

# Condizioni di benessere e prestazioni termiche

Corso di Tecniche del controllo  
ambientale

Prof.Arch.Gianfranco Cellai

Laboratorio di Fisica Ambientale per la Qualità Edilizia  
Università di Firenze

# **Riferimenti legislativi e normativi inerenti il benessere**

**D.L.vo 626/94 Miglioramento della sicurezza e salute negli ambienti di lavoro, sostituito dal D.l.vo 9 aprile 2008, n. 81**

**UNI EN ISO 7730 Ambienti termici moderati -  
Determinazione degli indici PMV e PPD e specifica delle  
condizioni di benessere termico**

**UNI EN ISO 9920 Stima dell'isolamento termico e della  
resistenza evaporativa dell'abbigliamento**

**UNI EN ISO 7726 Ambienti termici. Strumenti e metodi per  
la misura delle grandezze fisiche**

**UNI EN ISO 8996 Determinazione del metabolismo energetico**

# D.L.vo 81/2008 (ex 626)

## Allegato IV – Punto 1.9 Microclima

### 1.9.1. Aerazione dei luoghi di lavoro chiusi

1.9.1.1. Nei luoghi di lavoro chiusi, è necessario far sì che tenendo conto dei metodi di lavoro e degli sforzi fisici ai quali sono sottoposti i lavoratori, essi dispongano di aria salubre in quantità sufficiente ottenuta preferenzialmente con aperture naturali e quando ciò non sia possibile, con impianti di aerazione.

1.9.1.2. Se viene utilizzato un impianto di aerazione, esso deve essere sempre mantenuto funzionante. Ogni eventuale guasto deve essere segnalato da un sistema di controllo, quando ciò è necessario per salvaguardare la salute dei lavoratori.

1.9.1.3. Se sono utilizzati impianti di condizionamento dell'aria o di ventilazione meccanica, essi devono funzionare in modo che i lavoratori non siano esposti a correnti d'aria fastidiosa.

1.9.1.4. Gli stessi impianti devono essere periodicamente sottoposti a controlli, manutenzione, pulizia e sanificazione per la tutela della salute dei lavoratori.

1.9.1.5. Qualsiasi sedimento o sporcizia che potrebbe comportare un pericolo immediato per la salute dei lavoratori dovuto all'inquinamento dell'aria respirata deve essere eliminato rapidamente.

# D.L.vo 81/2008 (ex 626)

## Allegato IV – Punto 1.9.2 Temperatura dei locali

1.9.2.1. La temperatura nei locali di lavoro deve essere adeguata all'organismo umano durante il tempo di lavoro, tenuto conto dei metodi di lavoro applicati e degli sforzi fisici imposti ai lavoratori.

1.9.2.2. Nel giudizio sulla temperatura adeguata per i lavoratori si deve tener conto della influenza che possono esercitare sopra di essa il grado di umidità ed il movimento dell'aria concomitanti.

1.9.2.3. La temperatura dei locali di riposo, dei locali per il personale di sorveglianza, dei servizi igienici, delle mense e dei locali di pronto soccorso deve essere conforme alla destinazione specifica di questi locali.

1.9.2.4. Le finestre, i lucernari e le pareti vetrate devono essere tali da evitare un soleggiamento eccessivo dei luoghi di lavoro, tenendo conto del tipo di attività e della natura del luogo di lavoro.

1.9.2.5. Quando non è conveniente modificare la temperatura di tutto l'ambiente, si deve provvedere alla difesa dei lavoratori contro le temperature troppo alte o troppo basse mediante misure tecniche localizzate o mezzi personali di protezione.

1.9.2.6. Gli apparecchi a fuoco diretto destinati al riscaldamento dell'ambiente nei locali chiusi di lavoro di cui al precedente articolo, devono essere muniti di condotti del fumo privi di valvole regolatrici ed avere tiraggio sufficiente per evitare la corruzione dell'aria con i prodotti della combustione, ad eccezione dei casi in cui, per l'ampiezza del locale, tale impianto non sia necessario.

# **LA QUALITÀ DELL'ABITARE**

**E' ESPRESSA DAL BENESSERE  
TERMOIGROMETRICO DEGLI  
INDIVIDUI  
OTTENUTO SENZA SPRECHI  
ENERGETICI**

# LA DEFINIZIONE DI BENESSERE

POSSIAMO AFFERMARE CHE UN AMBIENTE SI TROVA IN CONDIZIONI TERMICAMENTE COMFORTEVOLI QUANDO UNA ELEVATA PERCENTUALE DI PERSONE POSTE ALL'INTERNO DELLO STESSO, SOGGETTE AD ANALOGHE CONDIZIONI DI VESTIARIO ED ATTIVITÀ FISICA , NON È IN GRADO DI DIRE SE PREFERIREBBE UNA TEMPERATURA PIÙ ALTA O PIÙ BASSA DICHIARANDOSI QUINDI IMPLICITAMENTE SODDISFATTA

# L' AUTOREGOLAZIONE DELLA TEMPERATURA

I naturali meccanismi fisiologici di autoregolazione della temperatura corporea tendono a mantenere il nucleo interno del corpo umano a temperatura all'incirca costante ( $37^{\circ}\text{C}$ ); man mano che le condizioni ambientali si fanno progressivamente più estreme si registra :

## con aumento della temperatura

- vasodilatazione con incremento della conducibilità termica della pelle e dello smaltimento di calore proveniente dal corpo umano ;
- incremento progressivo della sudorazione ;
- riduzione dell'attitudine all'attività fisica (riduzione del calore corporeo  $Q$ ) .

## con diminuzione della temperatura

- vasocostrizione con riduzione della conducibilità termica della pelle ;
- aumento della tensione muscolare ( aumento di  $Q$ ) ;
- comparsa di brividi e battito di denti (ulteriore aumento di  $Q$ ) con assunzione di posizioni corporee contratte al fine di ridurre gli scambi termici .

## **PARAMETRI INFLUENZANTI IL BENESSERE**

L'esperienza indica che la sensazione termica dell'uomo è legata soprattutto al bilancio di energia termica del corpo umano visto nel suo complesso.

Tale bilancio è influenzato **dall'attività fisica** e **dall'abbigliamento (Parametri riferiti alla persona)**, oltre che dai seguenti parametri ambientali:

- **temperatura dell'aria,**
- **temperatura media radiante,**
- **velocità dell'aria,**
- **ed in minor misura dall'umidità dell'aria.**



# PARAMETRI AMBIENTALI

- **l'umidità relativa** o grado igrometrico  $\Phi$ , che deve essere generalmente compreso tra il 30÷70% con tolleranza max.  $\pm 10 \%$ ; infatti per valori inferiori al 30% si seccano le mucose mentre per valori superiori al 70% possono verificarsi con maggiore probabilità fenomeni di condensazione su zone fredde con sviluppi di muffe, danneggiamenti degli intonaci e possibili sviluppi di allergie per gli occupanti;
- **la temperatura dell'aria**  $\theta_i$  ( $^{\circ}\text{C}$ ),
- **la temperatura media radiante**  $\theta_{mr}$  ( $^{\circ}\text{C}$ );
- **la temperatura operativa**  $\theta_o$  ( $^{\circ}\text{C}$ ),
- **la velocità relativa dell'aria**  $V_r$  (m/s) nei confronti del soggetto.

# PARAMETRI TERMICI IMPORTANTI

- la temperatura dell'aria  $\theta_i$  : la *temperatura dell'aria*, rilevata al centro del locale per mezzo di un termometro a bulbo secco;
- la temperatura media radiante  $\theta_{mr}$ , è definita come la temperatura uniforme ideale di una cavità nera in cui un soggetto scambierebbe la stessa quantità di calore per irraggiamento che scambia nell'ambiente reale in cui si trova; tale temperatura è rilevata comunemente con un globotermometro;
- la temperatura operativa  $\theta_o = (h_r \theta_{mr} + h_c \theta_i) / (h_r + h_c)$

Dove  $h_r$  e  $h_c$  sono rispettivamente i coefficienti di scambio termico radiativo e convettivo persona-aria. E' definita come la temperatura uniforme dell'aria e delle pareti di un ipotetico ambiente, con il quale il corpo umano scambia la medesima potenza termica per radiazione e convezione scambiata con l'ambiente reale; per valori contenuti della velocità relativa o per differenze non elevate tra  $\theta_{mr}$  e  $\theta_i$ , può essere determinata mediante la seguente relazione :  $\theta_o = (\theta_i + \theta_{mr})/2$

## PARAMETRI RIFERITI ALLA PERSONA: il metabolismo M

Il **metabolismo M**, esprime l'energia prodotta dall'organismo umano nell'unità di tempo che è convertita parzialmente in **lavoro meccanico L** scambiato con l'esterno e principalmente in **calore corporeo Q** :

$$M = L + Q \quad \text{MET}$$

(metabolismo in condizioni di riposo = 1 MET = 58 W/m<sup>2</sup>di sup.corporea);

Nella maggior parte dei casi in ambito residenziale e terziario L è quasi sempre nullo o trascurabile; pertanto possiamo assumere con buona approssimazione:

$$Q \cong M$$

I suddetti parametri sono riferiti ad unità di superficie corporea degli individui

$$A_{Du} = 0.202 (w_b)^{0.425} (h)^{0.725} (m^2) \quad \text{con } w_b = \text{peso (kg)} \text{ e } h = \text{altezza (m)} .$$

Per un individuo adulto alto 1,7 m che pesa 70 kg  $A_{Du} = 1,8 \text{ m}^2$  )

# Tabella dei valori metabolici M

(W/m<sup>2</sup> di sup.corporea)

| Attività                                                                | Energia metabolica |     |
|-------------------------------------------------------------------------|--------------------|-----|
|                                                                         | W/m <sup>2</sup>   | 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 |

# Resistenza termica del vestiario $I_{cl}$

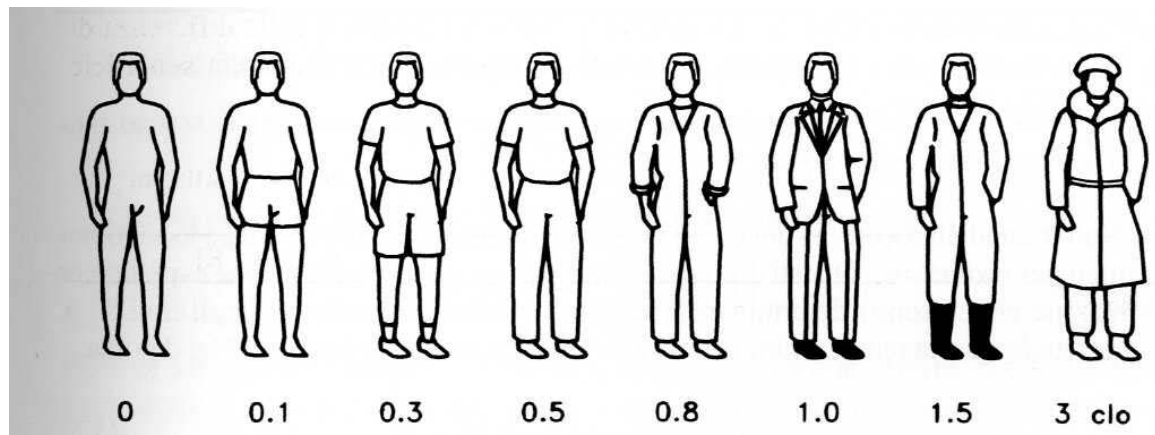
la **resistenza termica degli indumenti** è indicata con  $I_{cl}$

L'unità di misura è il **CLO** ( $1\text{CLO} = 0,155 \text{ m}^2\text{K/W}$ );

1 CLO corrisponde alla resistenza termica di un abito europeo di mezza stagione.

Per esperienza diretta sappiamo che tale parametro è estremamente importante ai fini del benessere.

Tuttavia è difficile definire in modo rigoroso l'abbigliamento delle persone. Per questo i valori in questione si trovano tabulati per numerose combinazioni di vestiario e per capi singoli.



## RESISTENZA TERMICA DI ALCUNE COMBINAZIONI TIPICHE DI CAPI DI ABBIGLIAMENTO

| Abbigliamento da lavoro                                                                                | $I_{cl}$ |                      | Abbigliamento giornaliero                                                                  | $I_{cl}$ |                      |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------|----------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------|----------|----------------------|
|                                                                                                        | clo      | m <sup>2</sup> . K/W |                                                                                            | clo      | m <sup>2</sup> . K/W |
| Mutande, tuta, calzini, scarpe                                                                         | 0,70     | 0,110                | Slip, maglietta, pantaloncini, calzini leggeri, sandali                                    | 0,30     | 0,050                |
| Mutande, camicia, pantaloni, calzini, scarpe                                                           | 0,75     | 0,115                | Slip, sottoveste, calze, abito leggero con maniche, sandali                                | 0,45     | 0,070                |
| Mutande, camicia, tuta, calzini, scarpe                                                                | 0,80     | 0,125                | Mutande, camicia con maniche corte, pantaloni leggeri, calzini leggeri, scarpe             | 0,50     | 0,080                |
| Mutande, camicia, pantaloni, giacca, calzini, scarpe                                                   | 0,85     | 0,135                | Slip, calze, camicia a maniche corte, gonna, sandali                                       | 0,55     | 0,085                |
| Mutande, camicia, pantaloni, grembiule, calzini, scarpe                                                | 0,90     | 0,140                | Mutande, camicia, pantaloni leggeri, calzini, scarpe                                       | 0,60     | 0,095                |
| Biancheria intima a maniche e gambe corte, camicia, pantaloni, giacca, calzini, scarpe                 | 1,00     | 0,155                | Slip, sottoveste, calze, abito, scarpe                                                     | 0,70     | 0,105                |
| Biancheria intima a gambe e maniche corte, camicia, pantaloni, tuta, calzini, scarpe                   | 1,10     | 0,170                | Biancheria intima, camicia, pantaloni, calzini, scarpe                                     | 0,70     | 0,110                |
| Biancheria intima a gambe e maniche lunghe, giacca termica, calzini, scarpe                            | 1,20     | 0,185                | Biancheria intima, completo da corsa (maglia e pantaloni), calzini lunghi, scarpe da corsa | 0,75     | 0,115                |
| Biancheria intima a maniche e gambe corte, camicia, pantaloni, giacca, giacca termica, calzini, scarpe | 1,25     | 0,190                | Slip, sottoveste, camicia, gonna, calzettoni spessi al ginocchio, scarpe                   | 0,80     | 0,120                |
| Biancheria intima a maniche e gambe corte, tuta, giacca termica e pantaloni, calzini, scarpe           | 1,40     | 0,220                | Slip, camicia, gonna, maglione a girocollo, calzettoni spessi al ginocchio, scarpe         | 0,90     | 0,140                |

## RESISTENZA TERMICA DI ALCUNE COMBINAZIONI TIPICHE DI CAPI DI ABBIGLIAMENTO

| Abbigliamento da lavoro                                                                                                                                                | $I_{cl}$ |                      | Abbigliamento giornaliero                                                                                        | $I_{cl}$ |                      |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------|----------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------|----------------------|
|                                                                                                                                                                        | clo      | m <sup>2</sup> . K/W |                                                                                                                  | clo      | m <sup>2</sup> . K/W |
| Biancheria intima a maniche e gambe corte, camicia, pantaloni, giacca, giacca termica e pantaloni, calzini, scarpe                                                     | 1,55     | 0,225                | Mutande, camiciola a maniche corte, camicia, pantaloni, maglione con scollo a V, calzini, scarpe                 | 0,95     | 0,145                |
| Biancheria intima a maniche e gambe corte, camicia, pantaloni, giacca, giacca con imbottitura pesante e tuta, calzini, scarpe                                          | 1,85     | 0,285                | Slip, camicia, pantaloni, giacca, calzini, scarpe                                                                | 1,00     | 0,155                |
| Biancheria intima a maniche e gambe corte, camicia, pantaloni, giacca, giacca con imbottitura pesante e tuta, calzini, scarpe, berretto, guanti                        | 2,00     | 0,310                | Slip, calze, camicia, gonna, gilet, giacca                                                                       | 1,00     | 0,155                |
| Biancheria intima a maniche e gambe lunghe, giacca termica e pantaloni, giacca termica per esterno e pantaloni, calzini, scarpe                                        | 2,20     | 0,340                | Slip, calze, blusa, gonna lunga, giacca, scarpe                                                                  | 1,10     | 0,170                |
| Biancheria intima a maniche e gambe lunghe, giacca termica e pantaloni, parka con imbottitura pesante, tuta con imbottitura pesante, calzini, scarpe, berretto, guanti | 2,55     | 0,395                | Biancheria intima, camiciola con maniche corte, camicia, pantaloni, giacca, calzini, scarpe                      | 1,10     | 0,170                |
|                                                                                                                                                                        |          |                      | Biancheria intima, camiciola a maniche corte, camicia, pantaloni, gilet, giacca, calzini, scarpe                 | 1,15     | 0,180                |
|                                                                                                                                                                        |          |                      | Biancheria intima a maniche e gambe lunghe, camicia, pantaloni, maglione con scollo a V, giacca, calzini, scarpe | 1,30     | 0,200                |
|                                                                                                                                                                        |          |                      | Biancheria intima a maniche e gambe corte, camicia, pantaloni, gilet, giacca, cappotto, calzini, scarpe          | 1,50     | 0,230                |

**UNI EN ISO 7730/1996**  
**Ambienti termici moderati**  
**Determinazione degli indici PMV e PPD e**  
**specifica**  
**delle condizioni di benessere termico**



# BILANCIO TERMICO DEL CORPO UMANO

$$S = M - E - R_{es} - (R + C) \quad (W/m^2)$$

**S =** potenza termica ceduta dal corpo;

**E =** potenza termica scambiata per evaporazione;

**R<sub>es</sub>** = calore sensibile ceduto per respirazione;

**R =** potenza termica scambiata per irraggiamento;

**C =** potenza termica scambiata per convezione.

I suddetti parametri sono riferiti ad unità di superficie corporea degli individui. In ambienti termici moderati normalmente è il corpo umano che cede calore all'esterno sia in inverno che in estate.

# Le condizioni del benessere

quando  $S > 0$  la temperatura del corpo tende ad aumentare

quando  $S < 0$  la temperatura del corpo tende a decrescere

quando  $S = 0$  siamo in presenza di equilibrio termico e quindi di *potenziale benessere*, condizione necessaria ma non sufficiente a causa dei meccanismi di autoregolazione della temperatura corporea.

## SCAMBIO TERMICO RADIATIVO R CORPO-AMBIENTE

$$R = A_{\text{eff}} \cdot h_r (\theta_{\text{cl}} - \theta_{\text{mr}}) \quad (\text{W})$$

$A_{\text{eff}}$  = superficie del corpo che effettivamente *vede* l'ambiente (m<sup>2</sup>)

$h_r$  coefficiente di scambio termico radiativo tra due corpi uno interno all'altro:

$$h_r = 4 \varepsilon \cdot 5.67 \cdot 10^{-8} [(\theta_{\text{cl}} + 273) + (\theta_{\text{mr}} + 273)/2]^3$$

dove  $\varepsilon = 0,975$  emissività del corpo umano (media tra pelle = 1 e vestiti = 0,95)

$\theta_{\text{cl}}$  = temperatura superficiale del vestiario

$\theta_{\text{mr}}$  = temperatura media radiante

**La Temperatura media radiante è il parametro significativo dal punto di vista progettuale sul quale possiamo intervenire**

## PARAMETRI PER LO SCAMBIO TERMICO RADIATIVO

$A_{\text{eff}} = f_{\text{cl}} \cdot f_{\text{eff}}$  è l'area efficace di scambio termico del corpo umano, ovvero la superficie che effettivamente *vede* l'ambiente tenuto conto delle concavità, aumentata per effetto degli abiti.

$f_{\text{eff}}$  coefficiente di area efficace che vale 0,696 per persone sedute e 0,725 per persone in piedi (valore medio 0,71);

$f_{\text{cl}}$  è il fattore adimensionale di area vestita (rapporto tra superfici del corpo vestito e nudo) funzione del tipo di vestiario

$$\lceil 1.00 + 0.2 I_{\text{cl}} \quad \text{per } I_{\text{cl}} < 0.5 \text{ (clo)}$$

$f_{\text{cl}} =$

$$\lfloor 1.05 + 0.1 I_{\text{cl}} \quad \text{per } I_{\text{cl}} \geq 0.5 \text{ (clo)}$$

# Parametri che influenzano lo scambio termico radiativo

**La potenza termica scambiata per radiazione dipende da:**

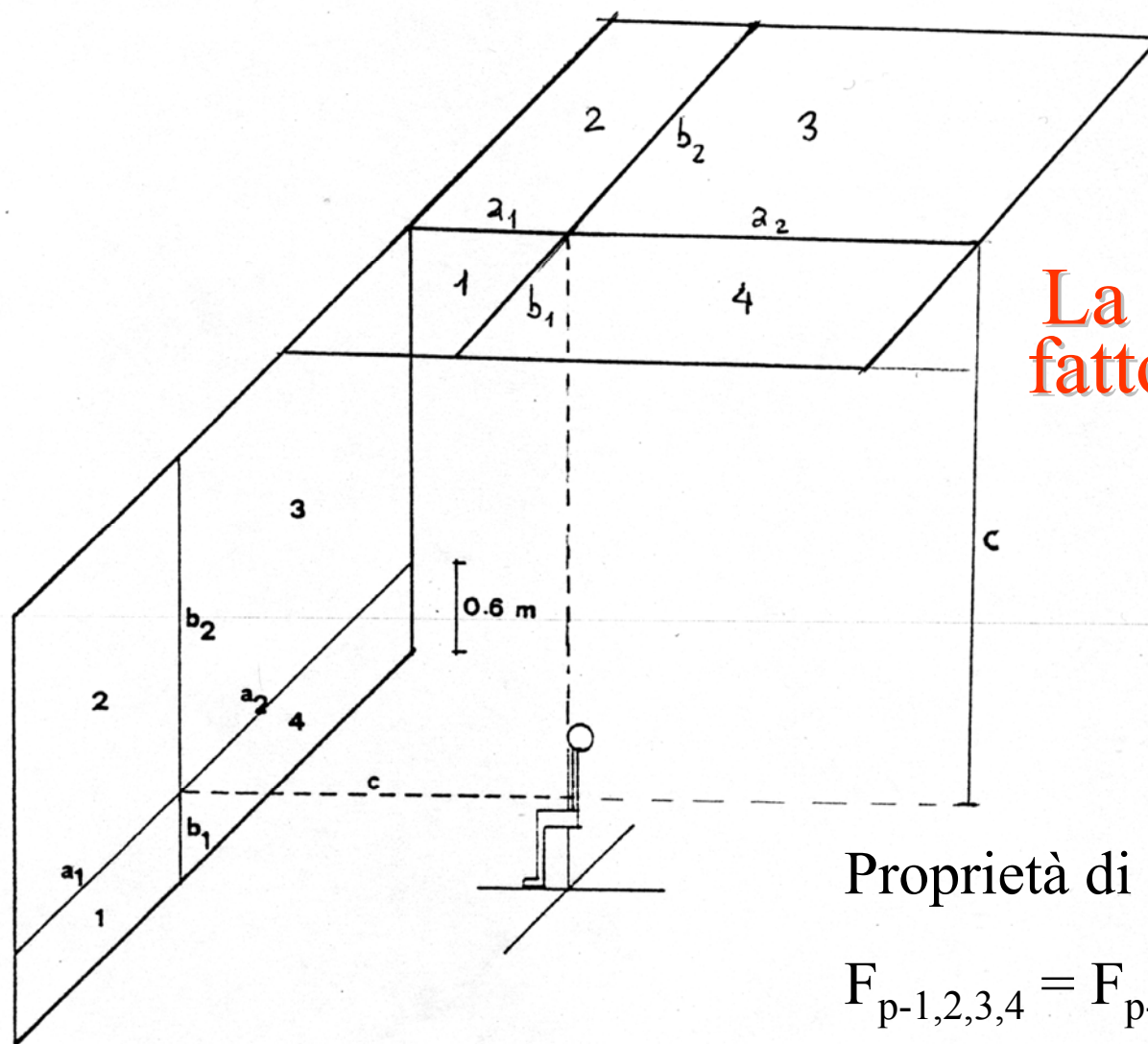
- **temperatura superficiale del vestiario;**
- **temperatura media radiante;**
- **posizione della persona (seduta o in piedi)**
- **abbigliamento.**

## IL CALCOLO DI $\theta_{mr}$

Nel caso che le differenze di temperatura tra le superfici risultino contenute entro i 10°C ed essendo le emissività  $\varepsilon$  delle superfici prossime all'unità, si ha :

$$\theta_{mr} = [\theta_1 \cdot F_{P1} + \theta_2 \cdot F_{P2} + \theta_3 \cdot F_{P3} \dots\dots\dots + \theta_n \cdot F_{Pn}]$$

$F_{Pn}$  è il fattore di vista della persona rispetto alla superficie ennesima: tanto maggiore è il fattore di vista tanto maggiore è il peso della temperatura della superficie vista dalla persona

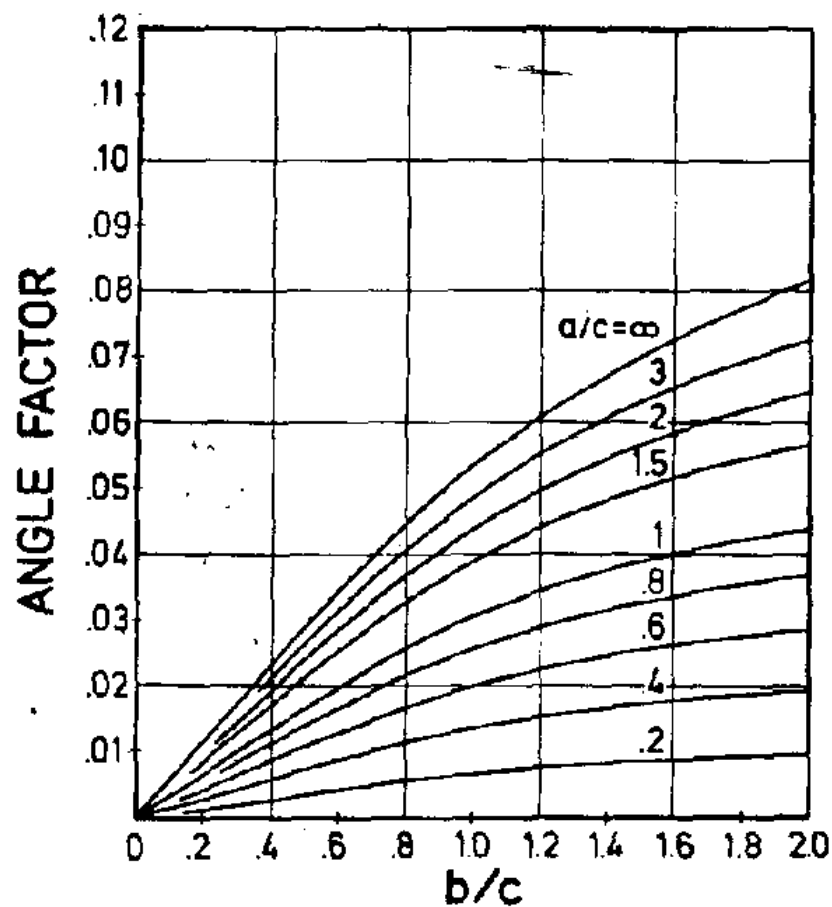


La determinazione dei  
fattori di vista persona-  
superfici

Proprietà di suddivisione

$$F_{p-1,2,3,4} = F_{p-1} + F_{p-2} + F_{p-3} + F_{p-4}$$

# I fattori di vista persona superfici orizzontali

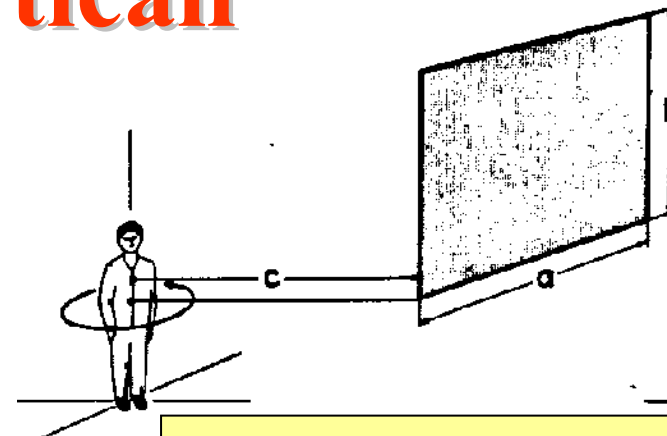
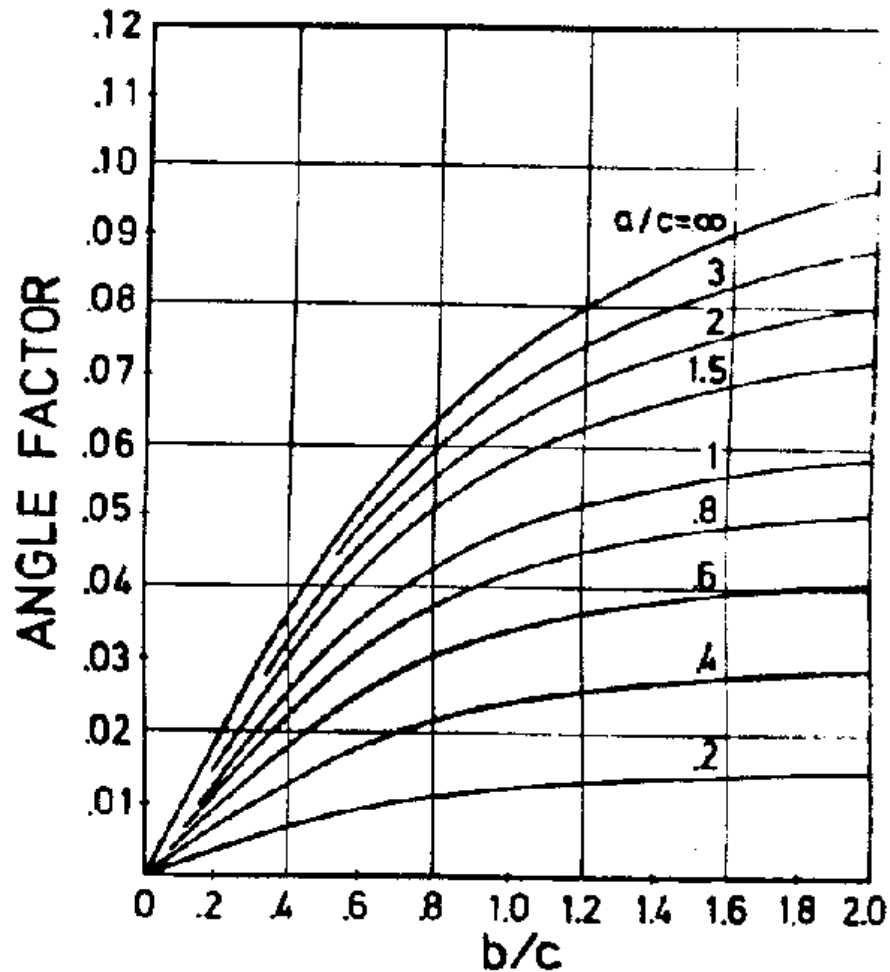


Il fattore di vista aumenta all'aumentare del rapporto  $b/c$  e  $a/c$ :

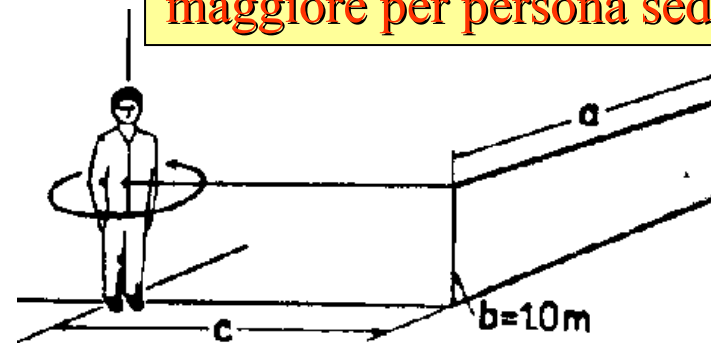
Considerando  $a$  e  $b$  eguali per pavimento e soffitto, il fattore di vista è maggiore per il pavimento rispetto al soffitto. L'incremento è ancor maggiore per persona seduta.



# I fattori di vista persona superfici verticali

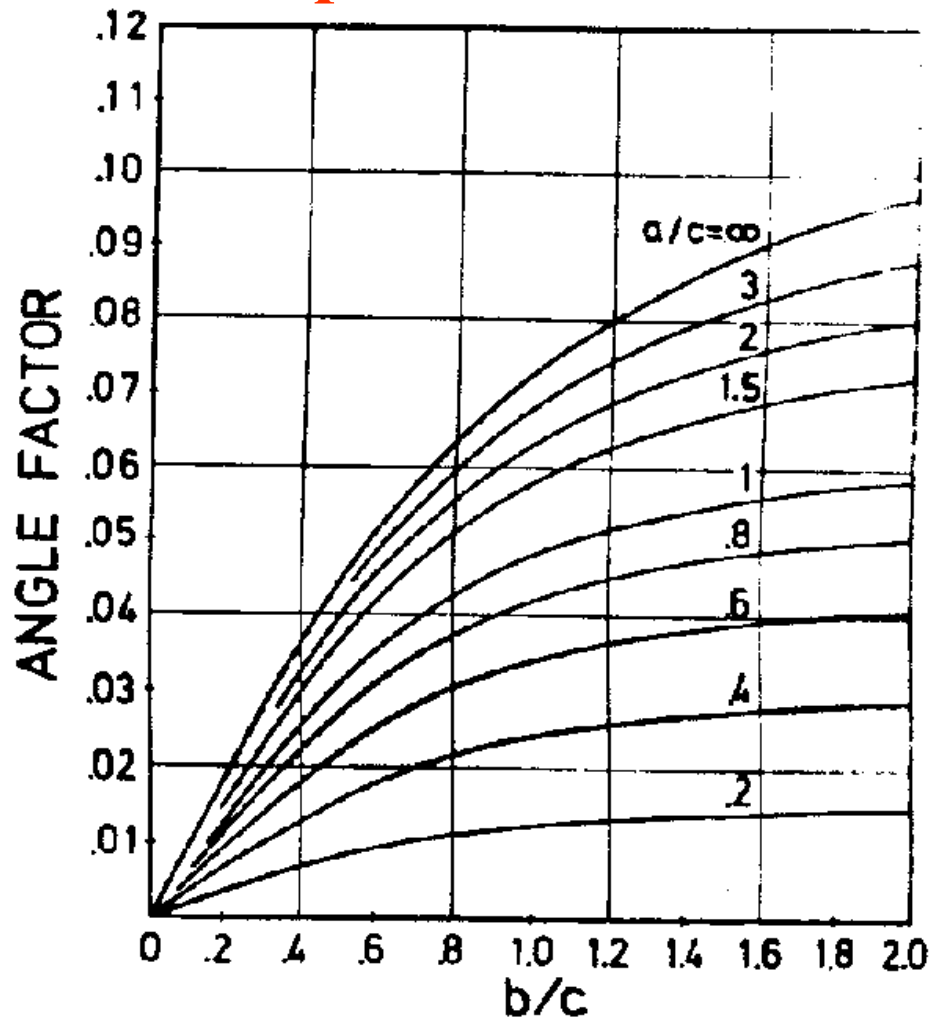


Considerando  $a$  e  $c$  eguali, il fattore di vista è maggiore per la zona superiore di solito occupata dalle finestre. L'incremento è ancor maggiore per persona seduta.

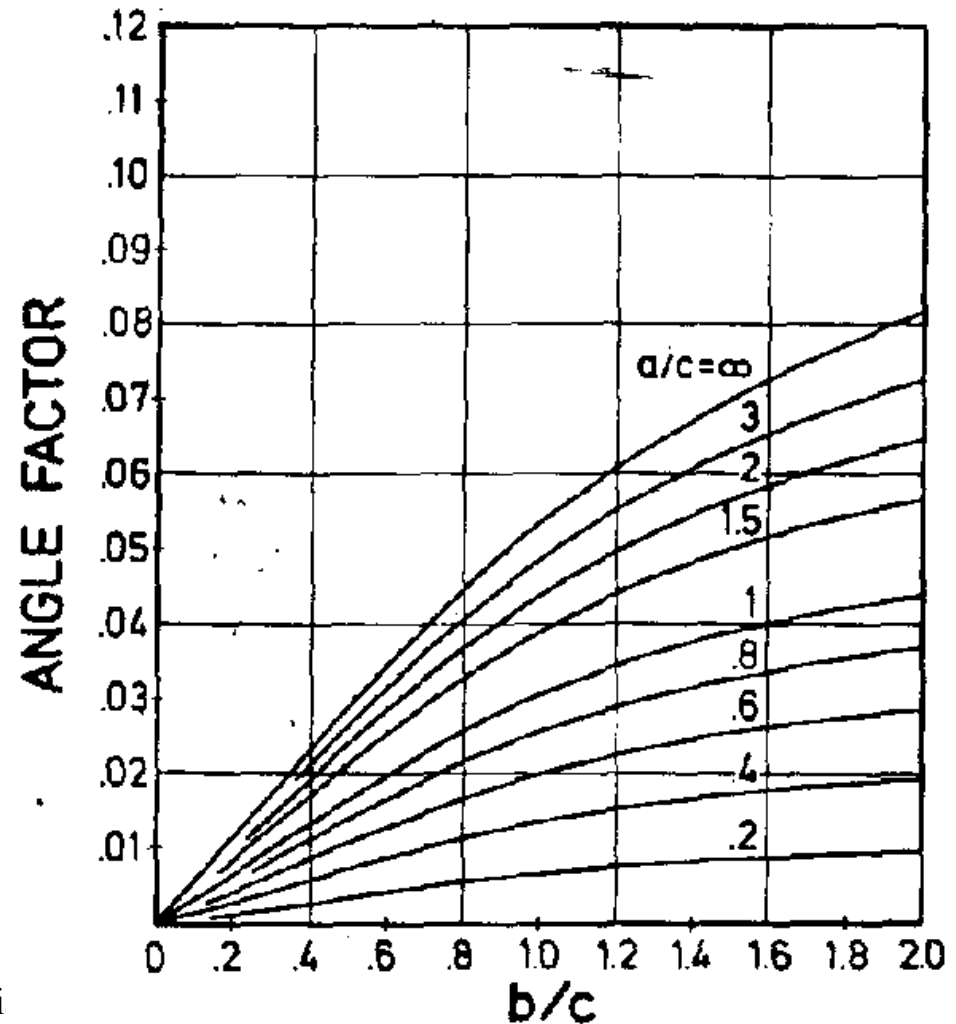


A parità di rapporti geometrici il *peso* delle superfici verticali è maggiore di quelle orizzontali

### Superfici verticali



### Superfici orizzontali



# Alcune considerazioni

A parità di temperatura operativa  $\theta_o = (\theta_i + \theta_{mr})/2$  una temperatura media radiante più elevata consente di mantenere la temperatura dell'aria più bassa, con conseguente risparmio energetico.

Una temperatura media radiante più elevata è ottenibile con:

- **superfici radianti estese aventi temperature superiori all'aria;**
- **a parità di temperatura superficiale** la temperatura media radiante è più elevata per le superfici che la persona vede meglio ovvero con un più alto fattore angolare;
- entrambe le situazioni suddette **sono ottenibili facilmente con pannelli radianti possibilmente posti a parete e a pavimento;**
- le pareti verticali sono pertanto le più importanti in relazione al benessere estivo ed invernale; chiaramente le finestre giocano un ruolo fondamentale.

# LO SCAMBIO TERMICO CONVETTIVO

L'energia termica scambiata per convezione è data dalla relazione:

$$C = A_{Du} \cdot f_{cl} \cdot h_c (\theta_{cl} - \theta_i) \quad (W)$$

Il coefficiente di scambio termico convettivo  $h_c$  può essere determinato con la seguente relazione:

$$h_c = 12.1 (v_r)^{0.5} \quad \text{valida per} \quad 2.38 (\theta_{cl} - \theta_i)^{0.25} < 12.1 (v_r)^{0.5}$$

$$\text{Con } v_r = v_a + 0.0052 (M - 58) \quad (m/s)$$

velocità relativa dell'aria nei confronti del soggetto

La relazione è valida per  $M \geq 58 \text{ W/m}^2$  (1 met) Per  $M$  fino a  $80 \text{ W/m}^2$   $v_r \cong v_a$

## SEMPLIFICAZIONI PER il calcolo di $\theta_{cl}$

Con velocità dell'aria  $\leq 0,1$  m/s (aria ferma) ed attività metabolica compresa tra 1 e 2 Met, per il calcolo di  $\theta_{cl}$  si può usare con buona approssimazione la seguente relazione:

$$\theta_{cl} = 35,7 - 0,028 M + 0,69 I_{cl} [(\theta_{mr} + \theta_a)/(1 + 1,38 I_{cl})] \text{ (}^\circ\text{C)}$$

con  $M$  (W/m<sup>2</sup>) e  $I_{cl}$  (m<sup>2</sup> K/W)

In condizioni di benessere si può assumere  $\theta_{cl} = \theta_{sk}$  temperatura della pelle e si calcola con la seguente relazione:

$$\theta_{sk} \cong 35,7 - 0,028 M \text{ (}^\circ\text{C)} \quad \text{con } M \text{ (W/m}^2\text{)}$$

## PARAMETRI CHE INFLUENZANO LO SCAMBIO TERMICO CONVETTIVO

**La potenza termica scambiata per convezione dipende da:**

- **temperatura superficiale del vestiario;**
- **temperatura dell'aria;**
- **velocità relativa soggetto-aria ;**
- **abbigliamento.**

**La Temperatura e la velocità dell'aria sono i parametri significativi dal punto di vista progettuale sui quali possiamo intervenire**

# **Lo scambio termico congiunto radiativo + convettivo**

**Per il calcolo complessivo di R e C si può usare la seguente espressione valida per ambienti termicamente moderati :**

$$\mathbf{R + C = A_{Du} (\theta_{sk} - \theta_o) / [0,155 I_{cl} + 1/f_{cl} h] \quad (W)}$$

**Dove :  $h = h_r + h_c$  = somma dei coefficienti di scambio termico radiativo e convettivo**

**$\theta_{sk}$  ,  $\theta_o$  ,  $f_{cl}$  sono rispettivamente la temperatura della pelle e operativa e il fattore adimensionale di area vestita.**

**Tale espressione presenta il vantaggio di non usare la temperatura superficiale del vestiario che è di difficile valutazione.**

# LO SCAMBIO TERMICO EVAPORATIVO E (calore latente)

$$E = E_d + E_{sw} + E_{res} \quad (W/m^2)$$

**Dove :**

$E_d$  potenza termica dispersa per diffusione

$E_{sw}$  potenza termica dispersa per sudorazione

$E_{res}$  potenza termica dispersa per respirazione



## LA POTENZA TERMICA DISPERSA PER DIFFUSIONE $E_d$

LA POTENZA TERMICA DISPERSA PER DIFFUSIONE attraverso la pelle è indipendente dal sistema di termoregolazione e può essere calcolata mediante la seguente relazione ( $M$  in  $W/m^2$  e  $p_v$  in Pa) che tiene conto della permeanza della pelle (legge di Fick):

$$E_d = 3.05 \cdot 10^{-3} [5733 - 6.99 M - p_v] \quad (W/m^2)$$

Essa è quindi funzione:

1. del grado igrometrico dell'aria ( $p_v = \phi \cdot p_s$ );
2. della temperatura dell'aria,  $p_s = f(T)$ ;
3. dell'attività metabolica.

## La potenza termica dispersa per sudorazione $E_{sw}$

Dipende in modo complesso dall'attività del soggetto, dalle condizioni termoigrometriche e dalla velocità relativa dell'aria.

Per soggetti in condizioni di comfort termico Fanger ha individuato la seguente relazione:

$$E_{sw} = 0.42 [M - 58] \quad (\text{W/m}^2)$$

Essa è quindi funzione dell'attività metabolica M

**E' uno dei parametri più importanti ai fini del benessere estivo**

## La potenza termica dispersa per respirazione $E_{res}$

L'aria inspirata scambia calore e vapor d'acqua con le mucose del tratto respiratorio raggiungendo all'interno degli alveoli polmonari le condizioni di temperatura e saturazione propri del nucleo corporeo e pertanto quando viene espirata ha una entalpia e titolo superiori a quelle dell'aria ambiente.

**In pratica è funzione dell'attività metabolica e delle condizioni termoigrometriche dell'aria ambiente.**

La potenza termica è quindi la somma di calore latente e calore sensibile :

calore latente       $E_{res} = 1.7 \cdot 10^{-5} M (5867 - p_v) \quad (\text{W/m}^2)$

## La potenza termica sensibile dispersa per respirazione $R_{es}$

calore sensibile       $R_{es} = 0.0014 M (34 - \theta_i) \quad (\text{W/m}^2)$

# Considerazioni sullo scambio evaporativo

**La potenza termica scambiata per evaporazione (sensibile e latente) dipende da:**

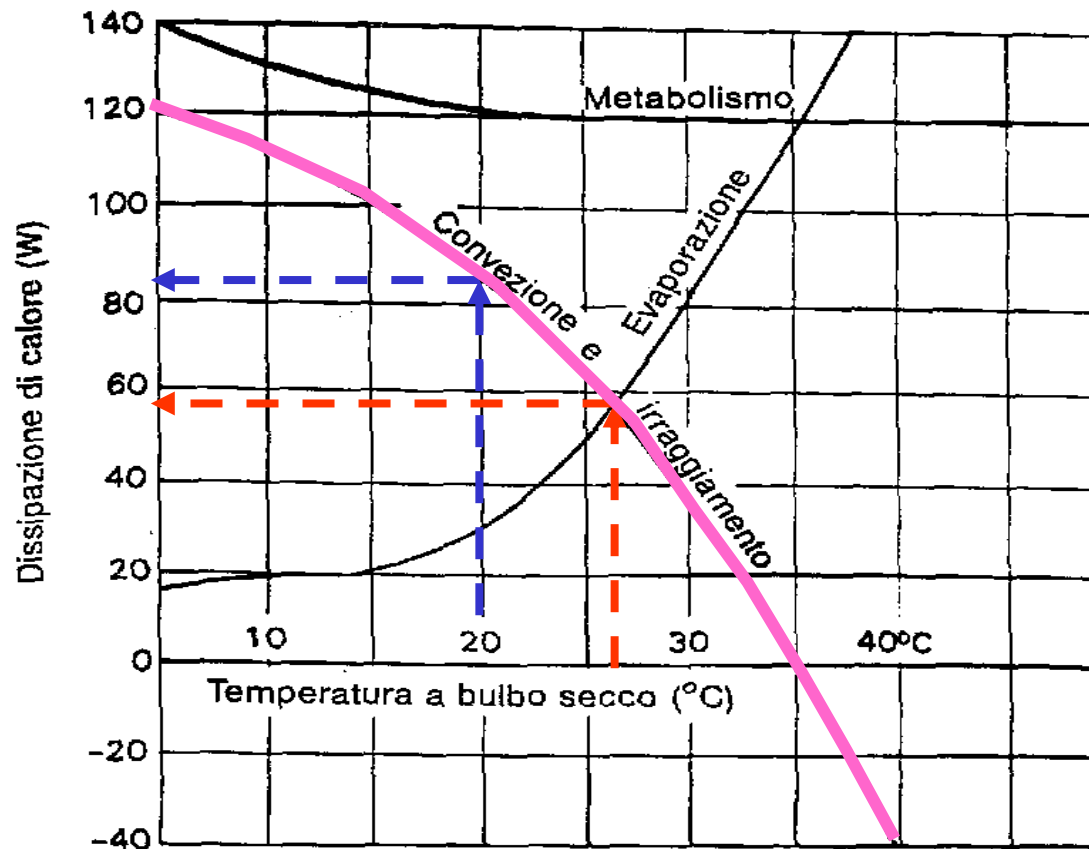
- **umidità dell'aria;**
- **temperatura dell'aria;**
- **attività metabolica .**

**La Temperatura e l'umidità dell'aria sono i parametri significativi dal punto di vista progettuale sui quali possiamo intervenire**

# INFLUENZA DEGLI SCAMBI TERMICI CONVETTIVI E RADIATIVI

In **regime invernale** (20 °C), per attività moderata ( $M \cong 1,2$  met), la cessione del calore per **convezione C** ed **irraggiamento R** rappresenta circa il 70÷80% di M .

In **regime estivo** (27 °C) l'evaporazione eguaglia le altre modalità di scambio termico, mentre per valori sensibilmente superiori diventa dominante



**NB. grafico riferito  
ad una superficie  
corporea di circa  
1,8 m<sup>2</sup> e  $M = 1,2$**

## **INDICE GLOBALE DI BENESSERE TERMICO E VOTO** **MEDIO PREVISTO PMV** (UNI-EN-ISO 7730/1996)

La prima condizione affinché un individuo si trovi in condizioni di benessere è che :

1)  $S = 0$  funzione di  $f(M, I_{cl}, \theta_i, v_r, \theta_{mr}, p_v, \theta_{sk}, E_{sw})$

Fanger, mediante lo studio su circa **1300 individui**, ha individuato altre due condizioni sufficienti a definire condizioni di benessere espresse dalle seguenti equazioni :

2)  $E_{sw} = 0,42 [M - 58] \quad (W/m^2)$

3)  $\theta_{sk} = 35,7 - 0.028 M \quad (^\circ C)$

**In pratica le possibili condizioni di benessere sono le combinazioni delle otto variabili che soddisfano contemporaneamente le tre suddette equazioni.**

# LA TEORIA DEL Prof. FANGER

La sensazione di **caldo** o di **freddo**, è proporzionale al **carico termico S'** definito come differenza tra il **calore Q** generato dal corpo umano e l'energia termica dispersa qualora l'individuo si trovasse in condizioni di benessere.

$$S' = Q - E - R_{es} - (R + C) \quad \text{NB. } Q \approx M$$

$$E_{sw} = 0.42 [M - 58]$$
$$\theta_{sk} = 35.7 - 0.028 M$$

# INDICE GLOBALE DI BENESSERE TERMICO

## IL VOTO MEDIO PREVISTO PMV DI SENSAZIONE TERMICA

La sensazione termica è espressa con un voto numerico in una scala di 7 valori

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

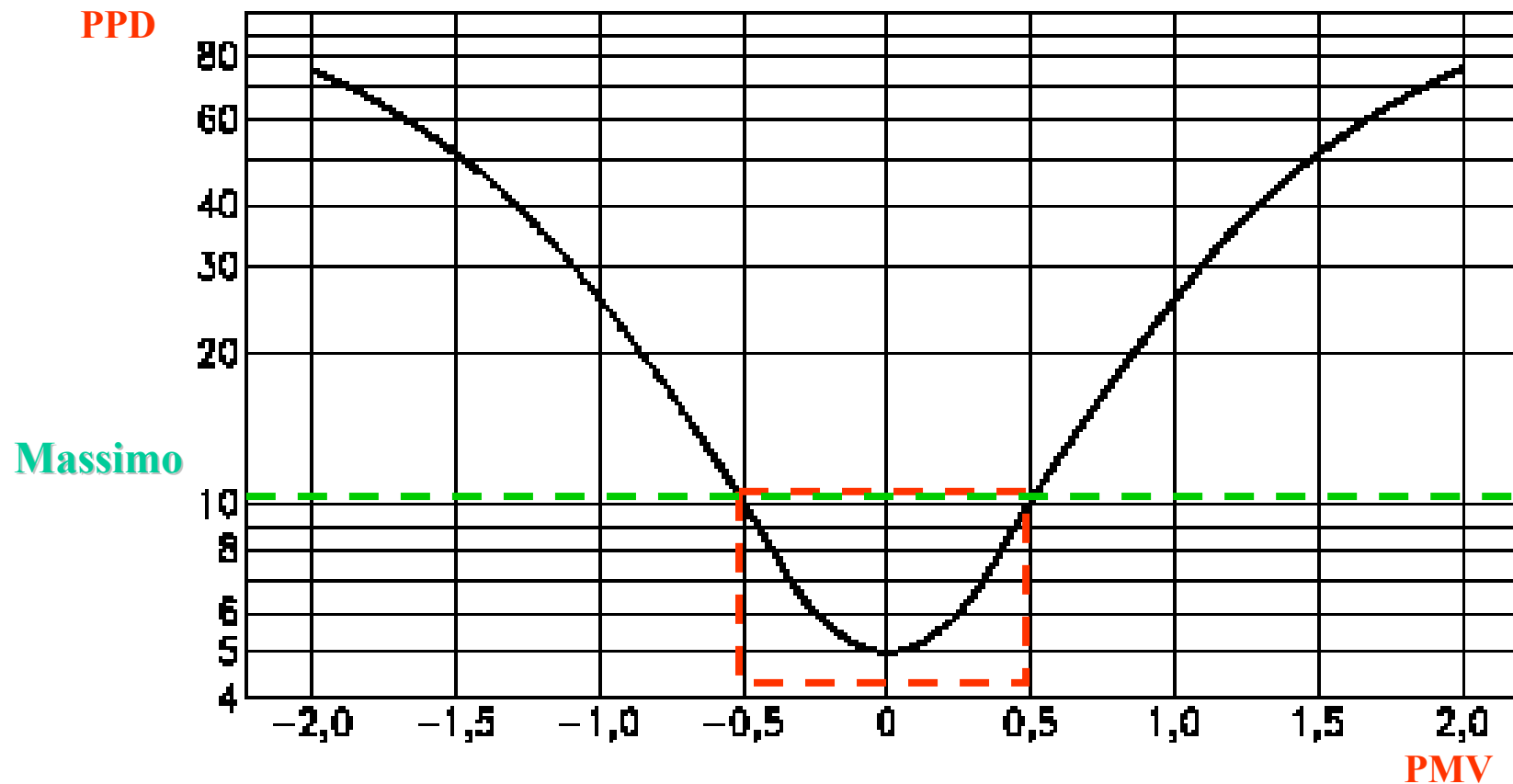
il PMV riportato nella scala psico-fisica suddetta esprime pertanto la sensazione termica che verrà avvertita in quel dato ambiente da un “***individuo dotato di media sensibilità***”.

Il limite di accettabilità è compreso tra  $- 0,5 < PMV < 0,5$



# Percentuale prevista di insoddisfatti (PPD) in funzione del voto medio previsto (PMV)

Il Limite di accettabilità è pari al 10% degli individui



## CAMPO DI VALIDITÀ DI PMV

L'indice *PMV* è valido per *situazioni stazionarie ed ambienti termicamente moderati* (con valori compresi tra  $\pm 2$  ); può essere utilizzato anche per condizioni che comportano variazioni nel tempo dei parametri purchè abbastanza contenute e si usino valori medi; la metodologia esposta è valida nel seguente campo di valori :

$$M = 0.8 \div 4 \quad \text{met}$$

$$I_{cl} = 0 \div 2 \quad \text{clo}$$

$$\theta_i = 10 \div 30 \quad ^\circ\text{C}$$

$$\theta_{mr} = 10 \div 40 \quad ^\circ\text{C}$$

$$v_r = 0 \div 1 \quad \text{m/s}$$

$$p_v = 0.0 \div 2700 \quad \text{Pa}$$

I valori di *PMV* si trovano peraltro tabulati per le situazioni più comuni .

# Espressione semplificata di PMV

E' possibile utilizzare un'espressione semplificata di PMV quando si operi nel seguente campo di valori dove M è in met:

$$1 < M < 2 \text{ met} \quad , \quad v_r \leq 0,1 \text{ m/s} \quad , \quad I_{cl} > 0,5 \text{ clo}$$

$$PMV = (0,092 - 0,03 M) \left\{ [ 43,61 M + 40,12 M I_{cl} + 14,61 I_{cl} + 4,44 (\theta_i + \theta_{mr}) - 305 ] / (1 + 1,38 |cl|) \right\}$$

# Esercizio per il calcolo di PMV

Siano dati i seguenti valori in **regime invernale**:

$$M = 1,2 \text{ Met} \quad I_{cl} = 1 \text{ clo} \quad \theta_{mr} = 18^\circ\text{C} \quad \theta_i = 20^\circ\text{C}$$

Mediante la relazione semplificata di PMV calcolare il voto medio previsto:

$$PMV = (0,092 - 0,03 M) \left\{ [ 43,61 \cdot M + 40,12 M \cdot I_{cl} + 14,61 I_{cl} + 4,44 (\theta_i + \theta_{mr}) - 305 ] / (1 + 1,38 I_{cl}) \right\}$$

$$PMV = (0,092 - 0,03 \cdot 1,2) \left\{ [ 43,61 \cdot 1,2 + 40,12 \cdot 1,2 \cdot 1 + 14,61 \cdot 1 + 4,44 \cdot (20+18) - 305 ] / (1+1,38 \cdot 1) \right\}$$

$$PMV = 0,056 \left\{ [ 52,33 + 48,14 + 14,61 + 168,72 - 305 ] / 2,38 \right\} =$$
$$= 0,056 \cdot (-8,91) = \text{PMV} = -0,5 \text{ accettabile}$$

# Esercizio per il calcolo di PMV

Siano dati i seguenti valori in **regime estivo**:

$$M = 1,2 \text{ Met} \quad I_{cl} = 0,5 \text{ clo} \quad \theta_{mr} = 28^{\circ}\text{C} \quad \theta_i = 26^{\circ}\text{C}$$

Mediante la relazione semplificata di PMV calcolare il voto medio previsto:

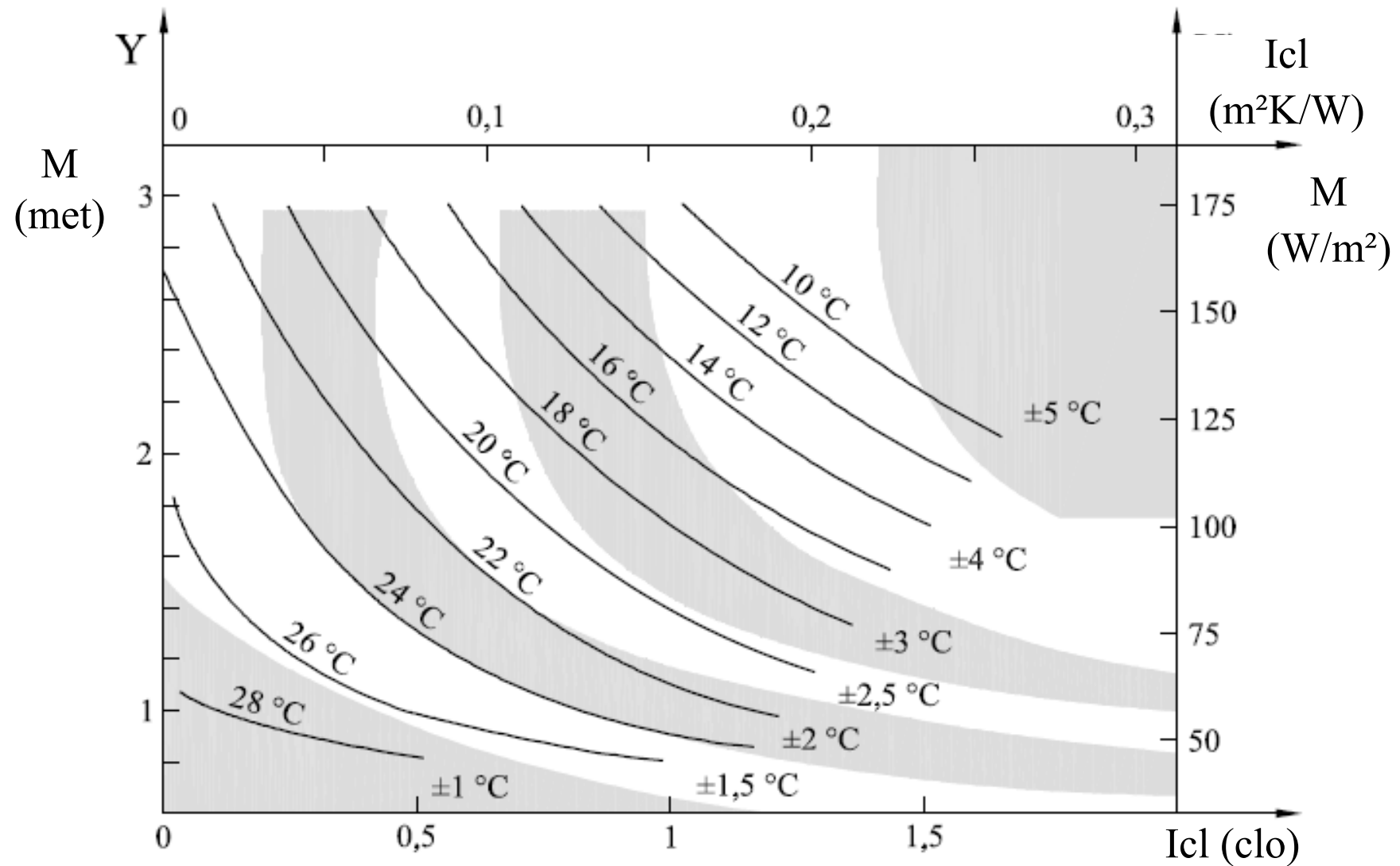
$$PMV = (0,092 - 0,03 M) \left\{ [ 43,61 \cdot M + 40,12 M \cdot I_{cl} + 14,61 I_{cl} + 4,44 (\theta_i + \theta_{mr}) - 305] / (1 + 1,38 I_{cl}) \right\}$$

$$PMV = (0,092 - 0,03 \cdot 1,2) \left\{ [ 43,61 \cdot 1,2 + 40,12 \cdot 1,2 \cdot 0,5 + 14,61 \cdot 0,5 + 4,44 \cdot (26+28) - 305] / (1+1,38 \cdot 0,5) \right\}$$

$$PMV = 0,056 \left\{ [ 52,33 + 24,01 + 7,3 + 239,76 - 305] / 1,69 \right\} =$$

$$= 0,056 \cdot (10,89) = \text{PMV} = 0,61 \text{ non accettabile}$$

Temperatura operativa ottimale  $\theta_o$  (PPD < 10 %) in funzione dell'attività e dell'abbigliamento



# CONDIZIONI DI BENESSERE INVERNALI

**Attività leggera, fondamentalmente sedentaria, in condizioni invernali (periodo con riscaldamento)**

Le condizioni sono le seguenti:

- a) La temperatura operativa deve essere compresa tra 20 °C e 24 °C (per esempio  $22\text{ °C} \pm 2\text{ °C}$ ).
- b) La differenza verticale di temperatura dell'aria tra 1,1 m e 0,1 m dal pavimento (livello testa e caviglia) deve essere minore di 3 °C.
- c) La temperatura superficiale del pavimento normalmente deve essere compresa tra 19 °C e 26 °C, ma si possono progettare sistemi di riscaldamento a pavimento a 29 °C.
- d) La velocità media dell'aria deve essere minore di quella specificata in figura D.2.
- e) L'asimmetria della temperatura radiante dovuta a finestre o ad altre superfici fredde verticali deve essere minore di 10 °C (rispetto ad un piccolo elemento piano verticale posto a 0,6 m dal pavimento).
- f) L'asimmetria della temperatura radiante dovuta ad un soffitto caldo (riscaldato) deve essere minore di 5 °C (rispetto ad un piccolo elemento piano orizzontale posto a 0,6 m dal pavimento).
- g) L'umidità relativa deve essere compresa tra il 30% e il 70%.

# CONDIZIONI DI BENESSERE ESTIVE

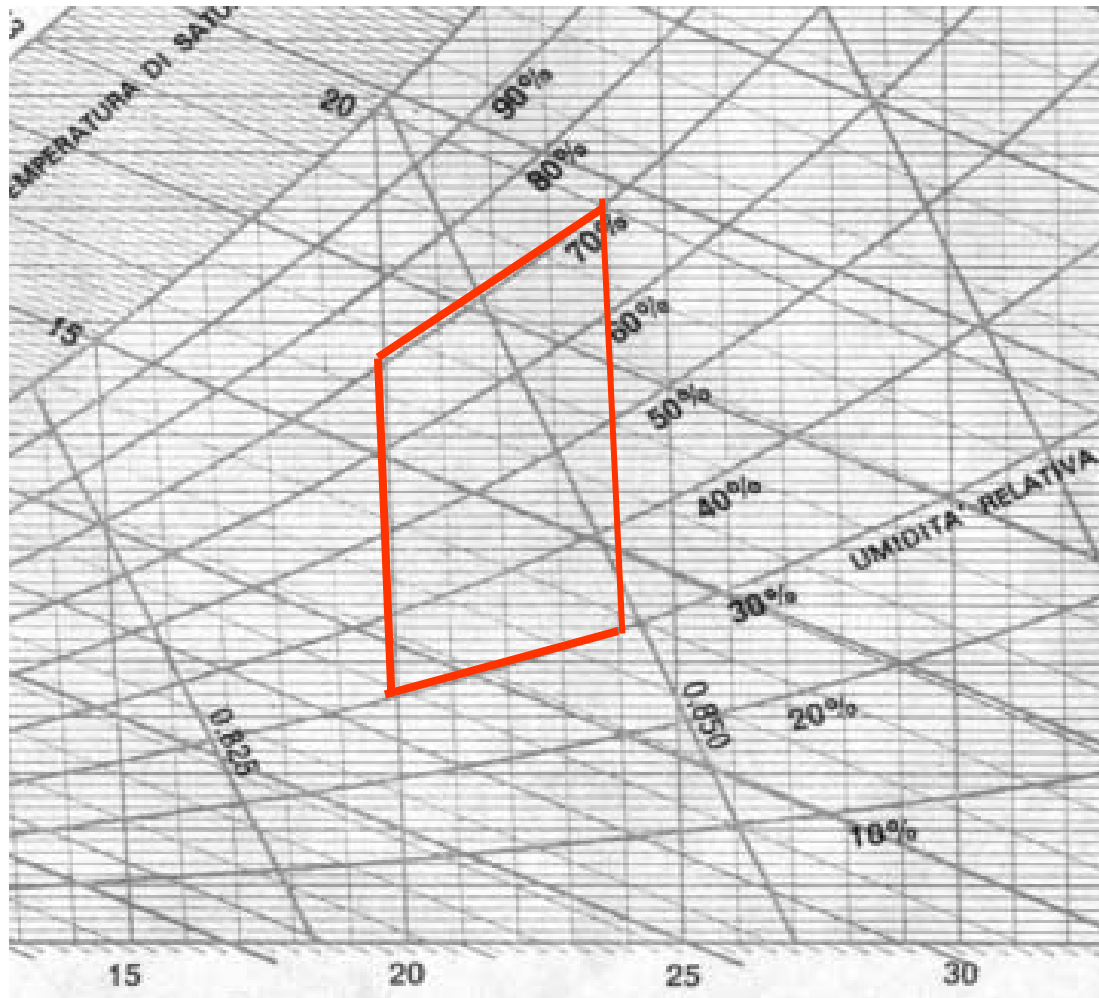
**Attività leggera, fondamentalmente sedentaria, in condizioni estive (periodo con raffrescamento)**

Le condizioni sono le seguenti:

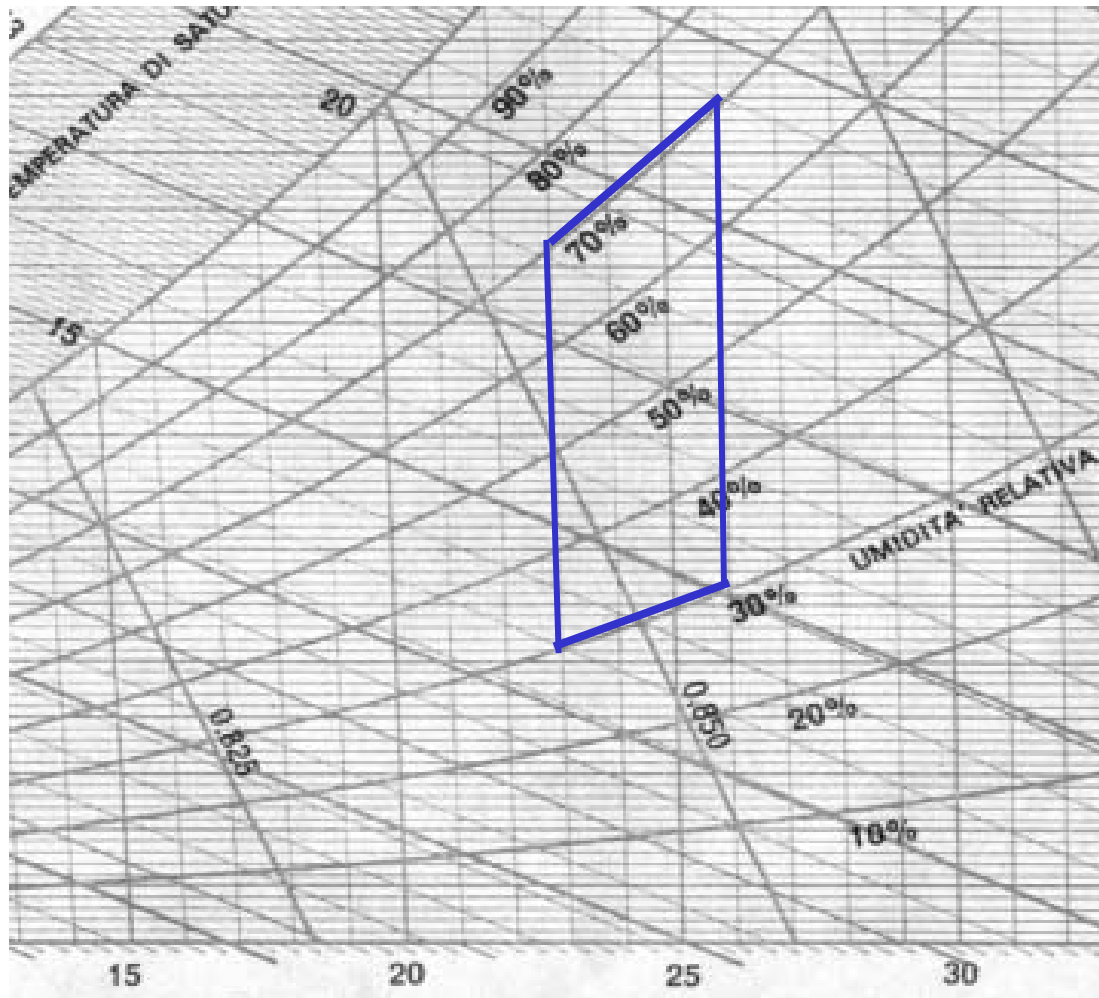
- a) La temperatura operativa deve essere compresa tra 23 °C e 26 °C (per esempio  $24,5\text{ °C} \pm 1,5\text{ °C}$ ).
- b) La differenza verticale di temperatura tra 1,1 m e 0,1 m dal pavimento (livello testa e caviglie) deve essere minore di 3 °C.
- c) La velocità media dell'aria deve essere minore di quella specificata in figura D.2.
- d) L'umidità relativa deve essere compresa tra il 30% e il 70%.



Condizioni di benessere invernali PPD 20%  
per  $\theta_0 = \theta_a$   $M < 1,2$  met e  $v_r < 0,15$  m/s  $I_{cl} = 0,9$  clo



Condizioni di benessere estive PPD 20%  
per  $\theta_o = \theta_a$   $M < 1,2$  met e  $v_r < 0,15$  m/s  $I_{cl} = 0,5$  clo



**VALORI PRECALCOLATI di PMV INVERNO** per  $M = 70 \text{ W/m}^2$  (1,2 met) in funzione della temperatura operativa, dell'abbigliamento e della velocità dell'aria

| Abbigliamento |                                     | Temperatura operativa<br>°C | Velocità relativa dell'aria<br>m/s |        |        |        |        |        |        |        |
|---------------|-------------------------------------|-----------------------------|------------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| clo           | $\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C/W}$ |                             | < 0,10                             | 0,10   | 0,15   | 0,20   | 0,30   | 0,40   | 0,50   | 1,00   |
| 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   |

# Valori precalcolati di PMV per $M = 70 \text{ W/m}^2$ (1,2 met)

## ESTATE

| Abbigliamento |                                     | Temperatura operativa<br>°C | Velocità relativa dell'aria<br>m/s |        |        |        |        |        |        |        |
|---------------|-------------------------------------|-----------------------------|------------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| clo           | $\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C/W}$ |                             | < 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   |

# Valori precalcolati di PMV per $M = 58 \text{ W/m}^2$ (1,0 met)

## ESTATE

| Abbigliamento |                                     | Temperatura operativa<br>°C | Velocità relativa dell'aria<br>m/s |        |        |        |        |        |        |        |
|---------------|-------------------------------------|-----------------------------|------------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| clo           | $\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C/W}$ |                             | < 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   |        |        |        |        |
|               |                                     | 33                          | 2,50                               | 2,41   | 2,34   | 2,29   |        |        |        |        |
|               |                                     |                             |                                    |        |        |        |        |        |        |        |
|               |                                     |                             |                                    |        |        |        |        |        |        |        |
| 0,25          | 0,039                               | 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 |
|               |                                     | 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   |
|               |                                     |                             |                                    |        |        |        |        |        |        |        |
|               |                                     |                             |                                    |        |        |        |        |        |        |        |
| 0,50          | 0,078                               | 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 |
|               |                                     | 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   |
|               |                                     |                             |                                    |        |        |        |        |        |        |        |
|               |                                     |                             |                                    |        |        |        |        |        |        |        |

# Valori precalcolati di PMV per $M = 58 \text{ W/m}^2$ (1,0 met)

## INVERNO

| Abbigliamento |                                     | Temperatura operativa<br>°C | Velocità relativa dell'aria<br>m/s |        |        |        |        |        |        |        |
|---------------|-------------------------------------|-----------------------------|------------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| clo           | $\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C/W}$ |                             | < 0,10                             | 0,10   | 0,15   | 0,20   | 0,30   | 0,40   | 0,50   | 1,00   |
| 1,00          | 0,155                               | 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 |
|               |                                     | 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   |
| 1,50          | 0,233                               | 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 |
|               |                                     | 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   |
| 2,00          | 0,310                               | 10                          | - 1,38                             | - 1,39 | - 1,49 | - 1,56 | - 1,67 | - 1,74 | - 1,80 | - 1,96 |
|               |                                     | 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   |

# Valori precalcolati di PMV per $M = 70 \text{ W/m}^2$ (1,2 met)

## INVERNO

| Abbigliamento |                                     | Temperatura operativa<br>°C | Velocità relativa dell'aria<br>m/s |        |        |        |        |        |        |        |
|---------------|-------------------------------------|-----------------------------|------------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| clo           | $\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C/W}$ |                             | < 0,10                             | 0,10   | 0,15   | 0,20   | 0,30   | 0,40   | 0,50   | 1,00   |
| 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   |

## Valori precalcolati di PMV per $M = 93 \text{ W/m}^2$ (1,6 met) ESTATE

| Abbigliamento |                                     | Temperatura operativa<br>°C | Velocità relativa dell'aria<br>m/s |        |        |        |        |        |        |        |
|---------------|-------------------------------------|-----------------------------|------------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| clo           | $\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C/W}$ |                             | < 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   |        |        |        |        |
|               |                                     | 30                          | 1,46                               | 1,38   | 1,27   | 1,19   |        |        |        |        |
| 0,25          | 0,039                               | 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 |
|               |                                     | 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   |
| 0,50          | 0,078                               | 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 |
|               |                                     | 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   |



## Valori precalcolati di PMV per $M = 93 \text{ W/m}^2$ (1,6 met) INVERNO

| Abbigliamento |                                     | Temperatura operativa<br>°C | Velocità relativa dell'aria<br>m/s |        |        |        |        |        |        |        |
|---------------|-------------------------------------|-----------------------------|------------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| clo           | $\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C/W}$ |                             | < 0,10                             | 0,10   | 0,15   | 0,20   | 0,30   | 0,40   | 0,50   | 1,00   |
| 0,75          | 0,116                               | 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 |
|               |                                     | 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   |
| 1,00          | 0,155                               | 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 |
|               |                                     | 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   |
| 1,50          | 0,233                               | 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 |
|               |                                     | 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   |
| 2,00          | 0,310                               | 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 |
|               |                                     | 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   |

Prof. Gianfranco Cellai

## Valori precalcolati di PMV per $M = 116 \text{ W/m}^2$ (2 met) ESTATE

| Abbigliamento |                     | Temperatura operativa<br>°C | Velocità relativa dell'aria<br>m/s |        |        |        |        |        |        |        |
|---------------|---------------------|-----------------------------|------------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| clo           | m <sup>2</sup> °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   |        |        |        |        |
|               |                     | 32                          |                                    | 2,33   | 2,32   | 2,31   |        |        |        |        |
| 0,25          | 0,039               | 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   |
|               |                     | 30                          |                                    | 1,88   | 1,84   | 1,81   | 1,76   | 1,72   | 1,68   | 1,57   |
| 0,50          | 0,078               | 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   |
|               |                     | 28                          |                                    | 1,59   | 1,55   | 1,51   | 1,46   | 1,42   | 1,38   | 1,27   |

## Valori precalcolati di PMV per $M = 116 \text{ W/m}^2$ (2 met) INVERNO

| Abbigliamento |                      | Temperatura operativa<br>°C | Velocità relativa dell'aria<br>m/s |        |        |        |        |        |        |        |
|---------------|----------------------|-----------------------------|------------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| clo           | m <sup>2</sup> .°C/W |                             | < 0,10                             | 0,10   | 0,15   | 0,20   | 0,30   | 0,40   | 0,50   | 1,00   |
| 0,75          | 0,116                | 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   |
|               |                      | 24                          |                                    | 1,07   | 1,01   | 0,97   | 0,90   | 0,85   | 0,81   | 0,68   |
| 1,00          | 0,155                | 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   |

# Discomfort locale

La condizione di  $-0,5 < PMV < 0,5$  non è sufficiente a garantire l'accettabilità di un ambiente dal punto di vista termico: possono infatti presentarsi situazioni di disuniformità della temperatura interna causa di discomfort localizzato.

Il parametro che esprime questa asimmetria,  $\Delta t_{pr}$ , viene definito come la differenza tra le temperature piane radianti delle facce di una piastrina verticale o orizzontale, posta opportunamente nel locale. Indicativamente la temperatura rilevata su ogni faccia della piastrina, è la temperatura media radiante del semispazio di ambiente che la fronteggia.

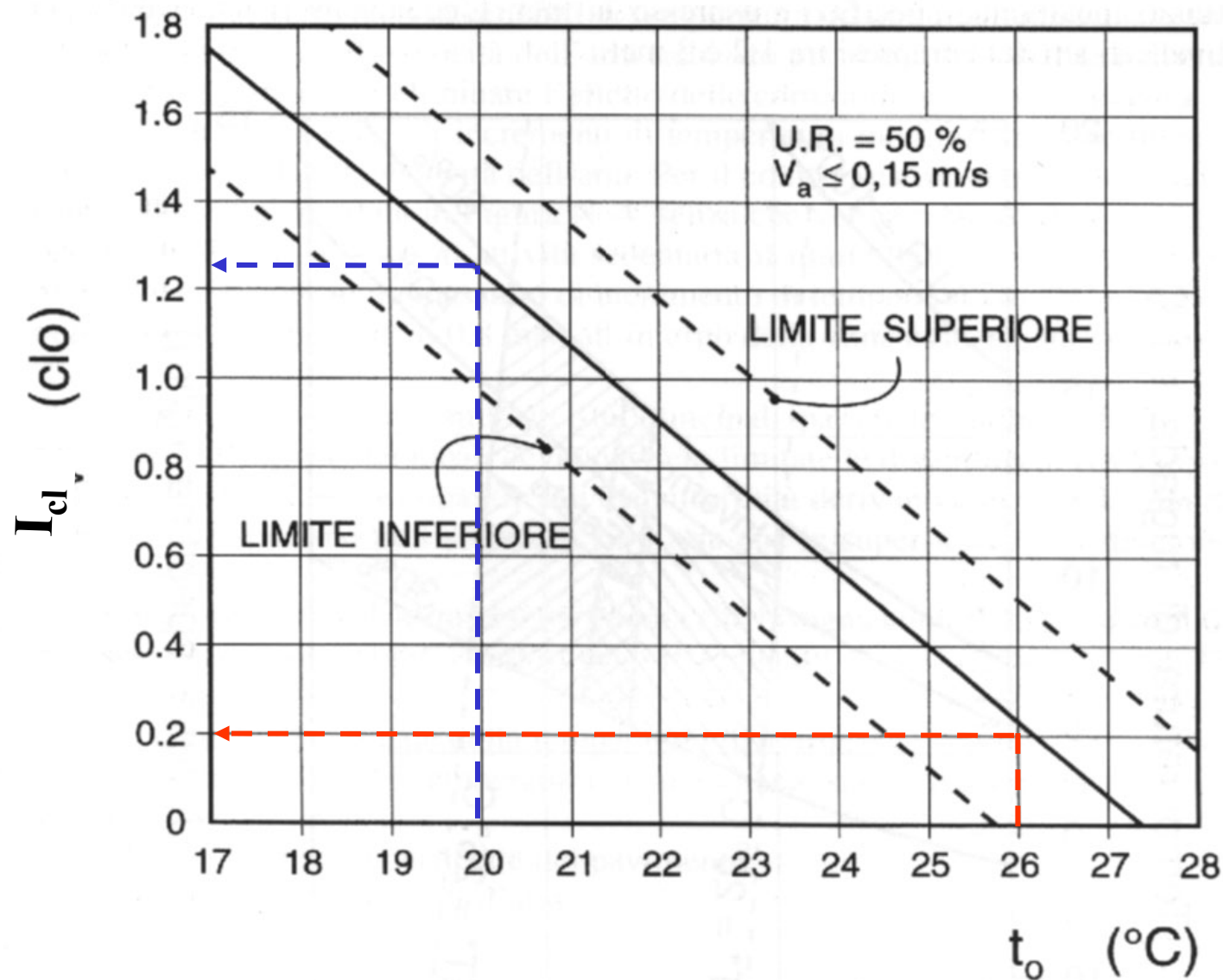
# FATTORI CHE PROVOCANO DISCOMFORT LOCALE

Tra le cause più diffuse di malessere si annoverano :

- **presenza di ampie superfici particolarmente fredde/calde** ( ad es. pareti vetrate o pareti non isolate ) che possono causare scambi termici radiativi anomali tra alcune parti del corpo umano e le superfici suddette (si raccomanda di mantenere l'asimmetria della temperatura radiante  $< 10^{\circ}\text{C}$  per le superfici verticali , e  $< 5^{\circ}\text{C}$  per i soffitti);
- **contatto con superfici eccessivamente fredde o calde** ; ad esempio pavimenti non isolati su porticati ecc. (si raccomandano temperature superficiali comprese tra  $19$  e  $26^{\circ}\text{C}$ );
- **presenza di correnti d'aria fredda** (spifferi) che su alcune zone del corpo, ad esempio la nuca, possono risultare particolarmente fastidiose (si raccomanda una velocità relativa dell'aria  $< 0,25$  m/s);
- **gradienti di temperatura all'interno dello stesso locale** (si raccomanda una differenza verticale di temperatura  $< 3^{\circ}\text{C}$ )

| LIVELLI DI PRESTAZIONE SECONDO LA UNI EN ISO 7730 |                                                                       |                  |                                                                               |                                                                            |
|---------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|------------------|-------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------|
| INDICE                                            | DESCRIZIONE                                                           | UNITA' DI MISURA | VALORI RACCOMANDATI per attività leggera (sedentaria) in CONDIZIONI INVERNALI | VALORI RACCOMANDATI per attività leggera (sedentaria) in CONDIZIONI ESTIVE |
| PMV                                               | voto medio previsto                                                   | -                | $-0,5 < PMV < 0,5$                                                            | $-0,5 < PMV < 0,5$                                                         |
| PPD                                               | percentuale di insoddisfatti                                          | %                | $PPD < 10\%$                                                                  | $PPD < 10\%$ $PPD < 10\%$                                                  |
| D.R.                                              | Percentuale insoddisfatti dovuta a correnti d'aria                    | %                | $D.R. < 15\%$                                                                 | $D.R. < 15\%$                                                              |
| U.R.                                              | umidità relativa                                                      | %                | $30\% < U.R. < 70\%$                                                          | $30\% < U.R. < 70\%$                                                       |
| $\theta_o$                                        | temperatura operativa                                                 |                  | $22 \pm 2^\circ\text{C}$                                                      | $24,5 \pm 1,5^\circ\text{C}$                                               |
| $\Delta t_{1,1-0,1}$                              | differenza verticale di temperatura dell'aria fra 1,1 m e 0,1 m       | $^\circ\text{C}$ | $\Delta t_{1,1-0,1} < 3^\circ\text{C}$                                        | $\Delta t_{1,1-0,1} < 3^\circ\text{C}$                                     |
| $\theta_p$                                        | temperatura superficiale del pavimento                                | $^\circ\text{C}$ | $19^\circ\text{C} < \theta_p < 26^\circ\text{C}$                              | -                                                                          |
| $\Delta t_{prv}$                                  | asimmetria della temp. radiante dovuta a finestre o altre sup. fredde | $^\circ\text{C}$ | $\Delta t_{prv} < 10^\circ\text{C}$                                           | -                                                                          |
| $\Delta t_{pro}$                                  | asimmetria della temp. radiante dovuta a soffitto caldo (riscaldato)  | $^\circ\text{C}$ | $\Delta t_{pro} < 5^\circ\text{C}$                                            | -                                                                          |

## Resistenza termica ottimale degli abiti in funzione della temperatura operativa (da 0,2 a 1,2 clo)

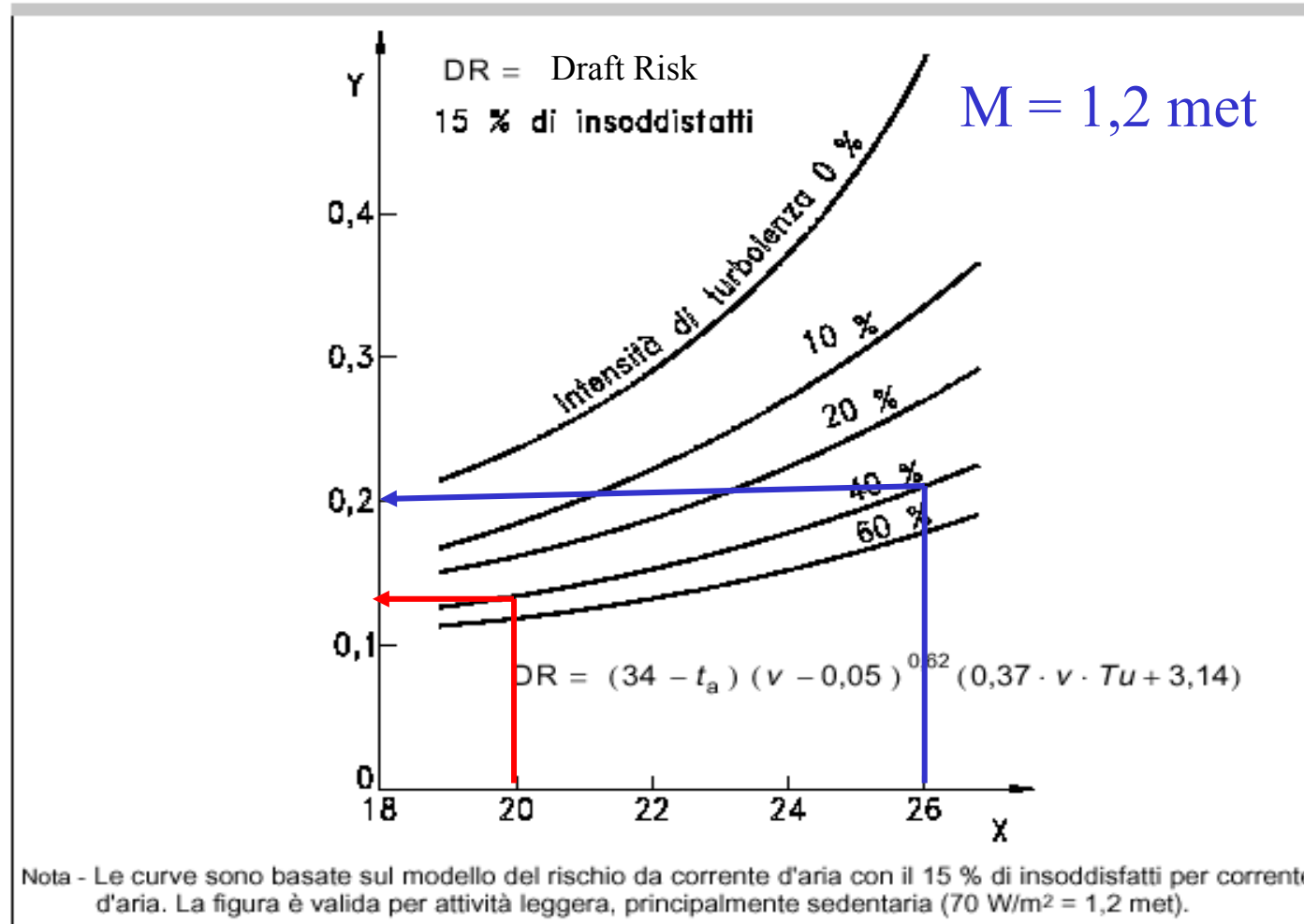


# Velocità media dell'aria ammissibile in funzione della temperatura e dell'intensità di turbolenza Tu

## Legenda

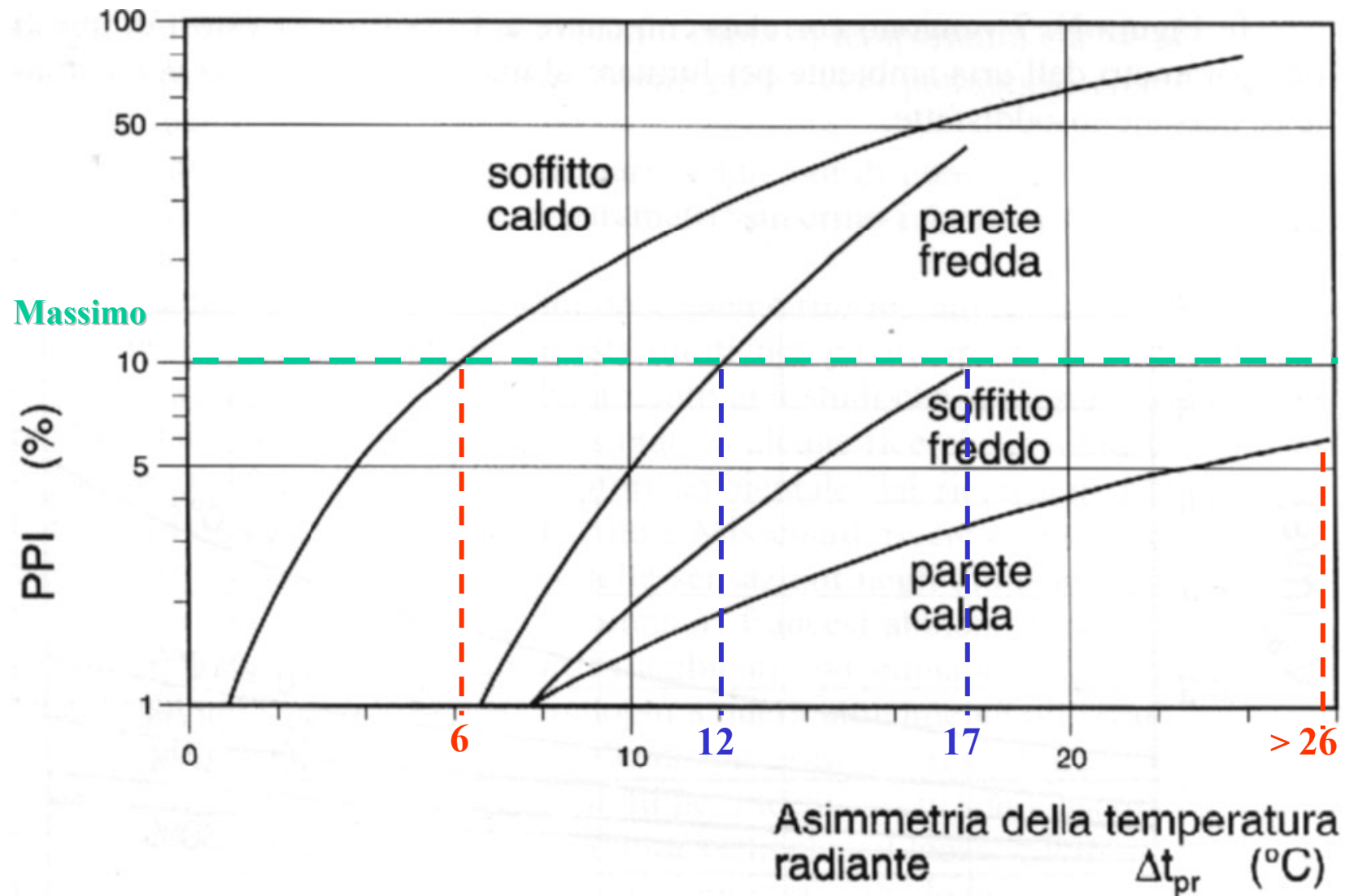
X Temperatura dell'aria in °C  
Y Velocità media dell'aria in m/s

In mancanza di indicazioni si assume  $Tu = 40\%$

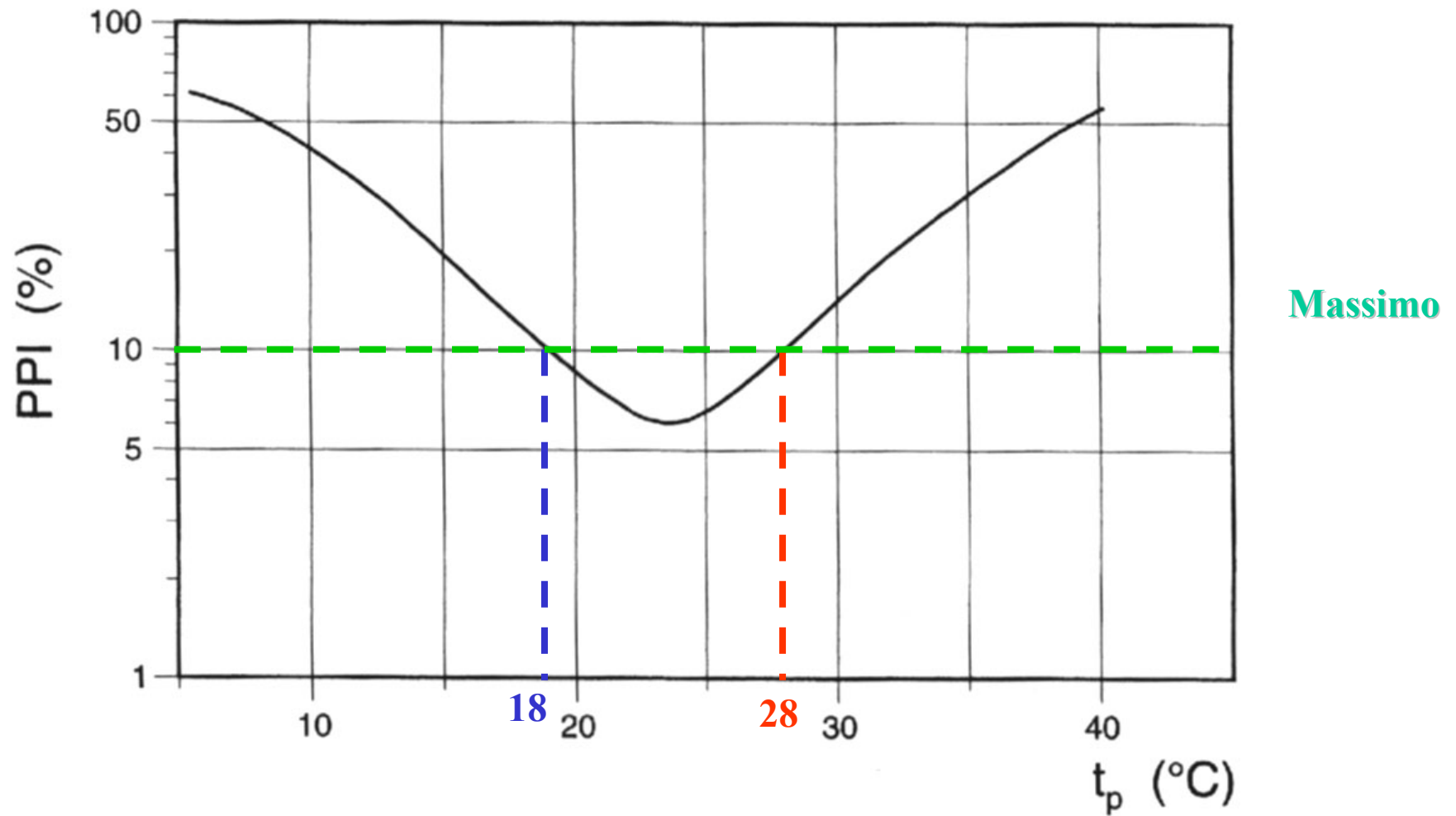




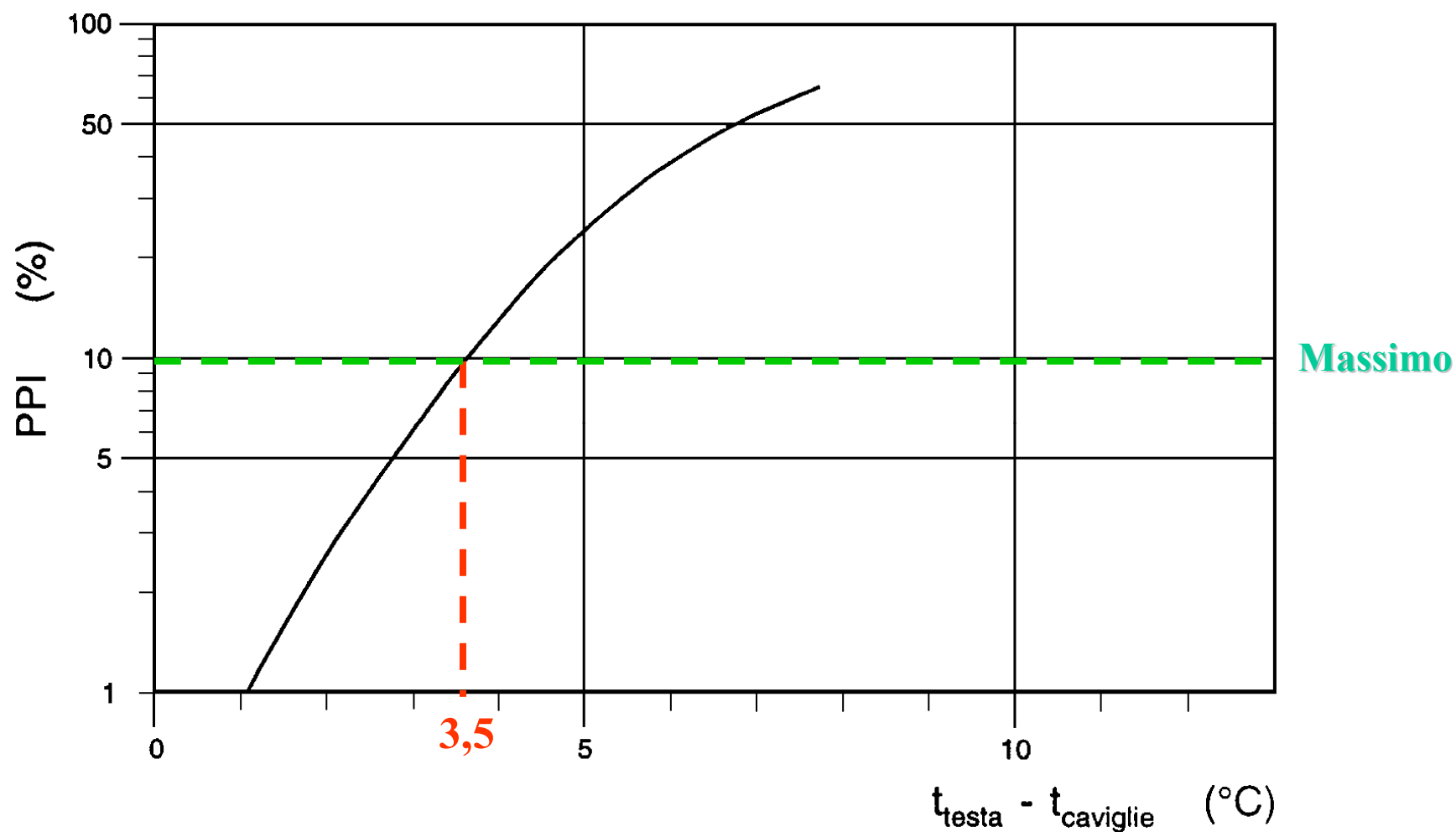
## Relazione tra l'asimmetria della temperatura radiante $\Delta t_{pr}$ e PPI per diverse superfici calde e fredde



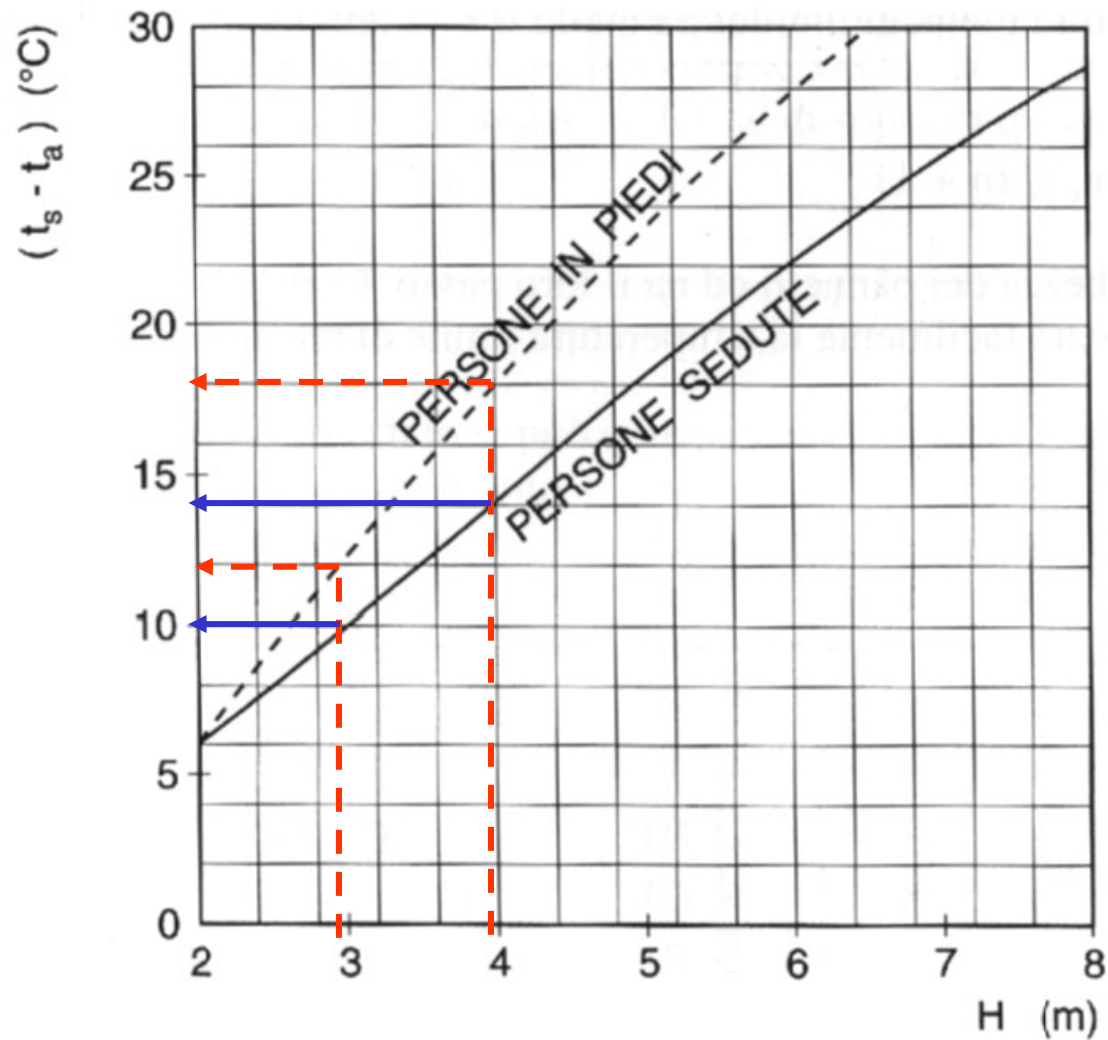
# Relazione tra la temperatura del pavimento e PPI



# Relazione tra la differenza temperatura testa-caviglie e PPI



## Condizioni limite della differenza di temperatura soffitto-aria in funzione dell'altezza H del locale



# Esempio di criteri di progettazione per spazi in vari tipi di edificio

| Tipo di edificio/spazio                                                                          | Attività<br>W/m <sup>2</sup> | Categoria | Temperatura operativa<br>°C               |                                           | Massima velocità media dell'aria <sup>a)</sup><br>m/s |                                           |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------|-----------|-------------------------------------------|-------------------------------------------|-------------------------------------------------------|-------------------------------------------|
|                                                                                                  |                              |           | Estate<br>(stagione di<br>raffrescamento) | Inverno<br>(stagione di<br>riscaldamento) | Estate<br>(stagione di<br>raffrescamento)             | Inverno<br>(stagione di<br>riscaldamento) |
| Ufficio singolo<br>Ufficio panoramico<br>Sala conferenze<br>Auditorium<br>Bar/Ristorante<br>Aula | 70                           | A         | 24,5 ± 1,0                                | 22,0 ± 1,0                                | 0,12                                                  | 0,10                                      |
|                                                                                                  |                              | B         | 24,5 ± 1,5                                | 22,0 ± 2,0                                | 0,19                                                  | 0,16                                      |
|                                                                                                  |                              | C         | 24,5 ± 2,5                                | 22,0 ± 3,0                                | 0,24                                                  | 0,21 <sup>b)</sup>                        |
| Giardino d'infanzia                                                                              | 81                           | A         | 23,5 ± 1,0                                | 20,0 ± 1,0                                | 0,11                                                  | 0,10 <sup>b)</sup>                        |
|                                                                                                  |                              | B         | 23,5 ± 2,0                                | 22,0 ± 2,5                                | 0,18                                                  | 0,15 <sup>b)</sup>                        |
|                                                                                                  |                              | C         | 23,5 ± 2,5                                | 22,0 ± 3,5                                | 0,23                                                  | 0,19 <sup>b)</sup>                        |
| Grandi magazzini                                                                                 | 93                           | A         | 23,0 ± 1,0                                | 19,0 ± 1,5                                | 0,16                                                  | 0,13 <sup>b)</sup>                        |
|                                                                                                  |                              | B         | 23,0 ± 2,0                                | 19,0 ± 3,0                                | 0,20                                                  | 0,15 <sup>b)</sup>                        |
|                                                                                                  |                              | C         | 23,0 ± 3,0                                | 19,0 ± 4,0                                | 0,23                                                  | 0,18 <sup>b)</sup>                        |

a) Il valore massimo della velocità media dell'aria è basato su un valore di intensità di turbolenza pari a 40% e sull'uguaglianza tra temperatura dell'aria e temperatura operativa, secondo il punto 6.2 e la figura A.2. L'umidità relativa è pari a 60% e 40% rispettivamente nella stagione estiva ed in quella invernale. Sia in estate sia in inverno, per determinare il valore massimo della velocità media dell'aria, si utilizza il valore di temperatura più basso all'interno dell'intervallo.

b) Al di sotto del limite di 20 °C (vedere figura A.2). **NB. Icl = 0,5 clo per l'estate e 1,0 clo per l'inverno**

# Normativa e benessere

Gli aspetti esaminati in materia di benessere si ritrovano puntualmente nelle normative emanate, dal D.M. 192/05 al DPR. 59/09 e infine al DM 26.06.2009 Linee Guida sulla certificazione energetica.

In particolare si ritrovano in tutte le disposizioni aventi ricadute sulla temperatura dell'aria interna e delle superfici, quali la schermatura efficace delle superfici vetrate, i limiti in materia di trasmittanza termica e trasmittanza termica periodica, nella ricerca di parametri prestazionali atti ad incrementare l'inerzia termica espressa da attenuazione e sfasamento, ed infine nelle azioni progettuali volte ad assicurare una efficace ventilazione degli ambienti, meglio se naturale.

## **D.PR 59/2009 art.18**

Il progettista, al fine di limitare i fabbisogni energetici per la climatizzazione estiva e di contenere la temperatura interna degli ambienti, nel caso di edifici di nuova costruzione e assimilati e limitatamente alle ristrutturazioni totali:

a) valuta puntualmente e documenta l'efficacia dei sistemi schermanti delle superfici vetrate, esterni o interni, tali da ridurre l'apporto di calore per irraggiamento solare;

b) esegue, per le localita' nelle quali il valore medio mensile dell'irradianza sul piano orizzontale, nel mese di massima insolazione estiva,  $I_{m,s}$ , sia maggiore o uguale a  $290 \text{ W/m}^2$ :

1) relativamente a tutte le pareti verticali opache con l'eccezione di quelle comprese nel quadrante nord-ovest / nord /nord-est, almeno una delle seguenti verifiche:

1.1 che il valore della massa superficiale  $M_s$ , sia superiore a  $230 \text{ kg/m}^2$ ;

1.2 che il valore del modulo della trasmittanza termica periodica ( $Y_{IE}$ ), sia inferiore a  $0,12 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ ;

2) relativamente a tutte le pareti opache orizzontali ed inclinate che il valore del modulo della trasmittanza termica periodica  $Y_{IE}$ , sia inferiore a  $0,20 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ ;

c) utilizza al meglio le condizioni ambientali esterne e le caratteristiche distributive degli spazi per favorire la ventilazione naturale dell'edificio; nel caso che il ricorso a tale ventilazione non sia efficace, puo' prevedere l'impiego di sistemi di ventilazione meccanica. Gli effetti positivi che si ottengono con il rispetto dei valori di massa superficiale o trasmittanza termica periodica delle pareti opache previsti alla lettera b), possono essere raggiunti, in alternativa, con l'utilizzo di tecniche e materiali, anche innovativi, ovvero coperture a verde, che permettano di contenere le oscillazioni della temperatura degli ambienti in funzione dell'andamento dell'irraggiamento solare. In tale caso deve essere prodotta una adeguata documentazione e certificazione delle tecnologie e dei materiali che ne attestino l'equivalenza con le predette disposizioni.



## **DM. LINEE GUIDA NAZIONALI PER LA CERTIFICAZIONE ENERGETICA DEGLI EDIFICI**

### **6. Valutazione qualitativa delle caratteristiche dell'involucro edilizio volte a contenere il fabbisogno per la climatizzazione estiva. Riferimenti nazionali.**

In considerazione della rilevanza crescente dei consumi per il raffrescamento degli edifici e per non fornire valutazioni fuorvianti circa la qualità energetica dell'edificio nei casi in cui, anche per le particolari condizioni climatiche, l'esposizione al calore e l'attitudine a trattenerlo possono determinare condizioni gravose per la prestazione energetica in estate, si ritiene utile tenere conto di questi aspetti pure nelle more della predisposizione di norme tecniche consolidate in materia di impianti per la climatizzazione estiva.

A tal fine, a far data dal 1 luglio 2008, per la valutazione della qualità termica estiva dell'involucro edilizio sono riferimenti nazionali le metodologie di cui ai paragrafi 6.1 e 6.2, in relazione alle procedure utilizzate per la determinazione degli indici di prestazione energetica di cui al paragrafo 4.

L'indicazione della qualità termica estiva dell'involucro edilizio deve essere riportata negli attestati di qualificazione e certificazione energetica.

In assenza di un quadro di normativa tecnica sperimentato e consolidato, in materia di climatizzazione estiva degli edifici, che, al momento, rende difficile la definizione di specifici metodi semplificati e ritenuto che, ancorché qualitativi, i metodi di valutazione indicati ai successivi paragrafi 6.1 e 6.2 non presentano le condizioni di semplicità e di minimizzazione degli oneri disposti all'articolo 6, comma 9, del decreto legislativo, la valutazione di cui al presente paragrafo è resa in ogni caso facoltativa nella certificazione di singole unità immobiliari ad uso residenziale di superficie utile inferiore o uguale a 200 m<sup>2</sup>, che per la determinazione dell'indice di prestazione energetica per la climatizzazione invernale utilizzino il metodo semplificato di cui al paragrafo 5.2, punto 3.

In assenza della predetta valutazione, all'unità immobiliare viene attribuita una qualità prestazionale corrispondente al livello "V" delle tabelle di cui ai paragrafi 6.1 e 6.2 .



## DM. LINEE GUIDA NAZIONALI PER LA CERTIFICAZIONE ENERGETICA DEGLI EDIFICI

### 6.1 Metodo basato sulla determinazione dell'indice di prestazione termica dell'edificio per il raffrescamento ( $E_{Pe,invol}$ )

Congiuntamente all'applicazione delle metodologie di cui al paragrafo 5.1 e al paragrafo 5.2, punti 1 e 2, sia in applicazione di disposizioni legislative che per scelta di utilizzo, si procede alla determinazione dell'indice di prestazione termica dell'edificio per il raffrescamento ( $E_{Pe,invol}$ ), espresso in kWh/m<sup>2</sup>anno, pari al rapporto tra il fabbisogno di energia termica per il raffrescamento dell'edificio (energia richiesta dall'involucro edilizio per mantenere negli ambienti interni le condizioni di comfort, non tiene conto dei rendimenti dell'impianto che fornisce il servizio e quindi non è energia primaria) e la superficie calpestabile del volume climatizzato. Il riferimento nazionale per il calcolo del fabbisogno di energia termica per il raffrescamento, direttamente o attraverso il metodo DOCET del CNR/ENEA, sono le norme tecniche di cui al paragrafo 5.1; e, a oggi, per il caso specifico la seguente norma tecnica e sue successive modificazioni e integrazioni:

UNI/TS 11300 – 1 Prestazioni energetiche degli edifici – Parte 1: Determinazione del fabbisogno di energia termica dell'edificio per la climatizzazione estiva ed invernale;

Sulla base dei valori assunti dal parametro  $E_{Pe,invol}$ , calcolati con la predetta metodologia, si definisce la seguente classificazione, valida per tutte le destinazioni d'uso:

| $E_{Pe,invol}$<br>(kWh/m <sup>2</sup> anno) | Prestazioni | Qualità<br>prestazionale |
|---------------------------------------------|-------------|--------------------------|
| $E_{Pe,invol} < 10$                         | ottime      | I                        |
| $10 \leq E_{Pe,invol} < 20$                 | buone       | II                       |
| $20 \leq E_{Pe,invol} < 30$                 | medie       | III                      |
| $30 \leq E_{Pe,invol} < 40$                 | sufficienti | IV                       |
| $E_{Pe,invol} \geq 40$                      | mediocri    | V                        |

### 6.2 Metodo basato sulla determinazione di parametri qualitativi

Congiuntamente all'applicazione delle metodologie di cui al paragrafo 5.2, punto 3, e con le limitazioni ivi previste, in alternativa alla metodologia di cui al paragrafo 6.1, si può procedere alla determinazione di indicatori quali: lo sfasamento (S), espresso in ore, ed il fattore di attenuazione (fa), coefficiente adimensionale. Il riferimento nazionale per il calcolo dei predetti indicatori è la norma tecnica UNI EN ISO 13786, dove i predetti parametri rispondono rispettivamente alle seguenti definizioni:

- fattore di attenuazione o fattore di decremento è il rapporto tra il modulo della trasmittanza termica dinamica e la trasmittanza termica in condizioni stazionarie.
- sfasamento è il ritardo temporale tra il massimo del flusso termico entrante nell'ambiente interno ed il massimo della temperatura dell'ambiente esterno.

Sulla base dei valori assunti da tali parametri si definisce la seguente classificazione valida per tutte le destinazioni d'uso:

| Sfasamento<br>(ore) | Attenuazione          | Prestazioni | Qualità<br>prestazionale |
|---------------------|-----------------------|-------------|--------------------------|
| $S > 12$            | $Fa < 0,15$           | ottime      | I                        |
| $12 \geq S > 10$    | $0,15 \leq fa < 0,30$ | buone       | II                       |
| $10 \geq S > 8$     | $0,30 \leq fa < 0,40$ | medie       | III                      |
| $8 \geq S > 6$      | $0,40 \leq fa < 0,60$ | sufficienti | IV                       |
| $6 \geq S$          | $0,60 \leq fa$        | mediocri    | V                        |

Nei casi in cui le coppie di parametri caratterizzanti l'edificio non rientrano coerentemente negli intervalli fissati in tabella, per la classificazione prevale il valore dello sfasamento.