

DISAGIO E STRESS TERMICO: EFFETTI, NORMATIVE, VALUTAZIONE E CONTROLLO

G. Alfano, F.R. d'Ambrosio, G. Riccio

Dipartimento di Energetica Termofluidodinamica applicata e Condizionamenti ambientali (DETEC), Università di Napoli

PREMESSA

Nei recenti dispositivi legislativi (626/94 e 242/96) sembra quasi che i problemi di comfort e di sicurezza degli ambienti dal punto di vista termico non siano contemplati. In effetti ci sono solo degli accenni del tutto generali, che sono sintetizzati nelle **Tablelle 1 e 2**.

Questa lacuna della legislazione recentemente approvata contrasta con lo stato della normativa tecnica del settore, molto dettagliata e talvolta addirittura specialistica. Nella **Tabella 3** si riportano le norme vigenti a livello ISO, EN e UNI, molte delle quali verranno analizzate nel seguito, e nella **Tabella 4** quelle in corso di elaborazione, sulle quali per mancanza di spazio non ci si soffermerà.

1. CENNI DI TERMOREGOLAZIONE DEL CORPO UMANO

Nella fisiologia della termoregolazione il corpo umano generalmente si suddivide in due zone: una esterna, costituita dalla pelle e dai tessuti sottocutanei, ed una interna, o nucleo, comprendente gli organi vitali. Le due zone sono caratterizzate da temperature diverse. In un soggetto sano la temperatura della zona interna, t_{cr} , è quasi costante ed è mediamente uguale a 37°C , variando di circa $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$ nell'arco della giornata. La temperatura della pelle, t_{sk} , non è uniforme e quando si parla di t_{sk} ci si riferisce in realtà ad una opportuna media aritmetica delle temperature della pelle misurate in punti particolari.

La funzione di mantenere quasi isoterma il nucleo del corpo è delegata al sistema di termoregolazione. Esistono due tipi di termoregolazione:

- vasomotoria (contro il caldo e contro il freddo);
- comportamentale (contro il caldo e contro il freddo).

L'energia termica che, come si vedrà, viene generata all'interno del corpo umano, viene poi dispersa verso l'ambiente essenzialmente attraverso la pelle, sia per convezione ed irraggiamento che per evaporazione. La termoregolazione vasomotoria interessa i capillari periferici; volendo modellizzare il fenomeno si può supporre che i

capillari siano dotati di sfinteri (valvole), che, aprendosi o chiudendosi, permettono o impediscono l'afflusso di sangue. Secondo questo modello negli ambienti freddi si ha la chiusura delle valvole (vasocostrizione) con diminuzione dell'afflusso di sangue verso la periferia e con conseguente diminuzione della temperatura superficiale e dello scambio termico con l'esterno. Negli ambienti caldi si riscontra la situazione opposta: l'apertura degli sfinteri determina un aumento dell'afflusso di sangue alla periferia, con conseguente aumento della temperatura della pelle e dello scambio termico con l'esterno (vasodilatazione).

Nel caso in cui la termoregolazione vasomotoria non sia sufficiente ad assicurare l'omeotermia del nucleo, interviene la termoregolazione comportamentale. Contro il freddo essa si manifesta con il brivido, che consiste nell'attivazione di quasi tutti i gruppi muscolari, con lavoro meccanico nullo e con aumento della generazione di energia termica all'interno del corpo. La termoregolazione comportamentale contro il caldo consiste nella sudorazione, di cui si parlerà in seguito.

Se neanche la termoregolazione comportamentale è sufficiente ad assicurare l'omeotermia si può avere: negli ambienti freddi ipotermia (fino alla morte per fibrillazione cardiaca); negli ambienti caldi ipertermia (fino alla morte per danni irreversibili alle proteine dei tessuti nervosi).

2. BILANCIO DI ENERGIA TERMICA SUL CORPO UMANO

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

$$S = M - W - E - E_{res} - C_{res} - C - R - K \quad (1)$$

con:

- S = variazione di energia interna del corpo umano nell'unità di tempo, W;
- M = metabolismo energetico, W;
- W = potenza meccanica scambiata tra il corpo e l'ambiente, W;
- E = potenza termica dispersa per evaporazione dalla pelle, W;
- E_{res} = potenza termica dispersa nella respirazione come "calore latente", W;
- C_{res} = potenza termica dispersa nella respirazione come "calore sensibile", W;
- C = potenza termica dispersa per convezione, W;
- R = potenza termica dispersa per irraggiamento, W;
- K = potenza termica dispersa per conduzione, W.

Spesso i termini che compaiono nella (1) sono riferiti all'unità di area della superficie del corpo umano nudo, A_b , e sono perciò espressi in W/m^2 .

Qui di seguito sarà brevemente illustrato il significato fisico e/o fisiologico di ciascuno dei termini che compaiono nella (1).

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

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

Potenza meccanica - La potenza meccanica, W , rappresenta l'energia che nell'unità di tempo l'uomo scambia con l'ambiente sotto forma di lavoro: è positiva se l'uomo compie lavoro sull'ambiente, negativa se l'ambiente compie lavoro sull'uomo.

Spesso alla potenza meccanica viene attribuito un valore nullo, sia perché per molti dei casi valutati si sono ottenuti valori comunque prossimi allo zero, sia perché per molte attività umane non è stata misurata.

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

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

La diffusione attraverso la pelle è un fenomeno indipendente dal sistema di termoregolazione.

La sudorazione consiste in varie fasi:

1. le ghiandole sudoripare, che sono situate immediatamente sotto la pelle e che sono sotto il controllo dell'ipotalamo, secernono il sudore, costituito prevalentemente da una soluzione acquosa di cloruro di sodio;
2. il sudore arriva sulla superficie esterna della pelle attraverso appositi condotti;
3. il sudore si sparge sulla superficie della pelle ricoprendola di un film sottile;
4. a regime permanente ed in assenza di gocciolamento, tutto il sudore passa come vapore nell'aria per evaporazione.

La produzione oraria di sudore dipende dai segnali di temperatura che giungono all'ipotalamo sia dalla pelle che dal nucleo; la relazione è piuttosto complessa ed esula da questa trattazione.

In ogni caso sia E_d che E_{sw} , e quindi E , possono essere espresse in funzione delle seguenti variabili:

- temperatura della pelle, t_{sk} ;
- temperatura dell'aria, t_a ;
- resistenza dell'abbigliamento alla trasmissione del vapor d'acqua;
- velocità relativa soggetto-aria, v_{ar} , grandezza sulla quale ci si soffermerà nel seguito;
- grado igrometrico dell'aria, ϕ ;

- percentuale di pelle bagnata dal sudore, w .

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

La potenza termica connessa alla respirazione può essere vista come somma di due aliquote: quella per "calore latente", E_{res} , e quella per "calore sensibile", C_{res} .

La potenza termica dispersa nella respirazione è funzione delle seguenti variabili:

- attività svolta dall'individuo, M ;
- grado igrometrico dell'aria, ϕ ;
- temperatura dell'aria, t_a .

Potenza termica dispersa per convezione - La potenza termica dispersa per convezione, C , è funzione delle seguenti variabili:

- temperatura della pelle, t_{sk} ;
- temperatura dell'aria, t_a ;
- resistenza termica dell'abbigliamento, I_{ci} ;
- velocità relativa soggetto-aria, v_{ar} (solo nel caso di convezione forzata).

La velocità relativa dipende dal movimento e quindi dall'attività del soggetto; in generale è calcolabile in maniera approssimativa con relazioni empiriche; qui di seguito si riporta una delle più usate:

$$v_{ar} = v_a + 0,005(M - 58,15) \quad (2)$$

con :

v_a = velocità misurata, m/s.

Potenza termica dispersa per irraggiamento - La potenza termica dispersa per irraggiamento è funzione delle seguenti variabili:

- temperatura della pelle, t_{sk} ;
- resistenza termica dell'abbigliamento, I_{ci} , della quale si parlerà al punto 3.
- temperatura media radiante, t_r .

La temperatura media radiante è definita come la temperatura di un ambiente fittizio termicamente uniforme che scambierebbe con il corpo umano la stessa potenza termica radiante scambiata nell'ambiente reale. La t_r è data con ottima approssimazione dalla seguente relazione:

$$t_r = \sum t_i F_{p-i} \quad (3)$$

con:

- t_i = temperatura della generica superficie isoterma di solido (parete, suppellettili, altra persona, ecc.) che vede il soggetto, °C;
 F_{p-i} = fattore di vista tra il soggetto e la generica superficie isoterma di solido, grandezza puramente geometrica calcolabile da diagrammi o da relazioni analitiche, adim.

La (3) chiarisce bene il concetto di temperatura media radiante, sulla cui misura ci si soffermerà nel seguito.

Potenza termica dispersa per conduzione - Il termine K rappresenta la potenza termica dispersa per conduzione attraverso i solidi a contatto con il corpo umano. Rientrano quindi in K la potenza termica che si scambia tra i piedi e il pavimento, quella che si scambia con la sedia (nel caso di soggetto seduto), quella che il soggetto scambia con gli oggetti tenuti in mano e così via.

Quasi sempre il termine K, di difficile valutazione, è trascurabile e pertanto nella pratica generalmente non se ne tiene conto. In ogni caso, se K non è trascurabile o se se ne vuole comunque tener conto, si può variare opportunamente il valore della resistenza termica dell'abbigliamento. Questo metodo è sistematicamente usato per le sedie nel caso di soggetti seduti.

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

La potenza termica secca viene talvolta espressa in funzione di una particolare temperatura media, la temperatura operativa (detta anche temperatura operante), t_o , opportuna media tra la temperatura dell'aria e la temperatura media radiante. Spesso, soprattutto negli ambienti termicamente moderati (cfr. l'ultimo capoverso del punto 2.), si può assumere t_o pari proprio alla media aritmetica di t_a e t_r .

Variazione di energia interna del corpo umano nell'unità di tempo - La variazione di energia interna del corpo umano nell'unità di tempo, S, rappresenta l'accumulo di energia per unità di tempo che si verifica nel corpo proprio in conseguenza della sua attività e dei diversi scambi energetici con l'ambiente circostante.

Quando una persona si trova in un determinato ambiente, dopo un certo tempo le diverse grandezze del bilancio, anche per effetto dei meccanismi di termoregolazione, tendono sempre ad equilibrarsi e l'accumulo orario tende ad annullarsi. Quando S si annulla il corpo umano raggiunge uno stato termico di regime permanente, caratterizzato dalla costanza dei valori delle variabili fisiologiche (t_{sk} , w e t_{cr}). Come si vedrà ai punti 5. e 6., se S non è ancora nullo quando la temperatura interna raggiunge valori al di sotto di 35 °C o al di sopra di 38 °C, allora l'uomo è certamente in una situazione di grave pericolo. Se S si annulla per un valore della temperatura

interna compresa nel suddetto intervallo (35-38 °C), lo stato termico non è detto che sia di comfort e può essere anche di intenso discomfort.

Da qui l'importanza di poter prevedere lo stato termico e le reazioni psicologiche e/o fisiologiche per l'uomo esposto.

Variabili indipendenti nella valutazione dello stato termico del corpo umano -

Dall'analisi dei diversi termini del bilancio termico sul corpo umano, si evince che alla determinazione dello stato termico per il corpo umano contribuiscono quattro parametri fisici dell'ambiente:

1. temperatura dell'aria, t_a ,
2. velocità dell'aria, v_a ,
3. grado igrometrico o umidità relativa, ϕ ,
4. temperatura media radiante, t_r ,

e due grandezze "personali":

1. l'attività che l'uomo compie, ovvero il metabolismo energetico, M ,
2. e la resistenza termica dell'abbigliamento, I_{cl} .

In verità, scorrendo l'elenco delle variabili dalle quali dipendono a loro volta i diversi termini, bisognerebbe aggiungere la resistenza alla trasmissione del vapore d'acqua dell'abbigliamento, grandezza che però spesso dipende proprio dalla resistenza termica dell'abbigliamento.

L'insieme di queste sei variabili viene generalmente chiamato ambiente termico.

Nel seguito, si richiameranno innanzitutto i metodi di valutazione o di misura di queste sei variabili; quindi si indicheranno i principali criteri di valutazione degli ambienti termici, che sono suddivisi in ambienti termici moderati, ambienti termici severi freddi e ambienti termici severi caldi, intendendo per termicamente moderati quegli ambienti nei quali l'obiettivo è il raggiungimento del comfort termico (p.e. gli edifici residenziali, gli uffici, i CED, etc.) e per ambienti termicamente severi quelli nei quali l'obiettivo non è certamente il comfort ma la sicurezza, nei quali cioè è scontato che non si raggiungano le condizioni di benessere termoigrometrico e bisogna invece preoccuparsi dei rischi che corre l'individuo.

3. MISURA E/O VALUTAZIONE DELLE GRANDEZZE CHE DETERMINANO L'AMBIENTE TERMICO

Metabolismo energetico - Il metabolismo energetico, che viene chiamato in modi diversi, quali per esempio energia metabolica e tasso metabolico, può essere distinto in due aliquote:

- il metabolismo energetico basale, che è quello necessario per il funzionamento degli organi vitali e che si misura nel soggetto a riposo fisico e mentale, digiuno da 12-18 ore, in condizioni di neutralità termica; vale all'incirca 43 W/m^2 ;
- metabolismo energetico legato all'attività.

Per la valutazione del metabolismo energetico per il quale viene spesso usata l'unità incoerente "met", essendo

$$1 \text{ met} = 58,2 \text{ W/m}^2 = 50,0 \text{ kcal/hm}^2 \quad (4)$$

esistono essenzialmente due metodi:

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

La misura diretta, che si basa principalmente sulla valutazione del consumo di ossigeno, pur fornendo valori precisi dell'energia metabolica è però lunga e complessa; qualora siano sufficienti valori approssimati, o non sia possibile effettuare la misura, si può ricorrere a tabelle. Le più semplici riportano i valori di energia metabolica per un certo numero di occupazioni; un esempio è riportato nella **Tabella 5**.

Sia i metodi di misura che i metodi di valutazione sono riportati nella norma UNI-EN 28996 (cfr. **Tabella 3**).

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

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

$$1 \text{ clo} = 0,155 \text{ m}^2\text{K/W} = 0,180 \text{ m}^2\text{Kh/kcal} \quad (5)$$

Si noti che un abbigliamento tipico estivo ha una resistenza termica di $0,5 \div 0,6$ clo, mentre un abbigliamento tipico invernale ha una resistenza di $0,9 \div 1,0$ clo.

La resistenza termica dell'abbigliamento è una grandezza molto difficile da misurare in quanto richiede laboratori appositamente attrezzati (in Italia non ne esistono ancora); viene pertanto generalmente valutata da tabelle, alcune delle quali, se ne ha un esempio in **Tabella 6**., riportano la resistenza termica di singoli capi d'abbigliamento, $I_{cl,u}$, altre, come quella di **Tabella 7**., riportano la resistenza termica, I_{cl} , di combinazioni di capi, esistendo relazioni che permettono di passare dalla resistenza dei singoli capi, $I_{cl,u}$, a quella dell'abbigliamento, I_{cl} . Di queste relazioni la più usata è la seguente:

$$I_{cl} = \sum I_{cl,u} \quad (6)$$

Sia i metodi di misura che i metodi di valutazione della resistenza termica dell'abbigliamento sono riportati nella norma ISO 9920 (cfr. **Tabella 3**), che probabilmente diventerà norma europea nel prossimo anno, essendo in corso la procedura di recepimento.

Temperatura dell'aria - È sicuramente tra le sei grandezze quella più facile a misurarsi: è il valore che ci fornisce un buon termometro a mercurio o un qualunque altro sensore di temperatura (p. e. il giunto di una termocoppia). Bisogna però stare attenti a non commettere un errore piuttosto frequente: il sensore deve essere in e-

quilibrio con l'aria e non deve perciò ricevere radiazioni termiche da corpi a temperatura diversa da quella dell'aria, deve essere cioè opportunamente schermato.

Grado igrometrico - Il grado igrometrico è definito come il rapporto tra la pressione parziale del vapor d'acqua nell'aria, p_a , e la pressione parziale massima di vapor d'acqua, p_{vs} , che si può avere a quella temperatura. La pressione parziale massima dipende unicamente dalla temperatura dell'aria e pertanto la valutazione di ϕ è legata alla valutazione di p_a .

In pratica vengono usati diversi strumenti per la determinazione di p_a o di ϕ . I principali sono i seguenti:

- a) igrometro a condensazione,
- b) termometro a bulbo bagnato a convezione forzata,
- c) termometro a bulbo bagnato a convezione naturale,
- d) igrometro a capello.

Velocità dell'aria - Generalmente si usano strumenti "a filo caldo", che si basano sul principio che lo scambio termico convettivo tra un elemento caldo e l'aria è proporzionale alla velocità dell'aria. Bisogna però stare attenti a non usare strumenti con elementi "caldi" cilindrici, che sono unidirezionali e vanno perciò usati quando si conosce la direzione del vettore velocità dell'aria, per esempio per misurare la velocità dell'aria nei canali. Nelle misure ambientali la direzione del vettore velocità non si può prevedere, e spesso è mutevole, e quindi va usato un sensore omnidirezionale, generalmente costituito da un elemento caldo sferico.

Temperatura media radiante - La temperatura media radiante si valuta essenzialmente con tre metodi:

- a) con il globotermometro,
- b) con i fattori di vista,
- c) con la temperatura radiante piana.

a) *Metodo del globotermometro* - Il globotermometro consiste in una sfera metallica di spessore molto sottile, generalmente del diametro di 0,15 m, verniciata di nero, all'interno della quale è posto un sensore di temperatura (bulbo di un termometro a mercurio, termocoppia, etc.). A regime permanente la temperatura del globo, t_g , coincide con quella del termometro in esso contenuto e dipende da t_a , da v_a e da t_r . Pertanto note t_a e v_a , da t_g si ricava t_r .

b) *Metodo dei fattori di vista* - Come si è detto al punto 2 la temperatura media radiante è data con ottima approssimazione dalla relazione (3), per applicare la quale bisogna conoscere le temperature t_i ed i fattori di vista. Le t_i possono essere misurate oppure, in fase di progettazione, calcolate o ipotizzate. Per i fattori di vista si possono utilizzare dei diagrammi e delle relazioni analitiche.

c) *Metodo delle temperature piane radianti* - La temperatura piana radiante (o radiante piana), t_{pr} , è la temperatura misurata da un radiometro piano (elemento piano annerito, su cui sono disposti giunti di termocoppie tra loro in serie, e protetto dallo

scambio convettivo mediante una semisfera di polietilene, sostanza trasparente alle radiazioni infrarosse).

Si dimostra che la temperatura piana radiante è una misura del flusso raggianti che proviene dai corpi circostanti sulla superficie del radiometro e si dimostra pure che la temperatura media radiante è ottenibile da un'opportuna media delle sei temperature medie radianti che si misurano secondo tre assi cartesiani ortogonali.

I metodi di misura per le quattro grandezze microclimatiche (t_a , t_r , v_a e ϕ) sono riportati dalla norma UNI-EN 27726 (cfr. **Tabella 3**), nella quale sono anche riportate le caratteristiche di precisione e di costante di tempo che devono avere gli strumenti.

4. AMBIENTI TERMICAMENTE MODERATI

4.1 *Comfort termico ed indici di benessere*

La condizione di comfort termico, anche detta di benessere termoigrometrico, può essere definita, dal punto di vista psicologico, come lo stato psicofisico in cui il soggetto esprime soddisfazione nei riguardi dell'ambiente termico, oppure, dal punto di vista termosensoriale, come la condizione in cui il soggetto non ha né sensazione di caldo né sensazione di freddo, cioè una condizione termoigrometricamente neutra; le due definizioni sono del tutto equivalenti.

Negli ambienti moderati il problema è quindi quello di valutare lo scostamento delle condizioni reali da quelle di benessere; questo problema si risolve mediante opportuni indici, gli indici di comfort globale, che sono funzione dei valori delle sei variabili da cui il comfort dipende (cfr. punto 2) e che assumono lo stesso valore per tutte quelle combinazioni di queste variabili cui corrispondono uguali sensazioni termiche. Questi indici si dicono globali perché si valutano in funzione dei valori medi spaziali delle quattro variabili ambientali.

Lo studio degli ambienti termicamente moderati non si esaurisce con la valutazione degli indici di comfort globale: è necessario anche valutare se sussistono condizioni di discomfort "localizzato", di cui si parlerà punto 4.4.

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

4.2 *L'indice PMV (Predicted Mean Vote)*

L'indice PMV (Voto Medio Previsto), proposto da Fanger, è definito sulla scala bipolare a 7 punti:

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

Si basa su due assunzioni fatte da Fanger analizzando le esperienze condotte su circa 1300 individui

- a) La sensazione di caldo o di freddo che prova un individuo è proporzionale al "carico termico", L , definito come la differenza tra l'energia termica che si genera all'interno del corpo umano, $(M - W)$, e l'energia termica che l'individuo disperderebbe se fosse in benessere con il valore reale dell'attività svolta.
- b) La relazione tra l'indice PMV, ovvero la sensazione di caldo o di freddo avvertita da un individuo medio espressa come voto sulla scala a sette punti, ed il carico termico ora definito è la seguente:

$$PMV = [0,303 \exp(-0,036M) + 0,028]L \quad (7)$$

Dalla (7) si perviene a delle equazioni che permettono la valutazione dell'indice PMV dalle sei grandezze esaminate al punto 2.

Da quanto detto si evince che la condizione di neutralità termica è caratterizzata da un valore nullo dell'indice PMV.

Si noti che analizzando le equazioni per il calcolo del PMV, risulta che per gli ambienti moderati l'umidità, al contrario delle altre tre variabili ambientali, influisce molto poco sul valore della sensazione termica. In particolare risulta che a parità di valori delle altre quattro variabili, per ottenere lo stesso valore di PMV la t_a deve variare al massimo di 1°C passando da $\phi = 0,30$ a $\phi = 0,70$; questi due valori di ϕ rappresentano i limiti, accettati un po' da tutti, entro i quali è consigliabile rimanere. È comunque opportuno chiarire che tali limiti sono dovuti a motivi indipendenti dalle sensazioni termiche: per valori minori di $0,30$ si seccano le mucose con diminuzione delle difese da germi e batteri, per valori maggiori di $0,70$ aumentano i rischi di allergie e le probabilità che si formi condensa su punti freddi con conseguente sviluppo di muffe.

L'indice PMV si è molto diffuso negli ultimi dieci anni ed è alla base della norma UNI-EN-ISO 7730 (cfr. **Tabella 3**). Il valore del PMV può essere calcolato con programmi di calcolo o con tabelle che si trovano anche nella norma citata.

La UNI-EN-ISO 7730 considera condizioni di comfort quelle caratterizzate da valori di PMV compresi tra $+0,50$ e $-0,50$.

4.3 L'indice PPD (Predicted Percentage of Dissatisfied)

Come detto, il PMV rappresenta il voto di un individuo medio, ovvero la media dei voti espressi da un gran numero di persone poste in certe condizioni sperimentali. Sempre sperimentalmente, si è visto che i voti dei singoli individui presentano una certa dispersione intorno al valore medio, il che è rappresentativo di insoddisfazione; Fanger definì PPD la percentuale prevista di insoddisfatti e la correlò al PMV, ottenendo il diagramma di **Figura 1**; dalla figura si evince che la percentuale di insoddisfatti, ovvero l'indice PPD, è pari al 5% per PMV uguale a 0, diventa il 10% ai limiti dell'intervallo di benessere (+0,50/0,50) e cresce rapidamente all'allontanarsi del PMV dai valori di comfort. Questo risultato, universalmente accettato, evidenzia come le risposte soggettive siano molto diverse tra di loro e come sia quindi impensabile realizzare condizioni che siano di comfort per tutti.

Nella **Figura 2** è riportato un diagramma di grande utilità nella pratica, che riporta le curve rappresentative della t_o di benessere in funzione di I_{cl} e di M . È valido per $\phi = 0,50$ e $W = 0$; la velocità è calcolata con la (4) ponendo $v_a = 0$.

Il diagramma è diviso in zone, ciascuna caratterizzata da un Δt ammissibile, intendendo per Δt ammissibile lo scarto tra la temperatura operativa reale e quella di benessere con il quale, a parità di altre variabili, si rimane nel campo dei valori ammissibili per PPD (5-10%). Per esempio per $M = 2,0$ met ed $I_{cl} = 1,00$ clo, dal diagramma di **Figura 2** si ricava innanzitutto che la t_o di benessere è all'incirca $16,5^\circ\text{C}$; si ricava inoltre che il Δt ammissibile è di 3°C , ovvero che per t_o compresa nell'intervallo $13,5 \div 19,5^\circ\text{C}$, si è nel campo di PPD $5 \div 10$ % e di PMV $-0,5 \div +0,5$.

4.4 Discomfort locale

Come detto, gli indici esaminati (PMV e PPD) danno una valutazione del comfort in funzione dei valori medi delle variabili ambientali, cioè valutano il "comfort globale". Le condizioni $-0,5 < \text{PMV} < +0,5$ e $5\% < \text{PPD} < 10\%$ rappresentano pertanto condizioni necessarie ma non sufficienti per il comfort. Perché ci sia effettivamente comfort, infatti, deve essere anche nullo il discomfort dovuto a disuniformità delle variabili ambientali, cioè non deve esserci "discomfort locale".

Le cause di discomfort locale sono quattro:

- a) elevata differenza verticale di temperatura;
- b) pavimento troppo caldo o troppo freddo;
- c) correnti d'aria;
- d) elevata asimmetria media radiante.

a) Elevata differenza verticale di temperatura - Generalmente negli ambienti chiusi esiste un gradiente verticale della temperatura dell'aria; in particolare la temperatura in prossimità del soffitto è maggiore di quella al pavimento. Questa differenza, oltre a comportare un maggior consumo di energia (nel caso di ambiente riscaldato), può comportare una sensazione di discomfort locale per i soggetti esposti a quel microclima, che possono avvertire più caldo alla testa che ai piedi.

La UNI-EN-ISO 7730 assume come limite un gradiente di $3^\circ\text{C}/\text{m}$ al quale corrisponde una percentuale di insoddisfatti, PD_a , minore del 5%

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

Per la UNI-EN-ISO 7730, in inverno, per persone con scarpe e calze idonee, sono accettabili valori della temperatura del pavimento comprese tra 18 e 26 °C (si può arrivare a 29 °C per pavimenti riscaldati), limiti ai quali corrisponde una percentuale di insoddisfatti, PD_p , del 10%. Per la stagione estiva non esiste alcun limite.

c) Correnti d'aria - Il discomfort da corrente d'aria è definito come un indesiderato raffreddamento locale del corpo umano, causato dal movimento dell'aria. È un problema molto delicato e dibattuto; delicato, perché spesso sono proprio le correnti d'aria la causa del discomfort, soprattutto negli ambienti provvisti di impianti di climatizzazione con ventilazione forzata e nei mezzi di locomozione (auto, treni, ecc.); dibattuto, perché sono in corso molte ricerche e forse non si sono ancora ottenuti risultati definitivi.

Come è noto, il moto dell'aria negli ambienti è turbolento, cioè la velocità istantanea dell'aria nel punto non è costante nel tempo, anche nel caso in cui ci siano condizioni che farebbero pensare ad una situazione di regime permanente. In **Figura 3** sono riportate, ad esempio, le caratteristiche fluttuazioni della velocità istantanea, v_{ai} , che si osservano nel punto di un ambiente. In figura sono indicati sia il valore della velocità media, v_a , che quello della deviazione standard, SD_v . Il loro rapporto, SD_v/v_a , è detto intensità di turbolenza, Tu . La velocità dell'aria, v_a , di cui si è parlato precedentemente, è in effetti proprio la velocità media, e pertanto andrebbe indicata con v_a soprasssegnata. Per semplicità generalmente si evita il soprassegno quando non c'è rischio di confusione tra velocità media e istantanea.

Sperimentalmente si è verificato che la sensazione di discomfort da corrente d'aria è influenzata:

- dal valore massimo e dalle fluttuazioni della velocità, che sono ben rappresentati dal valore medio e dall'intensità di turbolenza;
- dalla temperatura della corrente (al crescere della temperatura diminuisce il discomfort);
- dalla zona del corpo che viene investita dalla corrente (le zone più sensibili sono testa, collo, spalle e caviglie);
- dall'attività del soggetto (la sensibilità delle persone alle correnti d'aria diminuisce al crescere dell'attività);

Fino ad una decina di anni fa si pensava di eliminare il discomfort da correnti d'aria limitando il valore della velocità a 0,15 m/s in inverno, a 0,25 m/s in estate.

Recentemente è stata proposta, per attività leggera o sedentaria, per le parti del corpo scoperte e per t_a compresa tra 20 e 26 °C, la relazione:

$$DR = (34 - t_a)(v_a - 0,55)^{0,62}(0,37v_a Tu + 3,14) \quad (8)$$

con DR percentuale di insoddisfatti da corrente d'aria.

Evidentemente, dalla (8), fissato DR si ricava una relazione tra t_a , Tu ed il valore limite di v_a . La relazione (8) ha ottenuto subito un grande consenso ed è stata accettata nell'ultima edizione della ISO 7730, del 1994, che è poi stata recepita dal CEN ed è diventata UNI-EN-ISO 7730. La norma ha fissato per il DR il valore limite del

15%; il diagramma di **Figura 4** riporta i valori limite della velocità media dell'aria, v_a , in funzione della temperatura dell'aria, t_a , e dell'intensità di turbolenza, T_u , che si ricavano dalla (8) per $DR = 15\%$.

La relazione proposta porta a prescrizioni sulla velocità dell'aria molto più spinte di quelle precedentemente adottate. Infatti, dalla **Figura 4**, considerando che T_u varia in pratica nell'intervallo di valori $30\div 60\%$, si ricava che v_a deve essere minore di 0,12 m/s nella stagione invernale e di 0,15 m/s in quella estiva.

d) Elevata asimmetria della temperatura media radiante - L'asimmetria della temperatura radiante, Δt_{pr} , è la differenza tra le temperature piane radianti, t_{pr} , misurate sulle due facce opposte di un elementino piano. Nel caso degli ambienti reali non isotermi, la t_{pr} dipende dalla posizione della faccia dell'elementino. Si pensi ad un ambiente in cui ci sia un caminetto: se la faccia dell'elemento piano è rivolta verso il caminetto, il flusso termico incidente, e quindi t_{pr} , è certamente più elevato che se la faccia fosse rivolta per esempio verso il soffitto o verso il pavimento o verso un'altra zona dell'ambiente (ed è tanto più elevato quanto più l'elemento è vicino al caminetto).

Il discomfort da asimmetria media radiante si verifica raramente e solo nella stagione invernale. In pratica la causa può essere la presenza di una o più superfici esterne vetrate o di un impianto di riscaldamento a soffitto.

La norma UNI-EN-ISO 7730

- per attività leggera, quasi sedentaria, con finestre o superfici verticali fredde, limita l'asimmetria in direzione orizzontale, valutata rispetto a un elementino piano disposto verticalmente a 0,6 m dal pavimento, a 10°C, valore al quale corrisponde una percentuale di insoddisfatti, PD_r , del 5%,
- per attività leggera, quasi sedentaria, con soffitto riscaldato, limita l'asimmetria in direzione verticale, valutata rispetto a un elementino piano disposto orizzontalmente a 0,6 m dal pavimento, a 5°C, valore al quale corrisponde ancora una percentuale di insoddisfatti, PD_r , del 5%,

Nella **Tabella 8** sono sintetizzate le condizioni che devono essere verificate perché un ambiente sia considerato termicamente idoneo secondo la UNI-EN-ISO 7730.

5. AMBIENTI CALDI TERMICAMENTE SEVERI

5.1 Effetti patologici

I meccanismi di termoregolazione in condizioni ambientali particolarmente severe possono non riuscire ad evitare l'aumento di energia termica nel corpo e quindi l'aumento della temperatura del nucleo; d'altra parte una prolungata attività di questi meccanismi provoca squilibri idrominerali solo parzialmente recuperabili mediante l'assimilazione diretta di liquidi. Entrambe queste situazioni provocano effetti patologici nel soggetto. Nell'attuale classificazione delle malattie, traumatismi e decessi dell'Organizzazione Mondiale della Sanità, sono previste le seguenti patologie "da caldo":

- a) colpo di calore,
- b) sincope dovuta al calore,
- c) deficit idrico,
- d) deficit sodico.

a) Colpo di calore - Il colpo di calore si ha quando la temperatura sale al di sopra del valore limite. I sintomi, sempre presenti, sono tre: temperatura rettale superiore a 40,5 °C, forte riduzione della sudorazione, disturbi mentali con convulsioni epilettiche o coma.

Il colpo di calore può essere mortale se non si provvede ad abbassare la temperatura rettale al di sotto di 39 °C; il soggetto va immerso in acqua fredda.

Per fortuna i soggetti che lavorano in ambienti caldi imparano a riconoscere i primi sintomi di questa malattia che degenera rapidamente.

b) Sincope dovuta al calore - La vasodilatazione può determinare una distribuzione anomala del flusso sanguigno che può concentrarsi nei vasi periferici, specialmente negli arti inferiori, risultando insufficiente nell'area cerebrale. Qualora ciò si verifici, si ha una ridotta ossigenazione del cervello con conseguente svenimento preceduto da pallore, stordimento e vertigini. Si parla di sincope da calore.

Rispetto al colpo di calore la sincope da calore è una forma meno grave di patologia da caldo, e non comporta né abolizione della sudorazione né agitazione motoria.

Questa patologia è comune in individui non acclimatati ed in situazioni di prolungata permanenza in posizione eretta, come accade ai soldati durante le parate militari. Il trattamento consiste nella messa a riposo dell'individuo in posizione sdraiata o seduta in ambiente fresco e ventilato, e nella somministrazione di bevande fresche.

c) Deficit idrico - Qualora la perdita di liquidi per sudorazione non sia adeguatamente compensata con l'assimilazione di bevande, si perviene al deficit idrico.

I sintomi, per un deficit pari al 5% della massa corporea, sono: sete, fatica ed inibizione della sudorazione; se la perdita di acqua è superiore a tale valore intervengono disturbi circolatori e, se si supera una perdita idrica pari al 10% della massa corporea, si possono avere addirittura delirio e morte. Per individui che lavorano in ambienti particolarmente severi con una perdita di sudore pari a 1 l/h o più il deficit idrico si raggiunge rapidamente.

Il trattamento di questa patologia differisce a seconda che l'individuo sia cosciente o incosciente. Nel primo caso i liquidi vengono ripristinati mediante l'ingestione di bevande leggermente salate, nel secondo si ricorre all'iniezione endovenosa di una soluzione glucosata al 5% nel caso di deficit idrico puro, oppure ad una soluzione di NaCl se si sospetta un deficit sodico associato.

d) Deficit sodico - Il deficit sodico è dovuto ad un'insufficiente sostituzione dei sali perduti con il sudore. L'entità di queste perdite è di circa 1 g per litro di sudore per soggetti acclimatati e di 4 g/l per soggetti non acclimatati; quindi, una dieta normale, che contiene circa 10 g di sale, assicura il bilancio giornaliero dei sali in un ambiente moderato, mentre può essere insufficiente in ambienti caldi, soprattutto per persone non acclimatate.

I sintomi del deficit sodico sono: eccessivo affaticamento, stanchezza e debolezza muscolare. Per deficit moderati si hanno caratteristici spasmi muscolari dolorosi denominati crampi da calore.

Questa patologia non è pericolosa, manifestandosi dopo parecchi giorni di esposizione al caldo, e comunque non predispone l'individuo, come il deficit idrico, agli effetti deleteri del colpo di calore. Il trattamento consiste nella iniezione endovenosa di una soluzione di NaCl.

5.2 *Acclimatazione*

Una persona non abituata ad ambienti caldi reagisce con maggiore difficoltà rispetto ad una persona che vi è abituata. Questa differenza non deriva solo da fattori legati alle abitudini, ma ha fondamenti fisiologici. Infatti una persona abituata suda molto prima di una non abituata ed a parità di lavoro ha una frequenza cardiaca più bassa: in questo caso si parla di acclimatazione.

L'acclimatazione può essere naturale o indotta artificialmente. Generalmente per ottenerla artificialmente occorrono circa sei giorni: il primo giorno il soggetto viene sottoposto ad un carico di lavoro pari al 50% di quello di regime, carico che viene poi aumentato di un 10% al giorno.

5.3 *Valutazione degli ambienti caldi mediante l'indice WBGT*

L'indice WBGT è uno dei pochi indici proposti ormai da molti anni che è ancora molto utilizzato. È alla base della norma UNI-EN 27243 (cfr. **Tabella 3**). Si calcola con le seguenti relazioni

$$\text{WBGT} = 0,70t_{nw} + 0,30t_g \quad (9)$$

$$\text{WBGT} = 0,70t_{nw} + 0,20t_g + 0,10t_a \quad (10)$$

con:

t_g = temperatura del globotermometro, °C;

t_{nw} = temperatura di bulbo bagnato a convezione naturale, °C.

La (9) si usa per gli ambienti interni e per quelli esterni in assenza di sole, la (10) si usa per gli ambienti esterni con sole.

C'è da osservare che entrambe le formule forniscono il valore dell'indice WBGT in funzione dei soli parametri ambientali: sia t_{nw} che t_g dipendono da t_a , v_a e t_r , mentre t_{nw} dipende anche da ϕ .

L'indice WBGT non dipende né da M né da I_{cl} ; dipendono invece da M i valori limite, cioè i valori dell'indice WBGT che non vanno superati e che sono riportati in **Tabella 9**, i quali danno a regime permanente una temperatura interna di 38 °C. La tabella presuppone un abbigliamento leggero (0,4÷0,5 clo) con una permeabilità al vapore normale; nel caso il lavoratore debba indossare un abbigliamento più pesante o capi impermeabili al vapore, i valori limite della **Tabella 9** cadono in difetto.

La norma fornisce anche un diagramma dal quale, se il valore calcolato del WBGT è maggiore di quello limite, si ottiene il necessario periodo di pausa.

5.4 Valutazione degli ambienti caldi mediante il calcolo della sudorazione oraria necessaria

Questo metodo è attualmente considerato il più attendibile; non si è ancora molto diffuso perché non è molto semplice, richiedendo una certa specializzazione e necessariamente un corretto programma di calcolo. È alla base della norma EN-12515 (cfr. **Tabella 3**), che sarà pubblicata dall'UNI, come UNI-EN 12515, nel corso del 1998.

La valutazione della sudorazione oraria necessaria richiede la conoscenza delle sei grandezze che caratterizzano lo stato termico, con le quali, applicando l'equazione del bilancio sul corpo umano, vengono calcolati la percentuale di pelle bagnata, w_{req} , e la sudorazione oraria, SW_{req} , necessarie per raggiungere le condizioni di regime permanente.

La condizione di regime permanente sarà raggiunta effettivamente se la percentuale di pelle bagnata e la sudorazione oraria calcolate saranno minori dei rispettivi valori limite, w_{max} e SW_{max} .

Nel caso non si abbiano condizioni di regime permanente, dall'accumulo termico massimo ammissibile, Q_{max} , e dalla perdita di acqua massima possibile, D_{max} , si calcola il tempo limite di esposizione, DLE, che rappresenta il tempo massimo per il quale il soggetto può rimanere in quell'ambiente termico senza correre rischi.

Nella **Tabella 10** sono riportati i valori limite per w_{max} , SW_{max} , Q_{max} e D_{max} imposti dalla norma citata, la quale riporta anche il programma di calcolo necessario per la valutazione suggerita.

6. AMBIENTI FREDDI TERMICAMENTE SEVERI

6.1 La termoregolazione al freddo ed il ruolo protettivo dell'abbigliamento.

Al freddo la termoregolazione vasomotoria determina la chiusura degli sfinteri dei capillari periferici (vasocostrizione), riducendo la quantità di sangue diretta alle zone esterne, con conseguente diminuzione dello scambio termico. La termoregolazione comportamentale interviene solo quando quella vasomotoria non è sufficiente ad assicurare l'omeotermia e determina l'attivazione di gruppi muscolari (brivido), fenomeno al quale si associa la generazione di una certa quantità di energia termica. In definitiva, quindi, al freddo c'è un campo di parametri ambientali nel quale la principale funzione del sistema di termoregolazione comportamentale, ossia la produzione di energia termica mediante il brivido, rimane inattiva. Quando l'insieme delle condizioni ambientali esterne è tale che la quantità di energia termica ceduta dal corpo è ancora maggiore di quella prodotta all'interno del corpo stesso, i recettori termici continuano ad inviare al sistema nervoso centrale un segnale che indica che il soggetto è sottoposto a stress da freddo. In risposta, il sistema di termoregolazione reagisce, oltre che con la vasocostrizione, anche con il brivido. Va sottolineato che l'energia termica prodotta attraverso il brivido tende col tempo a decrescere e quindi l'uomo non può contare su tale meccanismo, se non per un periodo di tempo limitato.

I parametri ambientali associati all'insorgere del brivido costituiscono, pertanto, il limite inferiore per il campo di condizioni alle quali l'uomo può rimanere indefinitamente. Valicato tale limite, il sistema di termoregolazione non è più in grado di garantire l'omeotermia; insorge cioè il rischio di un progressivo raffreddamento (ipotermia) delle zone interne del corpo e quindi degli organi vitali.

Convenzionalmente, con il termine "ipotermia" si indica una temperatura del nucleo inferiore a 35°C. Nel campo di temperature comprese fra 35°C e 32°C il corpo reagisce con violenti brividi, mentre al di sotto di 32°C interviene uno stato di confusione mentale o la perdita di coscienza. Questa evenienza è particolarmente dannosa, poiché impedisce alla vittima dello stress da freddo acuto di prendere i provvedimenti, spesso elementari, che potrebbero arrestare il progredire del fenomeno e si ha rischio di morte, in genere per fibrillazione ventricolare e conseguente arresto cardiaco.

I valori di temperatura indicati non sono da intendersi in senso assoluto, poiché esiste una notevole variabilità in dipendenza di numerosi fattori soggettivi. Ad esempio, alcuni studi hanno mostrato come gli anziani ed i bambini di età inferiore ad un anno siano particolarmente sensibili agli effetti deleteri dello stress da freddo. Ancora, individui colpiti da patologie croniche, ormonali, muscolari (p.e. distrofia) o metaboliche, sono maggiormente esposti al rischio di ipotermia. Al contrario le persone grasse rischiano molto meno rispetto alle persone magre.

Dal punto di vista dell'adattamento dell'uomo agli ambienti termici freddi, i dati e le ricerche disponibili in letteratura non permettono di trarre conclusioni definitive sull'esistenza di un fenomeno di acclimatazione generale del soggetto, fenomeno riconosciuto e sperimentato negli ambienti caldi. Alcuni autori comunque, concordano sull'esistenza di un tipo di adattamento locale di singole parti del corpo, avendo dimostrato che i soggetti abitualmente impegnati in attività al freddo con le mani nude possono meglio conservare doti di destrezza e capacità tattili rispetto agli individui non acclimatati.

In verità il mantenimento del bilancio termico si ottiene, oltre che con la regolazione vasomotoria, utilizzando alcuni artifici, quali la variazione della postura del corpo (per modificare l'area della superficie corporea offerta allo scambio termico) e la scelta di un abbigliamento opportuno. L'abbigliamento, per flessibilità ed efficacia, rientra a pieno titolo nel novero delle tecniche ingegneristiche approntate dall'uomo in risposta agli stress termici ambientali e assurge al ruolo di unico elemento di protezione in situazioni nelle quali risulta impossibile variare i parametri microclimatici, per esempio durante le esposizioni all'aperto negli ambienti freddi. In particolare, l'abbigliamento svolge il compito di isolare termicamente il soggetto, regolando il flusso convettivo e radiativo di energia termica tra l'individuo e l'ambiente.

6.2 La valutazione degli ambienti freddi con l'indice IREQ.

Partendo dalla considerazione che con un'opportuna resistenza termica dell'abbigliamento l'uomo si può proteggere dal freddo, all'inizio degli anni '80 è stato proposto un indice di stress da freddo, IREQ, valido per il corpo nel suo complesso, che ha riscosso notevole successo. L'indice IREQ (da "I", simbolo della resistenza termica dell'abbigliamento e "REQ" di required, richiesto) è definito come la resistenza

termica dell'abbigliamento che, nell'ambiente in esame, sarebbe capace di mantenere indefinitamente il corpo umano in condizioni di regime termico stazionario. L'indice è alla base della norma ISO/TR 11079 (cfr. **Tabella 3**), per la quale è in corso la procedura di recepimento come norma ENV.

L'indice IREQ svolge due distinte funzioni. In primo luogo rappresenta una stima dello stress termico prodotto dall'ambiente freddo, per gli effetti combinati dei quattro parametri microclimatici (temperatura dell'aria, temperatura media radiante, umidità e velocità dell'aria) e dell'attività; contemporaneamente, provvede ad una valutazione quantitativa della protezione dell'abbigliamento, espressa in termini di resistenza termica necessaria a mantenere condizioni di regime stazionario per il corpo umano.

Le condizioni di regime permanente possono essere raggiunte in corrispondenza di diversi livelli di attivazione del sistema termoregolatorio. Per questo motivo l'IREQ viene generalmente calcolato nelle due condizioni estreme: la condizione limite di inizio di attivazione del sistema comportamentale e quella di neutralità termica (che si può vedere anche come la condizione limite di inizio di attivazione del sistema termoregolatorio vasomotorio). I due valori dell'indice IREQ vengono detti, rispettivamente, $IREQ_{min}$ ed $IREQ_{neu}$. Il valore di $IREQ_{min}$ è evidentemente sempre minore di $IREQ_{neu}$.

L'indice I_{req} si ricava dal bilancio di energia termica sul corpo umano, imponendo che il corpo sia nelle condizioni di regime permanente, imponendo che sia $I_{cl} = IREQ$ e dando a t_{sk} , temperatura media della pelle, ed a w , percentuale di pelle bagnata, i valori riportati nella **Tabella 11**.

Il valore dell'indice IREQ dipende essenzialmente dal metabolismo e dalla temperatura operativa, mentre dipende poco dalla velocità dell'aria e non dipende affatto dall'umidità.

Come si è visto, IREQ rappresenta un indice di valutazione dell'ambiente e, quindi, prescinde dall'effettiva presenza di persone. $IREQ_{min}$ rappresenta anche il valore limite della resistenza termica dell'abbigliamento per il quale non ci sono rischi di ipotermia per i soggetti esposti all'ambiente in esame. Nell'eventualità che il valore di resistenza termica dell'abbigliamento disponibile sia minore di $IREQ_{min}$, c'è rischio di ipotermia e si rende necessario il calcolo di una durata limite del tempo di esposizione, DLE, ovvero del tempo per il quale la persona può rimanere in quell'ambiente senza correre rischi dopo di che l'esposizione deve essere interrotta e alla persona va concesso di riposarsi in un ambiente riscaldato per il tempo necessario a ristabilire le condizioni di neutralità termica.

Il DLE si calcola ricavando l'accumulo orario S dall'equazione di bilancio (1) ed imponendo che l'energia interna del corpo umano diminuisca al massimo di 40 Wh/m^2 .

Il calcolo dell'indice IREQ non è semplicissimo, richiedendo necessariamente un opportuno programma di calcolo, che è riportato dalla stessa ISO/TR 11079.

6.3 La valutazione degli ambienti freddi con l'indice WCI (Wind Chill Index).

L'indice IREQ è ricavato da un'equazione di bilancio termico globale sul corpo umano, per cui non considera gli effetti di raffreddamento localizzati. Allo scopo di

determinare il danno provocato dall'esposizione al freddo di singole parti del corpo (per es. le mani, il viso), l'unico metodo attualmente esistente consiste nell'utilizzazione dell'indice WCI, indice empirico proposto negli anni '40 e rapidamente diffusi per la sua semplicità e validità. Rappresenta il flusso termico che un cilindro verticale, con la superficie esterna a 33 °C, disperde in aria per convezione ed irraggiamento. Anch'esso è stato recepito dalla ISO/TR 11079 (**Tabella 3**).

Si ricava dalla relazione

$$WCI = 1,16(10,45 + 10 \sqrt{v_{ar}} - v_{ar}) (33 - t_a) \quad (11)$$

con WCI espresso in W/m². Nella (11) 10,45 è la conduttanza unitaria radiativa in kcal/hm², $\sqrt{v_{ar}} - v_{ar}$ è la conduttanza unitaria convettiva in kcal/hm², 1,16 è il fattore di conversione nel S.I. (l'indice fu proposto nel Sistema Tecnico) e 33 è rappresentativo della temperatura media della pelle di un soggetto a riposo in condizioni di comfort.

Sperimentalmente si è visto che per velocità dell'aria minori di 80 km/h questo indice esprime bene gli effetti delle variabili fisiche ambientali sull'uomo. In particolare, per valori di WCI minori di 1600 W/m² non c'è rischio di congelamento per esposizioni di durata minore di un'ora, anche per parti del corpo scoperte; invece, per valori di WCI superiori a 2400 W/m² c'è rischio di congelamento anche in meno di un minuto per le parti scoperte.

Talvolta viene anche usato un indice ricavato da WCI, detto "wind chill factor" o "equivalent wind chill temperature" ed indicato con t_{ch} . Rappresenta la temperatura di un ambiente che con aria calma, con $v_a = 6,4$ km/h, avrebbe lo stesso WCI dell'ambiente reale. E si ricava con la relazione

$$t_{ch} = 33 - \frac{WCI}{25,5} \quad (12)$$

che deriva dalla (11) con $v_{ar} = 6,4$ km/h e $t_a = t_{eq}$.

In **Tabella 12** è riportata la corrispondenza tra i valori di WCI e di t_{ch} ed il relativo tempo di congelamento delle parti del corpo esposte.

7. ABBIGLIAMENTO TERMICAMENTE PROTETTIVO

7.1 Definizioni e generalità

Per abbigliamento termicamente protettivo, che per semplicità chiameremo termoprotettivo, si intende quello all'interno del quale si crea artificialmente un microclima di benessere o almeno di sicurezza.

L'abbigliamento termoprotettivo, ancora poco diffuso in Italia, si usa in applicazioni in cui l'uomo deve svolgere la sua attività in ambienti termicamente severi, dei quali si è ampiamente parlato ai capitoli 5 e 6, e nelle operazioni di decontaminazione; in quest'ultimo caso, il rischio termico può derivare dalle caratteristiche di permeabilità al vapore dell'abito protettivo indossato. Infatti, l'abbigliamento indossato per protezione da contaminanti è costituito da abiti sigillati e pressurizzati. In questo

caso, il tessuto è certamente impermeabile all'aria, per impedire la diffusione all'interno delle sostanze indesiderate. Ovviamente, un tessuto impermeabile all'aria lo è anche al vapor d'acqua emesso dal corpo umano; quest'ultimo perde quindi la possibilità di cedere calore per evaporazione: viene meno cioè il sistema di termoregolazione comportamentale al caldo

Va ricordato che una forte spinta alla ricerca di idonei abbigliamento termoprotettivi è stata data dai programmi spaziali, in quanto questo tipo di abbigliamento è indispensabile per gli astronauti.

Va anche sottolineato che gli abbigliamento termoprotettivi vanno considerati Dispositivi di Protezione Individuale (DPI), che in certe circostanze sono obbligatori ai sensi dell'art. 3 del D.Lgs. 626/94 e dell'art. 27 del D.Lgs. 242/95 (cfr. **Tabella 1 e Tabella 2**).

I sistemi di abbigliamento termoprotettivo possono essere divisi in due categorie:

1. sistemi attivi;
2. sistemi passivi,

i primi hanno funzionamento continuo, sono dotati di parti in movimento e richiedono, in esercizio, il collegamento con una sorgente di energia; i secondi non hanno parti in movimento né sono caratterizzati da funzionamento continuo.

Nell'ambito di questa prima classificazione, è possibile fare una distinzione sulla base dei meccanismi di scambio termico tra il corpo umano ed il sistema protettivo:

- a) sistemi che scambiano per evaporazione e convezione;
- b) sistemi che scambiano per conduzione.

Lo scambio convettivo ed evaporativo si ha quando un flusso di gas è a contatto diretto con il corpo. Quando invece il fluido è racchiuso in tubi, separati dalla superficie corporea mediante un abito aderente, il sistema viene detto conduttivo facendo riferimento esclusivamente allo scambio superficie corpo umano-superficie tubi e non considerando quindi il meccanismo convettivo fluido-tubo.

Un'ulteriore distinzione si può fare tenendo conto del tipo di refrigerante:

per i sistemi attivi

- a flusso di aria (evaporativo-convettivi);
- a flusso di acqua (conduttivi);

per i sistemi passivi

- a sudorazione artificiale (evaporativo-convettivi);
- a ghiaccio o a ghiaccio secco (conduttivi).

Nella scelta del sistema da adottare si deve tenere conto di importanti fattori, quali la disponibilità del refrigerante, l'energia richiesta, il peso dell'abito, la diminuzione di mobilità del lavoratore e, non ultimo, il costo dell'abito.

7.2 Sistemi attivi ad aria (AVS)

Come detto, si tratta di sistemi attivi evaporativo-convettivi, che si indicano generalmente con la sigla AVS (Air Ventilated Suit). Prevedono un flusso di aria circolante tra corpo e abito, che è generalmente distribuito da un sistema di tubi e che raffredda il corpo umano per convezione e/o evaporazione. L'AVS può essere utilizzato con un abito permeabile o impermeabile all'aria e può coprire l'intero corpo o

solo parte di esso, ad esempio una giacca o un cappuccio ventilati; nel caso di abiti permeabili, l'aria può lasciare il vestito attraverso il tessuto o attraverso aperture poste generalmente in corrispondenza del collo, dei polsi e delle caviglie. Gli abiti impermeabili, invece, sono dotati di valvole per diffondere l'aria nell'ambiente.

Negli AVS il raffreddamento convettivo è un meccanismo relativamente poco efficace, dal momento che il calore specifico dell'aria è basso e che non è pensabile usare valori di portate massiche eccessive che aumenterebbero le perdite di carico. Teoricamente, il potere refrigerante potrebbe essere aumentato fornendo aria estremamente fredda; in pratica, però, la temperatura di ingresso dell'aria non può essere eccessivamente bassa sia perché procurerebbe forte discomfort in corrispondenza delle zone d'immissione, sia perché il vapor d'acqua evaporato dalla superficie corporea condenserebbe. Per questi motivi, negli AVS si sfrutta soprattutto l'evaporazione. Questo meccanismo però, per essere efficiente, richiede un'elevata sudorazione, con conseguente sensazione di discomfort, dovuto alla bagnatura della pelle, ed eventuale disidratazione.

Per il filtraggio si possono utilizzare filtri di diversa qualità che proteggano contro polvere, fumi, nebbie, pesticidi.

L'AVS è utilizzato nell'industria, per gli equipaggi di aeroplani e di carri armati, e, in generale, in applicazioni che comportano limitato lavoro fisico e non presentano problemi per il collegamento con il sistema di distribuzione dell'aria.

I vantaggi derivanti dall'uso dei sistemi ad aria per applicazioni industriali sono essenzialmente i seguenti:

- sono prontamente disponibili;
- sono sicuri;
- sono versatili, ad esempio possono essere usati per riscaldare, raffreddare e per controllare l'umidità,
- permettono l'evaporazione del sudore

Rispetto ai più potenti sistemi ad acqua, i sistemi ad aria presentano un limite dato dalla massima potenzialità termica raggiungibile, ma hanno un costo nettamente inferiore.

Inoltre, il flusso d'aria influenza la rumorosità e la voluminosità dell'abito: è evidente che un abito eccessivamente voluminoso può diventare goffo e creare seri problemi di mobilità.

7.3 Sistemi attivi ad acqua (WCG)

L'abbigliamento protettivo con raffreddamento ad acqua liquida che, come si è detto, è un sistema attivo a flusso di acqua, generalmente viene detto semplicemente ad acqua; è indicato con la sigla WCG (Water Cooled Garment). L'idea di base è di creare una sorta di scambiatore di calore, cioè una circolazione extracorporea nella quale l'acqua sottrae calore al corpo umano passando in tubi di piccolo diametro posti sopra la pelle e viene poi inviata ad un sistema di raffreddamento.

Il confronto teorico tra un sistema ad aria ed uno ad acqua mostra che l'alto calore specifico dell'acqua permette l'uso di portate minori, e quindi di pompe di minore potenza rispetto ai compressori, sistemi meno pesanti ed abiti meno ingombranti.

L'acqua è generalmente mossa da una pompa alimentata a batteria. Un' alternativa è quella di connettere l'abito ad un rubinetto collegato con un tubo di gomma contenente acqua in pressione; tale soluzione, però, impedisce il ricircolo dell'acqua.

Per i sistemi portatili si stanno sviluppando cicli frigoriferi in miniatura a compressione di vapore saturo, alimentati a batteria o con motori a gasolio, che permettono di avere tempi di funzionamento del sistema più lunghi.

Rinunciando ad avere un sistema di raffreddamento portatile, si può porre la carica di ghiaccio in un contenitore fisso: in tal modo si ottengono tempi di funzionamento più lunghi ed un abito più leggero; questa soluzione è ottimale per operatori seduti o per chi compie un lavoro in spazi circoscritti.

Il WCG offre, virtualmente, illimitata capacità di raffreddamento senza costi fisiologici e con grande comfort per chi lo indossa. Per sistemi portatili o autonomi esso offre sostanziali vantaggi ingegneristici rispetto ai sistemi ad aria: sono più leggeri, meno rumorosi, meno voluminosi e meno ingombranti. Inoltre, il WCG è facilmente combinabile con qualunque tipo di abbigliamento protettivo perché è un sottabito.

I principali svantaggi sono:

- il costo elevato;
- la necessità di affidabilità, infatti una fuoriuscita di acqua potrebbe avere una serie di conseguenze tra le quali abbigliamento bagnato e corto circuito elettrico.

7.4 Sistemi passivi

Per rimuovere il calore metabolico nei sistemi passivi si utilizza una sostanza in passaggio di fase; su questa base, i sistemi passivi si distinguono in sistemi:

- ad evaporazione, che utilizzano acqua liquida che evapora;
- a conduzione, che utilizzano o un solido che liquefa (generalmente ghiaccio), o un solido che sublima (generalmente ghiaccio secco).

I sistemi passivi ad evaporazione, detti anche a sudorazione artificiale, si adoperano quando si indossano abiti impermeabili; consistono nel sovrapporre all'abito protettivo impermeabile un tessuto che assorbe bene l'acqua liquida e che deve essere sempre bagnato. L'acqua tende ad evaporare assorbendo l'energia termica di passaggio di fase in parte dall'ambiente in parte dal sistema abbigliamento-corpo umano e si ha un raffreddamento dell'abito impermeabile, sulla superficie interna del quale condensa il vapore prodotto dal corpo umano. In definitiva, il calore metabolico viene ceduto dal corpo umano per convezione, irraggiamento e evaporazione del sudore; passa poi per conduzione attraverso l'abito impermeabile e lo scambio è favorito dal gradiente termico creato dall'evaporazione dal tessuto assorbente.

Gli inconvenienti presentati da questi sistemi sono essenzialmente due:

- all'interno dell'abito impermeabile condensa continuamente del liquido e pertanto dopo pochi minuti il corpo è completamente bagnato;
- la loro efficienza diminuisce all'aumentare del grado igrometrico dell'ambiente.

Va chiarito che non è necessario mantenere costante la quantità di acqua dello strato assorbente, ma basta bagnarlo, ad esempio con una doccia, periodicamente e comunque prima che si sia completamente asciugato.

I sistemi passivi a conduzione consistono in capi dotati di tasche interne nelle quali viene posta una sostanza solida in passaggio di fase, cui viene trasmesso il calore metabolico. I capi più diffusi per questo scopo sono i giubbotti. Come solido si adoperano essenzialmente il ghiaccio e il ghiaccio secco.

Il capo deve avere una buona resistenza termica, in modo da ridurre l'aliquota di energia termica trasmessa al solido dall'ambiente esterno, che determina la fusione della sostanza senza che ci sia giovamento per il corpo.

A causa della temperatura iniziale del solido molto bassa, è necessario indossare l'indumento che lo contiene sopra un vestito isolante, per fare in modo che la pelle non si raffreddi troppo; in particolare, bisogna evitare che la temperatura della pelle in corrispondenza del solido scenda al di sotto dei 10 °C.

Il tessuto delle tasche deve essere costituito da fibre che assorbendo il primo vapore espandono, impedendo così successivamente il passaggio del vapore; quest'ultimo deve potersi disperdere liberamente nell'ambiente attraverso aperture del giubbotto. È comunque opportuno impedire che il vapore, oltrepassando il tessuto delle tasche, arrivi a diretto contatto con il solido, in quanto, in tal caso, il sudore cederebbe calore al solido stesso, senza nessun effetto sul raffreddamento della persona.

Sistemi di questo tipo sono molto diffusi in Sud Africa dove sono utilizzati per la protezione termica nelle miniere d'oro (profonde circa 3000 m) dove si valuta che scendono circa 300.000 minatori al giorno, e dove la temperatura dell'aria è compresa tra i 33°C e i 36°C, con alta umidità e bassa velocità dell'aria.

TESTI CONSIGLIATI PER L'APPROFONDIMENTO

1. Alfano G., d'Ambrosio F.R., e Riccio G. 1997. La valutazione delle condizioni termoigrometriche negli ambienti di lavoro: comfort e sicurezza. Napoli: CUEN.
2. ASHRAE. 1993. Physiological principles, comfort and health. In: ASHRAE Fundamentals, ch. 8. Atlanta: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc.
3. AA.VV. 1984. Manuale di Fisiologia del lavoro. (Scherrer e coll. Eds). Milano: Masson Italia Editori.
4. Fanger P.O. 1970. Thermal Comfort. New York: McGraw-Hill.
5. Gagge P.A., e Nishi Y. 1977. Heat exchange between human skin surface and thermal environment. In: Handbook of physiology, ch.5, sec. 9, 69- 92. Bethesda: American Physiological Society.
6. Konz S.A. 1984. Personal cooling garments: a review. *ASHRAE Transactions*, 88(1b), 499-518, 1984.
7. Hardy J.D., e Bard P. 1977. Regolazione della temperatura corporea. In: Trattato di fisiologia medica di Mountcastle, 2a edizione, vol.2, cap. 56, 1527-1570. Padova: Piccin Editore.
8. Hensel H. 1981. Monographs of the Physiological Society No. 38: Thermoreception and temperature regulation. New York: Academic Press.
9. Kerslake D. McK. 1972. Monographs of the Physiological Society No. 29: The stress of hot environments. Cambridge: Cambridge University Press.

10. Le Blanc J. 1975. Man in the cold. Springfield: Charles C. Thomas Publ.
11. Mc Intyre D.A. 1980. Indoor Climate. London: Applied Science Publisher Ltd.
12. Nunneley S.A. 1988. Design and evaluation of clothing for protection from heat stress: an overview. In: Environmental Ergonomics, part 1, 87- 98. London: Taylor and Francis.

Tabella 1 - Passi del D.Lgs.626/94 che si riferiscono, esclusivamente o anche, agli aspetti termici.

Art. 3 - Misure generali di tutela

1. Le misure generali per la protezione della salute e per la sicurezza dei lavoratori sono:
...
b) eliminazione dei rischi in relazione alle conoscenze acquisite in base al progresso tecnico e, ove ciò non è possibile, loro riduzione al minimo;
...
f) rispetto dei principi ergonomici nella concezione dei posti di lavoro;
...
o) misure di protezione collettiva ed individuale;
...

Art. 9 - Compiti del servizio di prevenzione e protezione

1. Il servizio di prevenzione e protezione dai rischi professionali provvede:
a) ... all'individuazione delle misure per la sicurezza e la salubrità degli ambienti di lavoro, nel rispetto della normativa vigente ...

Art. 33 - Adeguamenti di norme

7. L'art.11 del D.P.R. 19.03.1956 n. 303 è sostituito dal seguente:

Art. 11 (Temperatura dei locali).

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

9. L'art. 7 del D.P.R. 19.03.1956 n. 303 è sostituito dal seguente:

(Tabella 1: continua)

Tabella 1 - (segue)

Art. 7 (Pavimenti, muri, soffitti, finestre e lucernari dei locali, scale e marciapiedi mobili, banchina e rampe di lancio).

1. A meno che non sia richiesto diversamente dalle necessità della lavorazione, è vietato adibire a lavori continuativi i locali chiusi che non rispondono alle seguenti condizioni:
 - a) essere ben difesi contro gli agenti atmosferici, e provvisti di un isolamento termico sufficiente, tenuto conto del tipo di impresa e dell'attività fisica dei lavoratori;
 - b) avere aperture sufficienti per un rapido ricambio d'aria;
 - c) essere ben asciutti e difesi contro l'umidità;"

...

Tabella 2 - Passi del D.Lgs.242/96 che si riferiscono, esclusivamente o anche, agli aspetti termici.

Art. 27 - Integrazione all'allegato IV del D.Lgs.626/94

All'allegato IV al decreto legislativo n.626/94, sono aggiunti infine i seguenti paragrafi:

...

Scarpe, stivali, e soprastivali di protezione contro il calore.

Scarpe, stivali, e soprastivali di protezione contro il freddo.

...

Giubbotti termici.

...

Indumenti di protezione contro il calore.

Indumenti di protezione contro il freddo.

...

Art. 29 - Integrazione all'allegato VII del D.Lgs.626/94

All'allegato VII al decreto legislativo n.626/94, sono aggiunti infine i seguenti paragrafi:

...

e) calore

Le attrezzature appartenenti al/i posto/i di lavoro non devono produrre un eccesso di calore che possa essere fonte di disturbo per i lavoratori

....

g) umidità

Si deve far in modo di ottenere e mantenere un'umidità soddisfacente

...

Tabella 3: Norme tecniche nel settore del "Thermal environment" a livello UNI, CEN o ISO.

-
1. Ambienti caldi - Valutazione dello stress termico per l'uomo negli ambienti di lavoro, basata sull'indice WBGT (temperatura a bulbo umido e del globotermometro)
UNI-EN 27243 - 1996
(dall'ISO 7243 - 1989, revisione della norma dell'1882, confermata nel 1994)
 2. Ambienti termici - Strumenti e metodi per la misura delle grandezze fisiche
UNI-EN 27726 - 1995
(dall'ISO 7726 - 1985, che attualmente è in revisione come DIS)
 3. Ambienti termici moderati - Determinazione degli indici PMV e PPD e specifiche per le condizioni di benessere termico
UNI-EN-ISO 7730 - 1997
(dall'ISO 7730 - 1994, revisione della norma del 1984)
 4. Hot environments. Analytical determination and interpretation of thermal stress using calculation of required sweat rates.
EN 12515 - 1997
(dall'ISO 7933 - 1989, con lievi modifiche)
 5. Ergonomia - Determinazione della produzione di energia termica metabolica
UNI-EN 28996 - 1996
(dall'ISO 8996 - 1990, confermata nel 1995)
 6. Evaluation of thermal strain by physiological measurements.
ISO 9886 - 1992
 7. Ergonomics of the thermal environment - Estimation of the thermal insulation and evaporative resistance of a clothing ensemble.
ISO 9920 - 1995
 8. Assessment of subjective thermal comfort using standardised judgement scales.
ISO 10551 - 1995
 9. Evaluation of cold environments - Determination of required clothing insulation, IREQ.
ISO/TR 11079 - 1993
 10. Ergonomics of the thermal environment: Principles and application of International Standards.
ISO 11399 - 1993
-

Tabella 4: Norme tecniche in preparazione nel settore del "Thermal environment" a livello UNI, CEN o ISO.

1. ISO/DIS 9241-6
Ergonomic requirements for office work with visual display terminals (VDTs)
- Part 6: Environmental requirements
 2. ISO/FDIS 12894
Ergonomics of the thermal environment: medical supervision of individuals exposed to hot or cold environments.
 3. ISO/FDIS 13731
Ergonomics of the thermal environment - Definitions, symbols and units
 4. ISO/WG 13732 - Part I
Ergonomics of the thermal environment - Method for the assessment of human responses to contact surfaces. Part I: Hot surfaces
 5. ISO/CD 13732 - Part II
Ergonomics of the thermal environment - Method for the assessment of human responses to contact surfaces. Part II: Moderate surfaces
 6. ISO/NP 13732 - Part III
Ergonomics of the thermal environment - Method for the assessment of human responses to contact surfaces. Part III: Cold surfaces
 7. ISO/WG 14415
Ergonomics of thermal environment - Application of international standards to disabled, the aged and other handicapped persons.
 8. ISO/NP 14505
Ergonomics of the thermal environment - Evaluation of thermal environments on vehicles.
 9. ISO/NP 15265
Ergonomics of the thermal environment - Risk of stress or discomfort.
 10. ISO/NP 15742
Ergonomics of the physical environment - Determination of the combined effect of the thermal environment, air pollution, acoustics and illuminations on humans.
 11. ISO/NP 15743
Ergonomics of the thermal environment - Working practices for cold indoor environments.
 12. CEN/TC122/JWG 9
Thermal characteristics of personal protective equipment
-

Tabella 5: Esempio di tabella che fornisce l'energia metabolica per alcune occupazioni. Dalla norma UNI-EN 28996 (cfr. **Tabella 3**).

Occupazione	Energia metabolica (W/m²)
Artigiani	
Muratore	da 110 a 160
Falegname	da 110 a 175
Vetraio	da 90 a 125
Imbianchino	da 100 a 130
Panettiere	da 110 a 140
Macellaio	da 105 a 140
Orologiaio	da 55 a 70
Industria mineraria	
Addetto ai trasporti	da 70 a 85
Minatore di carbone (bassa stratificazione)	da 140 a 240
Addetto al forno da coke	da 115 a 175
Industria siderurgica	
Addetto all'alto forno	da 170 a 220
Addetto al forno elettrico	da 125 a 145
Formatore a mano	da 140 a 240
Formatore alla macchina	da 105 a 165
Fonditore	da 140 a 240
Professioni grafiche	
Compositore a mano	da 115 a 190
Rilegatore	da 85 a 110
Agricoltura	
Giardiniere	da 115 a 190
Conduttore di trattore	da 85 a 110
Traffico	
Conducente d'auto	da 70 a 90
Conducente d'autobus	da 75 a 125
Conducente di tram	da 80 a 115
Conducente di filobus	da 80 a 125
Conducente di gru	da 65 a 145
Professioni varie	
Assistente di laboratorio	da 85 a 100
Insegnante	da 85 a 100
Commessa	da 100 a 120
Segretaria	da 70 a 85

Tabella 6 - Esempio di tabella che fornisce l'isolamento termico $I_{cl,u}$ di capi di abbigliamento. Dalla norma UNI-EN-ISO 7730 (cfr. **Tabella 3**).

Descrizione capo	$I_{cl,u}$ (clo)	Descrizione capo	$I_{cl,u}$ (clo)
<i>Biancheria intima</i>		<i>Pantaloni</i>	
Slip	0,03	Corti	0,06
Mutande lunghe	0,10	Leggeri	0,20
Camiciola	0,04	Normali	0,25
Maglietta	0,09	Di flanella	0,28
Camicia, maniche lunghe	0,12	<i>Camicie-bluse</i>	
Slip e reggiseno	0,03	Maniche corte	0,15
<i>Abiti-gonne</i>		Leggera, maniche lunghe	0,20
Gonna leggera (estiva)	0,15	Normale, maniche lunghe	0,25
Gonna pesante (invernale)	0,25	Di flanella, maniche lunghe	0,30
Abito leggero, maniche corte	0,20	Blusa leggera, maniche lunghe	0,15
Abito pesante, maniche lunghe	0,40	<i>Abbigliamento per esterno</i>	
Completo termico	0,55	Cappotto	0,60
<i>Giacche</i>		Sotto-giacca	0,55
Leggera, estiva	0,25	Parka	0,70
Giacca classica	0,35	Tuta in "fiber pelt"	0,55
Camice	0,30	<i>Abiti pesanti, "fiber pelt"</i>	
<i>Vari</i>		Completo termico	0,90
Calzini	0,02	Pantaloni	0,35
Calzini sottili, alla caviglia	0,05	Giacca	0,40
Calzini sottili, lunghi	0,10	Gilet	0,20
Calze di nylon	0,03	<i>Maglioni</i>	
Scarpe (suola sottile)	0,02	Gilet	0,12
Scarpe (suola spessa)	0,04	Maglione leggero	0,20
Stivali	0,10	Maglione classico	0,28
Guanti	0,05	Maglione pesante	0,35

Tabella 7: Esempio di tabella che fornisce l'isolamento termico I_{cl} di combinazioni di capi d'abbigliamento. Dalla UNI-EN-ISO 7730 (cfr. **Tabella 3**).

Abbigliamento	I_{cl}	
	(clo)	($m^2 K/W$)
Da lavoro		
Mutande, completo termico, calzini, scarpe	0,70	0,110
Mutande, camicia, pantaloni, calzini, scarpe	0,75	0,115
Mutande, camicia, completo termico, 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
Abbigliamento intimo corto, camicia, pantaloni, giacca, calzini, scarpe	1,00	0,155
Abbigliamento intimo lungo, termo-giacca, calzini, scarpe	1,20	0,185
Abbigliamento intimo corto, camicia, pantaloni, giacca, termo-giacca, calzini, scarpe	1,25	0,190
Abbigliamento intimo corto, camicia, pantaloni, giacca, termo-giacca, e pantaloni, calzini, scarpe	1,55	0,225
Abbigliamento intimo corto, camicia, pantaloni, giacca, giacca con imbottitura pesante e tuta, calzini, scarpe	1,85	0,285
Abbigliamento intimo corto, camicia, pantaloni, giacca, giacca con imbottitura pesante e tuta, calzini, scarpe, berretto, guanti	2,00	0,310
Abbigliamento intimo lungo, termo-giacca e pantaloni, termo-giacca esterna e pantaloni, calzini, scarpe	2,20	0,340
Giornaliero		
Slip, maglietta, pantaloncini, calzini leggeri, sandali	0,30	0,050
Slip, sottabito, calze lunghe, abito leggero con maniche, sandali	0,45	0,070
Mutande, camicia con maniche corte, pantaloni leggeri, calzini leggeri, scarpe	0,50	0,080
Slip, calze lunghe, camicia a maniche corte, gonna, sandali	0,55	0,085
Mutande, camicia, pantaloni leggeri, calzini, scarpe	0,60	0,095
Slip, sottabito, calze lunghe, abito, scarpe	0,70	0,105
Abbigliamento intimo, camicia, pantaloni, calzini, scarpe	0,70	0,110
Abbigliamento intimo, tuta da jogging, calzini lunghi, scarpe da corsa	0,75	0,115
Slip, camicia, gonna, maglia a girocollo, calzettoni al ginocchio spessi, scarpe	0,90	0,140
Slip, camicia, pantaloni, giacca, calzini, scarpe	1,00	0,155
Slip, calze lunghe, camicia, gonna, gilet, giacca	1,00	0,155
Slip, calze lunghe, blusa, gonna lunga, giacca, scarpe	1,10	0,170

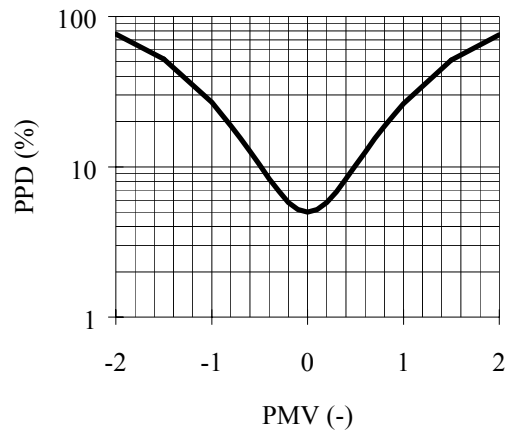


Figura 1 - Relazione tra gli indici PMV e PPD. Dalla UNI-EN-ISO 7730 (cfr. **Tabella 3**).

**INSERIRE QUI
 FIGURA 2
 DISPONIBILE
 SOLO
 SU CARTA
 VEDI FALDONE**

Figura 2 - Curve a t_o costante di benessere e aree di benessere in funzione di M e di I_{cl} per $\phi = 0,50$, $W = 0$ e v_{ar} calcolata con la (2) per $v_a = 0$. Dalla UNI-EN-ISO 7730 (cfr. **Tabella 3**).

INSERIRE
FIGURA 3
DISPONIBILE
SOLO
SU CARTA
VEDI FALDONE

Figura 3 - Esempio di mutazioni di velocità in uno spazio ventilato.

INSERIRE QUI
FIGURA 4
DISPONIBILE
SOLO
SU CARTA
VEDI FALDONE

Figura 4 - Valori di temperatura dell'aria, t_a , e dell'intensità di turbolenza, T_u , per $DR = 15\%$ Dalla UNI-EN-ISO 7730 (cfr. **Tabella 3**).

Tabella 8: Condizioni per il comfort termoigrometrico per attività sedentarie o leggere e per persone sedute come da UNI-EN-ISO 7730 (cfr. **Tabella 3**)

Grandezza	Condizione	PD o PPD (%)
PMV	$-0,5 \leq PMV \leq 0,5$	10
Δt_{av}	$(t_{a,1,1} - t_{a,0,1}) \leq 3^{\circ}C$	≤ 5
$\Delta t_{pr,0,6}$ ¹	$\Delta t_{pr,0,6h} \leq 10^{\circ}C$ $\Delta t_{pr,0,6)v} \leq 5^{\circ}C$	≤ 5
t_p	$19 < t_p \leq 26^{\circ}C$ ²	≤ 10
v_a	$DR \leq 15\%$	≤ 15

1 Solo in inverno

2 In caso di pavimenti riscaldati, il limite superiore dell'intervallo di accettabilità diventa 29°C.

Tabella 9: Valori limite per il WBGT per la norma UNI-EN 27243 (cfr. **Tabella 3**)

Classe	Metabolismo, M		Valori di riferimento di WBGT [°C]			
	(W/m ²)	(W)	<i>Soggetto acclimatato</i>		<i>Soggetto non acclimatato</i>	
0	M < 65	M < 117	33		32	
1	65 < M < 130	117 < M < 234	30		29	
2	130 < M < 200	234 < M < 360	28		26	
			<i>Aria stagnante</i>	<i>Aria non stagnante</i>	<i>Aria stagnante</i>	<i>Aria non stagnante</i>
3	200 < M < 260	360 < M < 468	25	26	22	23
4	M > 260	M > 468	23	25	18	20

NOTA - I valori forniti sono stati stabiliti sulla base di un valore massimo della temperatura rettale di 38 °C

Tabella 10 - Valori limite per la norma EN 12515 (cfr. **Tabella 3**)

Criterio	Soggetti non acclimatati		Soggetti acclimatati	
	Allarme	Pericolo	Allarme	Pericolo
Massima frazione di pelle bagnata w_{max} (--)	0,85	0,85	1,0	1,0
Massima sudorazione				
<u>Riposo:</u>				
$M < 65 \text{ W/m}^2$	$SW_{max} \text{ W/m}^2$	100	150	200
	$SW_{max} \text{ (g/h)}$	260	390	520
<u>Lavoro:</u>				
$M > 65 \text{ W/m}^2$	$SW_{max} \text{ W/m}^2$	200	250	300
	$SW_{max} \text{ (g/h)}$	520	650	780
Massimo accumulo di energia				
	$Q_{max} \text{ (Wh/m}^2\text{)}$	50	60	50
Massima perdita di acqua				
	$D_{max} \text{ (Wh/m}^2\text{)}$	1000	1250	1500
	$D_{max} \text{ (g)}$	2600	3250	3900

Tabella 11: Valori di t_{sk} e w per il calcolo di IREQ secondo la ISO/TR 11079 (cfr. **Tabella 3**)

	t_{sk} (°C)	w (adim.)
IREQ _{min}	30	0,06
IREQ _{neu}	$35,7 - 0,0285 \frac{M}{A_b}$	$\frac{\left[3,05(0,256t_{sk} - 3,373 - p_a) + 0,42 \left(\frac{M}{A_b} - 58 \right) \right] \cdot R_{e,T}}{(p_{sk,s} - p_a)}$

Tabella 12: Corrispondenza tra i valori di WCI e di t_{ch} e relativi valori del tempo di congelamento delle parti del corpo esposte

WCI (W/m ²)	t_{ch} (°C)	Effetto
1200	-14	Molto freddo <i>Senza danno per esposizioni di 5 h con pelle secca</i>
1400	-22	Freddo rigido
1600	-30	<i>Le parti esposte congelano entro 1 ora</i>
1800	-38	
2000	-45	<i>Le parti esposte congelano entro 1 minuto</i>
2200	-53	
2400	-61	<i>Le parti esposte congelano entro 30 secondi</i>
2600	-69	