

## 17. COMFORT TERMICO

Argomento del presente capitolo è lo studio degli effetti che l'ambiente termo-igrometrico ha sulla fisiologia e sulle sensazioni umane, in particolare all'interno di uno spazio confinato.

I fattori che determinano l'ambiente termo-igrometrico in uno spazio confinato sono principalmente: le caratteristiche termiche degli elementi di confine (l'involucro edilizio), le sorgenti di calore e di vapore presenti all'interno, il clima esterno, le caratteristiche dell'impianto di climatizzazione.

Il dato finale da valutare è il grado di benessere percepito dagli occupanti nello spazio considerato, ovvero il grado di **comfort termico**. Lo strumento utile a questo fine è costituito dai principi teorici e dai metodi di misura per la previsione della **sensazione termica percepita** dalle persone. L'ambiente termo-igrometrico è descritto tramite opportune grandezze fisiche.

Dal punto di vista operativo le metodologie da utilizzare sono ben sintetizzate nelle seguenti norme tecniche:

**UNI EN ISO 7726 (1995)** che specifica i metodi per la misura delle grandezze fisiche che influenzano le sensazioni termiche.

**UNI EN ISO 7730 (settembre 1997)** che specifica i metodi per la previsione della sensazione termica percepita da un essere umano all'interno degli ambienti confinati di tipo "moderato" (sono esclusi gli ambienti cosiddetti "estremi" nei quali sono possibili sollecitazioni termiche nocive: stress termico, disidratazione, ecc.).

Le norme citate sono valide in tutti i Paesi della Comunità Europea e nella maggior parte dei Paesi del mondo. Si tratta di norme emanate dall'**ISO** (International Standard Organisation), Organizzazione Internazionale che elabora gli Standard per tutti i settori della tecnica) nel 1984 - 1985, ed adottate dal **CEN** (Comitato Europeo per la Normativa tecnica), nel 1994 -1995.

Le norme citate sono di particolare interesse nella progettazione dell'Involucro Edilizio e degli Impianti di climatizzazione, perché permettono la previsione e la verifica della sensazione percepita dall'essere umano per effetto dell'azione combinata del clima esterno, dell'involucro edilizio, dell'impianto di climatizzazione e del comportamento individuale (attività fisica e tipo di vestiario).

### 17.1 SENSAZIONI TERMICHE

Tutti gli organi periferici del corpo umano inviano segnali al cervello attraverso il sistema nervoso. Tali segnali permettono la percezione di numerose sensazioni come quelle visive, sonore, tattili, olfattive e termiche. Queste ultime sono basate sui segnali provenienti dagli organi periferici che fanno parte del sistema di termoregolazione.

Questo sistema esegue le azioni fisiologiche necessarie per realizzare l'uguaglianza tra i flussi di energia termica e meccanica prodotte dai processi biochimici interni al corpo (metabolismo) e la somma algebrica dei flussi di calore e lavoro che vengono costantemente scambiati tra il corpo umano e l'ambiente circostante, con intensità che dipende dell'attività svolta. Se questa uguaglianza è realizzata non vi è variazione di energia interna del sistema - corpo umano e la temperatura media interna di questo si mantiene costante.

## 17.2 METABOLISMO

Con il termine *metabolismo* si indica l'insieme dei processi che, all'interno del corpo umano, trasformano l'energia chimica potenziale introdotta con gli alimenti in altre forme di energia.

I processi metabolici sono complessivamente esotermici; si tratta di processi essenzialmente ossidativi che trasformano in lavoro meccanico (muscolare) ed in calore gran parte dell'energia potenziale chimica contenuta negli alimenti ed, eventualmente, nelle sostanze di riserva accumulate nel corpo umano.

Il flusso totale di energia generato in tal modo all'interno del corpo viene chiamato potenza prodotta per metabolismo o anche **flusso metabolico**, che viene comunemente indicato con il simbolo **M** e si misura in watt od in met. Un met equivale a 58 W per m<sup>2</sup> di superficie corporea, ed è il flusso metabolico connesso alla posizione seduta in condizioni di relax.

## 17.3 SISTEMA DI TERMOREGOLAZIONE

Una delle condizioni vitali per l'essere umano è la possibilità di *mantenere costante la temperatura del suo corpo* e più specificatamente la temperatura della zona corporea più interna, denominata *nucleo*, che comprende gli organi vitali. Tale temperatura deve mantenere il valore di 37 °C circa con variazioni non superiori a circa 0,5 °C nell'arco della giornata.

Le condizioni che garantiscono la costanza della temperatura interna sono, dal punto di vista termodinamico, quelle che corrispondono ad una variazione nulla dell'energia interna del corpo.

Una variazione positiva dell'energia interna genera un incremento della temperatura corporea, mentre una variazione negativa determina una diminuzione della stessa. In entrambi i casi interviene il sistema di termoregolazione che agisce, in vario modo, al fine di eliminare lo squilibrio.

I meccanismi che consentono all'essere umano di mantenere costante la temperatura interna sono detti meccanismi di termoregolazione che possono essere:

- di tipo naturale o involontario:
  - ⇒ attività fisiologica vasomotoria
  - ⇒ attività comportamentale: sudorazione o brivido
- di tipo artificiale o volontario
  - ⇒ abbigliamento
  - ⇒ modificazione delle condizioni ambientali: uso degli impianti

Il primo dei meccanismi di termoregolazione naturali consiste nella modificazione involontaria del flusso sanguigno in prossimità della superficie della pelle (vasodilatazione o vasocostrizione) che ha l'effetto di aumentare o diminuire dapprima gli scambi termici tra il nucleo e la superficie del corpo, quindi (per effetto dell'aumento o della diminuzione della temperatura della pelle) anche gli scambi termici tra superficie del corpo e ambiente.

Quando il meccanismo vasomotorio non sia sufficiente a garantire gli scambi termici necessari subentra il secondo tipo di meccanismo di carattere comportamentale. A seconda che lo scambio termico debba essere aumentato o ridotto subentrano la sudorazione o il brivido.

Ci sono poi i meccanismi di tipo artificiale: prima di tutto la scelta di un adeguato abbigliamento e quindi, ove possibile, il ricorso a sistemi che consentano la modificazione delle condizioni termogrometriche ambientali mediante gli impianti di climatizzazione.

È durante l'azione dei meccanismi di termoregolazione che noi percepiamo le **sensazioni di caldo o di freddo**.

In particolare gli esperimenti hanno dimostrato che :

- l'attivazione del meccanismo vasomotorio, anche in presenza di una leggera sudorazione, non compromette la sensazione di gradevolezza (di comfort);
- quando invece il corpo umano deve attivare anche i meccanismi di termoregolazione naturali di tipo comportamentale, sudorazione visibile o brivido, la sensazione percepita dall'uomo è decisamente non gradevole (di discomfort).

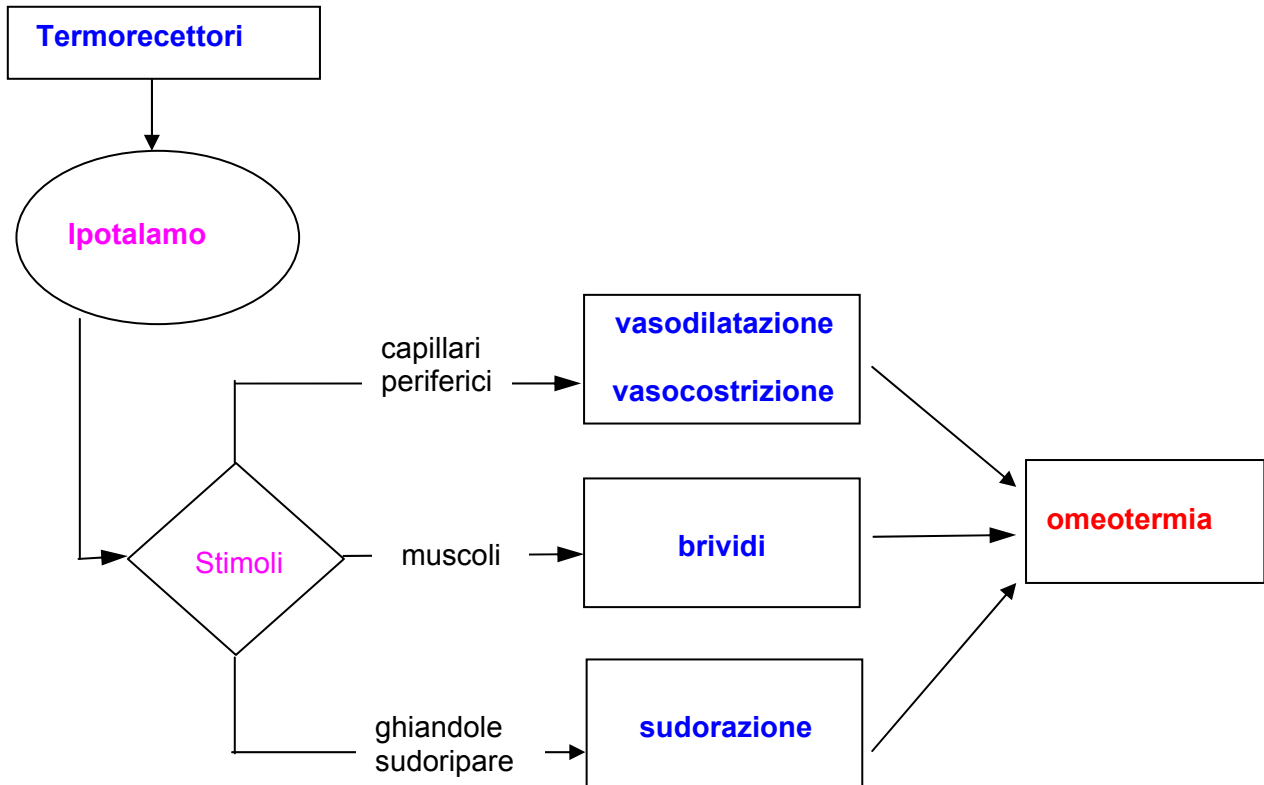


Fig. 1 - Temperature superficiali di un corpo umano abbigliato.

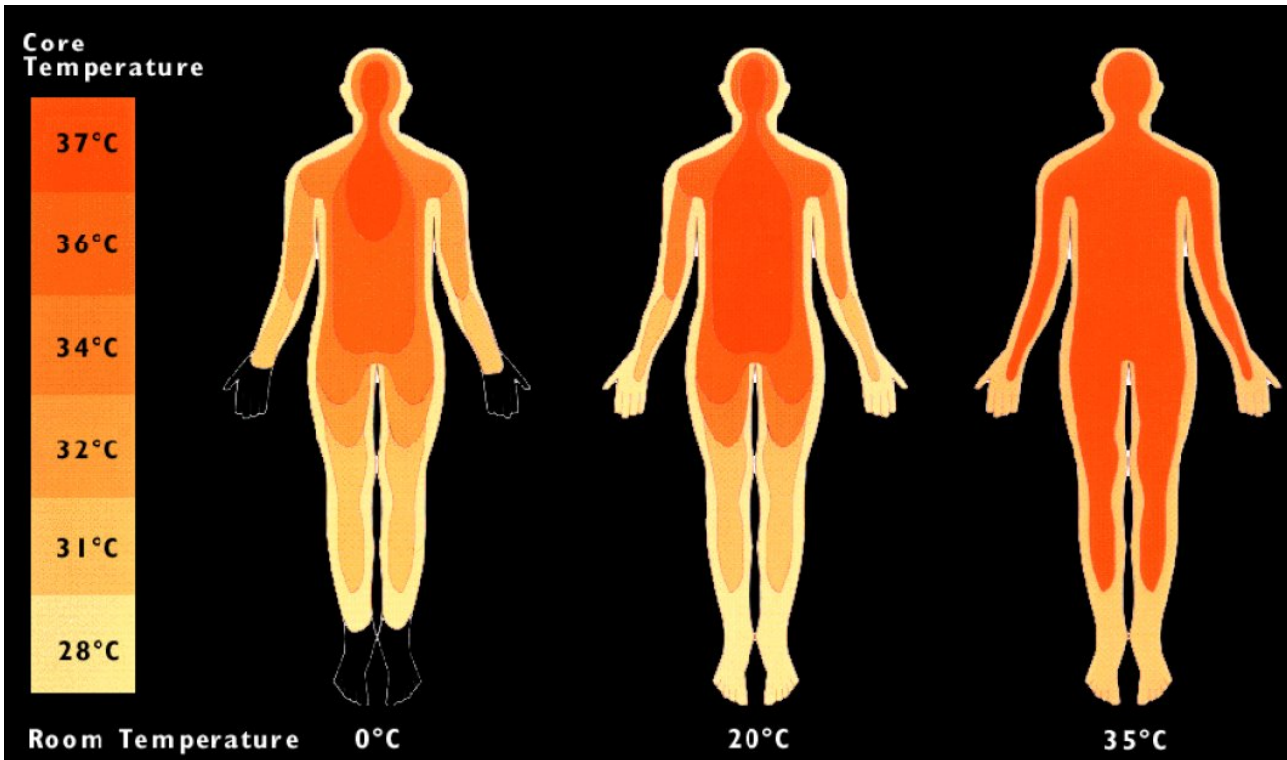


Fig. 2 - Variazioni delle temperature interne del corpo umano in conseguenza degli adattamenti alla temperatura ambientale (termoregolazione). Fonte: Transsolar Energietechnik GmbH. Stuttgart - München - New York.

### 17.4 VALUTAZIONE DEL BENESSERE TERMOIGROMETRICO

Le sensazioni termiche dipendono dalle azioni del sistema di termoregolazione; che agisce al fine di realizzare l'uguaglianza tra l'energia termica e meccanica prodotta dai processi biochimici interni al corpo e gli scambi di calore e lavoro tra il corpo e l'esterno.

Tale osservazione permette di individuare le grandezze che influenzano le sensazioni termiche, poiché esse coincidono con quelle che determinano i processi di scambio di calore e massa tra corpo umano e ambiente (Tab. 1).

Il primo Principio della Termodinamica applicato al sistema "corpo umano" trascurando le variazioni di energia cinetica, potenziale, etc., può essere scritto secondo la seguente relazione:

$$M - L - Q = dU/d\tau$$

dove Q e L sono positivi quando il calore è perso ed il lavoro è svolto dal corpo umano. Gli scambi di calore sensibile e latente fra Uomo e Ambiente si verificano sulla superficie esterna del corpo umano e all'interno della cavità polmonare.

Esplicitando i termini relativi allo scambio termico si ottiene la seguente equazione:

$$M - L - Q_C - Q_r - Q_k - Q_{trp} - Q_{sdz} - Q_{rps} - Q_{rpl} = dU/d\tau \quad (1)$$

dove:

- M : potenza generata dall'attività metabolica [W];
- L : potenza meccanica scambiata tra corpo umano e l'ambiente [W];
- Q<sub>C</sub> : potenza termica sensibile scambiata per convezione [W];

- $Q_r$  : potenza termica sensibile scambiata per irraggiamento [W]  
 $Q_k$  : potenza termica sensibile scambiata per conduzione [W];  
 $Q_{trp}$  : potenza termica latente scambiata per traspirazione (diffusione del vapore) attraverso la pelle [W],  
 $Q_{sdz}$  : potenza termica latente scambiata per evaporazione del sudore sulla superficie della pelle [W];  
 $Q_{rps}$  : potenza termica sensibile scambiata nella respirazione [W];  
 $Q_{rpl}$  : potenza termica latente scambiata nella respirazione [W];  
 $dU/d\tau$  : variazione dell'energia interna del corpo umano nell'unità di tempo [W].

Si può scrivere  $M-L = M \cdot (1-\eta)$  dove il simbolo  $\eta=L/M$  rappresenta il rendimento di conversione dell'energia metabolica in lavoro.

Esplicitando ogni termine della (A.1) in base ai principi generali che regolano gli scambi di calore e di vapore, nell'ipotesi di regime stazionario, si ricava l'equazione (A.9) del bilancio energetico del corpo umano.

**Tab.1** - Grandezze che intervengono nel bilancio energetico del corpo umano.

Elemento del bilancio	Fattori da cui dipende l'effetto	Grandezze
$Q_C$ : calore sensibile scambiato per convezione, tra il corpo umano e l'aria	differenza tra la temperatura della pelle e quella dell'aria dell'ambiente ( $t_a$ ), velocità dell'aria ( $\omega_a$ ) e resistenza termica del vestiario ( $R_v$ )	$t_a$ $\omega_a$ $R_v$
$Q_R$ : calore sensibile scambiato per radiazione, tra il corpo umano e le superfici calde o fredde che delimitano il locale	differenza di temperatura tra la pelle o il vestiario e quella delle superfici del locale ( $t_{mr}$ ), proprietà radiative (emissività) del vestiario ( $\epsilon_v$ ) e delle superfici circostanti ( $\epsilon_s$ ) dimensione apparenti, e distanza tra le superfici radianti (fattore di vista $F_{v-s}$ )	$t_{mr}$ $\epsilon_v$ $\epsilon_s$ $F_{v-s}$
$Q_{EV}$ : calore latente trasportato dell'acqua che evapora dalla pelle del soggetto (sudorazione) e dalla cavità polmonare (respirazione)	differenza tra il titolo del vapore sulla pelle e nella cavità polmonare ed il titolo nell'aria dell'ambiente permeabilità al vapore del vestiario ( $\pi_v$ )	$t_a$ $\varphi_a$ $\pi_v$
$M$ : energia generata all'interno del corpo umano dai processi di trasformazione dell'energia chimica degli alimenti	processi metabolici legati alle funzioni vitali di base e alla specifica attività fisica svolta dal soggetto ( $M$ )	$M$
$L$ : lavoro meccanico	attività fisica condotta dal soggetto	$\eta$

Dalla Tab.1 si deduce che la sensazione termica dipende da alcune proprietà dei materiali coinvolti e da otto grandezze fisiche:

- $t_a$ ,  $\varphi_a$ ,  $\omega_a$ ,  $t_{mr}$ , che riguardano l'ambiente fisico (aria + involucro),
- $t_{sk}$ ,  $Q_{EV}$ , che riguardano la fisiologia del corpo umano,
- $R_v$ ,  $H$  (dove  $H=M \cdot (1-\eta)$ ), che riguardano il comportamento del soggetto umano.

Gli studi sperimentali condotti negli anni '60 dal *Prof. Povl Ole Fanger* (1934 – 2006) presso la Technical University of Denmark hanno dimostrato che, nello stato di benessere termico, le varia-

bili  $t_{sk}$  ed  $Q_{sdz}$  sono fortemente correlate al metabolismo specifico (ovvero per unità di superficie corporea)  $M/A_p$  [ $W/m^2$ ], al rendimento meccanico del corpo umano ed alla **sensazione di comfort**, mentre la variazione delle altre cause che concorrono all'equilibrio termico del corpo umano non provoca apprezzabili effetti sul comfort.

Pertanto si può affermare che le **variabili fisiche** dalle quali dipende il benessere termico sono sei:  $t_a$ ,  $\varphi_a$ ,  $\omega_a$ ,  $t_{mr}$ ,  $R_v$ ,  $H$ .

Sviluppando i singoli termini dell'equazione del bilancio energetico del corpo umano ed imponendo alla temperatura della pelle ed al flusso termico ceduto per sudorazione i valori relativi alle condizioni di comfort, valori che sono forniti dalle equazioni (A.10) ed (A.11), vedasi anche Allegato-1,

$$Q_{sdz}^* = 0,42 \cdot A_p \cdot [M \cdot (1-\eta)/A_p - 58,15] \quad (A.10)$$

$$t_{sk}^* = 35,7 - 0,0275 \cdot M \cdot (1-\eta)/A_p \quad (A.11)$$

si ottiene l'equazione (2) degli stati di equilibrio termico in condizioni di benessere (**equazione del benessere**).

$$M \cdot (1-\eta) - h_{cp} \cdot f_v \cdot A_p \cdot (t_v^* - t_a) - f_{eff} \cdot f_v \cdot A_p \cdot h_{rp} \cdot (t_v^* - t_{rm}) - r \cdot \Pi \cdot f_d \cdot A_p \cdot (1 - \beta) \cdot (p_{sk}^* - p_a) + \\ - 0,42 \cdot A_p \cdot [M \cdot (1-\eta)/A_p - 58,15] - G_x \cdot c_{pa} \cdot (t_x - t_a) - G_x \cdot r \cdot (x_x - x_a) = 0 \quad (2)$$

$$t_v^* = t_{sk}^* - R_v \cdot \{ M - L - Q_{trp} - Q_{sdz}^* - Q_{rps} - Q_{rpl} \}$$

$$t_v^* = 35,7 - 0,0275 \cdot M/A_p \cdot (1-\eta) - R_v \cdot \{ (M \cdot (1-\eta)/A_p - r \cdot \Pi \cdot (p_{sk} - p_a) + \\ - 0,42 \cdot [M/A_p \cdot (1-\eta) - 58,15] - (G_x/A_p) \cdot [c_{pa} \cdot (t_x - t_a) + r \cdot (x_x - x_a)] \} \quad (3)$$

L'equazione (3) fornisce la temperatura esterna del corpo abbigliato in condizioni di benessere (vedasi allegato B).

Lo **stato neutro di benessere termico** è individuato dalle infinite combinazioni delle sei variabili fisiche che soddisfano le equazioni (2) e (3).

Se si mantengono costanti le tre grandezze:  $M/A_p$ ,  $R_v$ ,  $\varphi_a$ , le equazioni (2) e (3) sono soddisfatte dalle **terne di valori** di  $t_a$ ,  $t_{mr}$ ,  $\omega_a$ , appartenenti alle curve riportate in fig. 3 (linee isocomfort); queste forniscono, per alcune velocità dell'aria prefissate, tutte le coppie di temperature  $t_a$ ,  $t_{mr}$  che hanno come effetto la sensazione di benessere o di neutralità termica, caratterizzata dall'indice  $PMV=0$  che verrà introdotto al paragrafo successivo.

Ogni curva  $t_{mr} = f(t_a)$  si può approssimare con una retta, ottenendo l'espressione (4), la quale definisce **una particolare temperatura che, attribuita all'aria, determina uno scambio termico, e quindi una sensazione, equivalente a quello complessivo dovuto agli scambi reali convettivi e radiativi.**

$$t_o = a \cdot t_a + (1 - a) \cdot t_{mr} \quad (4)$$

dove  $a$  è la seguente funzione della velocità dell'aria:



$a = 0,5$  se  $0,0 < \omega_a < 0,2$  m/s  
 $a = 0,6$  se  $0,2 < \omega_a < 0,6$  m/s  
 $a = 0,7$  se  $0,6 < \omega_a < 1,0$  m/s.

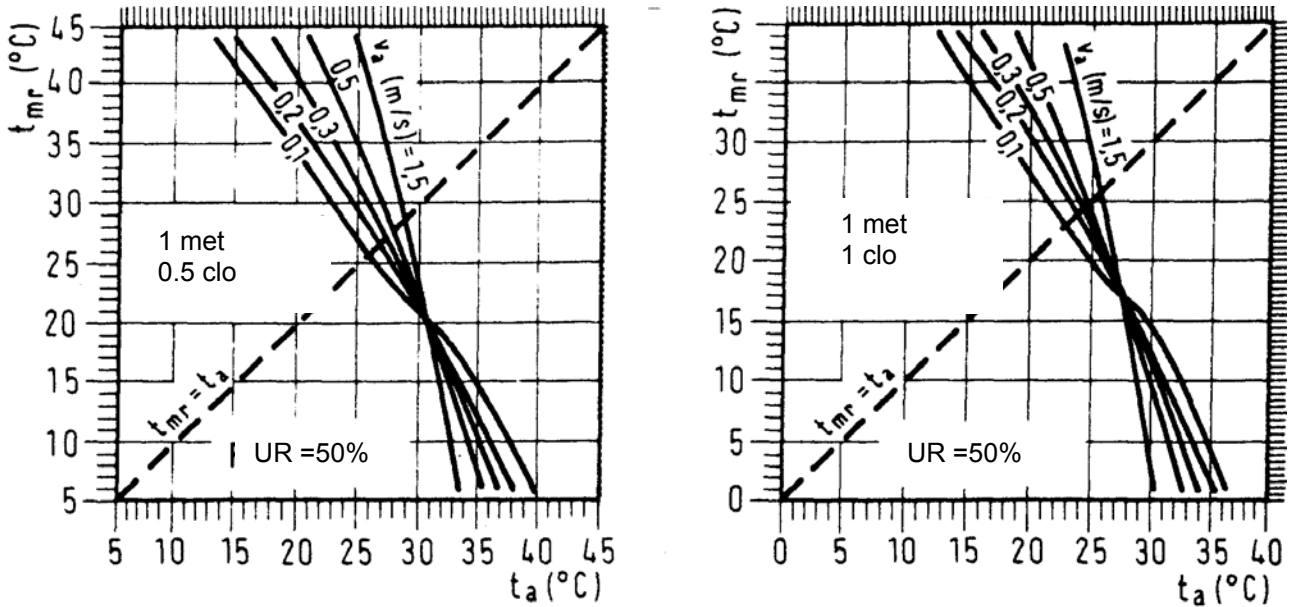


Fig. 3 - Curve isocomfort.

La grandezza  $t_o$ , chiamata **temperatura operativa (o operante)**, è un indicatore parziale del benessere termico; infatti la (3) riassume l'effetto di tre grandezze: la temperatura dell'aria, la temperatura media radiante, la velocità dell'aria; mentre le altre tre cause che influenzano la sensazione termica assumono un valore fisso pari a:

$$\varphi_a = 50\%, R_v = 1 \text{ clo}, M/A_p = 1 \text{ met.}$$

La **temperatura operativa**, può essere definita come quella temperatura uniforme dell'aria e delle pareti dell'ambiente che provocherebbe per il soggetto lo stesso scambio termico per convezione e radiazione che si ha nell'ambiente reale.

Il modo più rigoroso di calcolarla è il seguente:

$$t_o = \frac{h_r \cdot t_{mr} + h_c \cdot t_a}{\alpha}$$

dove:

- $t_{mr}$  = temperatura media radiante;
- $t_a$  = temperatura dell'aria;
- $h_c$  = coefficiente di scambio convettivo per l'uomo;
- $h_r$  = coefficiente di scambio radiativo per l'uomo;
- $\alpha$  =  $h_c + h_r$  = coefficiente di adduzione termica sulla superficie corporea.

Nella pratica se la differenza tra temperatura media radiante e temperatura dell'aria è inferiore a  $4^\circ\text{C}$ , la velocità dell'aria è inferiore a  $0,2$  m/s si può assumere  $t_o$  pari alla media aritmetica di  $t_{mr}$  e  $t_a$ :

$$t_o = \frac{t_{mr} + t_a}{2}$$

## 17.5 L'INDICE DI BENESSERE PMV

I dati sperimentali raccolti dal prof. Fanger sono relativi a:

- i valori di quattro variabili fisiche rilevate nella camera di prova:  $t_a$ ,  $t_{mr}$ ,  $\omega_a$ ,  $\phi_a$ ,
- i giudizi verbali (voti) scelti in una scala nominale composta da sette valori: molto freddo (-3), freddo (-2), leggermente freddo (-1), neutro (0), leggermente caldo (+1), caldo (+2), molto caldo(+3).

Tali dati hanno permesso di stabilire che le sensazioni diverse da quella neutra (PMV=0) ossia quelle che corrispondono alle percezioni di caldo e di freddo, sono proporzionali al “**carico termico**” che il sistema di termoregolazione del corpo umano deve neutralizzare.

Tale carico è stato definito da Fanger come la differenza  $\Delta Q$  tra la potenza termica metabolica netta (M-L) nella situazione considerata e la potenza termica che l'individuo disperderebbe se fosse in condizioni di benessere (PMV=0) con il valore reale di (M- L) ovvero:

$$\Delta Q = M \cdot (1 - \eta) - Q_c^* - Q_r^* - Q_k^* - Q_{trp}^* - Q_{sdz}^* - Q_{rps} - Q_{rpl} \quad (A.15)$$

dove le grandezze con l'asterisco sono calcolate nelle condizioni di benessere, mediante la (A.10) e le relazioni (A.11), (A.13), per i termini, che dipendono da  $t_{sk}^*$ ,  $t_v^*$ .

[L'elaborazione dei dati rilevati ha permesso a Fanger di stabilire la seguente correlazione statistica tra l'indice di benessere PMV ed il carico termico agente sul corpo umano:](#)

$$PMV = (0,303 \cdot e^{-0,036 M/A_p} + 0,028) \cdot \Delta Q/A_p \quad (A.16)$$

Sostituendo in  $\Delta Q$  le espressioni già trovate in precedenza si ottiene una funzione di sei variabili, del tipo:

$$PMV = f(t_{mr}, t_a, \phi_a, \omega_a, M/A_p, R_v)$$

Tale funzione è tabellata e permette di ricavare il valore di PMV corrispondente a qualsiasi combinazione delle sei variabili che influenzano il benessere termico.

Il valore di PMV calcolato per qualsiasi combinazione delle variabili del benessere è riportato in apposite tabelle. Per semplificare la tabulazione le temperature  $t_{mr}$  e  $t_a$  sono rappresentate mediante la temperatura operante.

## 17.6 PERCENTUALE PREVISTA DI INSODDISFATTI

L'indice PMV predice il valore medio dei voti di sensazione termica espressi da un gran numero di persone esposte alle stesse condizioni ambientali.

Tuttavia i voti individuali sono dispersi intorno al valore medio con la distribuzione riportata nella Tab. 2, basata su esperimenti fatti su 1300 soggetti.

[Pertanto è utile prevedere il numero delle persone che presumibilmente saranno insoddisfatte in quanto avranno una sensazione di caldo \(+2\) o molto caldo \(+3\) oppure di freddo \(-2\) o molto freddo \(-3\) nella scala a sette valori del PMV.](#)

[L'indice PPD fornisce la percentuale prevedibile delle persone che saranno insoddisfatte poiché “sentiranno” l'ambiente troppo caldo o troppo freddo e che voteranno -2, -3, +2, +3.](#)

Come si può osservare in tabella n. 2, in corrispondenza di un PMV pari a 0 si riscontra un ppd pari a 5, vale a dire un 5% complessivo di persone che voterebbero -2, -3, +2, +3.



**Tab. 2** – Distribuzione percentuale dei voti.

PMV (calcolato)	percentuale prevista di persone che votano						
	0	+1	+2	+3	-1	-2	-3
+2	5	20	45	30			
+1	27	48	20	5			
0	55	20	2.5	0	20	2.5	0
-1	27				48	20	5
-2	5				20	45	30

In base ai dati rilevati da Fanger la percentuale di insoddisfatti si può esprimere in funzione del PMV con la relazione (A.17) rappresentata graficamente nella fig. 2 :

$$PPD = 100 - 95 \cdot e^{- ( 0,03353 PMV^4 + 0,2179 PMV^2 )} \quad (A.17)$$

Il resto del gruppo, pari a (1-PPD)%, giudicherà l’ambiente neutro oppure leggermente caldo oppure leggermente freddo.

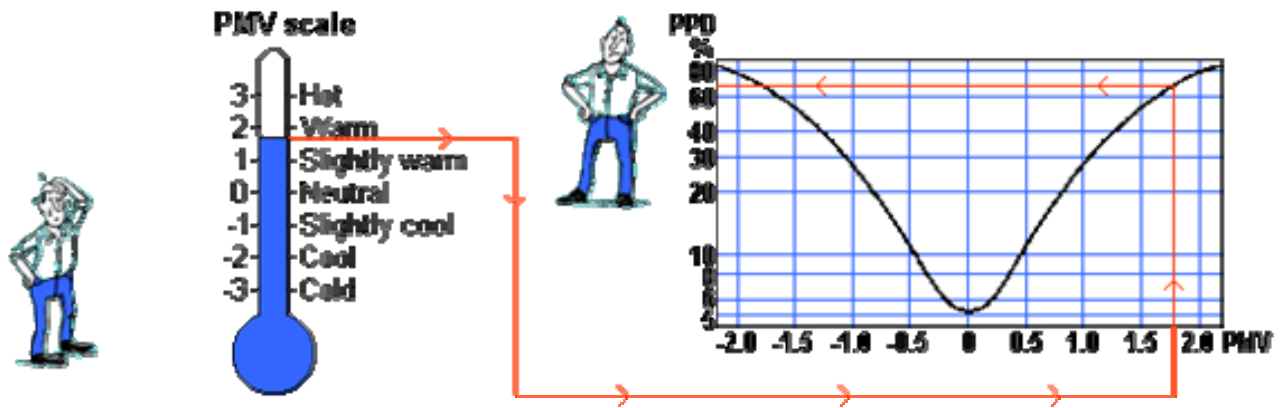


Fig. 4

### 17.7 AMBIENTI TERMICI UNIFORMI E AMBIENTI REALI, IL DISAGIO LOCALIZZATO

Tutte le deduzioni fin qui introdotte sono fondate sui dati sperimentali che sono stati rilevati in una camera di prova nella quale le grandezze fisiche ambientali ( $t_a$ ,  $t_{mr}$ ,  $\omega_a$ ,  $\phi_a$ ) erano uniformi nello spazio e costanti nel tempo.

Pertanto la valutazione di PMV come sopra esposta fornisce informazioni esaustive solo nel caso di “ambienti termici uniformi” cioè simili alle condizioni realizzate nella camera di prova.

Gli ambienti termici reali sono generalmente non uniformi e la velocità dell’aria non è mai costante del tempo. Tutto ciò provoca specifiche cause di disagio sulle quali sono state fatte apposite indagini sperimentali.

Pertanto si deve valutare la percentuale di persone insoddisfatte (PD), in base agli attuali dati sperimentali, per effetto di:

- asimmetria radiante (fonti termiche concentrate su un punto o una superficie);
- gradiente verticale di temperatura dell’aria;
- pavimenti caldi o freddi;
- non uniformità e fluttuazione della velocità dell’aria.



Fig. 5

**17.7.1 DISAGIO LOCALIZZATO DA ASIMMETRIA DELLA TEMPERATURA RADIANTE**

Dai diagrammi di Fig. 3 si deduce che il valore della differenza di temperatura piana radiante,  $\Delta t_{pr}$  (misurata con apposito strumento), che provoca disagio, e quindi insoddisfazione, per il 5% delle persone è pari a circa 10°C per la parete fredda, 4°C per il soffitto caldo, 14°C per la parete calda, 22°C per il soffitto freddo. Dunque le prime due situazioni risultano più fastidiose.

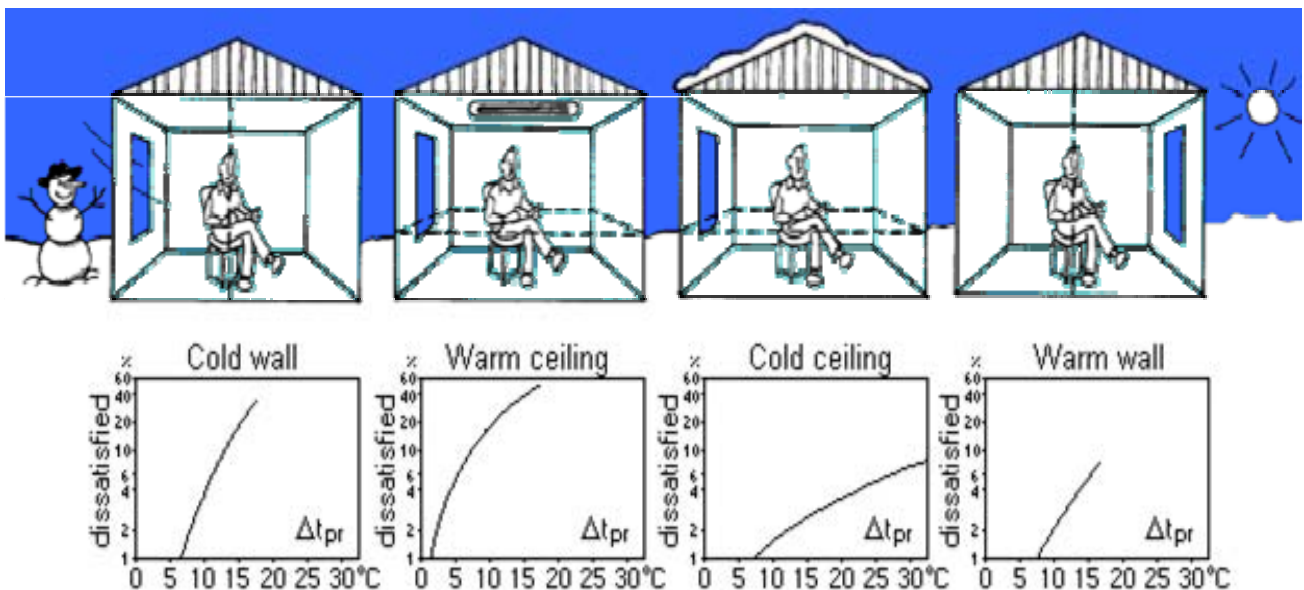


Fig. 6

### 17.7.2 DISAGIO LOCALIZZATO DA GRADIENTE VERTICALE DI TEMPERATURA DELL'ARIA

L'aria calda o fredda, immessa in un ambiente da un impianto, tende a stratificare a causa della differenza di densità rispetto all'aria già presente. In alcuni casi la situazione genera disagi percepiti dall'occupante poiché il sistema di termoregolazione genera una reazione fisiologica basata sulla media delle sollecitazioni termiche.

La grandezza che caratterizza l'effetto del gradiente verticale è la differenza di temperatura dell'aria **tra le zone testa-collo e caviglie**, cioè tra i livelli 1.1 m e 0.1 m per la persona seduta.

La fig. 7 mostra che **una differenza di temperatura di 3°C provoca l'insoddisfazione del 5% degli occupanti**.

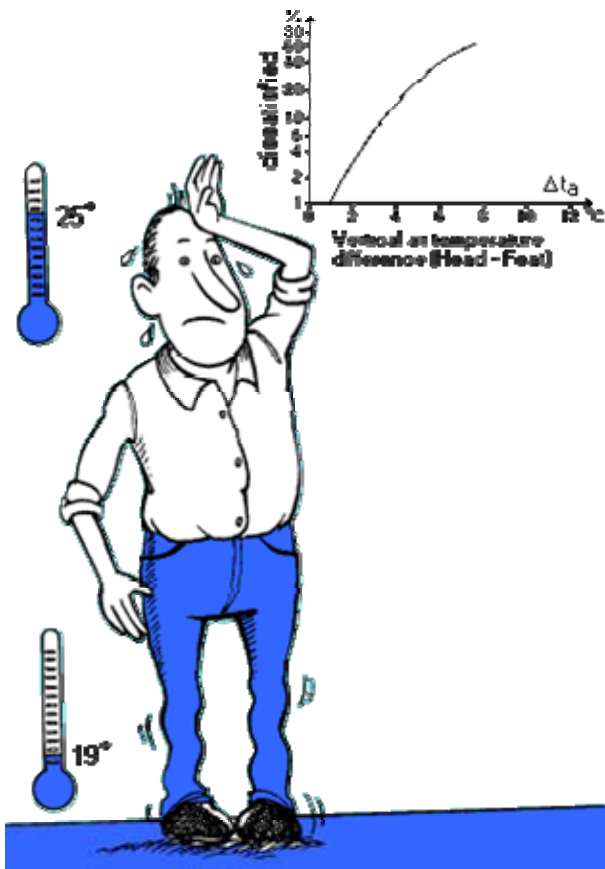


Fig. 7

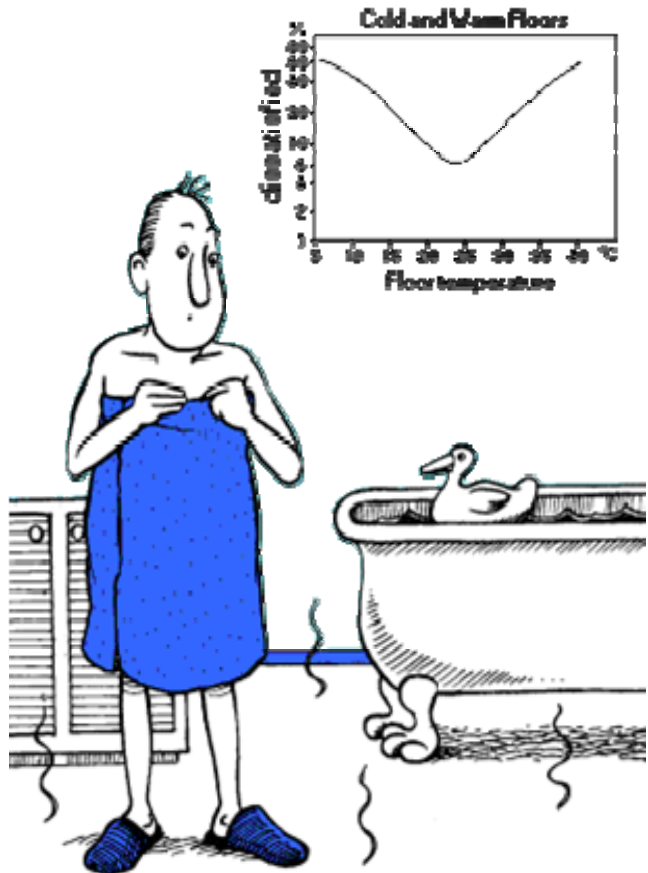


Fig. 8

La temperatura del pavimento può essere più calda o più fredda di quella dell'aria per effetto di scambi col terreno oppure di appositi impianti di riscaldamento o raffreddamento inseriti nel pavimento.

La fig. 8 riguarda il caso di persone con scarpe e calze normali; il grafico mostra che per limitare la percentuale di insoddisfatti al 5% è necessario che la temperatura del pavimento sia compresa tra 19°C e 29°C. Ulteriori dati sono disponibili per persone scalze oppure per calzature diverse dal normale.

### 17.7.3 DISAGIO LOCALIZZATO DA FLUTTUAZIONE DELLA VELOCITA' DELL'ARIA

La velocità dell'aria in un ambiente chiuso fluttua continuamente nel tempo per effetto dei movimenti naturali dell'aria, del moto imposto dalla ventilazione naturale oppure dagli impianti di ventilazione o climatizzazione.

Il sistema di termoregolazione non riesce ad adattarsi alle sollecitazioni localizzate su una parte del corpo umano, come le correnti d'aria, oppure ad azioni pulsanti come la fluttuazione di velocità pertanto reagisce alle condizioni medie. In tal modo la parte interessata dal flusso d'aria risulta male adattata alle condizioni ambientali e si percepisce una sensazione di disagio.

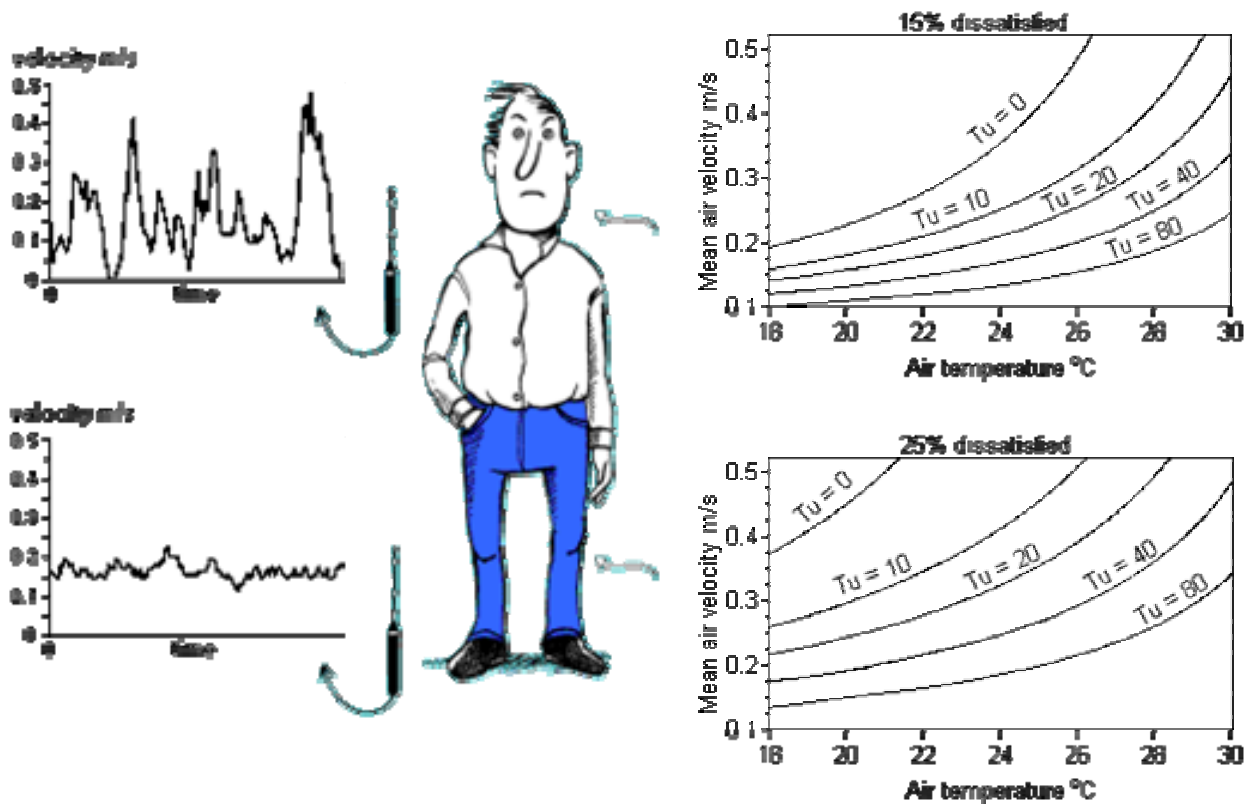


Fig. 9

Per caratterizzare la fluttuazione dell'aria si usa la grandezza chiamata turbolenza percentuale ( $Tu\%$ ) così definita:

$$Tu\% = 100 \cdot SD / \omega_{am}$$

dove  $SD$  è lo scarto quadratico medio della velocità istantanea rispetto al valore medio  $\omega_{am}$ .

Valori comuni della turbolenza misurabile negli impianti di buona esecuzione sono compresi tra 30% e 50%.

I grafici di fig. 6 mostrano che con  $Tu\%=40$  e  $t_a = 26^\circ C$ , la velocità dell'aria non deve superare il valore di 0.2 m/s se si vuole che la percentuale di insoddisfatti risulti non superiore al 15%.

Il rischio di disagio da correnti d'aria (DR) è misurato dalla percentuale di persone insoddisfatte e può essere calcolato per qualsiasi valore delle variabili  $t_a$ ,  $\omega_a$ ,  $Tu\%$ , mediante la seguente relazione basata su studi sperimentali relativi a 150 soggetti:

$$DR = (34 - t_a) (\omega_a - 0,05)^{0,62} (0,37 \cdot \omega_a \cdot Tu\% + 3,14) \tag{A.18}$$

### 17.7.3 AMBIENTI TERMICI ACCETTABILI DAL PUNTO DI VISTA DEL COMFORT TERMICO

La norma **UNI EN ISO 7730** fornisce i requisiti per degli ambienti termici accettabili ovvero indica gli intervalli di valori delle grandezze fisiche ambientali che permettono di ottenere un benessere accettabile negli ambienti.

La norma raccomanda di realizzare quelle condizioni ambientali che risultano soddisfacenti per il 90% degli occupanti ovvero di conseguire una percentuale di insoddisfatti non superiore a 10% che corrisponde ad un valore di PMV compreso tra -0.5 e + 0.5.

Riguardo il discomfort localizzato, la norma prescrive quanto segue:

- asimmetria radiante  $\Delta t_r < 10^\circ\text{C}$  in corrispondenza di superfici vetrate o fredda calcolata con riferimento a 60 cm di altezza dal pavimento;
- asimmetria radiante  $\Delta t_r < 5^\circ\text{C}$  in corrispondenza ad un soffitto radiante calcolata con riferimento a 60 cm di altezza dal pavimento;
- velocità dell'aria  $< 0,15$  m/s (inverno)  
 $< 0,25$  m/s (estate)
- gradiente di temperatura tra 0,1 m e 1,1 m  $< 3^\circ\text{C}$ ;
- temperatura del pavimento compresa tra  $19^\circ\text{C}$  e  $29^\circ\text{C}$  (in Inverno, attività sedentaria)

Con le ipotesi di vestiario e attività fisica più comuni nei luoghi di lavoro dalle tabelle di PMV o dall'equazione (A.17) si ottengono i valori riassunti in Tab.3.

Tab. 3.

Grandezza	INVERNO	ESTATE
Resistenza del VESTIARIO	$I_{cl} = 1 \text{ clo} \cong 0,155 \text{ m}^2 \cdot \text{C/W}$	$I_{cl} = 0,5 \text{ clo} \cong 0,08 \text{ m}^2 \cdot \text{C/W}$
ATTIVITA' FISICA	$M \leq 1,2 \text{ met} \cong 70 \text{ W/m}^2$	$M \leq 1,2 \text{ met} \cong 70 \text{ W/m}^2$
Temperatura operativa, con $\varphi_a = 50\%$	$20^\circ\text{C} < t_o < 24^\circ\text{C}$	$23^\circ\text{C} < t_o < 26^\circ\text{C}$
Gradiente verticale tra $h=0,1$ m ed $h=1,1$ m	$t_{a,1.1} - t_{a,0.1} < 3^\circ\text{C}$	$t_{a,1.1} - t_{a,0.1} < 3^\circ\text{C}$
Differenza di temperatura radiante piana, misurata ad $h=0,6$ m	$\Delta t_{r,s-p} < 5^\circ\text{C}$ $\Delta t_{r,p-p} < 10^\circ\text{C}$	Non definita, si può porre eguale all'inverno, come nella norma ASHRAE
Temperatura del pavimento	$19^\circ\text{C} < t_a < 29^\circ\text{C}$	$19^\circ\text{C} < t_a < 29^\circ\text{C}$
Rischio di corrente d'aria	$DR < 15\%$	$DR < 15\%$

Si noti che quattro righe su cinque sono dedicate ai requisiti necessari per limitare i disagi localizzati (percentuale di insoddisfatti) dovuti ai diversi tipi di disuniformità dell'ambiente termico reale.

<b>APPENDICE A - Equazioni di bilancio del corpo umano</b>
--

Il primo Principio della Termodinamica applicato al sistema "Corpo umano" trascurando le variazioni di energia cinetica, potenziale, ecc. può essere scritto secondo la seguente relazione:

$$M - L - Q = dU/d\tau$$

dove Q e L sono positivi quando il calore è perso ed il lavoro è fatto dal corpo umano.

Gli scambi di calore sensibile e latente fra Uomo e Ambiente si verificano sulla superficie esterna del corpo umano e all'interno della cavità polmonare.

Esplicitando i termini relativi allo scambio termico si ottiene l'equazione (A.1).

$M - L - Q_c - Q_r - Q_k - Q_{trp} - Q_{sdz} - Q_{rps} - Q_{rpl} = dU/d\tau$	(A.1)
--	-------

dove:

- M : potenza termica generata dall'attività metabolica [W];
- L : potenza meccanica scambiata tra corpo umano e l'ambiente [W];
- $Q_c$  : potenza termica sensibile scambiata per convezione [W];
- $Q_r$  : potenza termica sensibile scambiata per irraggiamento [W];
- $Q_k$  : potenza termica sensibile scambiata per conduzione [W];
- $Q_{trp}$  : potenza termica latente scambiata per traspirazione (diffusione del vapore) attraverso la pelle [W];
- $Q_{sdz}$  : potenza termica latente scambiata per evaporazione del sudore sulla superficie della pelle [W];
- $Q_{rps}$  : potenza termica sensibile scambiata nella respirazione [W];
- $Q_{rpl}$  : potenza termica latente scambiata nella respirazione [W];
- $dU/d\tau$  : variazione dell'energia interna del corpo umano nell'unità di tempo [W].

Si può scrivere  $M-L = M \cdot (1-\eta)$  dove il simbolo  $\eta=L/M$  rappresenta il rendimento di trasformazione dell'energia metabolica in lavoro.

Esplicitando ogni termine della (A.1) in base ai principi generali che regolano gli scambi di calore e di vapore, nell'ipotesi di regime stazionario, si ricava l'equazione (A.9) del bilancio energetico del corpo umano.



Scambio per convezione:  $Q_C$ 

$$Q_C = h_{cp} \cdot f_v \cdot A_p \cdot (t_v - t_a) \quad (A.2)$$

dove:

$h_{cp}$  : conduttanza convettiva unitaria sulla persona [ $W/(m^2 \cdot K)$ ];  $h_{cp}$  si calcola in funzione del salto termico vestiario-aria oppure della velocità relativa dell'aria,  $\omega_{ar}$ , secondo due relazioni, una per la convezione naturale, una per la convezione forzata; quando la situazione che si studia è al confine fra le due si sceglie il valore di  $h_{cp}$  più elevato;

per la convezione naturale si ha:

$$h_{cp} = 2,38 \cdot (t_v - t_a)^{0.25} \quad (A.2.1)$$

per la convezione forzata si ha:

$$h_{cp} = 12,1 \cdot \omega_{ar}^{0.5} \quad (A.2.2)$$

$f_v$  : fattore adimensionale di area coperta dal vestiario;  $f_v = A_v/A_p$ , dove  $A_v$  è la superficie corporea avente temperatura  $t_v$ , lambita dall'aria a temperatura  $t_a$ ;

$f_v$  si calcola con relazioni empiriche del tipo  $f_v = f(R_v)$ , dove  $R_v$  è la resistenza termica specifica abbigliamento misurata anche in [clo] (1 clo =  $0,155 \text{ m}^2 \cdot K/W$ ):

$$f_v = 1 + 1,29 \cdot R_v \quad \text{se } R_v < 0,078 \text{ m}^2 \cdot K/W \quad (A.2.3)$$

$$f_v = 1,05 + 0,645 \cdot R_v \quad \text{se } R_v > 0,078 \text{ m}^2 \cdot K/W \quad (A.2.4)$$

$A_p$  : area superficie corpo umano [ $m^2$ ];

$t_v$  : temperatura media superficiale del corpo abbigliato [ $^{\circ}C$ ];

$t_a$  : temperatura aria ambiente a bulbo secco [ $^{\circ}C$ ];

$\omega_{ar}$  : velocità relativa dell'aria, [m/s].

Scambio per irraggiamento:  $Q_r$ 

La potenza termica scambiata per irraggiamento tra il corpo vestito e l'ambiente circostante può essere valutata con la legge di Stefan-Boltzmann applicata a due corpi grigi: 1 (il corpo umano) e 2 (le superfici di confine del locale) dove  $A_2$  contiene  $A_1$  ed è  $A_2 \gg A_1$ .

Indicando con  $\varepsilon_p$  l'emissività del corpo abbigliato che consideriamo uguale alla media fra l'emissività del vestiario ( $\varepsilon_v = 0,95$ ) e l'emissività della pelle ( $\varepsilon_{sk} = 0,99$ ) risulta  $\varepsilon_p = 0,97$ , in base alle formule dello scambio per radiazione si ottiene:

$$Q_r = \sigma \cdot \varepsilon_p \cdot A_{\text{eff}} \cdot F_{p-a} \cdot [(t_v + 273)^4 - (t_{mr} + 273)^4] \quad (\text{A.3})$$

$A_{\text{eff}}$  : poiché il corpo umano presenta delle parti concave l'area radiante efficace è quella della superficie convessa che lo racchiude completamente:  $A_{\text{eff}} = f_v \cdot f_{\text{eff}} \cdot A_p$ , dove  $f_v$  è il fattore di area del vestiario;

$f_{\text{eff}}$  : è il coefficiente di area efficace pari al rapporto tra la superficie radiante effettiva del corpo abbigliato e la superficie totale; le misure sperimentali mostrano che questo coefficiente non dipende apprezzabilmente dalle dimensioni del corpo ed è stimato pari 0,696 per soggetti seduti e pari a 0,725 per soggetti in piedi, mentre per una posizione generica si può assumere  $f_{\text{eff}} = 0,71$ ;

$\sigma$  : costante di Stefan-Boltzmann pari a  $5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$ ;

$F_{p-a}$  : fattore di vista fra la persona e l'intero ambiente, che risulta unitario;

$t_v$  : temperatura media superficiale del corpo abbigliato [ $^{\circ}\text{C}$ ];

$t_{mr}$  : temperatura media radiante delle superfici che delimitano il locale [ $^{\circ}\text{C}$ ].

$$t_{mr} = \sum_i t_i F_{p-i} \quad (\text{A.3.1})$$

Applicando le semplificazioni valide per lo scambio per radiazione tra due superfici con differenza di temperatura modesta, si ottiene:

$$Q_r = A_{\text{eff}} \cdot h_{rp} \cdot (t_v - t_{rm}) \quad (\text{A.4})$$

con

$$h_{rp} = 4 \cdot \sigma \cdot \varepsilon_p \cdot ((T_v + T_{rm})/2)^3 \quad (\text{A.4.1})$$

dove risulta  $h_{rp} = 5,9 \text{ W}/\text{m}^2\text{K}$  alla temperatura media di 300 K.

Scambio termico per conduzione: $Q_k$
---------------------------------------

La potenza termica dispersa per conduzione  $Q_k$  riguarda una superficie molto limitata del corpo, che di solito corrisponde a quella d'appoggio dei piedi. La sua influenza nel bilancio generale del corpo umano si considera perciò irrilevante. Tuttavia le dispersioni per conduzione possono essere causa di discomfort locale e vanno studiate di volta in volta indicando i limiti di comfort delle temperature superficiali dell'ambiente.

Scambi termici per diffusione del vapore attraverso la pelle: $Q_{trp}$
---

La massa di vapore scambiata dal corpo umano con l'ambiente è dovuta a due fenomeni diversi: il trasporto di vapore per diffusione attraverso la pelle e l'evaporazione del sudore che avviene sulla superficie corporea bagnata.

Sulla pelle asciutta avviene il primo tipo di scambio, sulla pelle bagnata avviene il secondo. Si può presentare solo uno dei due flussi ed il rapporto fra le aree interessate da ciascuno scambio è dato dalla frazione di superficie corporea bagnata  $\beta = A_s/A_p$ , dove  $A_s$  è la superficie bagnata che scambia il flusso  $Q_{sdz}$ .

La potenza termica dispersa per diffusione si può esprimere dunque con:

$$Q_{trp} = r \cdot \Pi \cdot f_d \cdot A_p \cdot (1 - \beta) \cdot (p_{sk} - p_a) \quad (A.5)$$

- $r$  : calore latente di evaporazione dell'acqua alla temperatura interna del corpo umano [J/Kg];
- $\Pi$  : permeanza della pelle al vapore acqueo, pari a  $1,27 \cdot 10^{-9}$  kg/(m<sup>2</sup>·s·Pa);
- $f_d$  : fattore di resistenza al vapore del vestiario; vale 1 [adim.] in assenza di vestiti, vale 0,85 per il vestiario estivo e 0,65 per quello invernale;
- $A_p$  : area superficie corpo umano [m<sup>2</sup>];
- $\beta$  : frazione di superficie del corpo bagnata:  $A_s/A_p$  [adim.];
- $p_{sk}$  : pressione di saturazione vapore d'acqua alla temperatura della pelle  $t_{sk}$  [Pa], data dalla relazione empirica valida tra 27°C e 37°C:  $p_{sk} = 256 t_{sk} - 3373$  [Pa]
- $p_a$  : pressione parziale del vapore d'acqua nell'ambiente a temperatura  $t_a$ , data dalla relazione  $p_a = UR_a \cdot p_{as}$ , dove la pressione di saturazione  $p_{as}$  si può esprimere con la seguente relazione approssimata:

$$p_{as} = 776.3 + 10.80 \cdot t_a + 3.378 \cdot t_a^2 \quad [\text{Pa}]$$

Scambi termici per evaporazione sulla superficie della pelle:  $Q_{sdz}$ 

La potenza termica scambiata per sudorazione  $Q_{sdz}$  è uno degli indicatori fisiologici di comfort studiati da P.O.Fanger (ricercatore danese).

La sua espressione è :

$$Q_{sdz} = r \cdot (h_{cp}/c_{pa}) \cdot f_d \cdot A_p \cdot \beta \cdot (x_s - x_a) \quad (A.6)$$

$r$  : calore latente di evaporazione dell'acqua alla temperatura interna del corpo umano pari a  $2,41 \cdot 10^6$  J/kg;

$h_{cp}$  : conduttanza convettiva unitaria sulla persona [W/(m<sup>2</sup>·K)];

$c_{pa}$  : calore specifico dell'aria a pressione costante [J/(kg·°C)];

$f_d$  : fattore di resistenza al vapore del vestiario [adim.];

$x_a$  : umidità specifica dell'aria ambiente, [adim.];

$x_s$  : umidità specifica aria satura a temperatura  $t_{sk}$  della pelle, [adim.].

Le umidità specifiche  $x_a$  e  $x_s$  si possono scrivere in funzione delle rispettive pressioni parziali del vapore:

$$x_a = 0,622 \cdot p_a / (p - p_a) \quad (A.6.1)$$

$$x_s = 0,622 \cdot p_{sk} / (p - p_{sk}) \quad (A.6.2)$$

dove  $p$  è la pressione atmosferica standard pari a 101325 [Pa].

Scambi termici di respirazione:  $Q_{rps}$ ,  $Q_{rpl}$ 

La respirazione è un processo continuo di ventilazione della cavità polmonare. Durante la respirazione l'aria dell'ambiente viene introdotta nei polmoni dove si satura di vapore d'acqua e raggiunge una temperatura, vicina a quella interna del cavo polmonare, che indichiamo con  $t_x$ .

La portata d'aria  $G_x$  introdotta nel cavo polmonare scambia sia calore sensibile, per variazione di temperatura, che latente, per aumento di umidità specifica; a tali processi corrispondono i termini  $Q_{rps}$  ed  $Q_{rpl}$ :

$$Q_{rps} = G_x \cdot c_{pa} \cdot (t_x - t_a) \quad (A.7)$$

$$Q_{rpl} = G_x \cdot r \cdot (x_x - x_a) \quad (A.8)$$

dove:

$c_{pa}$  : calore specifico aria a pressione costante [J/kg K];

$G_x$  : portata d'aria del cavo polmonare [kg/s]; data, in funzione dell'attività metabolica, dalla relazione empirica:  $G_x = 1,43 \cdot 10^{-6} \cdot M/A_p$  [kg/(s·m<sup>2</sup>)];

$r$  : calore latente di evaporazione dell'acqua alla temperatura interna del corpo umano [J/kg];

$t_x$  : temperatura nella cavità polmonare pari a circa 34°C;

$x_x$  : umidità specifica aria espirata [adim.];

$x_a$  : umidità specifica aria ambiente [adim.].

La differenza ( $x_x - x_a$ ) si può esprimere mediante la relazione empirica:

$$x_x - x_a = 0,0277 + 6,5 \cdot 10^{-5} \cdot t_a - 0,80 \cdot x_a \quad (\text{A.8.1})$$

pertanto le (A.7) e (A.8) si possono scrivere nella forma:

$$Q_{rps} = 1,43 \cdot 10^{-6} M/A_p \cdot c_{pa} \cdot (t_x - t_a) \quad (\text{A.8.2})$$

$$Q_{rpl} = 1,43 \cdot 10^{-6} M/A_p \cdot r \cdot (0,0277 + 6,5 \cdot 10^{-5} t_a - 0,80 \cdot x_a) \quad (\text{A.8.3})$$

**Bilancio energetico degli scambi Uomo-Ambiente in regime stazionario**

Sostituendo in (A.1) le espressioni dei singoli termini, l'equazione di bilancio termico del corpo umano in regime stazionario ( $dU/d\tau=0$ ) e ponendo  $Q_k=0$ , diventa:

$$M \cdot (1-\eta) - h_{cp} \cdot f_v \cdot A_p \cdot (t_v - t_a) - f_{eff} \cdot f_v \cdot A_p \cdot h_{rp} \cdot (t_v - t_{rm}) - r \cdot \Pi \cdot f_d \cdot A_p \cdot (1-\beta) \cdot (p_{sk} - p_a) - r \cdot (h_{cp}/c_{pa}) \cdot f_d \cdot A_p \cdot \beta \cdot (x_s - x_a) - G_x \cdot c_{pa} \cdot (t_x - t_a) - G_x \cdot r \cdot (x_x - x_a) = 0 \quad (A.9)$$

Quando la (A.9) è soddisfatta si realizza uno stato del sistema corpo-ambiente che è tale da assicurare l'eguaglianza tra i flussi termici generati all'interno del corpo umano e quelli scambiati sulla superficie; tale condizione è necessaria, ma non sufficiente, per l'esistenza dello stato di benessere termoigrometrico.

Per individuare lo stato di benessere è necessario considerare, insieme alla (A.9), le relazioni matematiche che rappresentano il comportamento del sistema fisiologico.

A tal fine il prof. P.O.Fanger, ha eseguito una serie di test su un campione di popolazione statisticamente significativo. Operando in una camera climatica ha rilevato sperimentalmente l'opinione delle persone sulla sensazione di benessere da esse percepito ed ha contestualmente rilevato i dati fisici e fisiologici che caratterizzavano ogni prova.

Analizzando i risultati ottenuti in numerose prove Fanger ha stabilito che nello stato di benessere termico, le variabili  $t_{sk}$  ed  $Q_{sdz}$  sono fortemente correlate al metabolismo specifico  $M/A_p$  ed al rendimento meccanico, mentre la variazione delle altre cause che concorrono all'equilibrio termico del corpo umano non provoca apprezzabili effetti sul comfort.

Le equazioni che sintetizzano i dati sperimentali di Fanger sono:

$$Q_{sdz}^* = 0,42 \cdot A_p \cdot [M(1-\eta)/A_p - 58,15] \quad (A.10)$$

$$t_{sk}^* = 35,7 - 0,0275 \cdot M \cdot (1-\eta)/A_p \quad (A.11)$$

ove l'asterisco indica che i valori delle grandezze sono quelli relativi alle condizioni di benessere.

Sostituendo le (A.10) e (A.11) nell'equazione del bilancio energetico del corpo umano, (A.9), si ottiene l'equazione di Fanger per l'equilibrio termico in condizioni di benessere.

$$M \cdot (1-\eta) - h_{cp} \cdot f_v \cdot A_p \cdot (t_v^* - t_a) - f_{eff} \cdot f_v \cdot A_p \cdot h_{rp} \cdot (t_v^* - t_{rm}^*) - r \cdot \Pi \cdot f_d \cdot A_p \cdot (1-\beta) \cdot (p_{sk}^* - p_a) + - 0,42 \cdot A_p \cdot [M \cdot (1-\eta)/A_p - 58,15] - G_x \cdot c_{pa} \cdot (t_x - t_a) - G_x \cdot r \cdot (x_x - x_a) = 0 \quad (A.12)$$

In Appendice B si dimostra che  $t_v^*$ , nelle condizioni di benessere può essere calcolata mediante le relazioni (B.4), (B.5), (B.6), (B.7), cioè in funzione di quattro variabili ambientali ( $p$ ,  $t_a$ ,  $UR_a$ ,  $\omega_a$ ) e delle due variabili pertinenti all'attività ed il vestiario del soggetto ( $M/A_p$ ,  $R_v$ ). Si ottiene:

$$t_v^* = 35,7 - 0,0275 \cdot M \cdot (1-\eta)/A_p - R_v \cdot \{ M \cdot (1-\eta)/A_p - r \cdot \Pi \cdot (p_{sk} - p_a) + - 0,42 \cdot [M \cdot (1-\eta)/A_p - 58,15] - (G_x/A_p) \cdot [c_{pa} \cdot (t_x - t_a) + r \cdot (x_x - x_a)] \} \quad (A.13)$$



**APPENDICE B - Equazione della temperatura esterna media del corpo abbigliato  $t_v$** 

La temperatura media corpo abbigliato,  $t_v$ , può essere calcolata considerando l'equazione di bilancio termico del corpo umano. In essa la somma della potenza termica scambiata per irraggiamento e per convezione (dalla superficie del corpo vestito) risulta pari a quella che attraversa il vestiario di resistenza  $R_v$ , ovvero:

$$Q_r + Q_c = A_p \cdot (t_{sk} - t_v) / R_v \quad (B.1)$$

Se sostituiamo la (B.1) nell'equazione di bilancio termico (A.1), riportata in Appendice A, e trascuriamo  $Q_k$ , si può scrivere:

$$M - L - Q_{trp} - Q_{sdz} - Q_{rps} - Q_{rpl} = A_p \cdot (t_{sk} - t_v) / R_v \quad (B.2)$$

da cui si ottiene  $t_v$ :

$$t_v = t_{sk} - R_v \cdot (M - L - Q_{trp} - Q_{sdz} - Q_{rps} - Q_{rpl}) / A_p \quad (B.3)$$

Introducendo in (B.3) le relazioni (A.5), (A.7), (A.8) e le (A.10), (A.11) che esprimono  $t_{sk}^*$  ed  $Q_{sdz}^*$  si ottiene il valore di  $t_v$  nel caso particolare in cui l'uomo sia nelle condizioni di benessere:

$$t_v^* = 35,7 - 0,0275 \cdot M / A_p \cdot (1 - \eta) - R_v \cdot \{ M / A_p \cdot (1 - \eta) - r \cdot \Pi \cdot (p_{sk} - p_a) - 0,42 \cdot [M / A_p \cdot (1 - \eta) - 58,15] - (G_x / A_p) \cdot [c_{pa} \cdot (t_x - t_a) + r \cdot (x_x - x_a)] \} \quad (B.4)$$

$\eta$  : viene posto uguale a zero

$G_x$  : portata d'aria nel cavo polmonare;

$p_a$  : pressione parziale del vapore d'acqua a temperatura  $t_a$  che può essere espressa come  $p_a = p_{as} \cdot UR_a$  ;

$p_{as}$  : pressione di saturazione del vapore d'acqua in funzione della temperatura dell'aria  $t_a$  (Appendice C);

$p_{sk}^*$  : pressione di saturazione del vapore d'acqua a temperatura  $t_{sk}^*$  calcolata con la relazione empirica (B.5) valida tra 27°C e 37°C:

$$p_{sk}^* = 256 t_{sk}^* - 3373 \quad [\text{Pa}] \quad (B.5)$$

$A_p, r, c_{pa}, \Pi, t_x$  : costanti di valore noto (Appendice D).

**APPENDICE C - Equazione della pressione di saturazione**

Nel campo delle temperature di interesse per il benessere negli ambienti termici moderati la pressione parziale di saturazione del vapore, si può approssimare con la relazione:

$$p_{as} = 776,3 + 10,80 \cdot t_a + 3,378 \cdot t_a^2 \quad [\text{Pa}]$$

**APPENDICE D - Costanti fisiche**

- $A_p$  : superficie corporea media data dalla relazione di Du Bois,  
 $A_p = 0,202 \text{ peso}^{0,425} \text{ altezza}^{0,725}$ . Risulta pari a  $1,7 \text{ m}^2$  per una persona di 60 kg ed altezza di 1,70 m;
- $r$  : calore latente dell'acqua alla temperatura di  $35^\circ\text{C}$ , pari a  $2,41 \cdot 10^6 \text{ J/kg}$ ;
- $c_{pa}$  : calore specifico dell'aria a pressione costante, pari a  $1004 \text{ J/(kg}\cdot\text{K)}$ ;
- $\eta$  : rendimento meccanico del corpo umano, spesso posto uguale a zero.
- $p$  : pressione atmosferica; costante pari a  $101325 \text{ Pa}$ ;
- $T_x$  : temperatura aria espirata, pari a quella del cavo polmonare,  $t_x = 34^\circ\text{C}$ ;
- $\beta$  : frazione di superficie corporea bagnata, valore tipico  $0,1 - 0,15$ ;
- $\Pi$  : permeanza della pelle al vapore d'acqua pari a  $1,27 \cdot 10^{-9} \text{ kg/(m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa)}$ .

**Appendice E - Met value table**

Activity	Metabolic rates [M]	W/m2	Met
Reclining		46	0.8
Seated relaxed		58	1.0
Clock and watch repairer		65	1.1
Standing relaxed		70	1.2
Sedentary activity (office, dwelling, school, laboratory)		70	1.2
Car driving		80	1.4
Graphic profession - Book Binder		85	1.5
Standing, light activity (shopping, laboratory, light industry)		93	1.6
Teacher		95	1.6
Domestic work -shaving, washing and dressing		100	1.7
Walking on the level, 2 km/h		110	1.9
Standing, medium activity (shop assistant, domestic work)		116	2.0
Building industry -Brick laying (Block of 15.3 kg)		125	2.2
Washing dishes standing		145	2,5
Domestic work -raking leaves on the lawn		170	2.9
Domestic work -washing by hand and ironing (120-220 W/m2)		170	2.9
Iron and steel -ramming the mould with a pneumatic hammer		175	3.0
Building industry -forming the mould		180	3.1
Walking on the level, 5 km/h		200	3.4
Forestry -cutting across the grain with a one-man power saw		205	3.5
Agriculture -Ploughing with a team of horses		235	4.0
Building industry -loading a wheelbarrow with stones and mortar		275	4.7
Sports -Ice skating, 18 km/h		360	6.2
Agriculture -digging with a spade (24 lifts/min.)		380	6.5
Sports -Skiing on level, good snow, 9 km/h		405	7.0
Forestry -working with an axe (weight 2 kg. 33 blows/min.)		500	8.6
Sports -Running, 15 km/h		550	9.5

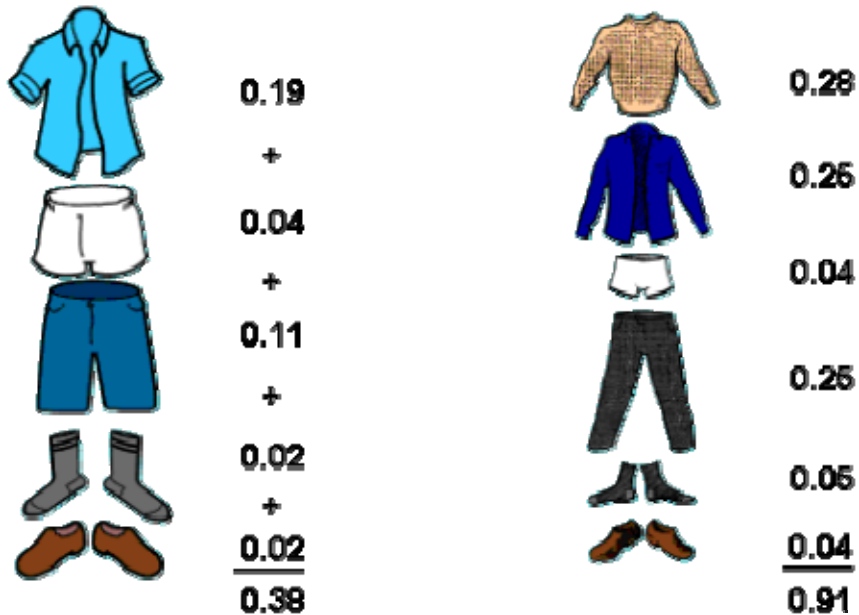
(La potenza metabolica è data  $Q_p = M \cdot A_p$  con M in W ed  $A_p = 1,7 \text{ m}^2$  per persone alte 1,7 m di peso 70 kg)

**Appendix F: Clo values table**

Garment description		Iclu	Clo	m <sup>2</sup> °C/W
Underwear, pants	Pantyhose		0.02	0.003
	Panties		0.03	0.005
	Briefs		0.04	0.006
	Pants 1/2 long legs, wool		0.06	0.009
	Pants long legs		0.1	0.016
Underwear, shirts	Bra		0.01	0.002
	Shirt sleeveless		0.06	0.009
	T-shirt		0.09	0.014
	Shirt with long sleeves		0.12	0.019
	Half-slip, nylon		0.14	0.022
Shirts	Tube top		0.06	0.009
	Short sleeve		0.09	0.029
	Light weight blouse, long sleeves		0.15	0.023
	Light weight, long sleeves		0.20	0.031
	Normal, long sleeves		0.25	0.039
	Flannel shirt, long sleeves		0.3	0.047
	Long sleeves, turtleneck blouse		0.34	0.053
Trousers	Shorts		0.06	0.009
	Walking shorts		0.11	0.017
	Light-weight trousers		0.20	0.031
	Normal trousers		0.25	0.039
	Flannel trousers		0.28	0.043
	Overalls		0.28	0.043
Coveralls	Daily wear, belted		0.49	0.076
	Work		0.50	0.078
Highly-insulating coveralls	Multi-component, filling		1.03	0.160
	Fibre-pelt		1.13	0.175
Sweaters	Sleeveless vest		0.12	0.019
	Thin sweater		0.2	0.031
	Long sleeves, turtleneck (thin)		0.26	0.040
	Sweater 0.28 0.043 Thick sweater		0.35	0.054
	Long sleeves, turtleneck (thick)		0.37	0.057
Jacket	Vest		0.13	0.020
	Light summer jacket		0.25	0.039
	Jacket		0.35	0.054
	Smock		0.3	0.047
Coats and overjackets and overtrousers	Coat		0.6	0.093
	Down jacket		0.55	0.085
	Parka		0.7	0.109
	Overalls multi-component		0.52	0.081
Sundries	Socks		0.02	0.003
	Thick, ankle socks		0.05	0.008
	Thick, long socks		0.1	0.016
	Slippers, quilted fleece		0.03	0.005
	Shoes (thin soled)		0.02	0.003
	Shoes (thick soled)		0.04	0.006
	Boots 0.1 0.016 Gloves		0.05	0.008
Skirts, dresses	Light skirt, 15 cm. above knee		0.10	0.016

	Light skirt, 15 cm. below knee	0.18	0.028
	Heavy skirt, knee-length	0.25	0.039
	Light dress, sleeveless	0.25	0.039
	Winter dress, long sleeves	0.4	0.062
Sleepwear	Long sleeve, long gown	0.3	0.047
	Thin strap, short gown	0.15	0.023
	Hospital gown	0.31	0.048
	Long sleeve, long pyjamas	0.50	0.078
	Body sleep with feet	0.72	0.112
	Undershorts	0.1	0.016
Robes	Long sleeve, wrap, long	0.53	0.082
	Long sleeve, wrap, short	0.41	0.064
Chairs	Wooden or metal	0.00	0.000
	Fabric-covered, cushioned, swivel	0.10	0.016
	Armchair	0.20	0.032

Insulation for the entire clothing:  $I_{cl} = \sum I_{clu}$



Tab. 4 – Dati sul metabolismo in relazione al tipo di attività svolta.

12-6

IMPIANTI TECNICI DI ESERCIZIO INDUSTRIALE

Tab. 1.III – Potenze termiche sensibili ( $P_C + P_I$ ), latenti ( $P_E$ ), totali ( $P_W$ ) e portate di vapore  $g_p$  emesse da una persona adulta in funzione della temperatura ambiente  $t_a$  (del bulbo asciutto dello psicrometro) e della condizione di attività fisica.

Tipo di attività	Applicazione	$t_a$													
		28 °C			26 °C			24 °C			21 °C				
		$P_C+P_I$	$P_E$	$g_p$	$P_C+P_I$	$P_E$	$g_p$	$P_C+P_I$	$P_E$	$g_p$	$P_C+P_I$	$P_E$	$g_p$		
	(W)			(W)			(W)			(W)					
		$P_W$													
Seduto a riposo	Teatro	52	52	75	64	40	64	58	58	69	35	50	75	29	42
Seduto con lavoro molto leggero	Scuola	52	64	93	64	52	70	75	70	70	46	67	81	35	51
Seduto con attività moderata. In piedi con passo lento	Uffici Abitazioni Negozzi	50	80	115	64	70	70	100	100	70	60	87	80	50	73
Lavoro leggero al banco	Fabbrica	58	162	235	70	150	87	220	87	133	190	190	104	116	170
Lavoro abbastanza pesante	Fabbrica	80	215	310	100	195	110	280	110	180	260	260	130	160	230
Lavoro pesante	Fabbrica	130	290	420	140	280	150	400	150	270	390	390	180	240	350