radiante dipende dalla posizione dell'elemento. Si pensi ad un ambiente in cui ci sia un caminetto: se la faccia dell'elemento piano è rivolta verso il caminetto il flusso termico incidente è certamente più elevato che se la faccia fosse rivolta per esempio verso il soffitto o verso il pavimento o verso un'altra zona dell'ambiente (ed è tanto più elevato quanto più l'elemento è vicino al caminetto).

In pratica, la temperatura radiante piana, che descrive le radiazioni provenienti dal semispazio che fronteggia la faccia dell'elemento piano può essere avvicinata alla temperatura media radiante, che descrive le radiazioni provenienti dall'intero spazio che circonda un corpo (p.e. il corpo umano); ne deriva che la temperatura radiante piana può essere calcolata con una

relazione perfettamente analoga alla (2.19), usata per il calcolo di t_{mr} :

$$t_{pr} = \sum_{p-i} F_{p-i} t_i \quad (4.3)$$

con:

t_{pr} = temperatura piana radiante, °C;

F_{p-i} = fattore di vista tra la faccia dell'elementino piano e l' i -esima superficie dell'ambiente che vede la faccia dell'elementino, adim.;

t_i = temperatura dell' i -esima superficie dell'ambiente, °C.

Il discomfort da asimmetria media radiante è un problema che generalmente riguarda poco gli ambienti moderati, nei quali può comunque essere causato per esempio dalla presenza di finestre, di una o più pareti fredde o di un caminetto acceso, ma è stato comunque oggetto di molti studi - Fanger (1980), Fanger (1985), McIntyre (1975a), McIntyre (1975b), Olesen (1972) -.

Nella figura 4.7. è riportato un diagramma "percentuale di insoddisfatti - asimmetria della temperatura media radiante"; ci sono quattro curve, relative ad asimmetria radiante dovuta a soffitto caldo, a parete fredda, a soffitto freddo, a parete calda. Le curve sono state citate nell'ordine in cui si trovano sul diagramma muovendosi da sinistra a destra, e quindi, a parità di asimmetria, in ordine decrescente della percentuale di insoddisfatti.

Per l'asimmetria media radiante la normativa, sia ISO (allegato 1, paragrafo A.1.1) che ASHRAE (allegato 2, paragrafo 5.1.6.2) prevede:

- Attività leggera, quasi sedentaria; finestre o superfici verticali fredde; asimmetria in direzione orizzontale valutata rispetto a un elementino piano disposto verticalmente a 0.6 m dal pavimento:

$$\Delta t_{pr} < 10^\circ\text{C}$$

- Attività leggera, quasi sedentaria; soffitto riscaldato; asimmetria in direzione verticale valutata rispetto a un elementino piano disposto orizzontalmente a 0.6 m dal pavimento:

$$\Delta t_{pr} < 5^\circ\text{C}$$

Esaminando il diagramma 4.7. risulta evidente che le due norme hanno assunto come valore limite di Δt_{pr} quello che comporta una percentuale di insoddisfatti del 5%. Si capisce allora perché non sono state considerati il caso di finestre o superfici verticali calde e quello di soffitto freddo: in questi casi, infatti, perché il PD arrivi al 5%, Δt_{pr} deve superare rispettivamente i 22°C ed i 15°C, valori praticamente impossibili in ambienti moderati.

Anche in questo caso c'è comunque una differenza tra le due

norme: l'ISO limita il valore dell'asimmetria della temperatura media radiante solo per la stagione invernale, mentre l'ASHRAE non fa distinzione tra le stagioni.

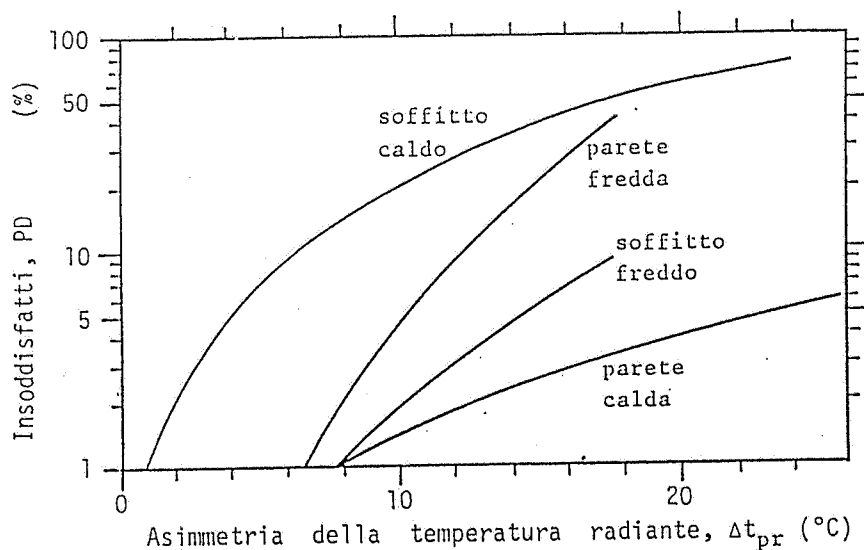


Fig. 4.7. - Diagramma per la valutazione della percentuale di insoddisfatti in funzione dell'asimmetria della temperatura media radiante per pareti verticali od orizzontali calde o fredde. Da - (Fanger 1986a) -.

5. MISURA E/O VALUTAZIONE DI ALCUNE GRANDEZZE

5.1. Introduzione

Al capitolo 3. si è visto che le grandezze che influenzano il discomfort termoigrometrico globale dell'uomo sono sei: temperatura, velocità e grado igrometrico dell'aria, metabolismo energetico, resistenza termica dell'abbigliamento, temperatura media radiante.

Nel capitolo 4. si è poi visto che per verificare che non ci siano condizioni di discomfort locale bisogna misurare il valore della temperatura e della velocità dell'aria e quello della temperatura del pavimento, ma va anche misurata l'asimmetria della temperatura media radiante.

Alcune grandezze citate, e in particolare la temperatura, il grado igrometrico e la velocità sono di uso comune in molti settori dell'ingegneria e quindi la loro misura, che è normalizzata dalla ISO 7726 - ISO (1985) -, risulta generalmente nota; le rimanenti quattro, e cioè il metabolismo energetico, la resistenza termica dell'abbigliamento, la temperatura media radiante e l'asimmetria media radiante sono tipiche dei problemi di benessere termoigrometrico. Nei paragrafi da 5.2 a 5.5 si accennerà alle metodologie adottate per la loro misura e/o valutazione.

APPENDICE A ENERGIA METABOLICA PER DIVERSE ATTIVITÀ
(normativa)

Ulteriori informazioni sull'energia metabolica sono fornite nella ISO 8996.

prospetto A.1

Energia metabolica

Attività	Energia metabolica	
	W/m ²	met
Disteso	46	0,8
Seduto, rilassato	58	1,0
Attività sedentaria (ufficio, casa, scuola, laboratorio)	70	1,2
Attività leggera in piedi (compere, laboratorio, industria leggera)	93	1,6
Attività media in piedi (commesso, lavori domestici, lavori a macchina)	116	2,0
Camminare a:		
2 km/h	110	1,9
3 km/h	140	2,4
4 km/h	165	2,8
5 km/h	200	3,4

prospetto C.2 Livello di attività = 58 W/m² (1 met)

Abbigliamento		Temperatura operativa °C	Velocità relativa dell'aria m/s								
clo	m ² °C/W		< 0,10	0,10	0,15	0,20	0,30	0,40	0,50	1,00	
0	0	26	-1,62	-1,62	-1,96	-2,34					
		27	-1,00	-1,00	-1,36	-1,69					
		28	-0,39	-0,42	-0,76	-1,05					
		29	0,21	0,13	-0,15	-0,39					
		30	0,80	0,68	0,45	0,26					
		31	1,39	1,25	1,08	0,94					
		32	1,96	1,83	1,71	1,61					
0,25	0,039	33	2,50	2,41	2,34	2,29					
		24	-1,52	-1,52	-1,80	-2,06	-2,47				
		25	-1,05	-1,05	-1,33	-1,57	-1,94	-2,24	-2,48		
		26	-0,58	-0,61	-0,87	-1,08	-1,41	-1,67	-1,89	-2,66	
		27	-0,12	-0,17	-0,40	-0,58	-0,87	-1,10	-1,29	-1,97	
		28	0,34	0,27	0,07	-0,09	-0,34	-0,53	-0,70	-1,28	
		29	0,80	0,71	0,54	0,41	0,20	0,04	-0,10	-0,58	
0,50	0,078	30	1,25	1,15	1,02	0,91	0,74	0,61	0,50	0,11	
		31	1,71	1,61	1,51	1,43	1,30	1,20	1,12	0,83	
		23	-1,10	-1,10	-1,33	-1,51	-1,78	-1,99	-2,16		
		24	-0,72	-0,74	-0,95	-1,11	-1,36	-1,55	-1,70	-2,22	
		25	-0,34	-0,38	-0,56	-0,71	-0,94	-1,11	-1,25	-1,71	
		26	0,04	-0,01	-0,18	-0,31	-0,51	-0,66	-0,79	-1,19	
		27	0,42	0,35	0,20	0,09	-0,08	-0,22	-0,33	-0,68	
0,75	0,116	28	0,80	0,72	0,59	0,49	0,34	0,23	0,14	-0,17	
		29	1,17	1,08	0,98	0,90	0,77	0,68	0,60	0,34	
		30	1,54	1,45	1,37	1,30	1,20	1,13	1,06	0,86	
		21	-1,11	-1,11	-1,30	-1,44	-1,66	-1,82	-1,95	-2,36	
		22	-0,79	-0,81	-0,98	-1,11	-1,31	-1,46	-1,58	-1,95	
		23	-0,47	-0,50	-0,66	-0,78	-0,96	-1,09	-1,20	-1,55	
		24	-0,15	-0,19	-0,33	-0,44	-0,61	-0,73	-0,83	-1,14	
1,00	0,155	25	0,17	0,12	-0,01	-0,11	-0,26	-0,37	-0,46	-0,74	
		26	0,49	0,43	0,31	0,23	0,09	0,00	-0,08	-0,33	
		27	0,81	0,74	0,64	0,56	0,45	0,36	0,29	0,08	
		28	1,12	1,05	0,96	0,90	0,80	0,73	0,67	0,48	
		20	-0,85	-0,87	-1,02	-1,13	-1,29	-1,41	-1,51	-1,81	
		21	-0,57	-0,60	-0,74	-0,84	-0,99	-1,11	-1,19	-1,47	
		22	-0,30	-0,33	-0,46	-0,55	-0,69	-0,80	-0,88	-1,13	
1,50	0,233	23	-0,02	-0,07	-0,18	0,27	-0,39	-0,49	-0,56	-0,79	
		24	0,26	0,20	0,10	0,02	-0,09	-0,18	-0,25	-0,46	
		25	0,53	0,48	0,38	0,31	0,21	0,13	0,07	-0,12	
		26	0,81	0,75	0,66	0,60	0,51	0,44	0,39	0,22	
		27	1,08	1,02	0,95	0,89	0,81	0,75	0,71	0,56	
		14	-1,36	-1,36	-1,49	-1,58	-1,72	-1,82	-1,89	-2,12	
		16	-0,94	-0,95	-1,07	-1,15	-1,27	-1,36	-1,43	-1,63	
2,00	0,310	18	-0,52	-0,54	-0,64	-0,72	-0,82	-0,90	-0,96	-1,14	
		20	-0,09	-0,13	-0,22	-0,28	-0,37	-0,44	-0,49	-0,65	
		22	0,35	0,30	0,23	0,18	0,10	0,04	0,00	-0,14	
		24	0,79	0,74	0,68	0,63	0,57	0,52	0,49	0,37	
		26	1,23	1,18	1,13	1,09	1,04	1,01	0,98	0,89	
		28	1,67	1,62	1,58	1,56	1,52	1,49	1,47	1,40	
		10	-1,38	-1,39	-1,49	-1,56	-1,67	-1,74	-1,80	-1,96	
2,00	0,310	12	-1,03	-1,05	-1,14	-1,21	-1,30	-1,37	-1,42	-1,57	
		14	-0,68	-0,70	-0,79	-0,85	-0,93	-0,99	-1,04	-1,17	
		16	-0,32	-0,35	-0,43	-0,48	-0,56	-0,61	-0,65	-0,77	
		18	0,03	-0,00	-0,07	-0,11	-0,18	-0,23	-0,26	-0,37	
		20	0,40	0,36	0,30	0,26	0,20	0,16	0,13	0,04	
		22	0,76	0,72	0,67	0,64	0,59	0,55	0,53	0,45	
		24	1,13	1,09	1,05	1,02	0,98	0,95	0,93	0,87	

prospetto C.3 Livello di attività = 69,6 W/m² (1,2 met)

Abbigliamento		Temperatura operativa °C	Velocità relativa dell'aria m/s								
clo	m ² °C/W		< 0,10	0,10	0,15	0,20	0,30	0,40	0,50	1,00	
0	0	25	-1,33	-1,33	-1,59	-1,92					
		26	-0,83	-0,83	-1,11	-1,40					
		27	-0,33	-0,33	-0,63	-0,88					
		28	0,15	0,12	-0,14	-0,36					
		29	0,63	0,56	0,35	0,17					
		30	1,10	1,01	0,84	0,69					
		31	1,57	1,47	1,34	1,24					
		32	2,03	1,93	1,85	1,78					
0,25	0,039	23	-1,18	-1,18	-1,39	-1,61	-1,97	-2,25			
		24	-0,79	-0,79	-1,02	-1,22	-1,54	-1,80	-2,01		
		25	-0,42	-0,42	-0,64	-0,83	-1,11	-1,34	-1,54	-2,21	
		26	-0,04	-0,07	-0,27	-0,43	-0,68	-0,89	-1,06	-1,65	
		27	0,33	0,29	0,11	-0,03	-0,25	-0,43	-0,58	-1,09	
		28	0,71	0,64	0,49	0,37	0,18	0,03	-0,10	-0,54	
		29	1,07	0,99	0,87	0,77	0,61	0,49	0,39	0,03	
		30	1,43	1,35	1,25	1,17	1,05	0,95	0,87	0,58	
0,50	0,078	18	-2,01	-2,01	-2,17	-2,38	-2,70				
		20	-1,41	-1,41	-1,58	-1,76	-2,04	-2,25	-2,42		
		22	-0,79	-0,79	-0,97	-1,13	-1,36	-1,54	-1,69	-2,17	
		24	-0,17	-0,20	-0,36	-0,48	-0,68	-0,83	-0,95	-1,35	
		26	0,44	0,39	0,26	0,16	-0,01	-0,11	-0,21	-0,52	
		28	1,05	0,98	0,88	0,81	0,70	0,61	0,54	-0,31	
		30	1,64	1,57	1,51	1,46	1,39	1,33	1,29	1,14	
		32	2,25	2,20	2,17	2,15	2,11	2,09	2,07	1,99	
0,75	0,116	16	-1,77	-1,77	-1,91	-2,07	-2,31	-2,49			
		18	-1,27	-1,27	-1,42	-1,56	-1,77	-1,93	-2,05	-2,45	
		20	-0,77	-0,77	-0,92	-1,04	-1,23	-1,36	-1,47	-1,82	
		22	-0,25	-0,27	-0,40	-0,51	-0,66	-0,78	-0,87	-1,17	
		24	0,27	0,23	0,12	0,03	-0,10	-0,19	-0,27	-0,51	
		26	0,78	0,73	0,64	0,57	0,47	0,40	0,34	0,14	
		28	1,29	1,23	1,17	1,12	1,04	0,99	0,94	0,80	
		30	1,80	1,74	1,70	1,67	1,62	1,58	1,55	1,46	
1,00	0,155	16	-1,18	-1,18	-1,31	-1,43	-1,59	-1,72	-1,82	-2,12	
		18	-0,75	-0,75	-0,88	-0,98	-1,13	-1,24	-1,33	-1,59	
		20	-0,32	-0,33	-0,45	-0,54	-0,67	-0,76	-0,83	-1,07	
		22	0,13	0,10	0,00	-0,07	-0,18	-0,26	-0,32	-0,52	
		24	0,58	0,54	0,46	0,40	0,31	0,24	0,19	0,02	
		26	1,03	0,98	0,91	0,86	0,79	0,74	0,70	0,58	
		28	1,47	1,42	1,37	1,34	1,28	1,24	1,21	1,12	
		30	1,91	1,86	1,83	1,81	1,78	1,75	1,73	1,67	
1,50	0,233	12	-1,09	-1,09	-1,19	-1,27	-1,39	-1,48	-1,55	-1,75	
		14	-0,75	-0,75	-0,85	-0,93	-1,03	-1,11	-1,17	-1,35	
		16	-0,41	-0,42	-0,51	-0,58	-0,67	-0,74	-0,79	-0,96	
		18	-0,06	-0,09	-0,17	-0,22	-0,31	-0,37	-0,42	-0,56	
		20	0,28	0,25	0,18	0,13	0,05	0,00	-0,04	-0,16	
		22	0,63	0,60	0,54	0,50	0,44	0,39	0,36	0,25	
		24	0,99	0,95	0,91	0,87	0,82	0,78	0,76	0,67	
		26	1,35	1,31	1,27	1,24	1,20	1,18	1,15	1,08	
2,00	0,310	10	-0,77	-0,78	-0,86	-0,92	-1,01	-1,06	-1,11	-1,24	
		12	-0,49	-0,51	-0,58	-0,63	-0,71	-0,76	-0,80	-0,92	
		14	-0,21	-0,23	-0,29	-0,34	-0,41	-0,46	-0,49	-0,60	
		16	0,08	0,06	-0,00	-0,04	-0,10	-0,15	-0,18	-0,27	
		18	0,37	0,34	0,29	0,26	0,20	0,17	0,14	0,05	
		20	0,67	0,63	0,59	0,56	0,52	0,48	0,46	0,39	
		22	0,97	0,93	0,89	0,87	0,83	0,80	0,78	0,72	
		24	1,27	1,23	1,20	1,18	1,15	1,13	1,11	1,06	

prospetto C.5 Livello di attività = 92,8 W/m² (1,6 met)

Abbigliamento		Temperatura operativa °C	Velocità relativa dell'aria m/s								
clo	m ² ·°C/W		< 0,10	0,10	0,15	0,20	0,30	0,40	0,50	1,00	
0	0	23	-1,12	-1,12	-1,29	-1,57					
		24	-0,74	-0,74	-0,93	-1,18					
		25	-0,36	-0,36	-0,57	-0,79					
		26	0,01	0,01	-0,20	-0,40					
		27	0,38	0,37	0,17	0,00					
		28	0,75	0,70	0,53	0,39					
		29	1,11	1,04	0,90	0,79					
0,25	0,039	30	1,46	1,38	1,27	1,19					
		16	-2,29	-2,29	-2,36	-2,62					
		18	-1,72	-1,72	-1,83	-2,06	-2,42				
		20	-1,15	-1,15	-1,29	-1,49	-1,80	-2,05	-2,26		
		22	-0,58	-0,58	-0,73	-0,90	-1,17	-1,38	-1,55	-2,17	
		24	-0,01	-0,01	-0,17	-0,31	-0,53	-0,70	-0,84	-1,35	
		26	0,56	0,53	0,39	0,29	0,12	-0,02	-0,13	-0,51	
0,50	0,078	28	1,12	1,06	0,96	0,89	0,77	0,67	0,59	0,33	
		30	1,66	1,60	1,54	1,49	1,42	1,36	1,31	1,14	
		14	-1,85	-1,85	-1,94	-2,12	-2,40				
		16	-1,40	-1,40	-1,50	-1,67	-1,92	-2,11	-2,26		
		18	-0,95	-0,95	-1,07	-1,21	-1,43	-1,59	-1,73	-2,18	
		20	-0,49	-0,49	-0,62	-0,75	-0,94	-1,08	-1,20	-1,59	
		22	-0,03	-0,03	-0,16	-0,27	-0,43	-0,55	-0,65	-0,98	
0,75	0,116	24	0,43	0,41	0,30	0,21	0,08	-0,02	-0,10	-0,37	
		26	0,89	0,85	0,76	0,70	0,60	0,52	0,46	0,25	
		28	1,34	1,29	1,23	1,18	1,11	1,06	1,01	0,86	
		14	-1,16	-1,16	-1,26	-1,38	-1,57	-1,71	-1,82	-2,17	
		16	-0,79	-0,79	-0,89	-1,00	-1,17	-1,29	-1,39	-1,70	
		18	-1,41	-0,41	-0,52	-0,62	-0,76	-0,87	-0,96	-1,23	
		20	-0,04	-0,04	-0,15	-0,23	-0,36	-0,45	-0,52	-0,76	
1,00	0,155	22	0,35	0,33	0,24	0,17	0,07	-0,01	-0,07	-0,27	
		24	0,74	0,71	0,63	0,58	0,49	0,43	0,38	0,21	
		26	1,12	1,08	1,03	0,98	0,92	0,87	0,83	0,70	
		28	1,51	1,46	1,42	1,39	1,34	1,31	1,28	1,19	
		12	-1,01	-1,01	-1,10	-1,19	-1,34	-1,45	-1,53	-1,79	
		14	-0,68	-0,68	-0,78	-0,87	-1,00	-1,09	-1,17	-1,40	
		16	-0,36	-0,36	-0,46	-0,53	-0,65	-0,74	-0,80	-1,01	
1,50	0,233	18	-0,04	-0,04	-0,13	-0,20	-0,30	-0,38	-0,44	-0,62	
		20	0,28	0,27	0,19	0,13	0,04	-0,02	-0,07	-0,21	
		22	0,62	0,59	0,53	0,48	0,41	0,35	0,31	0,17	
		24	0,96	0,92	0,87	0,83	0,77	0,73	0,69	0,58	
		26	1,29	1,25	1,21	1,18	1,14	1,10	1,07	0,99	
		10	-0,57	-0,57	-0,65	-0,71	-0,80	-0,86	-0,92	-1,07	
		12	-0,32	-0,32	-0,39	-0,45	-0,53	-0,59	-0,64	-0,78	
2,00	0,310	14	-0,06	-0,07	-0,14	-0,19	-0,26	-0,31	-0,36	-0,48	
		16	0,19	0,18	0,12	0,07	0,01	-0,04	-0,07	-0,19	
		18	0,45	0,43	0,38	0,34	0,28	0,24	0,21	0,11	
		20	0,71	0,68	0,64	0,60	0,55	0,52	0,49	0,41	
		22	0,97	0,95	0,91	0,88	0,84	0,81	0,79	0,72	
		10	-0,08	-0,08	-0,14	-0,18	-0,24	-0,29	-0,32	-0,41	
		12	0,14	0,12	0,07	0,03	-0,02	-0,06	-0,09	-0,17	
2,00	0,310	14	0,35	0,33	0,29	0,25	0,20	0,17	0,14	0,07	
		16	0,57	0,54	0,50	0,47	0,43	0,40	0,38	0,31	
		18	0,78	0,76	0,73	0,70	0,66	0,63	0,61	0,56	
		20	1,00	0,98	0,95	0,93	0,89	0,87	0,85	0,80	
		22	1,23	1,20	1,18	1,16	1,13	1,11	1,10	1,06	

prospetto C.7 Livello di attività = 116 W/m² (2,0 met)

Abbigliamento		Temperatura operativa °C	Velocità relativa dell'aria m/s							
clo	m ² .°C/W		< 0,10	0,10	0,15	0,20	0,30	0,40	0,50	1,00
0	0	18		-2,00	-2,02	-2,35				
		20		-1,35	-1,43	-1,72				
		22		-0,69	-0,82	-1,06				
		24		-0,04	-0,21	-0,41				
		26		0,59	0,41	0,26				
		28		1,16	1,03	0,93				
		30		1,73	1,66	1,60				
0,25	0,039	32		2,33	2,32	2,31				
		16		-1,41	-1,48	-1,69	-2,02	-2,29	-2,51	
		18		-0,93	-1,03	-1,21	-1,50	-1,74	-1,93	-2,61
		20		-0,45	-0,57	-0,73	-0,98	-1,18	-1,35	-1,93
		22		0,04	-0,09	-0,23	-0,44	-0,61	-0,75	-1,24
		24		0,52	0,38	0,28	0,10	-0,03	-0,14	-0,54
		26		0,97	0,86	0,78	0,65	0,55	0,46	0,18
28		1,42	1,35	1,29	1,20	1,13	1,07	0,90		
0,50	0,078	30		1,88	1,84	1,81	1,76	1,72	1,68	1,57
		14		-1,08	-1,16	-1,31	-1,53	-1,71	-1,85	-2,32
		16		-0,69	-0,79	-0,92	-1,12	-1,27	-1,40	-1,82
		18		-0,31	-0,41	-0,53	-0,70	-0,84	-0,95	-1,31
		20		-0,07	-0,04	-0,14	-0,29	-0,40	-0,50	-0,81
		22		0,46	0,35	0,27	0,15	0,05	-0,03	-0,29
		24		0,83	0,75	0,68	0,58	0,50	0,44	0,23
26		1,21	1,15	1,10	1,02	0,96	0,91	0,75		
0,75	0,116	28		1,59	1,55	1,51	1,46	1,42	1,38	1,27
		10		-1,16	-1,23	-1,35	-1,54	-1,67	-1,78	-2,14
		12		-0,84	-0,92	-1,03	-1,20	-1,32	-1,42	-1,74
		14		-0,52	-0,60	-0,70	-0,85	-0,97	-1,06	-1,34
		16		-0,20	-0,29	-0,38	-0,51	-0,61	-0,69	-0,95
		18		0,12	0,03	-0,05	-0,17	-0,26	-0,32	-0,55
		20		0,43	0,34	0,28	0,18	0,10	0,04	-0,15
22		0,75	0,68	0,62	0,54	0,48	0,43	0,27		
1,00	0,155	24		1,07	1,01	0,97	0,90	0,85	0,81	0,68
		10		-0,68	-0,75	-0,84	-0,97	-1,07	-1,15	-1,38
		12		-0,41	-0,48	-0,56	-0,68	-0,77	-0,84	-1,05
		14		-0,13	-0,21	-0,28	-0,39	-0,47	-0,53	-0,72
		16		0,14	0,06	0,00	-0,10	-0,16	-0,22	-0,39
		18		0,41	0,34	0,28	0,20	0,14	0,09	-0,04
		20		0,68	0,61	0,57	0,50	0,44	0,40	0,28
22		0,96	0,91	0,87	0,81	0,76	0,73	0,62		
1,50	0,233	10		-0,04	-0,11	-0,16	-0,24	-0,29	-0,33	-0,46
		14		0,39	0,33	0,29	0,23	0,18	0,15	0,04
		18		0,82	0,78	0,75	0,70	0,66	0,64	0,56
		22		1,27	1,24	1,22	1,18	1,16	1,14	1,08
2,00	0,310	10		0,34	0,30	0,26	0,21	0,18	0,15	0,07
		14		0,70	0,66	0,64	0,60	0,57	0,55	0,49
		18		1,07	1,04	1,02	0,99	0,97	0,95	0,90
		22		1,45	1,42	1,42	1,39	1,38	1,37	1,33