

**UNIVERSITA' DEGLI STUDI "MEDITERRANEA"  
DI REGGIO CALABRIA  
FACOLTA' DI INGEGNERIA  
Dipartimento di Informatica Matematica Elettronica e Trasporti**

QD-SD 03/02

**La valutazione delle condizioni termiche  
negli ambienti severi**

Antonino Nucara

**QUADERNO DI DIPARTIMENTO**

**Serie didattica**

Feo di Vito - 89100 Reggio Calabria - Italy

# INDICE

<b>Sommario .....</b>	<b>3</b>
<b>Abstract .....</b>	<b>3</b>
<b>1. Termoregolazione del corpo umano .....</b>	<b>5</b>
1.1 Bilancio termico del corpo umano .....	5
1.2 Variazione di energia interna.....	6
1.3 Metabolismo energetico .....	6
1.4 Potenza meccanica .....	7
1.5 Potenza termica dispersa nella respirazione .....	7
1.5.1 Scambio sensibile.....	7
1.5.2 Scambio latente .....	8
1.6 Potenza termica dispersa attraverso la pelle.....	8
1.6.1 Scambio per convezione .....	9
1.6.2 Scambio per conduzione .....	10
1.6.3 Scambio per radiazione.....	10
1.6.4 Temperatura del corpo umano abbigliato .....	11
1.6.5 Scambio per evaporazione .....	12
1.7 Equazione di bilancio .....	13
<b>2. Ambienti severi .....</b>	<b>15</b>
2.1 Ambienti severi caldi.....	15
2.2 Indice WBGT .....	16
2.2.1 Durata delle pause di riposo.....	17
2.3 Indice $SW_{req}$ .....	17
2.3.1 Tempo limite di esposizione .....	20
2.4 Ambienti severi freddi.....	21
2.5 Isolamento richiesto, IREQ .....	21
2.5.1 Tempo limite di esposizione .....	23
2.6 Indice WCI .....	23
<b>Bibliografia .....</b>	<b>25</b>

# La valutazione delle condizioni termiche negli ambienti severi

Antonino Nucara

## Sommario

La sensazione termica di un soggetto in un ambiente confinato è strettamente legata alla produzione di calore metabolico, allo scambio di energia con l'ambiente e alle conseguenti variazioni fisiologiche e di temperatura del corpo.

Nelle normali condizioni di vita e di lavoro l'uomo è generalmente esposto ad ambienti in cui è possibile raggiungere il benessere termico, definito come la condizione della mente per la quale l'uomo esprime soddisfazione per l'ambiente termico circostante. In questo caso gli ambienti saranno detti *ambienti moderati*.

Nei casi in cui le condizioni microclimatiche rendano impossibile raggiungere le condizioni di benessere, il soggetto esposto si troverà invece in condizioni di stress termico e gli ambienti prenderanno il nome di *ambienti severi*. Gli ambienti severi possono poi a loro volta essere classificati in *ambienti severi caldi* ed *ambienti severi freddi*.

Nell'ottica di valutare le condizioni termiche dei soggetti posti in ambienti severi, nella parte iniziale di questo documento verranno analizzati i meccanismi di termoregolazione del corpo umano e verranno definite le relazioni che consentono di esplicitare l'equazione di bilancio termico del corpo umano.

Successivamente, facendo riferimento alle normative nazionali ed internazionali emanate in tema di stress termico, verranno quindi descritti i procedimenti più comunemente adottati per la valutazione delle condizioni termiche dei soggetti esposti ad ambienti severi caldi ed ambienti severi freddi.

## Abstract

The thermal sensation of a subject in an indoor environment is strongly linked to the metabolic heat production of the body, to its thermal exchange with the environment, and to its physiological and of temperature variations.

In standard conditions of life and work, people is generally exposed to environments in which it is possible to reach thermal comfort, defined as the condition of the mind for which people express satisfaction for the surrounding thermal environment. In such case environments are defined *moderate environments*.

Nevertheless, in particular thermal conditions, it is impossible to reach comfort; in this case the exposed subjects are in thermal stress conditions and the environments are called *severe environments*. In addition, severe environments can be classified in *severe hot environments* and *severe cold environments*.

In order to evaluate thermal conditions of people in severe environments, in the first part of the text the thermoregulation mechanisms of human body will be analyzed and the terms of the heat balance equation for the human body will be definite.

Subsequently, with reference to domestic and international standards regarding thermal stress, the more commonly procedures adopted for the evaluation of the thermal conditions of the subjects exposed to severe hot and severe cold environments will be described.



## 1. Termoregolazione del corpo umano

Il corpo umano può essere suddiviso dal punto di vista fisiologico in due zone caratterizzate da differenti temperature. La prima, costituita dal nucleo interno, presenta una temperatura pressoché costante pari a circa  $37^{\circ}\text{C}$ , mentre la seconda, costituita dalla pelle e dai tessuti ad essa adiacenti, presenta una variabilità della temperatura che può andare da un massimo di  $45^{\circ}\text{C}$  ad un minimo che, a seconda della parte del corpo, può oscillare tra i  $4$  ed i  $17^{\circ}\text{C}$ .

Mentre la temperatura superficiale può variare in relazione alle condizioni dell'ambiente, la temperatura del nucleo deve mantenersi costante per garantire le condizioni di sopravvivenza dell'individuo (*omeotermia*). Per mantenere isoterma il nucleo, il corpo umano è dotato di un sistema di termoregolazione il cui funzionamento è comandato dall'ipotalamo, centro nervoso collocato nel cervello. Nell'ipotalamo confluiscono le terminazioni nervose provenienti dai recettori termici posti nel corpo. I segnali provenienti da essi vengono confrontati con valori di riferimento e qualora risultino differenti, vengono attivati i meccanismi di termoregolazione.

Tali meccanismi sono di due tipi: *vasomotori* e *comportamentali*.

Mediante la termoregolazione vasomotoria è possibile modificare la quantità di calore dispersa verso l'ambiente modificando la circolazione sanguigna superficiale. I capillari periferici sono dotati di valvole, gli *sfinteri*, che, aprendosi o chiudendosi, consentono infatti di mutare il flusso sanguigno.

Se l'ambiente esterno è caldo avviene allora l'apertura degli sfinteri (*vasodilatazione*) che ha come conseguenza un incremento del flusso termico scambiato con l'ambiente. In un ambiente freddo si ha invece la chiusura degli sfinteri (*vasocostrizione*) ed una riduzione degli scambi termici verso l'esterno.

Qualora la regolazione vasomotoria non sia sufficiente a mantenere la omeotermia del nucleo, interviene la regolazione comportamentale. Essa si manifesta in maniera differente per reazione al caldo o al freddo.

La regolazione contro il caldo porta alla sudorazione tramite la quale il corpo disperde calore a causa del cambiamento di stato del film di sudore che ricopre interamente la pelle. La regolazione contro il freddo comporta invece l'insorgere del brivido che consiste nell'attivazione dei gruppi muscolari con aumento nella generazione di energia termica all'interno del corpo, senza che si abbia però produzione di lavoro.

Se nemmeno i meccanismi comportamentali riescono a mantenere la temperatura del nucleo costante avviene la morte dell'individuo per danni irreversibili alle proteine dei tessuti nervosi (*ipertermia*) o per fibrillazione cardiaca (*ipotermia*).

### 1.1 Bilancio termico del corpo umano

Come appena descritto, il nucleo del corpo umano deve essere mantenuto a temperatura costante di circa  $37^{\circ}\text{C}$  per garantire la sopravvivenza dell'individuo. In realtà le condizioni termiche che normalmente si riscontrano negli ambienti di vita o di lavoro sono ben differenti da quelle del nucleo del corpo, per cui si instaura uno scambio termico tra uomo ed ambiente che può essere descritto a partire dal primo principio della termodinamica applicato al sistema corpo umano.

La variazione di energia interna,  $S$ , sarà allora pari alla differenza tra il tasso metabolico,  $M$ , al netto del lavoro meccanico,  $W$ , e le dispersioni termiche per convezione,  $C_{\text{res}}$ , e per evaporazione,  $E_{\text{res}}$ , dovute alla respirazione e gli scambi termici per convezione,  $C$ , radiazione,  $R$ , conduzione,  $K$ , ed evaporazione,  $E$ , attraverso la pelle:

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

Complessivamente gli scambi avvengono quindi per mezzo della respirazione e attraverso la superficie del corpo; per ognuna delle due modalità, si può poi distinguere un'aliquota latente da un'aliquota sensibile (Figura 1).

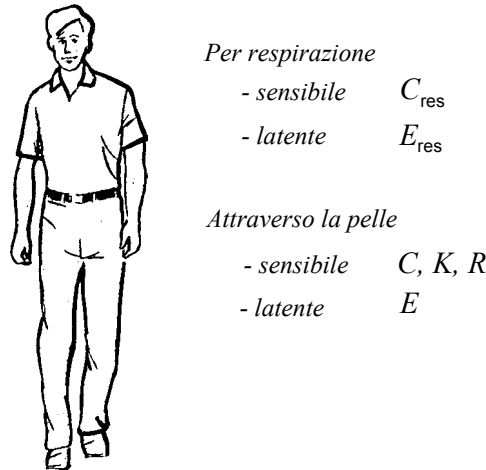


Figura 1 - Scambi termici tra corpo umano ed ambiente.

I termini dell'equazione di bilancio, aventi le dimensioni di una potenza per unità di superficie ed espressi in  $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ , saranno esplicitati nei successivi paragrafi.

### 1.2 Variazione di energia interna

Poiché il meccanismo di termoregolazione del corpo umano tende a mantenere costante la temperatura corporea, si può ipotizzare che, per una esposizione sufficientemente lunga in un ambiente moderato all'interno del quale venga svolta un'attività costante, la variazione di energia interna non sia apprezzabile.

Se questo non si verifica si può determinare un incremento o una diminuzione della temperatura del nucleo. Queste condizioni non sono però accettabili perché potrebbero comportare effetti dannosi all'organismo.

### 1.3 Metabolismo energetico

Gli alimenti e le bevande ingeriti dall'uomo vengono trasformati mediante reazioni chimiche di ossidazione; esse costituiscono il metabolismo energetico o tasso metabolico dell'individuo.

Le reazioni che avvengono sono prevalentemente esoenergetiche cosicché la maggior parte dell'energia chimica potenziale dei cibi viene trasformata in energia termica.

Una parte della produzione di energia termica è necessaria al corpo umano per conservare la temperatura corporea e per il funzionamento degli organi interni; questa aliquota è detta *metabolismo basale* ed assume un valore di circa  $43 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ . L'ulteriore produzione di calore è necessaria invece per le attività dell'individuo e può variare notevolmente a secondo dell'attività svolta.

La potenza metabolica connessa all'attività dell'individuo viene normalmente valutata per mezzo di tabelle (ISO, 1990).

Per la valutazione dell'energia metabolica si fa spesso ricorso ad un'unità incoerente, il "met", che risulta essere pari a:

$$1 \text{ met} = 50 \text{ kcal}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{m}^{-2} = 58,2 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$$

#### 1.4 Potenza meccanica

L'uomo può essere considerato come una macchina termica che trasforma una piccola parte dell'energia termica metabolica in lavoro, mentre ne riversa la maggior parte nella sorgente ambiente sotto forma di calore.

Da ciò deriva che, nelle normali attività, parte dell'energia prodotta con il metabolismo viene convertita in energia meccanica. L'energia meccanica è assunta positiva se l'uomo compie lavoro verso l'ambiente mentre è negativa nel caso opposto.

Si definisce rendimento meccanico l'espressione:

$$\eta = \frac{W}{M} \quad (2)$$

in cui  $W$  è la potenza meccanica ed  $M$  è il metabolismo.

Il valore del rendimento meccanico è normalmente molto basso ( $\eta < 0.20$ ) e risulta leggermente crescente con la potenza meccanica scambiata. Per la sua valutazione si fa ricorso a tabelle (ISO, 1990). Dalla conoscenza del rendimento meccanico si può poi risalire alla potenza meccanica che, così come il metabolismo, risulta funzione dell'attività svolta dall'individuo.

#### 1.5 Potenza termica dispersa nella respirazione

Nella respirazione l'aria inspirata ha una temperatura in genere inferiore a quella del nucleo del corpo; nel momento in cui viene espirata, essa avrà subito però un riscaldamento e sarà stata saturata di umidità. Da ciò deriva che essa avrà acquistato un'entalpia ed un titolo maggiori rispetto alle condizioni di inspirazione cioè alle condizioni ambientali.

Si ha allora che lo scambio termico connesso alla respirazione può essere considerato come la somma di due aliquote: una dovuta alla differenza di temperatura tra l'aria inspirata e quella espirata (*scambio sensibile*), ed una dovuta alla differenza di titolo (*scambio latente*).

##### 1.5.1 Scambio sensibile

Lo scambio sensibile può essere valutato con la seguente relazione:

$$C_{\text{res}} = \frac{c_p \dot{V}_{\text{ex}} (t_{\text{ex}} - t_a)}{A_b} \quad (3)$$

dove:

- $c_p$  è il calore specifico a pressione costante dell'aria, pari a  $1000 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ;
- $\dot{V}_{\text{ex}}$  è la portata d'aria espirata, in  $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$ ;
- $t_{\text{ex}}$  è la temperatura dell'aria espirata, in  $^{\circ}\text{C}$ ;
- $t_a$  è la temperatura dell'aria ambiente, in  $^{\circ}\text{C}$ ;
- $A_b$  è la superficie del corpo umano nudo, in  $\text{m}^2$ .

La portata d'aria espirata può essere espressa in funzione dell'attività metabolica, mediante la relazione:

$$\frac{\dot{V}_{\text{ex}}}{A_b} = 1,43 \cdot 10^{-6} M \quad (4)$$

in cui  $M$  è espresso in  $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ .

Sostituendo la (4) nella (3) si ha allora:

$$C_{\text{res}} = 0,0014 \cdot M \cdot (t_{\text{ex}} - t_{\text{a}}) \quad (5)$$

### 1.5.2 Scambio latente

Lo scambio latente può essere invece espresso con la relazione:

$$E_{\text{res}} = \frac{c_e \dot{V}_{\text{ex}} (W_{\text{ex}} - W_{\text{a}})}{A_b} \quad (6)$$

dove:

- $c_e$  è il calore latente di vaporizzazione dell'acqua alla temperatura del nucleo, in  $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$ ;
- $\dot{V}_{\text{ex}}$  è la portata d'aria espirata, in  $\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$ ;
- $W_{\text{ex}}$  è il titolo dell'aria espirata, in  $\text{kg}_{\text{acqua}}\cdot\text{kg}^{-1}_{\text{aria secca}}$ ;
- $W_{\text{a}}$  è il titolo dell'aria ambiente, in  $\text{kg}_{\text{acqua}}\cdot\text{kg}^{-1}_{\text{aria secca}}$ .
- $A_b$  è la superficie del corpo umano nudo, in  $\text{m}^2$ .

Alla pressione di 1 *atm* è possibile esprimere la quantità  $(W_{\text{ex}} - W_{\text{a}})$  con la relazione (Fanger, 1970):

$$W_{\text{ex}} - W_{\text{a}} = 0,029 - 4,94 \cdot 10^{-6} p_a \quad (7)$$

in cui  $p_a$  (Pa) è la pressione parziale del vapore d'acqua nell'aria, pari a:

$$p_a = \frac{\text{RH} p_{\text{as}}}{100} \quad (8)$$

con RH (%) umidità relativa e  $p_{\text{as}}$  (Pa) pressione di saturazione del vapore d'acqua alla temperatura dell'ambiente.

Pertanto, sostituendo le equazioni (4) e (7) nella (6) ed ipotizzando  $c_e=2407 \text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ , si ha:

$$E_{\text{res}} = 1,72 \cdot 10^{-5} M (5867 - p_a) \quad (9)$$

Nell'equazione (9) la quantità 5867 rappresenta la pressione di saturazione dell'aria espirata,  $p_{\text{ex}}$ . Talvolta viene allora usata l'equazione:

$$E_{\text{res}} = 1,72 \cdot 10^{-5} M (p_{\text{ex}} - p_a) \quad (10)$$

### 1.6 Potenza termica dispersa attraverso la pelle

Parte della produzione interna di calore viene dispersa verso l'ambiente attraverso la pelle. Come per la potenza dispersa nella respirazione, lo scambio termico che avviene attraverso la pelle può essere considerato la somma di due aliquote, date rispettivamente dallo scambio sensibile e da quello latente.

Lo scambio sensibile sarà a sua volta costituito da tre contributi: lo scambio per convezione, per conduzione e per irraggiamento. Lo scambio latente sarà invece dovuto



alla sudorazione ed alla diffusione di vapore attraverso gli strati superficiali della pelle.

### 1.6.1 Scambio per convezione

La superficie esterna del corpo umano si troverà normalmente ad una temperatura diversa da quella dell'aria che la circonda. Ciò provocherà uno scambio termico per convezione che sarà funzione sia della differenza di temperatura tra la superficie esterna del corpo abbigliato e l'aria, sia, tramite la conduttanza termica convettiva, della velocità dell'aria:

$$C = f_{cl} h_c (t_{cl} - t_a) \quad (11)$$

dove:

- $f_{cl}$  è il coefficiente di area dell'abbigliamento;
- $h_c$  è la conduttanza termica convettiva abiti-aria, in  $W \cdot m^{-2} \cdot ^\circ C^{-1}$ ;
- $t_{cl}$  è la temperatura media della superficie esterna del corpo umano abbigliato, in  $^\circ C$ ;
- $t_a$  è la temperatura dell'aria ambiente, in  $^\circ C$ .

Il coefficiente  $f_{cl}$ , dato dal rapporto tra la superficie esterna del corpo umano abbigliato,  $A_{cl}$ , e la superficie esterna del corpo umano nudo,  $A_b$ , non è mai inferiore all'unità e, in dipendenza del tipo di abbigliamento, può essere calcolato in funzione della resistenza termica del vestiario,  $I_{cl}$ , per mezzo della relazione (ISO, 1995):

$$f_{cl} = 1,00 + 1,97 I_{cl} \quad (12)$$

La resistenza termica dell'abbigliamento viene valutata per mezzo di tabelle (ISO, 1995) che consentono di stimare il parametro  $I_{cl}$  sia direttamente, per tipiche combinazioni di capi di vestiario, oppure a partire dalla resistenza termica dei singoli capi.

Così come il *met* per il metabolismo, per la resistenza termica dell'abbigliamento è stata introdotta una nuova unità di misura incoerente denominata “*clo*” e pari a:

$$1 \text{ clo} = 0,180 \text{ m}^2 \cdot ^\circ C \cdot \text{h} \cdot \text{kcal}^{-1} = 0,155 \text{ m}^2 \cdot ^\circ C \cdot W^{-1}.$$

La conduttanza termica convettiva abiti-aria può essere invece calcolata utilizzando, a secondo del regime di convezione differenti relazioni; le più usate sono riportate in Tabella 1.

Tabella 1 - Espressioni più comunemente utilizzate per il calcolo della conduttanza termica convettiva abiti-aria.

Regime	Equazione	Fonte
Convezione naturale	$h_c = 2,38 \sqrt[4]{t_{cl} - t_a}$	UNI EN ISO 7730
	$h_c = 2,38 \sqrt[4]{t_{sk} - t_a}$	ISO 7933
Convezione forzata	$h_c = 12,1 \sqrt{v_{ar}}$	UNI EN ISO 7730
	$v_{ar} \leq 1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ $h_c = 3,5 + 5,2 v_{ar}$	ISO 7933, ISO/TR 11079
	$v_{ar} > 1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ $h_c = 8,7 v_{ar}^{0,7}$	ISO 7933, ISO/TR 11079

Nella Tabella 1 il termine  $v_{ar}$  rappresenta la velocità relativa dell'aria, che può essere calcolata in funzione della velocità  $v_a$  dell'aria e del metabolismo  $M$  espresso in  $W \cdot m^{-2}$ ,

con l'equazione:

$$v_{ar} = v_a + 0,0052(M - 58) \quad (13)$$

### 1.6.2 Scambio per conduzione

Questo termine è in genere dovuto alla potenza termica dispersa dal corpo umano per il contatto con corpi solidi quali, ad esempio, gli oggetti tenuti in mano, il pavimento, o, per i soggetti seduti, la sedia.

La potenza dispersa per conduzione è comunque di difficile valutazione e poiché la sua entità è modesta viene in genere trascurata. Lo scambio conduttivo più rilevante, che è quello associato con il contatto con la sedia, viene infatti considerato nello scambio convettivo, mediante un incremento della resistenza termica degli abiti.

### 1.6.3 Scambio per radiazione

La maggior parte delle attività dell'uomo avviene normalmente in spazi confinati in cui le temperature delle superfici dell'involucro sono spesso differenti dalla temperatura superficiale del corpo umano. A causa di ciò si produce uno scambio termico per irraggiamento, valutabile con la relazione:

$$R = A_r \sigma \varepsilon \left[ (t_{cl} + 273)^4 - (\bar{t}_r + 273)^4 \right] \quad (14)$$

in cui:

- $A_r$  è l'area della superficie efficace del corpo umano, in  $m^2$ ;
- $\sigma$  è la costante di Stefan-Boltzmann, pari a  $5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W} \cdot m^{-2} \cdot K^{-4}$ ;
- $\varepsilon$  è l'emissività della superficie esterna del corpo abbigliato, mediamente pari a 0,97;
- $\bar{t}_r$  è la temperatura media radiante, in  $^{\circ}C$ , definita come la temperatura uniforme di una cavità nera in cui lo scambio termico radiativo con gli occupanti risulta essere uguale a quello scambiato con l'ambiente reale non uniforme.

L'area della superficie efficace del corpo umano, definita come l'area della più piccola superficie interamente convessa che avvolge il corpo, tiene conto del fatto che, poiché il corpo umano non è completamente convesso, esso vede solo parzialmente l'ambiente circostante.

L'area della superficie efficace può essere calcolata con la seguente relazione:

$$A_r = f_r f_{cl} A_b \quad (15)$$

in cui  $f_r$ , coefficiente di area efficace, è dato dal rapporto fra la superficie esterna del corpo abbigliato che vede l'ambiente circostante e la superficie esterna del corpo abbigliato; esso è stato valutato pari a 0,696 per persone in piedi e pari a 0,725 per persone sedute (Fanger, 1970). Qualora non fosse nota a priori la posizione del soggetto, per  $f_r$  si assume il valore medio di 0,710.

Sostituendo l'equazione (15) nella (14), sostituendo i valori di  $\sigma$ ,  $\varepsilon$  e considerando lo scambio per unità di superficie del corpo umano si ottiene:

$$R = 3,96 \cdot 10^{-8} f_{cl} \left[ (t_{cl} + 273)^4 - (\bar{t}_r + 273)^4 \right] \quad (16)$$

#### 1.6.4 Temperatura del corpo umano abbigliato

Nelle precedenti equazioni (11) e (16) relative agli scambi sensibili per convezione e radiazione è presente la dipendenza con la temperatura media della superficie esterna del corpo umano abbigliato,  $t_{cl}$ .

È possibile tuttavia eliminare questa dipendenza facendo alcune considerazioni sullo scambio termico secco complessivo.

Se si considera infatti il corpo umano abbigliato è possibile valutare due differenti temperature: la temperatura della pelle e la temperatura della superficie esterna degli abiti. Inoltre tra la superficie della pelle e la superficie esterna degli abiti è possibile individuare uno strato di aria tra la pelle e la superficie interna degli abiti ed uno strato costituito dal tessuto degli stessi abiti (Figura 2).

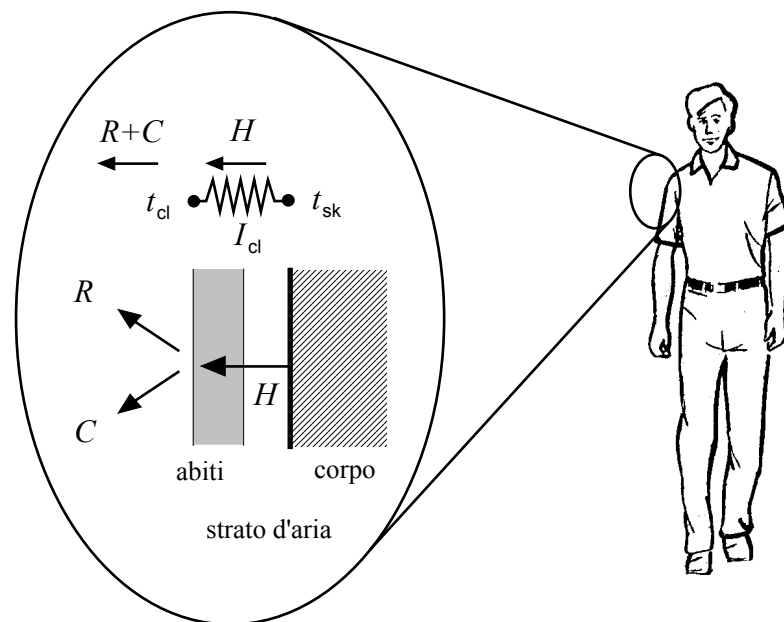


Figura 2 - Meccanismo di scambio termico secco sulla superficie del corpo abbigliato.

I due strati opporranno allora una resistenza al trasferimento del calore sensibile proveniente dal corpo. In condizioni stazionarie si può ipotizzare che lo scambio termico sensibile attraverso gli abiti,  $H$ , eguagli lo scambio termico complessivo per convezione,  $C$ , e per irraggiamento,  $R$ , che lascia la superficie del corpo abbigliato.

Si avrà allora:

$$H = C + R \quad (17)$$

Il termine dovuto allo scambio termico secco attraverso gli abiti, espresso in  $W \cdot m^{-2}$  può essere valutato con la relazione:

$$H = \frac{t_{sk} - t_{cl}}{I_{cl}} \quad (18)$$

La resistenza termica dell'abbigliamento,  $I_{cl}$ , tiene infatti conto infatti anche della resistenza termica opposta dallo strato d'aria tra la pelle e gli abiti.

A questo punto sostituendo nell'equazione (17) le equazioni (11), (16) e (18) si ottiene:

$$\frac{t_{sk} - t_{cl}}{I_{cl}} = f_{cl} h_c (t_{cl} - t_a) + 3,96 \cdot 10^{-8} f_{cl} \left[ (t_{cl} + 273)^4 - (\bar{t}_r + 273)^4 \right]$$

e quindi:

$$t_{cl} = t_{sk} - I_{cl} \left\{ f_{cl} h_c (t_{cl} - t_a) + 3,96 \cdot 10^{-8} f_{cl} \left[ (t_{cl} + 273)^4 - (\bar{t}_r + 273)^4 \right] \right\} \quad (19)$$

### 1.6.5 Scambio per evaporazione

Lo scambio termico latente che si verifica attraverso la superficie della pelle è innescato dall'evaporazione del sottile film liquido che si viene a creare sulla superficie della pelle per effetto della sudorazione e per effetto della diffusione del vapore negli strati superficiali della pelle.

La potenza evaporativa totale può essere determinata dalla seguente relazione:

$$E = w \frac{p_{sk,s} - p_a}{R_{e,T}} \quad (20)$$

in cui:

- $w$  è la frazione di pelle bagnata;
- $p_{sk,s}$  è la pressione di saturazione del vapor d'acqua alla temperatura della pelle, in Pa;
- $p_a$  è la pressione parziale del vapor d'acqua nell'aria, in Pa;
- $R_{e,T}$  è la resistenza totale degli abiti allo scambio termico evaporativo, in  $m^2 \cdot Pa \cdot W^{-1}$ .

La resistenza evaporativa degli abiti è normalmente valutata per mezzo di tabelle (ISO, 1995).

Il contributo allo scambio termico latente complessivo dovuto alla diffusione di vapore attraverso la pelle è minimo, anche se il meccanismo è sempre attivo indipendentemente dalla sudorazione. Tuttavia se la frazione di pelle bagnata è molto bassa o nulla, il contributo della diffusione di vapore può essere valutato con la relazione:

$$E_d = \mu c_e (p_{sk,s} - p_a) \quad (21)$$

in cui:

- $\mu$  è la permeanza della pelle alla diffusione del vapor d'acqua, in  $kg \cdot s^{-1} \cdot m^{-2} \cdot Pa^{-1}$ ;
- $c_e$  è il calore latente di vaporizzazione dell'acqua alla temperatura della pelle, in  $J \cdot kg^{-1}$ ;
- $p_{sk,s}$  è la pressione di saturazione del vapor d'acqua alla temperatura della pelle, in Pa;
- $p_a$  è la pressione parziale del vapor d'acqua nell'aria, in Pa;

Nell'ipotesi che la resistenza dell'abbigliamento alla trasmissione del vapore sia trascurabile rispetto a quella della pelle - caso che si verifica per abiti di lana o cotone - è possibile assumere per la permeanza il valore di  $1,27 \cdot 10^{-9} kg \cdot s^{-1} \cdot m^{-2} \cdot Pa^{-1}$ . Inoltre, assumendo per il calore latente di vaporizzazione il valore di  $2,41 \cdot 10^3 J \cdot kg^{-1}$ , valido per la temperatura di  $35^\circ C$ , e per la pressione di saturazione del vapor d'acqua alla

temperatura della pelle la seguente espressione lineare valida nel campo di temperatura 27÷37°C:

$$p_{sk,s} = 256 t_{sk} - 3373 , \quad (22)$$

la precedente relazione (21) può essere scritta nella forma:

$$E_d = 3,05 \cdot 10^{-3} (256 t_{sk} - 3373 - p_a) . \quad (23)$$

### 1.7 Equazione di bilancio

Sostituendo le relazioni trovate nei precedenti paragrafi nell'equazione (1) si ottiene l'equazione di bilancio del corpo umano, che risulta essere del tipo:

$$S = f(M, I_{cl}, t_a, p_a, v_{ar}, \bar{t}_r, t_{sk}, E) \quad (24)$$

Tale equazione lega fra loro due variabili dipendenti dal soggetto (*metabolismo, resistenza termica dell'abbigliamento*), quattro variabili ambientali (*temperatura, umidità e velocità dell'aria, temperatura media radiante*) e due variabili fisiologiche, dipendenti dal sistema di termoregolazione (*temperatura della pelle, potenza dispersa per evaporazione attraverso la pelle*).

Perché non vi sia accumulo o dispersione di calore dal nucleo del corpo è necessario che la variazione di energia interna sia nulla; si deve pertanto verificare che:

$$f(M, I_{cl}, t_a, p_a, v_{ar}, \bar{t}_r, t_{sk}, E) = 0 \quad (25)$$

Questa condizione, che consente di mantenere lo stato di omotermia del nucleo, non è però da sola sufficiente a garantire il comfort termico dell'individuo; è necessario infatti che si verifichino ulteriori condizioni riguardanti le grandezze fisiologiche per poter garantire il benessere termico.

L'equazione può però essere utilmente adoperata per valutare le condizioni termiche negli ambienti severi, nei quali gli individui si trovano in condizioni di stress termico cioè in condizioni termiche lontane dal comfort.



## 2. Ambienti severi

Gli ambienti severi sono quegli ambienti in cui non potendosi raggiungere le condizioni di comfort, è necessario preoccuparsi della salvaguarda della salute degli occupanti.

Si distinguono in ambienti severi caldi ed ambienti severi freddi. Normalmente per valutare se l'ambiente in esame è termicamente severo, si utilizza l'indice PMV (UNI, 1997): se si verifica  $PMV > 1$  si considera l'ambiente come severo caldo; se si verifica  $PMV < -1$  l'ambiente è da considerarsi severo freddo.

### 2.1 Ambienti severi caldi

I problemi che sorgono negli ambienti severi caldi sono legati essenzialmente al fatto che i meccanismi di termoregolazione possono non essere sufficienti a garantire l'omotermia del nucleo del corpo; questo comporta un accumulo di energia termica ed un conseguente innalzamento della temperatura corporea che può raggiungere livelli inaccettabili. Inoltre la continua attivazione del meccanismo comportamentale della sudorazione può portare a squilibri idrominerali.

Entrambi questi fenomeni possono indurre nell'organismo effetti patologici che più in dettaglio sono classificati come:

- colpo di calore;
- deficit idrico;
- sincope da caldo;
- deficit sodico.

Il colpo di caldo si verifica quando la temperatura del nucleo si eleva oltre i 40°C. Intervengono sintomi di ipertermia, scarsa secrezione urinaria, forte riduzione della sudorazione, disturbi mentali, convulsioni epilettiche, congestione polmonare e talvolta coma. L'intervento da attuare consiste nell'abbassare il più velocemente possibile la temperatura corporea mediante bagni o impacchi freddi, agendo però in modo tale da evitare il pericolo di collasso. Contemporaneamente bisogna ridurre lo stato di disidratazione facendo assumere liquidi alla persona colpita oppure, se il soggetto non è cosciente, procedendo con iniezioni endovena di soluzioni glucosate o di cloruro di sodio.

Se la perdita di acqua con la sudorazione non è compensata con l'assimilazione di bevande insorge il deficit idrico, che predispone al colpo di calore. I sintomi consistono in sete, affaticamento e riduzione della sudorazione. Per deficit oltre il 10% del peso corporeo possono insorgere delirio e successivamente la morte. Per scongiurare queste eventualità è necessario reidratare il soggetto con bevande o iniezioni endovena di soluzioni glucosate o di cloruro di sodio.

La sincope da calore nasce invece dalla distribuzione anomala del flusso sanguigno causata dal caldo. Il sangue si accumula negli arti, soprattutto quelli inferiori e diviene insufficiente nell'area celebrare. La mancata ossigenazione del cervello può così portare a stordimento, vertigini ed infine allo svenimento, preceduto da pallore. L'intervento da attuare consiste nella messa a riposo del soggetto colpito in ambiente fresco nella contemporanea assunzione di bevande fresche. Questa patologia è comunque meno grave del colpo di calore perché non comporta l'abolizione della sudorazione.

Infine il deficit sodico è dovuto alla insufficiente presenza di sali di sodio nell'organismo, dovuta alla loro perdita con la sudorazione. I sintomi di questa

patologia, che si manifestano in genere dopo diversi giorni di esposizione al caldo, sono affaticamento, stanchezza e debolezza muscolare; per deficit sodici moderati si hanno spasmi muscolari dolorosi detti crampi da calore. Questa patologia, che non è pericolosa perché non predispone agli effetti del colpo di calore, si risolve mediante iniezioni endovena di soluzione di cloruro di sodio.

Quando si esaminano gli ambienti severi caldi si è soliti distinguere i soggetti acclimatati da quelli non acclimatati. Un soggetto non acclimatato reagisce infatti agli ambienti caldi in modo più difficoltoso rispetto ad un soggetto acclimatato poiché quest'ultimo, per motivi fisiologici, attiva la sudorazione più rapidamente; inoltre, a parità di lavoro, il soggetto acclimatato ha una frequenza cardiaca più bassa.

L'acclimatazione, che può essere naturale o indotta, si attua in un arco di tempo di una settimana durante la quale la persona viene portata gradualmente ai parametri climatici tipici del luogo di lavoro.

La valutazione delle condizioni di stress termico negli ambienti severi caldi viene comunemente affrontata mediante due principali metodologie: quella riportata sulla norma UNI EN 27243 (UNI, 1996), che fa uso dell'indice WBGT, e quella più rigorosa della norma ISO 7933 (ISO, 1989) che fa riferimento all'indice SW.

## 2.2 Indice WBGT

Il WBGT (*Wet Bulb Globe Temperature*) (UNI, 1996) è un indice empirico di temperatura che viene utilizzato per la valutazione degli ambienti termici severi caldi, derivato dalle correlazioni riscontrate sperimentalmente tra parametri microclimatici e reazioni fisiologiche di un campione numeroso di soggetti.

Per la determinazione delle condizioni di stress termico all'interno di un ambiente è necessario conoscere la temperatura, la velocità e l'umidità dell'aria nonché la temperatura media radiante. L'indice WBGT utilizza alcune grandezze derivate da esse per caratterizzare del punto di vista termico l'ambiente in esame.

In particolare esistono due relazioni per quanto riguarda il WBGT. La prima, da utilizzarsi in ambienti interni o in esterno in assenza di radiazione solare, è:

$$\text{WBGT} = 0.7 t_{nw} + 0.3 t_g, \quad (26)$$

mentre la seconda, da utilizzarsi in esterno in presenza di irraggiamento solare, è:

$$\text{WBGT} = 0.7 t_{nw} + 0.2 t_g + 0.1 t_a. \quad (27)$$

Nelle precedenti relazioni  $t_{nw}$  è la temperatura di bulbo umido a ventilazione naturale,  $t_a$  è la temperatura dell'aria e  $t_g$  è la temperatura di globotermometro. L'indice WBGT è espresso in gradi centigradi.

Anche se l'umidità, la velocità dell'aria e la temperatura media radiante non risultano esplicitamente nelle relazioni (26) e (27), l'indice WBGT dipende comunque dalle tutte le quattro grandezze microclimatiche precedentemente elencate; infatti l'indicazione del globotermometro è funzione della temperatura media radiante, della temperatura dell'aria e della velocità dell'aria e l'indicazione del termometro a bulbo bagnato è funzione della temperatura media radiante, della temperatura, dell'umidità e della velocità dell'aria.

L'indice WBGT, che rappresenta lo stress termico che l'ambiente esercita sulla persona, non dipende né dal metabolismo, né dall'abbigliamento indossato.

La norma UNI EN 27243 fornisce valori limite per l'indice WBGT da non superare per evitare che il nucleo del corpo raggiunga una temperatura superiore a 38°C. I limiti



sono riferiti ad una persona in buono stato di salute, adatta all'attività in esame, con una resistenza termica dell'abbigliamento pari a 0.6 clo e permeabilità del vestiario pari a quella degli abiti di cotone. I limiti, riportati in Tabella 2, si riferiscono a differenti valori di metabolismo, parametro legato all'attività svolta dall'individuo, e sono differenti per soggetti acclimatati o non acclimatati; sono inoltre differenti per ambienti con aria stagnante rispetto a quelli con aria non stagnante.

Tabella 2 - Valori limite dell'indice WBGT.

Classe di tasso metabolico	Tasso metabolico		Valore limite WBGT			
	W/m <sup>2</sup>	met	Soggetti acclimatati		Soggetti non acclimatati	
			Aria stagnante	Aria non stagnante	Aria stagnante	Aria non stagnante
0 (a riposo)	≤65	≤1.1	33	33	32	32
1	65-130	1.1-2.2	30	30	32	32
2	130-200	2.2-3.4	28	28	26	26
3	200-260	3.4-4.5	25	26	22	23
4	>260	>4.5	23	25	18	20

### 2.2.1 Durata delle pause di riposo

Qualora l'indice WBGT risulti superiore al valore limite è necessario prevedere delle pause di riposo nei normali cicli di lavoro per evitare che possa verificarsi per i soggetti esposti un accumulo di energia termica all'interno del nucleo.

A tal fine la norma UNI EN 27243 fornisce a titolo informativo un diagramma mediante il quale ricavare la durata dei periodi di riposo in funzione della potenza metabolica e dell'indice WBGT (Figura 3); tale valutazione è riferita ad un intervallo temporale di un'ora.

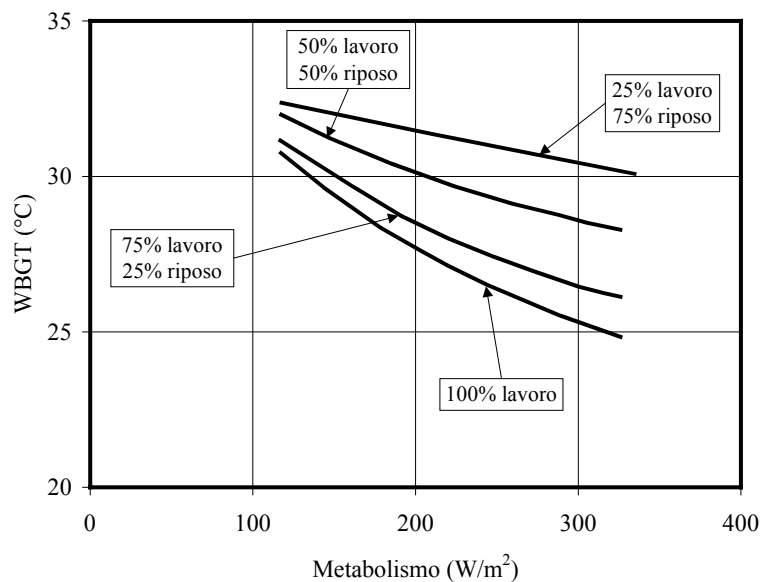


Figura 3 - Cicli orari di lavoro/riposo per persone acclimatate al calore in condizioni di aria non stagnante.

### 2.3 Indice $SW_{req}$

Un metodologia più rigorosa utilizzata per la valutazione delle condizioni termiche in ambienti severi caldi è quella della sudorazione richiesta, su cui è fondata la norma ISO 7933 (ISO, 1989).

Il metodo quantifica lo stress termico da caldo legandolo alla quantità di calore che il corpo umano può disperdere per sudorazione; il valore di sudorazione risultante dall'applicazione dell'equazione di bilancio termico del corpo umano deve essere tale da non fare insorgere accumulo di energia termica all'interno del nucleo.

Dall'applicazione dell'equazione di bilancio termico:

$$S = M - W - E_{\text{res}} - C_{\text{res}} - C - R - K - E, \quad (28)$$

nelle ipotesi di accumulo nullo ed ipotizzando trascurabile il termine dovuto alla conduzione, è possibile ricavare la quantità di calore da disperdere con la sudorazione,  $E$ :

$$E = M - W - E_{\text{res}} - C_{\text{res}} - C - R. \quad (29)$$

La temperatura media della pelle, che è una variabile indipendente del problema, può essere calcolata con la seguente relazione, suggerita dalla stessa ISO 7933:

$$t_{\text{sk}} = 30 + 0,093t_a + 0,045\bar{t}_r - 0,571v_a + 0,254p_a + 0,00128M - 3,57I_{\text{cl}} \quad (30)$$

Una volta calcolata la quantità di calore da disperdere con la sudorazione è possibile determinare la quantità oraria di sudore prodotta dal corpo, comprendendo anche quello che in realtà non evapora e non contribuisce allo scambio termico:

$$\text{SW} = \frac{E}{r}, \quad (31)$$

con SW potenza termica dispersa dalla vaporizzazione completa del sudore prodotto ed  $r$  efficienza evaporativa, che quantifica la frazione di sudore che effettivamente evapora; una parte del sudore prodotto infatti, gocciolando sul corpo, non contribuisce allo scambio termico.

L'efficienza evaporativa è calcolata nella norma ISO 7933 con la relazione:

$$r = 1 - \frac{w^2}{2}, \quad (32)$$

in cui  $w$  rappresenta la frazione di pelle bagnata. Quest'ultima quantità è definita come il rapporto tra la potenza termica dispersa,  $E$ , e il valore massimo della potenza termica dispersa per evaporazione dalla pelle,  $E_{\text{max}}$ .

$$w = \frac{E}{E_{\text{max}}}. \quad (33)$$

La massima potenza termica evaporativa dispersa attraverso la pelle è infine pari alla quantità:

$$E_{\text{max}} = \frac{p_{\text{sk,s}} - p_a}{R_{e,T}}, \quad (34)$$

con  $p_{\text{sk,s}}$  pressione di saturazione del sudore alla temperatura della pelle,  $p_a$  pressione parziale del vapor d'acqua nell'aria e  $R_{e,T}$  resistenza evaporativa degli abiti.

Le variabili in precedenza definite possono assumere valori diversi in rapporto alle condizioni a cui si riferiscono.

Si utilizza pertanto il termine di:

- richiesto (o necessario) per indicare il valore che la variabile deve assumere per soddisfare l'equazione di bilancio con accumulo nullo. Si utilizza a tal fine il pedice "req";
- previsto (o reale, o effettivo) per indicare il valore che si prevede assuma la variabile nell'ambiente in esame. Si indica con il pedice "p";
- limite (o massimo) per indicare il valore massimo attribuibile alla variabile in base a considerazioni fisiologiche. Si indica con il pedice "max".

Definite le precedenti quantità, la metodologia di calcolo prevede che vengano inizialmente calcolate la percentuale di pelle bagnata richiesta e la sudorazione richiesta, con le relazioni:

$$E_{\text{req}} = M - W - E_{\text{res}} - C_{\text{res}} - C - R ,$$

$$w_{\text{req}} = \frac{E_{\text{req}}}{E_{\text{max}}} = \frac{E_{\text{req}}}{\frac{p_{\text{sk,s}} - p_a}{R_{e,T}}} ,$$

$$r_{\text{req}} = 1 - \frac{w_{\text{req}}^2}{2} ,$$

$$SW = \frac{E_{\text{req}}}{r_{\text{req}}} .$$

A questo punto i valori calcolati devono essere confrontati con quelli limite della Tabella 3.

Tabella 3 - Valori limite per il calcolo della sudorazione richiesta (ISO, 1989).

Parametro	Soggetti non acclimatati		Soggetti acclimatati	
	Allarme	Pericolo	Allarme	Pericolo
Massima frazione di pelle bagnata $w_{\text{max}}$ (-)	0.85	0.85	1.00	1.00
Massima sudorazione $SW_{\text{max}}$ ( $\text{W m}^{-2}$ )	$M < 65 \text{ W m}^{-2}$ 100	150	200	300
	$M > 65 \text{ W m}^{-2}$ 200	250	300	400

Se si verifica che  $w_{\text{req}} < w_{\text{max}}$  e  $SW_{\text{req}} < SW_{\text{max}}$  il soggetto raggiungerà l'equilibrio termico e i valori reali delle grandezze risultano pari ai valori richiesti:

$$E_p = E_{\text{req}} ,$$

$$w_p = w_{\text{req}} ,$$

$$SW_p = SW_{\text{req}} .$$

Se invece la percentuale di pelle bagnata è maggiore del valore massimo ammissibile ( $w_{\text{req}} > w_{\text{max}}$ ) si avrà che la percentuale reale di pelle bagnata sarà pari alla massima:

$$w_p = w_{\text{max}} ,$$

che la dispersione evaporativa reale sarà pari a:

$$E_p = w_p E_{\max} = w_{\max} \frac{P_{\text{sk,s}} - P_a}{R_{e,T}}$$

e che la quantità di calore effettivamente dispersa per sudorazione sarà:

$$SW_p = \frac{E_p}{r_p}$$

con:

$$r_p = 1 - \frac{w_p^2}{2} = 1 - \frac{w_{\max}^2}{2}.$$

A questo punto, se la quantità di calore effettivamente dispersa per sudorazione è minore del valore massimo ( $SW_p < SW_{\max}$ ) i valori calcolati rappresentano i valori reali.

Se viceversa la sudorazione reale così calcolata supera quella massima ammissibile, cioè se si verifica  $SW_p > SW_{\max}$ , si ha:

$$SW_p = SW_{\max}$$

$$w_p = \frac{E_p}{E_{\max}} = r_p \frac{SW_p}{E_{\max}} = r_p \frac{SW_{\max}}{E_{\max}}$$

### 2.3.1 Tempo limite di esposizione

Nell'ipotesi che la sudorazione reale sia inferiore a quella richiesta per mantenere l'omoterma, si crea un accumulo di energia all'interno del nucleo; per evitare che questo possa comportare danni alla salute del soggetto esposto, conducendo l'individuo verso il colpo di calore, è necessario limitare la durata dell'esposizione all'ambiente caldo.

La durata dell'esposizione deve essere anche limitata al fine di evitare che dal corpo evaporino una eccessiva quantità di sudore; questo può infatti comportare, per i soggetti esposti, l'insorgere di deficit idrominerali.

Il calcolo del tempo limite di esposizione, *DLE*, viene allora condotto prendendo in considerazione i due criteri. Ne deriva che il tempo massimo di esposizione, in minuti, per evitare accumulo di calore è pari a:

$$DLE_1 = 60 \frac{Q_{\max}}{E_{\text{req}} - E_p} \quad (35)$$

in cui  $Q_{\max}$  ( $\text{Wh} \cdot \text{m}^{-2}$ ) è il massimo accumulo di energia tollerabile dall'organismo, mentre il tempo massimo di esposizione per evitare squilibri idrominerali è pari a:

$$DLE_2 = 60 \frac{D_{\max}}{SW_p} \quad (36)$$

in cui  $D_{\max}$  ( $\text{Wh} \cdot \text{m}^{-2}$ ) è la perdita massima giornaliera di acqua dal corpo. La quantità  $D_{\max}$  può essere espressa anche in grammi, dividendo per il calore latente di vaporizzazione del sudore.

Il tempo limite di esposizione da considerare sarà ovviamente il minore dei due:

$$DLE = \min\{DLE_1; DLE_2\} \quad (37)$$

I valori da adottare per il massimo accumulo di energia e per la massima perdita giornaliera di acqua per soggetti acclimatati e non acclimatati e per due differenti livelli di rischio, sono riportati in Tabella 4.

Tabella 4 - Valori delle grandezze da utilizzare per il calcolo del tempo limite di esposizione (ISO, 1989).

Parametro	Soggetti non acclimatati		Soggetti acclimatati	
	Allarme	Pericolo	Allarme	Pericolo
Massimo accumulo di energia				
$Q_{\max}$ (Wh·m <sup>-2</sup> )	50	60	50	60
Massima perdita di acqua				
$D_{\max}$ (Wh·m <sup>-2</sup> )	1000	1250	1500	2000

#### 2.4 Ambienti severi freddi

Quando un individuo è esposto per lunghi periodi ad ambienti severi freddi, al fine di impedire il raffreddamento del nucleo, l'organismo reagisce attivando inizialmente i meccanismi vasomotori e successivamente quelli comportamentali.

Per effetto della regolazione vasomotoria ed al fine di ridurre la circolazione sanguigna nelle zone periferiche del corpo avviene il restringimento degli sfinteri dei capillari periferici; quando questo meccanismo non è più sufficiente per garantire l'omotermia ed il nucleo del corpo si raffredda al di sotto dei 35°C (ipotermia), insorge il brivido che comporta l'attivazione dei gruppi muscolari con generazione di energia termica senza produzione di lavoro meccanico verso l'ambiente esterno.

A causa dell'affaticamento muscolare conseguente, il meccanismo comportamentale del brivido non può tuttavia protrarsi indefinitamente. Se la temperatura del nucleo si porta al di sotto di 32°C subentra allora uno stato di confusione mentale che può portare alla perdita della coscienza. In tali condizioni il soggetto non è più in grado di prendere alcun tipo di provvedimento e l'ulteriore conseguente raffreddamento del corpo conduce alla morte per fibrillazione ventricolare ed arresto cardiaco.

In questi casi è necessario intervenire sul soggetto colpito da stress da freddo riportandolo gradualmente a condizioni termiche più confortevoli. Il soggetto non va però riportato repentinamente a temperature più elevate per evitare che la vasocostrizione diminuisca talmente rapidamente da far sì che il sangue, raffreddandosi nell'attraversare i tessuti freddi, ritorni al cuore a bassa temperatura.

Le condizioni di stress termico a cui sono sottoposti gli individui negli ambienti severi freddi sono valutate mediante il procedimento contenuto nel rapporto tecnico ISO TR 11079 (ISO, 1993) che utilizza l'indice IREQ. Inoltre gli effetti dell'esposizione al freddo delle parti non protette del corpo sono affrontati nello stesso documento mediante l'uso degli indici WCI e  $t_{ch}$ .

#### 2.5 Isolamento richiesto, IREQ

Partendo dalla considerazione che un adeguato abbigliamento può proteggere dal freddo, il Technical Report ISO TR 11079 (ISO, 1993) ha adottato un indice di valutazione dello stress da freddo denominato IREQ. Esso rappresenta la resistenza termica dell'abbigliamento in grado di mantenere indefinitamente in condizioni di omotermia un soggetto sottoposto all'ambiente in esame.

L'indice IREQ si basa sull'analisi degli scambi termici tra soggetto ed ambiente e viene calcolato partendo dall'equazione di bilancio termico del corpo umano:

$$S = M - W - E_{\text{res}} - C_{\text{res}} - R - C - K - E \quad (38)$$

Dall'equazione (38) ipotizzando nulli il termine di accumulo e quello conduttivo si ha:

$$R + C = M - W - E_{\text{res}} - C_{\text{res}} - E \quad (39)$$

Inoltre, è possibile esprimere lo scambio secco  $H$  con la relazione:

$$H = R + C = \frac{t_{\text{sk}} - t_{\text{cl}}}{I_{\text{cl}}} \quad (40)$$

A questo punto ponendo  $I_{\text{cl}} = \text{IREQ}$  nelle equazioni (39) e (40) si ottiene un sistema di due equazioni nelle incognite  $t_{\text{cl}}$  e IREQ:

$$\begin{cases} M - W - E_{\text{res}} - C_{\text{res}} - E = R + C \\ \text{IREQ} = \frac{t_{\text{sk}} - t_{\text{cl}}}{M - W - E_{\text{res}} - C_{\text{res}} - E} \end{cases} \quad (41)$$

Il sistema va risolto in modo iterativo poiché sia il termine convettivo che quello radiativo dipendono dal coefficiente d'area dell'abbigliamento, a sua volta funzione della resistenza termica del vestiario. La temperatura della pelle e la percentuale di pelle bagnata risultano variabili indipendenti del problema a cui vengono assegnati dei valori in base a considerazioni di carattere fisiologico.

A tal fine vengono definiti due livelli per quanto riguarda l'indice IREQ: l' $\text{IREQ}_{\text{min}}$  e l' $\text{IREQ}_{\text{neu}}$ . Il primo valore è riferito a condizioni di stress termico elevato, al limite di attivazione del brivido, mentre il secondo fa riferimento a condizioni di stress termico moderato, al limite inferiore della neutralità termica.

L' $\text{IREQ}_{\text{min}}$  individua allora il minimo isolamento termico richiesto per mantenere l'equilibrio termico del nucleo del corpo al limite dell'attivazione del meccanismo comportamentale del brivido, mentre l' $\text{IREQ}_{\text{neu}}$  rappresenta l'isolamento termico richiesto per mantenere condizioni di neutralità al limite di attivazione dell'attività vasomotoria.

I valori della temperatura della pelle e della percentuale di pelle bagnata da imporre nell'equazione (41) possono essere allora assegnati in corrispondenza alle condizioni limite di neutralità termica e di attivazione del sistema termoregolatorio comportamentale.

Tali valori sono riportati in Tabella 5.

Tabella 5 - Valori della temperatura della pelle e della percentuale di pelle bagnata da utilizzare per il calcolo isolamento termico richiesto dell'abbigliamento.

Condizione	Temperatura della pelle $t_{\text{sk}} (\text{°C})$	Percentuale di pelle bagnata $w (-)$
stress termico elevato	30	0,06
stress termico moderato	$35,7 - 0,0285M$	$\frac{[3,05(0,256t_{\text{sk}} - 3,373 - p_a) + 0,42(M - 58)]R_{e,T}}{P_{\text{sk,s}} - p_a}$

### 2.5.1 Tempo limite di esposizione

Quando l'isolamento termico dell'abbigliamento indossato è minore dell'isolamento richiesto ( $I_{cl} < IREQ$ ), l'esposizione all'ambiente severo deve essere limitata nel tempo, per evitare un raffreddamento del nucleo.

Tuttavia si può accettare che una piccola riduzione di energia interna del corpo umano possa essere tollerata per una esposizione che si protragga per un tempo limitato; la durata massima di esposizione,  $DLE$ , può allora essere ricavata dalla seguente relazione:

$$DLE = \frac{Q_{lim}}{S} \quad (42)$$

in cui  $Q_{lim}$  ( $Wh \cdot m^{-2}$ ) è la diminuzione accettabile di energia interna del corpo umano ed  $S$  ( $W \cdot m^{-2}$ ) è la variazione effettiva di energia interna nell'unità di tempo per un soggetto nelle condizioni climatiche dell'ambiente severo in esame e con un isolamento termico dell'abbigliamento pari a  $I_{cl}$ .

Nell'equazione (42), secondo quanto riportato sul Technical Report ISO TR 11079, si assume una diminuzione accettabile di energia interna pari a  $40 Wh \cdot m^{-2}$ , mentre la variazione effettiva di energia interna viene calcolata a partire dal sistema di equazioni:

$$\begin{cases} S = M - W - C_{res} - E_{res} - E - R - C \\ t_{cl} = t_{sk} - I_{cl}(M - W - C_{res} - E_{res} - E - S) \end{cases} \quad (43)$$

Trascorso il tempo limite di esposizione è necessario interrompere l'esposizione all'ambiente severo e il soggetto deve essere trasferito in un ambiente in cui si possano ristabilire le condizioni di neutralità termica.

### 2.6 Indice WCI

Per la valutazione del raffreddamento provocato dall'esposizione al freddo di parti non protette del corpo umano si utilizza l'indice empirico WCI (*Wind Chill Index*), che rappresenta il flusso termico disperso nell'ambiente reale da un cilindro la cui superficie esterna si trova alla temperatura di  $33^\circ C$ .

L'equazione per il calcolo del WCI è la seguente:

$$WCI = 1,16(10,45 + 10\sqrt{v_{ar} - v_{ar}}) \times (33 - t_a), \quad (44)$$

in cui  $v_{ar}$  è la velocità relativa e  $t_a$  è la temperatura dell'aria.

Alternativamente all'indice WCI viene utilizzata la *Chilling Temperature*,  $t_{ch}$ , che rappresenta la temperatura di un ambiente fittizio, con velocità dell'aria pari a  $1,8 m \cdot s^{-1}$ , in cui si riscontra lo stesso raffreddamento prodotto nell'ambiente reale.

La sua espressione è la seguente:

$$t_{ch} = 33 - \frac{WCI}{25,5}. \quad (45)$$

Nella Tabella 6, tratta dal Technical Report ISO TR 11079, sono riportati gli effetti attesi sulle parti esposte per alcuni valori di WCI e  $t_{ch}$ .

Tabella 6 - Wind Chill Index, Chilling Temperature e corrispondenti effetti sulle parti esposte del corpo.

<i>Wind Chill Index</i> WCI ( $W \cdot m^{-2}$ )	<i>Chilling Temperature</i> $t_{ch}$ ( $^{\circ}C$ )	<i>Effetti</i>
1200	-14	Molto freddo
1400	-22	Freddo rigido
1600	-30	
1800	-38	Le parti esposte congelano entro 1 ora
2000	-45	
2200	-53	Le parti esposte congelano entro 1 minuto
2400	-61	
2600	-69	Le parti esposte congelano entro 30 secondi



## **Bibliografia**

Fanger (1970). *Thermal comfort*. McGraw-Hill, Danish Technical Press. Copenhagen.

ISO (2001). ISO/FDIS 13731. *Ergonomics of the thermal environment - Vocabulary and symbols*. International Standard Organization, Geneva.

ISO (1995). ISO 9920. *Ergonomics of the thermal environment – Estimation of the thermal insulation and evaporative resistance of a clothing ensemble*. International Standard Organization, Geneva.

ISO (1993). ISO/TR 11079. *Evaluation of cold environments – Determination of required clothing insulation (IREQ)*. International Standard Organization, Geneva.

ISO (1990). ISO 8996. *Ergonomics – Determination of metabolic heat production*. International Standard Organization, Geneva.

ISO (1989). ISO 7933. *Hot environments – Analytical determination and interpretation of thermal stress using calculation of required sweat rate*. International Standard Organization, Geneva.

UNI (1997). UNI EN ISO 7730. *Ambienti termici moderati – Determinazione degli indici PMV e PPD e specifica delle condizioni di benessere termico*. Unificazioni Italiane, Milano.

UNI (1996). UNI EN 27243. *Ambienti caldi. Valutazione dello stress termico per l'uomo negli ambienti di lavoro, basata sull'indice WBGT (temperatura a bulbo umido e del globotermometro)*. Unificazioni Italiane, Milano.