

COMFORT TERMOIGROMETRICO

Lo scambio termico che si instaura tra uomo ed ambiente può essere descritto secondo il primo principio della termodinamica.

Il prodotto tra la capacità termica del corpo, C_T , per la variazione della temperatura corporea, ΔT , sarà allora pari alla differenza tra:

- la quantità di energia metabolica prodotta, M , (al netto del lavoro meccanico, L), e
- le dispersioni termiche
- per convezione, $Q_{c,res}$,
- per evaporazione, $Q_{ev,res}$, dovute alla respirazione e
- gli scambi termici per convezione, Q_c ,
- radiazione, Q_r ,
- conduzione, Q_k ,
- ed evaporazione, Q_{ev} , attraverso la pelle:

$$C_T \cdot \Delta T = (M - L) - (Q_{c,res} + Q_{ev,res} + Q_c + Q_r + Q_k + Q_{ev})$$

Gli scambi avvengono per mezzo della respirazione e attraverso la superficie del corpo e per ognuna delle due modalità si può quindi distinguere un'aliquota latente da un'aliquota sensibile.

Rifacendosi ai termini dell'equazione di bilancio:

- il tasso metabolico e il lavoro meccanico dipendono dall'attività dell'individuo, M ;
- lo scambio sensibile per respirazione dipende dall'attività dell'individuo, M , e dalla temperatura dell'aria, t_a ;
- lo scambio latente per respirazione dipende dall'attività dell'individuo, M , e dall'umidità dell'aria, normalmente espressa in termini di pressione parziale del vapore d'acqua, p_a ;
- lo scambio sensibile per convezione dipende dalla resistenza termica dell'abbigliamento indossato, I_{cl} , dalla temp. degli abiti, t_{cl} , dalla temperatura, t_a , e dalla velocità dell'aria, v_{ar} ;
- lo scambio sensibile per radiazione dipende dalla resistenza termica dell'abbigliamento indossato, I_{cl} , dalla temp. degli abiti, t_{cl} , e dalla temperatura media radiante, t_r ;
- lo scambio sensibile per conduzione è in genere trascurabile;
- lo scambio latente attraverso la pelle dipende dalla percentuale di pelle bagnata, dall'umidità dell'aria e dalla resistenza degli abiti allo scambio evaporativo. Tuttavia quest'ultimo termine viene assunto come variabile indipendente, da valutare in base a considerazioni fisiologiche.

Esprimendo i termini dell'equazione di bilancio in funzione delle variabili precedentemente individuate, si perviene ad un'equazione del tipo:

$$C_T \cdot \Delta T = f(M, I_{cl}, t_a, p_a, v_{ar}, \overline{t_r}, t_s, Q_{ev})$$

Tale equazione lega fra loro:

- due variabili dipendenti dal soggetto (*metabolismo, resistenza termica abbigliamento*),
- quattro variabili microclimatiche (*temperatura dell'aria, pressione parziale del vapor d'acqua, velocità dell'aria, temperatura media radiante*)
- e due variabili fisiologiche, dipendenti dal sistema di termoregolazione (*temperatura della pelle e potenza dispersa per evaporazione attraverso la pelle*).

Perché si realizzino le condizioni di equilibrio termico e non vi sia accumulo o dispersione di calore dal nucleo del corpo è necessario che la temperatura corporea si mantenga costante ($\Delta T=0$); si deve pertanto verificare che:

$$f(M, I_{cl}, t_a, p_a, v_{ar}, \bar{t}_r, t_s, Q_{ev}) = 0$$

Questa condizione, che consente di mantenere lo stato di omotermia del nucleo del corpo, non è però da sola sufficiente a garantire il comfort termico dell'individuo.

Emerge la difficoltà di definire tale condizione mediante indicatori numerici o giudizi qualitativi a causa della complessità dei fenomeni in gioco e dell'imponderabilità di alcuni fattori, primi fra tutti quelli di carattere soggettivo.

Ad oggi la più efficace definizione analitica delle condizioni di comfort termoigrometrico in un ambiente confinato è quella proposta da P.O. Ranger

Tale modello si basa su considerazioni quantitative legate alle equazioni di equilibrio termico e sulla elaborazione statistica dei risultati di una vasta indagine campionaria condotta su individui sottoposti a condizioni ambientali controllate.

Fanger evidenziò ad esempio che, in condizioni di comfort, all'aumentare dell'attività, è tollerato un incremento della sudorazione ed è inoltre preferita una riduzione della temperatura della pelle.

I valori assunti dalle variabili fisiologiche non sono allora indipendenti, ma legati all'attività svolta dall'individuo.

Furono allora ricavate le due seguenti relazioni che definiscono i valori assunti dalle variabili fisiologiche in condizioni di comfort:

$$t_s = 35.7 - 0.028(M - L)$$
$$Q_{ev} = 0.42(M - L) - 58.15$$

Le due equazioni, sostituite nell'equazione di bilancio, consentono di ottenere l'equazione di benessere, funzione di sole 6 variabili:

$$f(M, I_{cl}, t_a, p_a, v_{ar}, \bar{t}_r) = 0$$

Dalla risoluzione numerica dell'equazione di benessere possono essere ricavati alcuni diagrammi che descrivono la condizione di comfort in funzione dei parametri assunti dalle variabili. Tali diagrammi sono noti come diagrammi di benessere; tre diverse tipologie di essi sono riportati nelle figure 2, 3 e 4.

Per ciascuno dei tre tipi di diagrammi esistono inoltre numerosi altri casi, per differenti combinazioni dei valori assunti dalle variabili.

Un primo modo per utilizzare i diagrammi consiste nel determinare il valore assunto da una delle variabili da cui dipende il comfort in funzione delle altre, come illustrato nelle figure 2, 3 e 4.

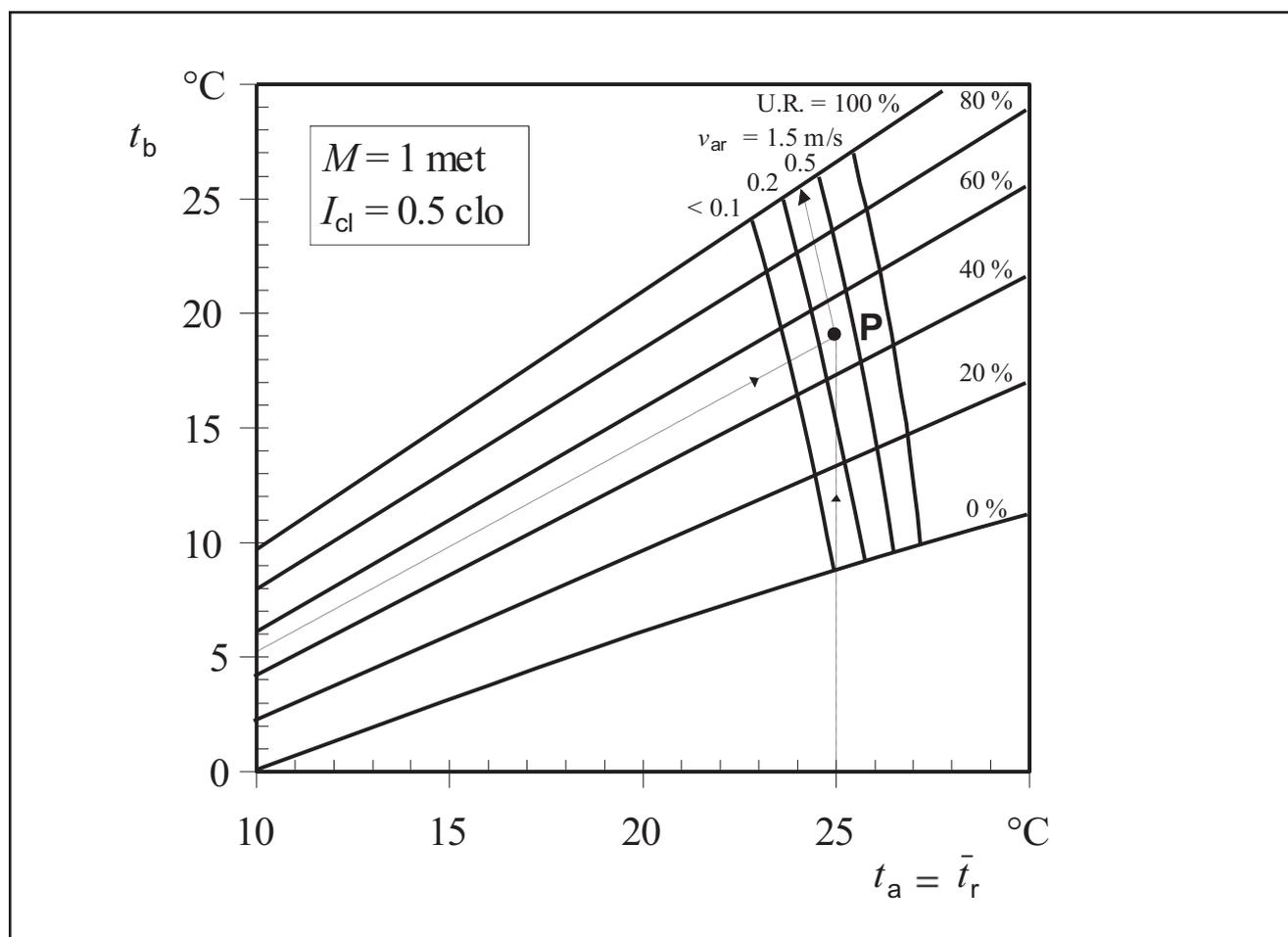


Figura 2. Correlazione tra temperatura ambiente, pari a quella media radiante, umidità relativa e velocità relativa dell'aria.

Il diagramma è riferito ad un livello metabolico di 1 met ed una resistenza termica dell'abbigliamento di 0.5 clo¹.

Un ambiente con umidità relativa del 50%, temperatura dell'aria e temperatura media radiante pari a 25°C ha condizioni rappresentate dal punto P. Da esso si ricava una velocità relativa dell'aria pari a 0.35 m/s.

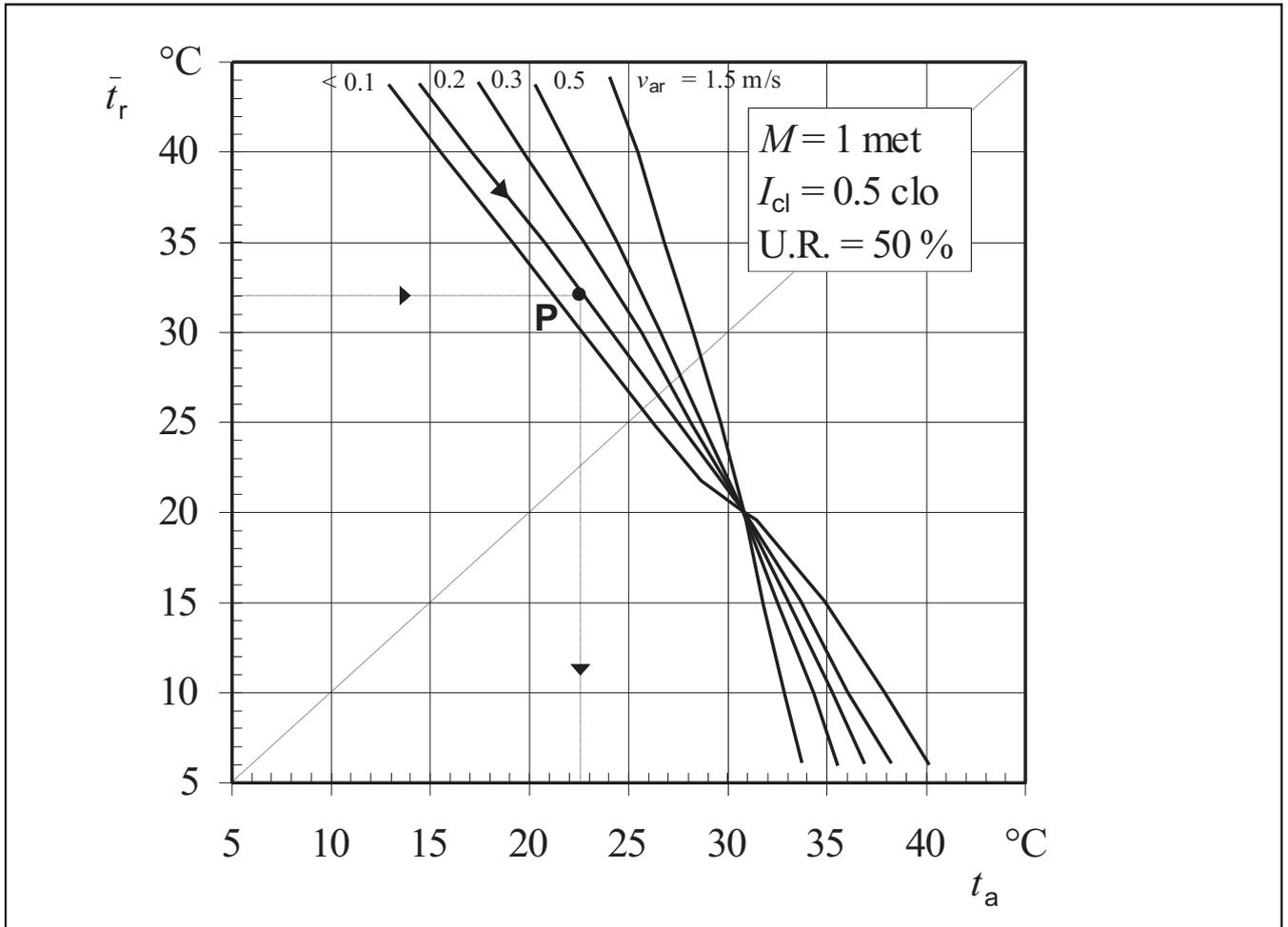


Figura 3. Correlazione tra temperatura dell'aria, temperatura media radiante e velocità dell'aria. Il diagramma è riferito ad un livello metabolico di 1 met, resistenza termica dell'abbigliamento di 0.5 clo ed umidità relativa del 50%.

Si supponga ad esempio di trovarsi in un ambiente con temperatura media radiante pari a 32°C e velocità relativa dell'aria di 0.2 m/s (punto P). Perché si abbia benessere termico è necessario allora che la temperatura dell'aria sia pari a 22.5°C.

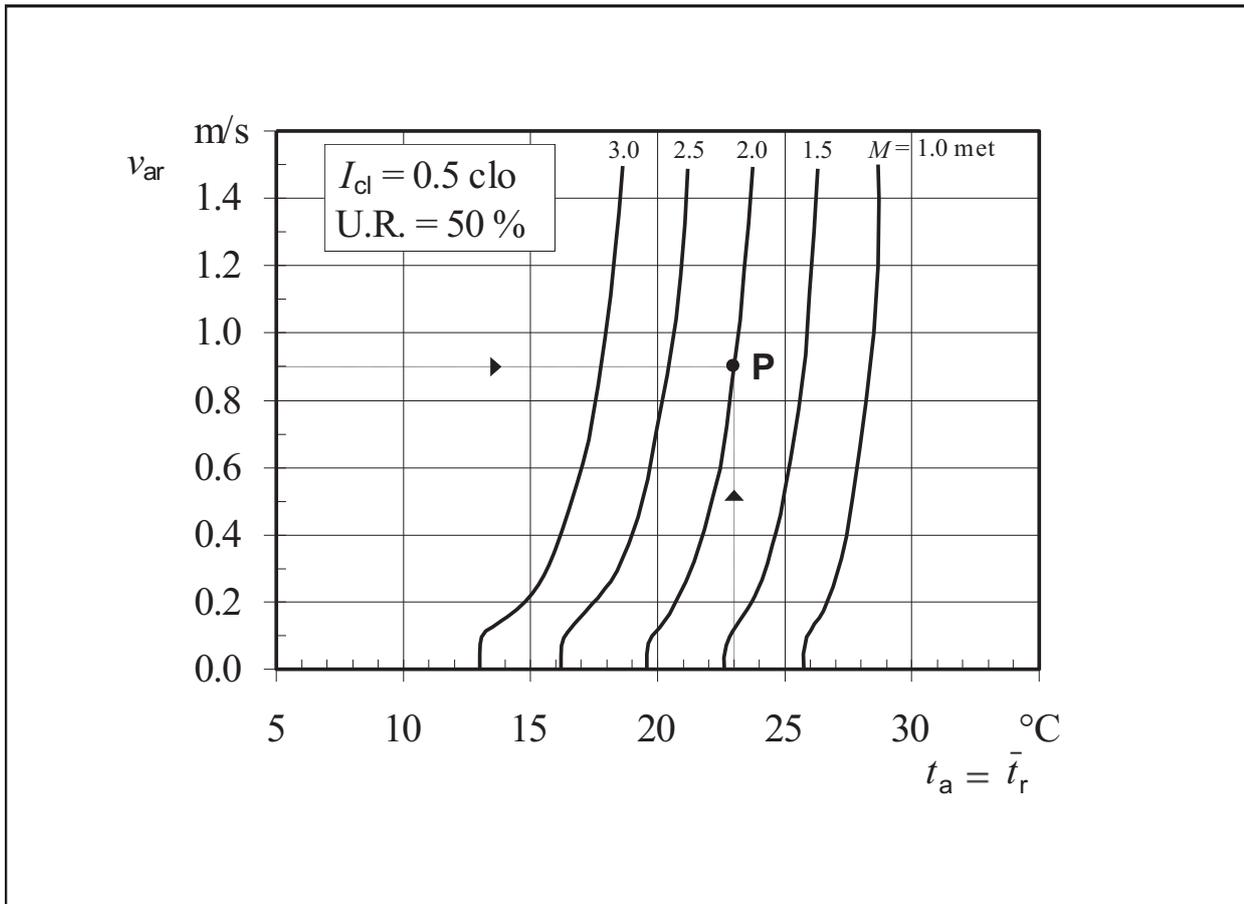


Figura 4. Correlazione in condizioni di comfort tra temperatura ambiente, assunta pari a quella media radiante, velocità relativa dell'aria ed attività.

Il diagramma è riferito ad un una resistenza termica dell'abbigliamento di 0.5 clo ed umidità relativa del 50%.

Si supponga ad esempio di trovarsi in un ambiente con temperatura dell'aria e temperatura media radiante pari a 23°C e con velocità relativa dell'aria di 0.9 m/s (punto P). Queste condizioni sono di benessere per un soggetto che compia un'attività metabolica di 2.0 met.

Il voto medio previsto (PMV)

L'equazione di benessere consente di valutare la combinazione delle variabili necessaria per garantire il comfort di un soggetto in un ambiente confinato.

Spesso però le condizioni dell'ambiente non sono tali da garantire il benessere per cui può essere utile valutare lo scostamento dalle condizioni ideali.

A tal fine vengono introdotti degli indici che, in funzione delle variabili da cui dipende il comfort, consentono di valutare la sensazione termica provata mediamente da un gran numero di individui sottoposti alla medesima condizione microclimatica.

L'indice maggiormente utilizzato in campo internazionale è il Voto medio previsto (PMV, Predicted Mean Vote), nato dagli studi di Fanger.

L'esigenza sulla quale si basa la teoria di Fanger nasce dalla necessità di correlare i parametri di tipo fisico a sensazioni soggettive delle persone esposte.

A tal fine Fanger condusse un'indagine sperimentale su un campione di 1296 individui che, dopo aver sostato all'interno di una camera termostata le cui caratteristiche climatiche erano opportunamente controllate, venivano invitati ad esprimere una valutazione sulla gradevolezza del clima dell'ambiente mediante la scala di sensazione termica a sette livelli riportata in tabella 1.

| Voto | Sensazione |
|------|--------------------|
| +3 | molto caldo |
| +2 | caldo |
| +1 | leggermente caldo |
| 0 | neutro |
| -1 | leggermente freddo |
| -2 | freddo |
| -3 | molto freddo |

In base a tale indagine, Fanger propose un legame funzionale tra la votazione mediamente espressa da individui sottoposti al medesimo microclima, in uguali condizioni di attività ed abbigliamento, ed il loro carico termico, Q_T .

Quest'ultimo è definito come la differenza tra la produzione interna di calore e la dispersione di calore che l'individuo avrebbe subito, per la stessa attività, se si fosse trovato in condizioni di benessere.

Il legame trovato fu del tipo:

$$PMV = (0.303e^{-0.036M} + 0.028)Q_T$$

e in termini di dipendenza con le variabili soggettive e microclimatiche:

$$PMV = f(M, I_{cl}, t_a, p_a, v_{ar}, \bar{t}_r)$$

La percentuale prevista di insoddisfatti (PPD)

Nonostante l'indice PMV sia il risultato di una media dei voti espressi da un gran numero di persone poste nelle stesse condizioni, esso non può rappresentare la variabilità delle preferenze individuali:

i voti individuali espressi dai soggetti risultano infatti dispersi rispetto al valore medio dato dal PMV.

Per tale motivo, Fanger introdusse l'indice Percentuale prevista di insoddisfatti (**PPD, Predicted Percentage of Dissatisfied**)

Con soggetto insoddisfatto si intende una persona che, sottoposta ad un determinato carico termico, esprima una votazione di +3, +2, -2 o -3 della scala di sensazione termica.

Per ciascun valore del PMV sarà così possibile determinare un corrispondente valore di PPD. Il legame tra i due parametri è esprimibile per mezzo della seguente equazione, che è graficamente rappresentata in figura 5:

$$PPD = 100 - 95 e^{-\left(0.03353 PMV^4 + 0.2179 PMV^2\right)}$$

E' interessante notare come, in virtù della diversità tra le risposte soggettive, non esista una condizione nella quale tutti i soggetti risultano soddisfatti ed anche per valori di PMV uguali a zero, cioè in condizioni previste di comfort, il valore di PPD è pari al 5%.

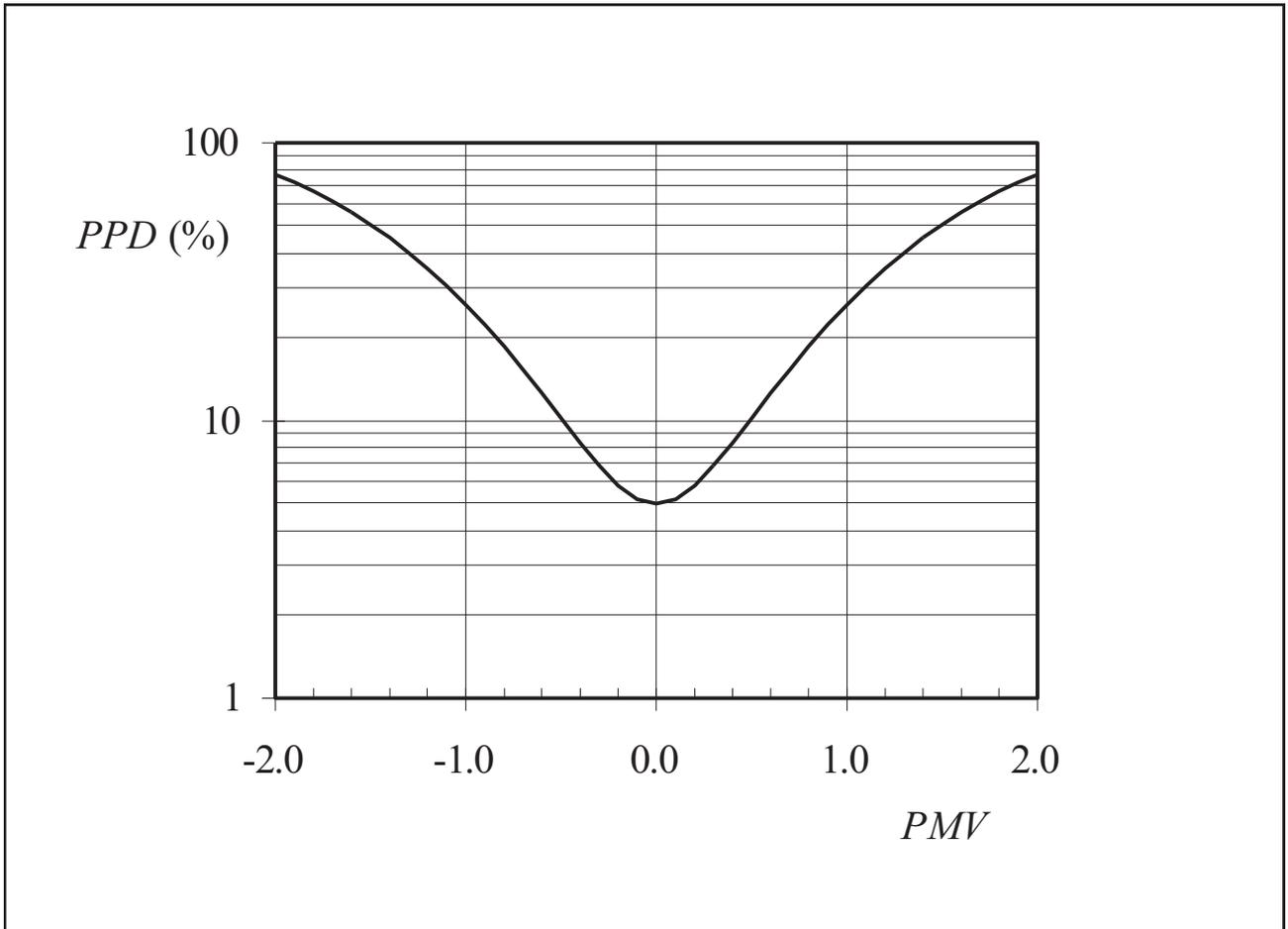


Figura 5. Percentuale prevista di insoddisfatti in funzione del voto medio previsto.

Il discomfort localizzato

L'equazione di Fanger e gli indici *PMV* e *PPD*, che consentono di valutare le condizioni di comfort per un soggetto che si trovi in un ambiente confinato, sono utilizzabili soltanto per la valutazione del **comfort globale**, cioè lo stato di benessere individuato dai valori medi delle variabili ambientali.

Si può però verificare che, anche per valori accettabili del *PMV*, il soggetto non sia soddisfatto riguardo all'ambiente circostante.

Questo è dovuto a disuniformità nei valori delle variabili ambientali e porta al fenomeno del **discomfort localizzato**.

Nel seguito verranno descritte le principali forme di discomfort localizzato che possono manifestarsi negli ambienti confinati.

Differenza verticale di temperatura

In molti ambienti confinati la temperatura dell'aria non è costante con l'altezza e tende normalmente a crescere a partire dal pavimento. Se il gradiente di temperatura che si viene a creare è sufficientemente elevato, può generarsi una sensazione di disagio locale anche se il soggetto si trova in condizioni di comfort termico globale.

Da studi sperimentali condotti su campioni di individui sottoposti in condizione di neutralità termica a vari gradienti verticali di temperatura (Olesen et al., 1979), è stato possibile ricavare una relazione tra la differenza tra la temperatura dell'aria al livello della testa ed al livello delle caviglie e la percentuale di persone insoddisfatte (figura 6). Occorre a tal riguardo sottolineare che una temperatura al livello delle caviglie superiore a quella che si riscontra al livello della testa non induce discomfort

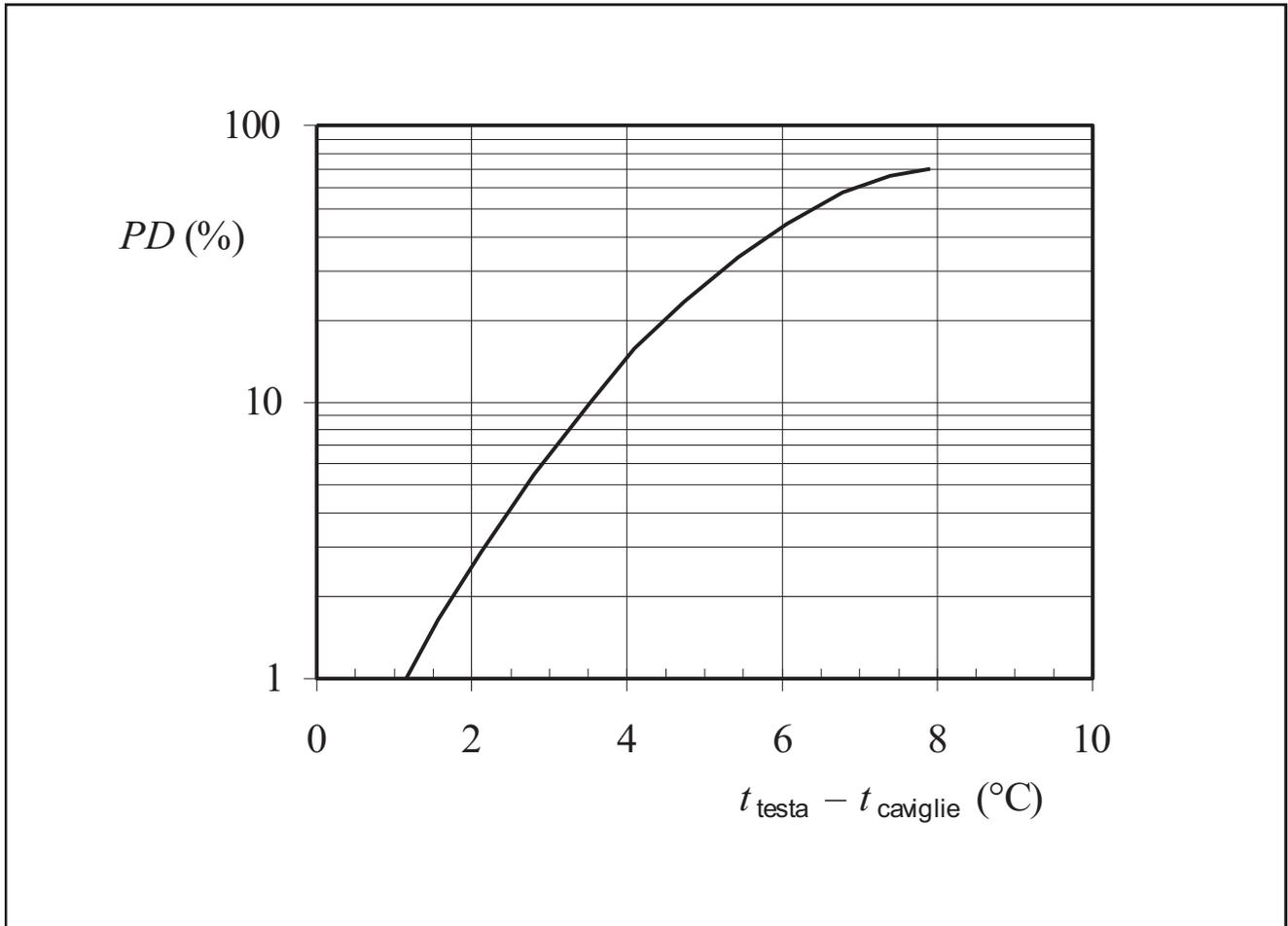


Figura 6. Percentuale di insoddisfatti in funzione della differenza tra le temperature dell'aria al livello della testa e al livello delle caviglie.

Temperatura del pavimento

A causa del contatto tra i piedi ed il pavimento possono verificarsi condizioni di discomfort localizzato qualora il pavimento sia troppo caldo o troppo freddo.

La sensazione termica dipende dal tempo di esposizione ed è differente per persone scalze o per persone con scarpe; inoltre, se un soggetto è scalzo, caso che può verificarsi in piscine, palestre o spogliatoi, la sensazione provata sarà differente a seconda del tipo di materiale usato per il pavimento. Inoltre, il valore ottimale per la temperatura superficiale del pavimento è diverso per persone sedute o in piedi.

Da studi sperimentali condotti da Olesen è stata ricavata la relazione tra insoddisfatti e temperatura superficiale del pavimento riportata in figura 7.

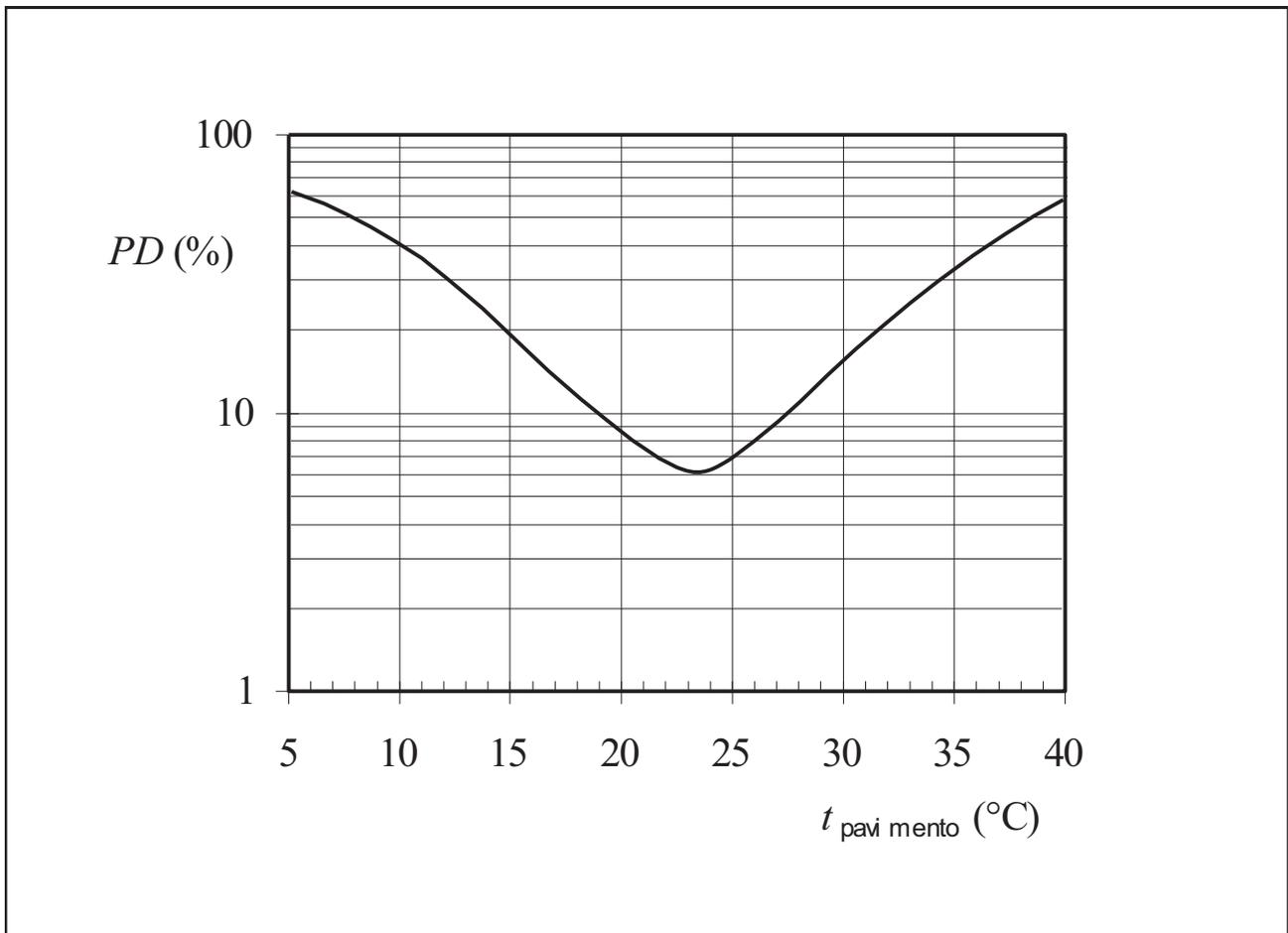


Figura 7. Percentuale di insoddisfatti in funzione della temperatura del pavimento per persone in piedi, in movimento, che indossano scarpe e calze (Olesen, 1977).

Dal diagramma si nota che, anche in condizioni ottimali di temperatura, si registra comunque una percentuale di insoddisfatti pari al 6%.

Correnti d'aria

Un raffreddamento locale indesiderato del corpo dovuto al movimento dell'aria genera il discomfort dovuto a correnti d'aria.

Le correnti d'aria sono uno dei principali fattori di disagio che si presentano all'interno degli ambienti di vita. Spesso, anche in condizioni di neutralità termica, la presenza di correnti d'aria conduce le persone a preferire una maggiore temperatura dell'aria o addirittura l'interruzione del funzionamento degli impianti di ventilazione.

La sensazione di disagio dipende dalla temperatura della corrente d'aria (il discomfort diminuisce per alte temperature), dalla sua differenza rispetto alla temperatura dell'aria ambiente (il discomfort aumenta all'aumentare di questa quantità), dalla zona del corpo che viene investita dalla corrente (le parti più sensibili sono la testa, il collo e le caviglie) e dall'attività dell'individuo (la sensibilità alle correnti diminuisce con l'aumentare dell'attività).

Inoltre, poiché il moto dell'aria negli ambienti è turbolento, la velocità fluttua in maniera notevole, sia nello spazio che nel tempo, rispetto al valore medio, incrementando ulteriormente la sensazione di disagio.

Per valutare il discomfort da correnti d'aria si utilizza l'indice Rischio da correnti d'aria (DR, Draught Rating) che esprime la percentuale di persone che si prevede possano essere infastidite dalla corrente d'aria:

$$DR = (34 - t_a) \cdot (v - 0.05)^{0.62} (0.37 \cdot v \cdot T_u + 34)$$

Esso è funzione della temperatura locale dell'aria, t_a , della velocità media locale dell'aria, v , e dell'intensità locale di turbolenza, T_u .

Quest'ultimo parametro, che quantifica l'irregolarità del moto dell'aria, è definito come il rapporto, in per cento, tra la deviazione standard e la velocità media locale dell'aria.

Asimmetria radiante

Uno dei principali termini che concorrono al bilancio termico del corpo umano è rappresentato dagli scambi termici per radiazione.

Negli spazi indoor può prodursi tuttavia un campo radiante asimmetrico o non uniforme provocato dalla radiazione proveniente da vaste superfici a differente temperatura.

La potenza radiante che incide da un semispazio può allora essere molto differente da quella proveniente dal semispazio opposto; tale condizione può provocare una sensazione di disagio localizzato per gli occupanti.

All'interno degli ambienti residenziali le principali sorgenti di asimmetria radiante sono le vaste superfici vetrate fredde e i pannelli radianti a soffitto, le sorgenti radianti ad alta intensità, come gli spot per l'illuminazione e, non ultima, la radiazione solare.

Il parametro che viene utilizzato per valutare la disomogeneità del campo radiante è l'asimmetria della temperatura radiante, pari alla differenza delle temperature piane radianti valutate sulle facce opposte di una piccola area, l'area test, collocata al baricentro del corpo.

Mediante studi sperimentali, condotti sottoponendo soggetti in neutralità termica ad asimmetrie radianti crescenti, è stata ricavata una relazione tra percentuale di insoddisfatti ed asimmetria della temperatura radiante (Figura 8).

Dagli studi è emersa una differente sensibilità all'asimmetria provocata da superfici verticali o orizzontali e da superfici fredde o calde. Infatti dalla figura 8 si nota che, per medesimi valori di asimmetria della temperatura radiante, una parete calda comporta meno disagio rispetto ad una fredda, mentre un soffitto caldo determina più disagio di uno freddo.

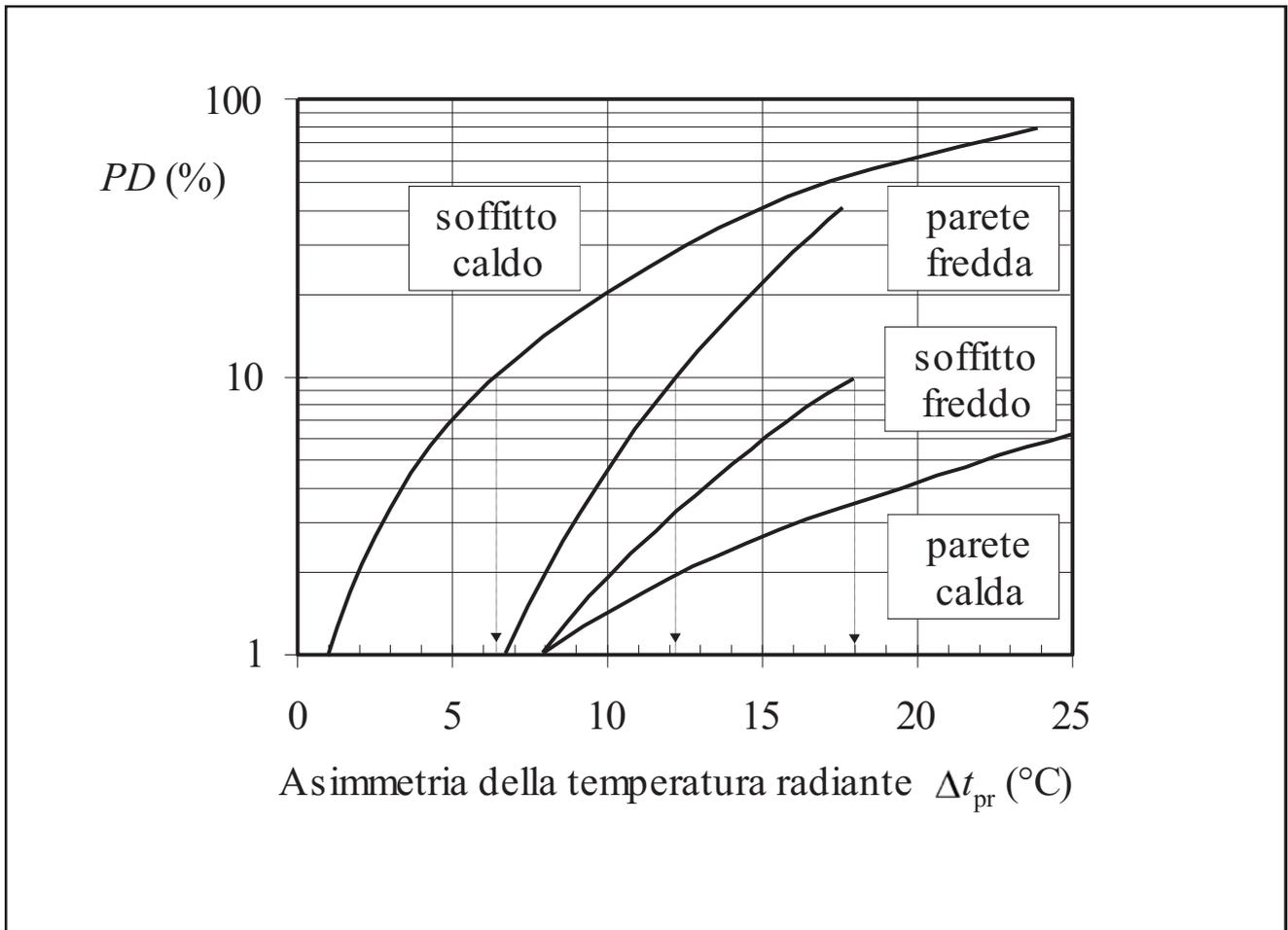


Figura 8. Percentuale di insoddisfatti in funzione dell'asimmetria della temperatura media radiante per pareti orizzontali o verticali, calde o fredde (Fanger et al., 1985). Se si vuole ad esempio mantenere la percentuale di insoddisfatti al di sotto della soglia del 10% è necessario limitare l'asimmetria radiante a 6.5°C per un soffitto caldo, a 12°C per una parete fredda, a 18°C per un soffitto freddo, mentre non vi sono praticamente limitazioni per una parete calda.

La norma ISO 7730

La valutazione degli ambienti termici moderati viene attuata per mezzo della norma ISO 7730, che ha lo scopo di presentare il metodo di previsione della sensazione termica e del grado di discomfort di persone esposte ad un ambiente termico moderato e di specificare le condizioni ambientali termicamente accettabili per il benessere termico.

La condizione di benessere viene valutata utilizzando gli indici della teoria di Fanger, mentre i requisiti prestazionali per l'ambiente sono scelti in modo tale da mantenere la percentuale di

persone insoddisfatte al di sotto della soglia del 10%, sia per quanto riguarda il comfort globale che per le condizioni di discomfort localizzato.

Per la valutazione del comfort globale viene utilizzato l'indice PMV e da esso il PPD.

A tal riguardo, nel testo della norma sono contenute sia la relazione analitica che consente il calcolo del PMV, nonché una serie di tabelle per varie attività metaboliche, da cui, in funzione dell'isolamento termico dell'abbigliamento, della velocità relativa dell'aria e della temperatura operativa, è possibile ricavare il valore del PMV. Infine in appendice alla norma è riportato un programma di calcolo per la valutazione del PMV e del PPD.

Per quanto riguarda i requisiti di benessere si raccomanda di mantenere la percentuale di insoddisfatti al di sotto del 10%, il che corrisponde a ritenere accettabili le condizioni nel momento in cui risulti $-0.5 < \text{PMV} < +0.5$.

Nella norma è anche fornito il diagramma di figura 11, utilizzabile per umidità relativa del 50% e per velocità relativa dell'aria $v_{ar} = 0.3$ (M-1), che consente di determinare la temperatura operativa ottimale, corrispondente a $\text{PMV}=0$, in funzione dell'attività e dell'abbigliamento, nonché le oscillazioni massime della temperatura operativa ottimale tali da mantenere la condizione $-0.5 < \text{PMV} < +0.5$.

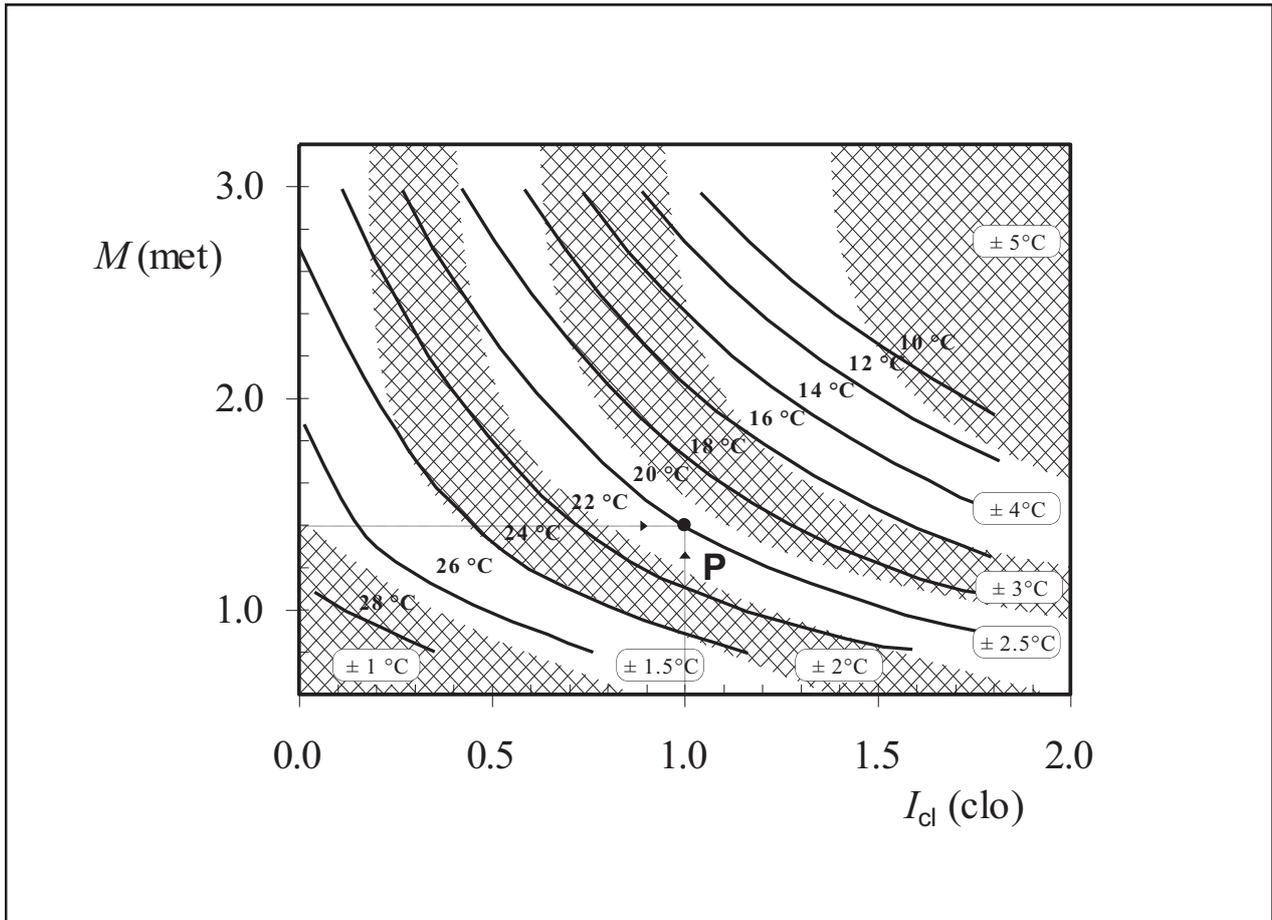


Figura 11. Temperatura operativa ottimale in funzione dell'attività e dell'abbigliamento e intervalli di comfort. Esempio di utilizzazione del diagramma: per un tasso metabolico di 1.4 met e una resistenza termica dell'abbigliamento di 1 clo si individua il punto P a cui corrisponde una temperatura operativa ottimale di 20°C. Poiché il punto cade in una zona caratterizzata da un valore pari a $\pm 2.5^\circ\text{C}$, l'intervallo di temperatura ottimale che consente di mantenere il PMV nell'intervallo $-0.5 < \text{PMV} < +0.5$ sarà $17.5^\circ\text{C} < t_o < 22.5^\circ\text{C}$.

Particolare interesse viene prestato alle condizioni termiche per attività leggera, sedentaria, per le quali vengono definiti i limiti di tabella 8.

| Grandezza | Periodo invernale | Periodo estivo |
|--|-------------------|----------------|
| Temperatura operativa | 20 – 24 °C | 23 – 26 °C |
| Differenza verticale di temperatura | < 3 °C | < 3 °C |
| Temperatura superficiale del pavimento | 19 – 26 °C | non specific. |
| Asimmetria della temperatura radiante dovuta a finestre o superfici fredde verticali | < 10 °C | non specific. |
| Asimmetria della temperatura radiante per un soffitto caldo riscaldato | < 5 °C | non specific. |
| Umidità relativa | 30 – 70 % | 30 – 70 % |

Tabella 8. Requisiti di benessere raccomandati per attività leggera, fondamentalmente sedentaria.

Le variabili ambientali e soggettive

Alcuni parametri soggettivi e microclimatici concorrono alla definizione del comfort termico globale in un ambiente confinato.

Essi si basano su tre principali normative:

- la ISO 8996 (ISO, 1990), per la valutazione del metabolismo energetico;
- la ISO 9920 (ISO, 1995) per la valutazione della resistenza termica dell'abbigliamento;
- la ISO 7726 (ISO, 1998) per la valutazione delle grandezze microclimatiche.

Metabolismo energetico

Il metabolismo energetico è una potenza termica e viene espressa nel sistema internazionale in watt oppure, riferendosi alla superficie unitaria del corpo, in W/m².

E' comunque spesso utilizzata un'unità di misura incoerente, il **met**, definito dalla relazione

$$1 \text{ met} = 58.2 \text{ W/m}^2.$$

Nelle valutazioni di tipo ambientale si fa ricorso a tabelle che consentono di determinare il tasso metabolico in base all'attività svolta.

Una raccolta di tali tabelle si trova nella norma ISO 8996 suddivise in due categorie:

Nelle prime, che consentono valutazioni di massima, è riportato, per varie occupazioni, un intervallo di valori a cui fare riferimento (Tabella 2).

Tabella 2. Energia metabolica per varie occupazioni.

| Occupazione | Energia metabolica (W/m ²) |
|--------------------------|--|
| Artigiani | |
| Muratore | 110 – 160 |
| Falegname | 110 – 175 |
| Vetraio | 90 – 125 |
| Imbianchino | 100 – 130 |
| Panettiere | 110 – 140 |
| Macellaio | 105 – 140 |
| Orologiaio | 55 – 70 |
| Industria | |
| Fabbro | 90 – 200 |
| Saldatore | 75 – 125 |
| Tornitore | 75 – 125 |
| Operatore alla fresa | 80 – 140 |
| Meccanico di precisione | 70 – 110 |
| Agricoltura | |
| Giardiniere | 115 – 90 |
| Conducente di trattore | 85 – 110 |
| Professioni varie | |
| Insegnante | 85 – 100 |
| Commessa | 100 – 120 |
| Segretaria | 70 – 85 |

Le seconde possono essere a loro volta ulteriormente suddivise in due sottoclassi:

- tabelle riferite ad attività specifiche, formalmente analoghe alla tabella 2, ma con attività più dettagliatamente caratterizzate;
- tabelle di aliquote che consentono di determinare il metabolismo energetico come somma
 - del metabolismo basale,
 - dell'aliquota dovuta alla postura o alla velocità di movimento e
 - dell'aliquota dovuta all'attività svolta.

Resistenza termica dell'abbigliamento

La resistenza termica dell'abbigliamento rappresenta la resistenza al flusso di calore opposta dai vestiti e dallo strato d'aria presente tra i vestiti e la pelle.

E' un valore medio riferito all'intero corpo abbigliato e tiene pertanto conto anche delle parti scoperte del corpo, come la testa e le mani.

La resistenza termica è espressa nel sistema internazionale in m^2C/W , ma, normalmente viene utilizzata un'unità di misura incoerente, il **clo**, tale che

$$1 \text{ clo} = 0.155 \text{ m}^2\text{C/W}.$$

Così come per la valutazione del tasso metabolico, anche per la resistenza termica dell'abbigliamento è sufficiente conoscere dei valori approssimati.

Si fa allora ricorso alle tabelle contenute nella ISO 9920.

Esistono due tipologie di tali tabelle:

- quelle contenenti la resistenza termica di tipiche combinazioni di capi di vestiario (tabella 3) e
- quelle contenenti i valori di resistenza dei singoli capi (tabella 4).

Utilizzando quest'ultima categoria di tabelle, che consentono una stima più accurata, la resistenza termica complessiva è ottenuta come somma delle resistenze termiche dei singoli capi.

Tabella 3. Valori di resistenza termica per alcune combinazioni tipiche di capi di abbigliamento.

| Abbigliamento | I_{cl} (clo) | I_{cl} (m²°C/W) |
|---|---------------------------------|---|
| Da lavoro | | |
| Mutande, tuta da lavoro, calzini, scarpe | 0.70 | 0.110 |
| Mutande, camicia, pantaloni, calzini, scarpe | 0.75 | 0.115 |
| Mutande, camicia, tuta da lavoro, calzini, scarpe | 0.80 | 0.125 |
| Mutande, camicia, pantaloni, giacca, calzini, scarpe | 0.85 | 0.135 |
| Mutande, camicia, pantaloni, grembiule, calzini, scarpe | 0.90 | 0.140 |
| Biancheria intima a maniche e gambe corte, camicia, pantaloni, giacca, calzini, scarpe | 1.00 | 0.155 |
| Biancheria intima a maniche e gambe corte, camicia, pantaloni, tuta, calzini, scarpe | 1.10 | 0.170 |
| Biancheria intima a maniche e gambe corte, camicia, pantaloni, giacca, giacca con imbottitura pesante, tuta, calzini, scarpe | 1.85 | 0.285 |
| Biancheria intima a maniche e gambe lunghe, giacca termica e pantaloni, giacca termica per l'esterno e pantaloni, calzini, scarpe | 2.20 | 0.340 |
| Giornaliero | | |
| Slip, maglietta, pantaloncini, calzini leggeri, sandali | 0.30 | 0.050 |
| Slip, camicia a maniche corte, gonna, calze, sandali | 0.55 | 0.080 |
| Mutande, camicia, pantaloni leggeri, calzini, scarpe | 0.60 | 0.095 |
| Slip, sottoveste, calze, abito, scarpe | 0.70 | 0.105 |
| Slip, camicia, gonna, maglione a girocollo, calzettoni spessi al ginocchio, scarpe | 0.90 | 0.140 |
| Slip, camicia, pantaloni, giacca, calzini, scarpe | 1.00 | 0.155 |
| Slip, blusa, gonna lunga, giacca, calze, scarpe | 1.10 | 0.170 |
| 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 |

Tabella 4. Valori di resistenza termica di singoli capi di abbigliamento.

| Capo di abbigliamento | I _{cl} (clo) |
|-----------------------------------|--------------------------|
| Maglieria intima | |
| Slip | 0.03 |
| Maglia a maniche corte | 0.09 |
| Maglia a maniche lunghe | 0.12 |
| Camicie | |
| Leggera, a maniche corte | 0.15 |
| Leggera, a maniche lunghe | 0.20 |
| Di flanella, a maniche lunghe | 0.30 |
| Pantaloni | |
| Corti | 0.06 |
| Leggeri | 0.20 |
| Normali | 0.25 |
| Abiti – gonne | |
| Gonna leggera (estiva) | 0.15 |
| Gonna pesante (invernale) | 0.25 |
| Abito leggero, a maniche corte | 0.20 |
| Abito invernale, a maniche lunghe | 0.40 |
| Maglioni | |
| Gilet | 0.12 |
| Maglione leggero | 0.20 |
| Maglione pesante | 0.35 |
| Giacche | |
| Giacca leggera (estiva) | 0.25 |
| Giacca pesante (invernale) | 0.35 |
| Accessori | |
| Calzini | 0.02 |
| Calzini pesanti lunghi | 0.10 |
| Calze di nylon | 0.03 |
| Scarpe (suola sottile) | 0.02 |
| Scarpe (suola spessa) | 0.04 |

Temperatura dell'aria

È temperatura dello strato d'aria che avvolge il soggetto, al di là dello strato d'aria riscaldata aderente alla persona.

- Influenza lo scambio termico convettivo e lo scambio secco per respirazione;
- interviene nella valutazione del discomfort localizzato dovuto ad elevata differenza verticale di temperatura.

•

Per la sua misurazione possono essere utilizzati:

- termometri ad espansione di liquido o di solido,
- termoresistenze,
- termocoppie o
- termomanometri (ISO, 1998).

Umidità dell'aria

È coinvolta negli scambi termici evaporativi che avvengono per respirazione ed attraverso la superficie della pelle.

Per la misurazione del contenuto di umidità nell'aria ambiente possono essere utilizzati:

- igrometri a condensazione,
- igrometri a variazione di conducibilità elettrica,
- igrometri ad adsorbimento e psicrometri (ISO, 1998).

•

Velocità dell'aria

La velocità dell'aria interviene negli scambi termici per convezione e nel discomfort da correnti d'aria.

La velocità dell'aria all'interno degli ambienti è turbolenta, e varia rapidamente in direzione ed intensità.

Nelle valutazioni di comfort globale ci si riferisce allora al suo valore medio in intervalli di qualche secondo.

Nella valutazione del comfort globale si fa riferimento alla velocità relativa dell'aria che è un parametro corretto per tener conto del movimento del soggetto all'interno dell'ambiente.

Nota la velocità dell'aria, la velocità relativa viene calcolata con la seguente espressione, funzione del metabolismo energetico:

$$v_{ar} = v_a + 0.0052(M - 58)$$

Misura della velocità dell'aria:

- in presenza di un flusso unidirezionale la misurazione può essere condotta utilizzando
 - anemometri a coppe oppure

- anemometri a filo caldo.
- Se non si individua una direzione prevalente, andrà invece utilizzata strumentazione insensibile alla direzione del flusso d'aria e potranno allora essere utilizzati:
 - anemometri a sfera calda,
 - anemometri ad ultrasuoni e
 - anemometri laser-doppler.

Temperatura media radiante

È la temperatura uniforme di una cavità nera in cui il soggetto scambierebbe per radiazione la stessa energia che scambia nell'ambiente reale non uniforme.

- ❖ Dipende dalla temperatura superficiale di tutte le superfici che si trovano attorno alla persona e dalla radiazione emessa da sorgenti ad alta intensità;
- ❖ Viene utilizzata per caratterizzare gli scambi radiativi relativamente al comfort globale.

La temperatura media radiante viene direttamente misurata utilizzando

- globotermometri o
- radiometri a due sfere
- oppure calcolata a partire dalle temperature delle superfici dell'ambiente
- o a partire dalle temperature piane radianti valutate in sei direzioni tra loro ortogonali (ISO, 1998).

Temperatura operativa

Viene spesso utilizzata per la valutazione delle condizioni climatiche negli ambienti confinati.

La norma ISO 7730 (ISO, 1994) fornisce delle tabelle che, in funzione di essa, consentono di calcolare il voto medio previsto.

La temperatura operativa è definita come

«la temperatura uniforme di una cavità in cui il soggetto scambierebbe per irraggiamento e convezione la stessa energia che effettivamente scambia nell'ambiente reale non uniforme»

Dipende quindi dagli scambi radiativi e convettivi e viene calcolata con la relazione:

$$t_o = \frac{h_r \bar{t}_r + h_c t_a}{h_r + h_c}$$

in cui h_c e h_r sono rispettivamente la conduttanza termica unitaria convettiva e radiativa.

Poiché si incontrano delle difficoltà nel valutare le due conduttanze termiche unitarie, la ISO 7730 propone due espressioni semplificate

(da applicarsi quando la velocità relativa dell'aria è bassa (< 0.2 m/s) o quando la differenza tra la temperatura media radiante e la temperatura dell'aria è piccola ($< 4^\circ\text{C}$))

La prima fornisce un valore della temperatura operativa dipendente dalla velocità relativa dell'aria per mezzo di un coefficiente A:

$$t_o = At_a + (1 - A)t_r$$

Tabella 5. Valori del coefficiente A da utilizzare per il calcolo della temperatura operativa.

| Velocità relativa dell'aria (m/s) | Coefficiente A |
|--------------------------------------|----------------|
| < 0.2 | 0.5 |
| 0.2 – 0.6 | 0.6 |
| 0.6 – 1.0 | 0.7 |

La seconda espressione è una invece semplice media aritmetica dei valori delle due temperature dalle quali la temperatura operativa dipende:

$$t_o = \frac{t_a + \bar{t}_r}{2}$$

Valutazione del PMV con le tabelle della norma ISO 7730

La norma ISO 7730 contiene 9 tabelle per il calcolo del PMV.

Ciascuna tabella è riferita

- ad un assegnato livello metabolico
- ad una umidità relativa del 50%;

all'interno di ognuna di esse il valore del PMV è riportato per vari valori

- della resistenza termica
- dell'abbigliamento,
- della temperatura operativa e
- della velocità relativa dell'aria.

A titolo di esempio, si supponga di trovarsi a svolgere

- attività sedentaria ($M=1$ met),
- abbigliati con vestiti aventi una resistenza termica di 1 clo,
- in un ambiente con umidità relativa del 50%,
- temperatura dell'aria pari a 19°C ,
- temperatura media radiante di 21°C e
- velocità relativa dell'aria di 0.10 m/s.

Utilizzando la relazione (20) è possibile calcolare la temperatura operativa, che risulta essere pari a 20°C .

Noto questo valore si può ricavare dalla tabella 7 il valore del PMV che risulta essere pari a -0.87.

Il soggetto avrà allora una sensazione di freddo.

Tabella 7. Determinazione del PMV:livello di attività 58 W/m² (1 met).

| I_{cl} (clo) | I_{cl} (m ² °C/W) | t_o (°C) | v_{ar} (m/s) | | | | | | | |
|-------------------|-----------------------------------|---------------|----------------|--------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | | | < 0.10 | 0.10 | 0.15 | 0.20 | 0.30 | 0.40 | 0.50 | 1.00 |
| 0 | 0 | 26 | -1.62 | -1.62 | -1.96 | -2.34 | | | | |
| | | 27 | -1.00 | -1.00 | -1.36 | -1.69 | | | | |
| | | 28 | -0.39 | -0.42 | -0.76 | -1.05 | | | | |
| | | 29 | 0.21 | 0.13 | -0.15 | -0.39 | | | | |
| | | 30 | 0.80 | 0.68 | 0.45 | 0.26 | | | | |
| | | 31 | 1.39 | 1.25 | 1.08 | 0.94 | | | | |
| | | 32 | 1.96 | 1.83 | 1.71 | 1.61 | | | | |
| 0.25 | 0.039 | 33 | 2.50 | 2.41 | 2.34 | 2.29 | | | | |
| | | 24 | -1.52 | -1.52 | -1.80 | -2.06 | -2.47 | | | |
| | | 25 | -1.05 | -1.05 | -1.33 | -1.57 | -1.94 | -2.24 | -2.48 | |
| | | 26 | -0.58 | -0.61 | -0.87 | -1.08 | -1.41 | -1.67 | -1.89 | -2.66 |
| | | 27 | -0.12 | -0.17 | -0.40 | -0.58 | -0.87 | -1.10 | -1.29 | -1.97 |
| | | 28 | 0.34 | 0.27 | 0.07 | -0.09 | -0.34 | -0.53 | -0.70 | -1.28 |
| | | 29 | 0.80 | 0.71 | 0.54 | 0.41 | 0.20 | 0.04 | -0.10 | -0.58 |
| 0.50 | 0.078 | 30 | 1.25 | 1.15 | 1.02 | 0.91 | 0.74 | 0.61 | 0.50 | 0.11 |
| | | 31 | 1.71 | 1.61 | 1.51 | 1.43 | 1.30 | 1.20 | 1.12 | 0.83 |
| | | 23 | -1.10 | -1.10 | -1.33 | -1.51 | -1.78 | -1.99 | -2.16 | |
| | | 24 | -0.72 | -0.74 | -0.95 | -1.11 | -1.36 | -1.55 | -1.70 | -2.22 |
| | | 25 | -0.34 | -0.38 | -0.56 | -0.71 | -0.94 | -1.11 | -1.25 | -1.71 |
| | | 26 | 0.04 | -0.01 | -0.18 | -0.31 | -0.51 | -0.66 | -0.79 | -1.19 |
| | | 27 | 0.42 | 0.35 | 0.20 | 0.09 | -0.08 | -0.22 | -0.33 | -0.68 |
| 0.75 | 0.116 | 28 | 0.80 | 0.72 | 0.59 | 0.49 | 0.34 | 0.23 | 0.14 | -0.17 |
| | | 29 | 1.17 | 1.08 | 0.98 | 0.90 | 0.77 | 0.68 | 0.60 | 0.34 |
| | | 30 | 1.54 | 1.45 | 1.37 | 1.30 | 1.20 | 1.13 | 1.06 | 0.86 |
| | | 21 | -1.11 | -1.11 | -1.30 | -1.44 | -1.66 | -1.82 | -1.95 | -2.36 |
| | | 22 | -0.79 | -0.81 | -0.98 | -1.11 | -1.31 | -1.46 | -1.58 | -1.95 |
| | | 23 | -0.47 | -0.50 | -0.66 | -0.78 | -0.96 | -1.09 | -1.20 | -1.55 |
| | | 24 | -0.15 | -0.19 | -0.33 | -0.44 | -0.61 | -0.73 | -0.83 | -1.14 |
| 1.00 | 0.155 | 25 | 0.17 | 0.12 | -0.01 | -0.11 | -0.26 | -0.37 | -0.46 | -0.74 |
| | | 26 | 0.49 | 0.43 | 0.31 | 0.23 | 0.09 | 0.00 | -0.08 | -0.33 |
| | | 27 | 0.81 | 0.74 | 0.64 | 0.56 | 0.45 | 0.36 | 0.29 | 0.08 |
| | | 28 | 1.12 | 1.05 | 0.96 | 0.90 | 0.80 | 0.73 | 0.67 | 0.48 |
| | | 20 | -0.85 | -0.87 | -1.02 | -1.13 | -1.29 | -1.41 | -1.51 | -1.81 |
| | | 21 | -0.57 | -0.60 | -0.74 | -0.84 | -0.99 | -1.11 | -1.19 | -1.47 |
| | | 22 | -0.30 | -0.33 | -0.46 | -0.55 | -0.69 | -0.80 | -0.88 | -1.13 |
| 1.50 | 0.233 | 23 | -0.02 | -0.07 | -0.18 | -0.27 | -0.39 | -0.49 | -0.56 | -0.79 |
| | | 24 | 0.26 | 0.20 | 0.10 | 0.02 | -0.09 | -0.18 | -0.25 | -0.46 |
| | | 25 | 0.53 | 0.48 | 0.38 | 0.31 | 0.21 | 0.13 | 0.07 | -0.12 |
| | | 26 | 0.81 | 0.75 | 0.66 | 0.60 | 0.51 | 0.44 | 0.39 | 0.22 |
| | | 27 | 1.08 | 1.02 | 0.95 | 0.89 | 0.81 | 0.75 | 0.71 | 0.56 |
| | | 14 | -1.36 | -1.36 | -1.49 | -1.58 | -1.72 | -1.82 | -1.89 | -2.12 |
| | | 16 | -0.94 | -0.95 | -1.07 | -1.15 | -1.27 | -1.36 | -1.43 | -1.63 |
| 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 | | |