
P.A.F. - PORTALE AGENTI FISICI

ALLEGATO SEZIONE PAF/MICROCLIMA/VALUTAZIONE

**CRITERI E METODI PER LA
VALUTAZIONE DEL RISCHIO MICROCLIMA
AMBIENTI MODERATI E AMBIENTI SEVERI**

A cura di:

Simona Del Ferraro (1), Vincenzo Molinaro (1), Antonio Moschetto (2) Iole Pinto (3)

1. INAIL DIPARTIMENTO DI MEDICINA, EPIDEMIOLOGIA, IGIENE DEL LAVORO ED AMBIENTALE - Laboratorio di Ergonomia e Fisiologia
2. INAIL DIPARTIMENTO DI MEDICINA, EPIDEMIOLOGIA, IGIENE DEL LAVORO ED AMBIENTALE – Rischio Agenti Fisici
3. Azienda Usl Toscana Sud-Est – Laboratorio Sanità Pubblica – Agenti Fisici

1. AMBIENTI MODERATI

Si definiscono ambienti moderati quegli ambienti nei quali non esistono vincoli in grado di pregiudicare il raggiungimento del comfort termico laddove per “comfort termico” si intende *lo stato psicofisico nel quale il soggetto esprime soddisfazione verso l'ambiente termico in esame*. Questi ambienti - se permangono i criteri di comfort di seguito discussi - non espongono in genere il lavoratore a rischi per la salute.

La norma tecnica di riferimento per la valutazione degli ambienti moderati è la UNI EN ISO 7730:2006: Ergonomia degli ambienti termici - Determinazione analitica e interpretazione del benessere termico mediante il calcolo degli indici PMV e PPD e dei criteri di benessere termico locale.

Gli indici descritti nella norma tecnica permettono di valutare:

- se il soggetto (nella sua globalità) si trova in una condizione di comfort termico o quanto è distante da quella condizione (indici di comfort globale PMV e PPD);
- se esistono delle condizioni termiche locali che possono creare dei discomfort per specifiche parti corporee (discomfort locali).

1.1 Comfort Globale

Gli indici maggiormente utilizzati derivano da un approccio teorico basato sull'applicazione dell'equazione di bilancio termico al corpo umano, cercando di stabilire una relazione tra la sensazione termica ed i 6 parametri fondamentali. La condizione di benessere microclimatico coincide con la sensazione di neutralità termica (omeotermia = temperatura interna costante). Scostamenti dalla condizione di omeotermia producono sensazioni crescenti di discomfort.

L'indice più utilizzato è il **Predicted Mean Vote (PMV)** che deriva dagli studi che Ole Fanger (1934–2006) condusse nella seconda metà degli anni '60. Fanger creò un modello predittivo confrontando i risultati ottenuti applicando l'equazione di bilancio termico al corpo umano con i voti di sensazione termica ottenuti dal campione di studenti del college che espose in camera climatica per 3 ore, facendogli eseguire attività standardizzate.

Gli indici PMV e PPD

Il PMV rappresenta il giudizio medio previsto che verrebbe espresso da un ampio gruppo di persone esposte alle medesime condizioni microclimatiche in esame, in una scala di sensazione termica a 7 punti.

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

L'indice PMV è ritenuto un indicatore affidabile quando assume valori compresi nell'intervallo tra -2 e +2.

La UNI EN ISO 7730 raccomanda di utilizzare l'indice PMV quando tutti i principali 6 parametri, necessari per la sua valutazione, assumono valori compresi nei seguenti intervalli:

PARAMETRO	INTERVALLO
Attività metabolica M	$46 \text{ W/m}^2 \div 232 \text{ W/m}^2 (0.8 \text{ Met} \div 4 \text{ Met})$
Isolamento termico I_{cl}	$0 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W} \div 0.31 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W} (0 \text{ clo} \div 2 \text{ clo})$
Temperatura dell'aria t_a	$10^\circ\text{C} \div 30^\circ\text{C}$
Temperatura media radiante $\bar{t}_r$	$10^\circ\text{C} \div 40^\circ\text{C}$
Velocità relativa v_r	$0 \text{ m/s} \div 1 \text{ m/s}$
Pressione parziale di vapore p_a	$0 \text{ Pa} \div 2700 \text{ Pa}$

Per valutare il metabolismo energetico si può utilizzare la UNI EN ISO 8996:2005.

Per valutare l'abbigliamento termico si fa riferimento alla UNI EN ISO 9920:2009.

Considerato che il PMV quantifica un voto medio, esiste, quindi, una percentuale di persone che non sono soddisfatte rispetto alle condizioni termiche in esame e che voterebbero *caldo*, *molto caldo*, o *freddo*, *molto freddo*.

Tale percentuale viene quantificata dall'indice PPD, Predicted Percentage of Dissatisfied.

L'indice PPD viene calcolato attraverso la seguente equazione, una volta noto il PMV:

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

L'andamento dell'indice PPD in funzione del PMV è illustrato in figura 1.

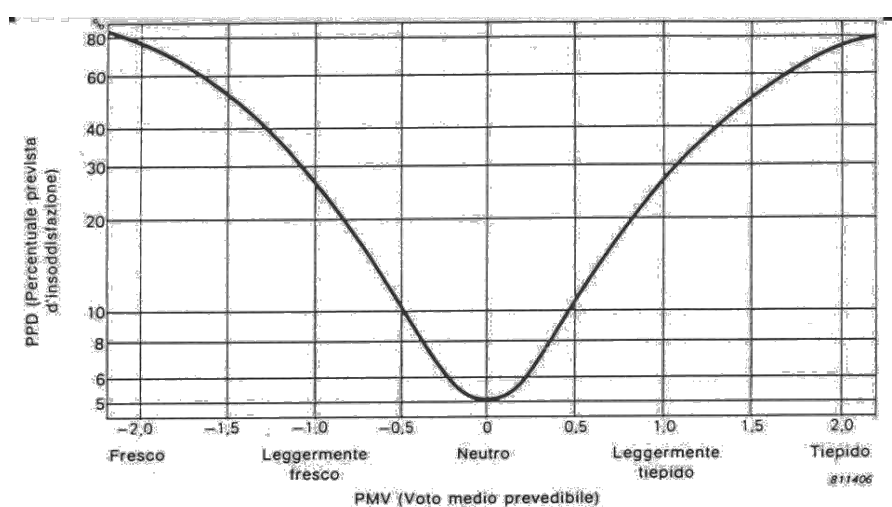


Fig. 1. Percentuale di insoddisfatti (PPD) in funzione del voto medio previsto (PMV).

Tabella 1

PMV	PPD		
	FREDDO	CALDO	TOTALE
-2.0	76.4	—	76.4
-1.5	52.0	—	52.0
-1.0	26.8	—	26.8
-0.9	22.5	—	22.5
-0.8	18.7	0.1	18.8
-0.7	15.3	0.2	15.5
-0.6	12.4	0.3	12.7
-0.5	9.9	0.4	10.3
-0.4	7.7	0.6	8.3
-0.3	6.0	0.9	6.9
-0.2	4.5	1.3	5.8
-0.1	3.4	1.8	5.2
0	2.5	2.5	5.0
+0.1	1.8	3.4	5.2
+0.2	1.3	4.5	5.8
+0.3	0.9	5.9	6.8
+0.4	0.6	7.7	8.3
+0.5	0.4	9.8	10.2
+0.6	0.3	12.2	12.5
+0.7	0.2	15.2	15.4
+0.8	0.1	18.5	18.6
+0.9	—	22.2	22.2
+1.0	—	26.4	26.4
+1.5	—	51.4	51.4
+2.0	—	75.7	75.7

Figura 1 e Tabella 1 mostrano che anche nella condizione di neutralità termica (PMV=0) esiste comunque una percentuale di persone insoddisfatte pari al 5%.

1.2 Discomfort Locali

L'indice PMV fornisce un giudizio medio sulla condizione di comfort/discomfort globale, ovvero relativo al corpo nella sua interezza, non tiene, quindi, conto di specifiche disomogeneità che possono essere presenti nell'ambiente e che possono determinare dei disagi locali per il soggetto.

La UNI EN ISO 7730 individua quattro principali cause di discomfort locali:

- Correnti d'aria;
- Differenza verticale di temperatura tra la testa e le caviglie;
- Pavimento troppo caldo o troppo freddo;
- Asimmetria della temperatura radiante.

a) Correnti d'aria

La formula per il calcolo della percentuale di soggetti disturbati dalla corrente d'aria è data dalla seguente relazione:

$$DR = (34 - t_{a,l}) \cdot (\bar{v}_{a,l} - 0.05)^{0.62} \cdot (0.37 \cdot \bar{v}_{a,l} \cdot T_u + 3.14)$$

dove $t_{a,l}$ è la temperatura dell'aria locale, in °C, con $20^\circ\text{C} < t_{a,l} < 26^\circ\text{C}$;

$\bar{v}_{a,l}$ è il valore medio della velocità locale, in m/s, con $\bar{v}_{a,l} < 0.5\text{m/s}$;

T_u è l'intensità della turbolenza locale, con $10\% < T_u < 60\%$ (se non è nota può essere assunta pari a 40%).

Per valori di $\bar{v}_{a,l} < 0.05 \text{ m/s}$ si ponga $\bar{v}_{a,l} = 0.05 \text{ m/s}$

Per valori di $DR < 100\%$ si ponga $DR = 100\%$

Il modello può essere usato in caso di attività leggere, principalmente sedentarie, per le quali la sensazione termica per l'intero corpo sia vicino alla condizione di neutralità termica e per correnti all'altezza della nuca.

b) Gradiente verticale di temperatura dell'aria.

Una elevata differenza in verticale di temperatura dell'aria tra testa e caviglie può essere causa di disagio.

La percentuale di insoddisfatti rispetto a questo fattore viene calcolata in funzione del gradiente verticale di temperatura dell'aria presente tra nuca e caviglie $\Delta t_{a,v}$, attraverso la seguente relazione:

$$PD = \frac{100}{1 + e^{(5.76 - 0.856 \cdot \Delta t_{a,v})}}$$

valida per $\Delta t_{a,v} < 8^\circ\text{C}$

c) Pavimenti caldi o freddi

La relazione per valutare la percentuale di insoddisfatti rispetto a questo fattore è data dalla seguente formula:

$$PD = 100 - 94 \cdot e^{(-1.387 + 0.118 \cdot t_f - 0.0025 \cdot t_f^2)}$$

dove t_f è la temperatura del pavimento in $^\circ\text{C}$.

NOTA:

- Per occupazioni lunghe i risultati non sono validi nel caso di pavimenti riscaldati elettricamente;
- Per luoghi in cui le persone sono a piedi nudi vedi ISO/TS 13732-2:2001.

d) Asimmetria della temperatura radiante (Δt_{pr}).

Vengono individuati 4 fattori (soffitto caldo, parete fredda, soffitto freddo, parete calda) che possono causare un'asimmetria nella temperatura radiante. Per ciascun fattore viene valutata la percentuale di insoddisfatti mediante le relazioni riportate di seguito:

- Soffitto caldo

$$PD = \frac{100}{1 + e^{(2.846 - 0.174 \cdot \Delta t_{pr})}} - 5.5 \quad \text{per } \Delta t_{pr} < 23^\circ\text{C}.$$

- Parete fredda

$$PD = \frac{100}{1 + e^{(6.61 - 0.345 \cdot \Delta t_{pr})}} \quad \text{per } \Delta t_{pr} < 15^\circ\text{C}.$$

- Soffitto freddo

$$PD = \frac{100}{1 + e^{(9.93 - 0.5 \cdot \Delta t_{pr})}} \quad \text{per } \Delta t_{pr} < 15^\circ\text{C}.$$

- Parete calda

$$PD = \frac{100}{1 + e^{(3.72 - 0.052 \cdot \Delta t_{pr})}} - 3.5 \quad \text{per } \Delta t_{pr} < 35^\circ\text{C}.$$

1.3 Criteri di Comfort

La UNI EN ISO 7730 condiziona l'accettabilità dell'ambiente termico in esame al soddisfacimento simultaneo dei criteri globali e locali, secondo le 3 categorie di comfort riportate nella Tabella 2.

I criteri devono essere soddisfatti contemporaneamente per ogni categoria.

Tabella 2.

Categoria	Stato termico del corpo nella sua interezza		Discomfort locali			
	PPD %	PMV	DR %	PD % Causato da		
				Differenza verticale di temperatura dell'aria	Pavimento caldo o freddo	Asimmetria radiante
A	<6	$-0.2 < PMV < +0.2$	<10	<3	<10	<5
B	<10	$-0.5 < PMV < +0.5$	<20	<5	<10	<5
C	<15	$-0.7 < PMV < +0.7$	<30	<10	<15	<10

Un metodo per individuare l'intervallo di accettabilità da utilizzare ai fini della valutazione del comfort, è stato sviluppato negli ultimi anni, partendo dalle indicazioni presentate nella tabella 3.5 della EN 16798-2, qui riportate nella Tabella 3.

La EN 16798-1 e la EN 16798-2 classificano gli ambienti su quattro categorie e non in tre, come invece fa la UNI EN ISO 7730. I limiti di accettabilità delle categorie che la EN 16798-1 e la EN 16798-2 indicano con I II e III coincidono con i limiti che la UNI EN ISO 7730 propone per le categorie A B e C, stabilendo in tal modo una precisa corrispondenza biunivoca. Di conseguenza la categoria IV della EN 16798-1 e EN 16798-2 si configura come una categoria aggiuntiva.

Nella Tabella 3 risultano di particolare importanza, ai fini della valutazione dell'accettabilità dei valori del PMV, i seguenti elementi:

- l'associazione delle prime tre categorie con altrettanti livelli di "aspettativa" termica
- **l'associazione esplicita della categoria I ($-0.2 < PMV < +0.2$) con ambienti con permanenza di soggetti particolarmente sensibili, con speciali requisiti termici quai soggetti con disabilità, soggetti con particolari patologie, donne in gravidanza, bambini, anziani, etc.)**
- l'indicazione che la categoria IV (PMV compreso tra $-1+1$) risulta accettabile **soltanto "per una parte limitata dell'anno"**.

Tabella 3 - Definizione qualitativa delle categorie : i valori degli indici PMV delle categorie I, II, III

coincidono con le rispettive categorie A,B,C riportate in tabella 2. Alla categoria IV è associato un PMV compreso tra -1+1.

Categoria	Livello di aspettativa	Definizione
I	Alto	Livello che dovrebbe essere adottato in presenza di individui con necessità particolari (bambini, anziani, handicappati)
II	Medio	Livello normalmente usato per il progetto e l'utilizzo
III	Moderato	Livello che consente di mantenere l'ambiente accettabile. Introduce qualche rischio di perdita di performance
IV	Basso	Livello che dovrebbe essere adottato soltanto per una parte limitata dell'anno, o in spazi con permanenza limitata

2. AMBIENTI SEVERI CALDI O FREDDI

Gli ambienti caldi o freddi sono ambienti nei quali sussistono esigenze produttive che determinano un vincolo su uno o più dei parametri microclimatici in grado di pregiudicare il raggiungimento del comfort. In questo tipo di ambienti è prioritario tutelare la salute e sicurezza del lavoratore a seguito della sollecitazione intensa e prolungata del sistema di termoregolazione che può determinare condizioni di stress termico per il soggetto esposto.

2.1 AMBIENTI CALDI

Allo stato attuale, la valutazione dello stress prodotto da un ambiente caldo viene effettuata in due modi, utilizzando:

- a) l'indice WBGT, di facile utilizzo per una valutazione preliminare ed esplorativa dell'ambiente in esame;
- b) il modello PHS, procedura utilizzata per una valutazione più approfondita.

2.1.1 Indice WBGT

L'indice WBGT (Wet Bulb Globe Temperature) è un indice empirico, di facile valutazione, che viene utilizzato in prima battuta per comprendere se l'esposizione ad un determinato ambiente caldo genera o meno stress termico. La stima è grossolana ma permette di comprendere se è necessaria una valutazione più approfondita dell'ambiente in esame.

La norma di riferimento in cui viene descritto l'indice WBGT è la UNI EN ISO 7243:2017: *“Ergonomia degli ambienti termici - Valutazione dello stress da calore utilizzando l'indice WBGT (temperatura globo del bulbo bagnato)”*.

Si applica per valutare la presenza o meno di stress termico provocato da un ambiente caldo sia indoor che outdoor, su un soggetto adulto, sia maschio che femmina.

La valutazione avviene attraverso i seguenti passi:

- a) calcolo del WBGT considerando il soggetto vestito con l'abbigliamento di riferimento da lavoro in cotone ($I_{cl} = 0.6 \text{ clo}$ e $i_m = 0.38$), utilizzando le seguenti relazioni:

- in assenza di carico solare

$$WBGT = 0.7 \cdot t_{nw} + 0.3 \cdot t_g$$

- in presenza di carico solare:

$$WBGT = 0.7 \cdot t_{nw} + 0.2 \cdot t_g + 0.1 \cdot t_a$$

dove

t_{nw} è la temperatura di bulbo umido a ventilazione naturale;

t_g è la temperatura del globotermometro;

t_a è la temperatura dell'aria.

- b) Correzione del valore WBGT calcolato, nel caso di abbigliamento diverso da quello preso come riferimento, aggiungendo al WBGT il valore CAV (Clothing Adjustment Value) nel seguente modo:

$$WBGT_{eff} = WBGT + CAV$$

CAV viene stimato attraverso la Tabella 3.

Tabella 3. Valori di CAV

Ensemble	Comment	CAV [°C-WBGT]
Work clothes	Work clothes made from a woven fabric is the reference ensemble.	0
Cloth coveralls	Woven fabric that includes treated cotton.	0
Non-woven SMS coveralls as a single layer	A non-proprietary process to make non-woven fabrics from polypropylene.	0
Non-woven polyolefin Coveralls as a single layer	A proprietary fabric made from polyethylene.	2
Vapour-barrier apron with long sleeves and long length over cloth coveralls	The wrap-around apron configuration was designed to protect the front and sides of the body against spills from chemical agents.	4
Double layer of woven clothing	Generally taken to be coveralls over work clothes.	3
Vapour-barrier coveralls as a single layer, without hood	The real effect depends on the level of humidity and in many cases the effect is less.	10
Vapour-barrier coveralls with hood as a single layer	The real effect depends on the level of humidity and in many cases the effect is less.	11
Vapour-barrier over cloth coveralls, without hood	—	12
Hood ^a	Wearing a hood of any fabric with any clothing ensemble.	+1
The CAVs are added to the measured WBGT to obtain WBGT _{eff} .		
NOTE For high vapour resistance clothing there is a dependence on relative humidity. The CAVs represent the likely high value.		
^a This value is added to the CAV of the ensemble without hood or respirator.		

- c) Calcolo del valore di riferimento $WBGT_{ref}$ (in funzione del metabolismo energetico) utilizzando la Tabella 4, quando la valutazione dell'attività metabolica viene fatta utilizzando la Tabella 5.

Tabella 4 Classificazione metabolismo energetico

Metabolic rate (class) (see Table E.1 for description)	Metabolic rate W	WBGT reference limit for persons acclimatized to heat °C	WBGT reference limit for persons unacclimatized to heat °C
Class 0 Resting metabolic rate	115	33	32
Class 1 Low metabolic rate	180	30	29
Class 2 Moderate metabolic rate	300	28	26
Class 3 High metabolic rate	415	26	23
Class 4 Very high metabolic rate	520	25	20
The values for WBGT _{eff} given here are provided for harmonization with existing national standards. As those standards are revisited in the future, the values from Figure A.1 or the related equations may be considered. The newer values will generally differ by ± 1 °C.			

Tabella 5 - esempi di attività associate alle differenti classi di attività metabolica

Class	Metabolic rate W	Examples
0 Resting	115 (100 to 125)	Resting, sitting at ease
1 Low metabolic rate	180 (125 to 235)	Light manual work (writing, typing, drawing, sewing, book-keeping); hand and arm work (small bench tools, inspection, assembly or sorting of light materials); arm and leg work (driving vehicle in normal conditions, operating foot switch or pedal). Standing drilling (small parts); milling machine (small parts); coil winding; small armature winding; machining with low power tools; casual walking on level surface (speed up to 2,5 km/h).
2 Moderate metabolic rate	300 (235 to 360)	Sustained hand and arm work (hammering in nails, filing); arm and leg work (off-road operation of lorries, tractors or construction equipment); arm and trunk work (work with pneumatic hammer, tractor assembly, plastering, intermittent handling of moderately heavy material, weeding, hoeing, picking fruits or vegetables, pushing or pulling lightweight carts or wheelbarrows, walking at a speed of 2,5 to 5,5 km/h on level surface: forging)
3 High metabolic rate	415 (360 to 465)	Intense arm and trunk work; carrying heavy material; shovelling; sledge-hammer work; sawing; planing or chiselling hard wood; hand mowing; digging; walking at a speed of 5,5 to 7 km/h on level surface. Pushing or pulling heavily loaded hand carts or wheelbarrows; chipping castings; concrete block laying.
4 Very high metabolic rate	520 (>465)	Very intense activity at fast to maximum pace; working with an axe; intense shovelling or digging; climbing stairs, ramp or ladder; walking quickly with small steps; running on level surface; walking at a speed greater than 7 km/h on level surface.

Se si dispone di una valutazione più accurata del metabolismo energetico, $WBGT_{ref}$ può essere calcolato interpolando i valori di Tabella 4.

In Figura 2 si riporta la relazione continua tra Metabolismo energetico e $WBGT_{ref}$ utilizzando le seguenti relazioni, rappresentate in Figura 2:

- Per soggetto acclimatato:

$$WBGT_{ref} = 56.7 - 11.5 \times \log_{10}(M) \text{ in } ^\circ\text{C}$$

- Per soggetto non acclimatato:

$$WBGT_{ref} = 59.9 - 14.1 \times \log_{10}(M) \text{ in } ^\circ\text{C}$$

I 2 modi di valutazione di $WBGT_{ref}$ possono differire di 1 °C.

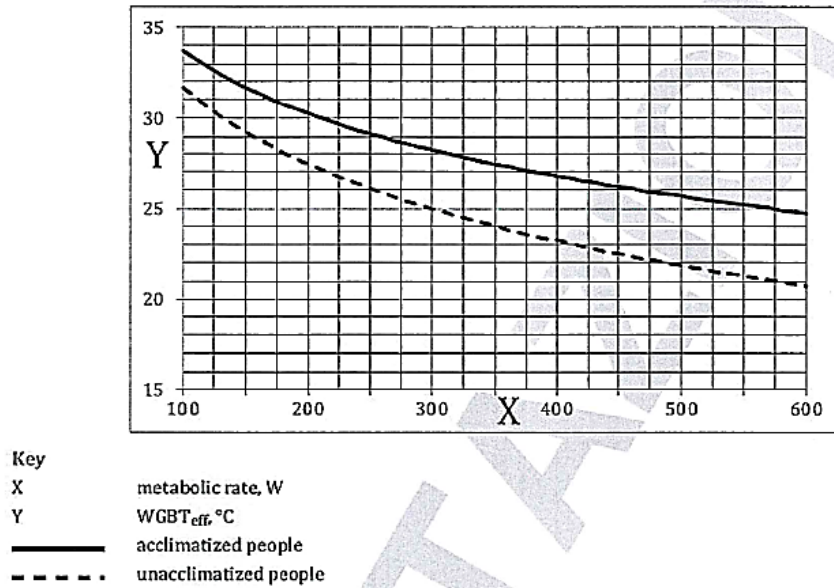


Figura 2.

d) Confronto tra $WBGT_{eff}$ e $WBGT_{ref}$.

- Se $WBGT_{eff} \leq WBGT_{ref}$ non sono richieste ulteriori azioni da intraprendere.
- Se $WBGT_{eff} > WBGT_{ref}$ è necessario:
 - ridurre lo stress termico con metodi appropriati (controllo dell'ambiente, del livello di attività, del tempo trascorso nell'ambiente in esame);
 - procedere ad una analisi più dettagliata dello stress termico utilizzando la ISO 7933 (modello PHS).

Note sulle misure:

- le misure delle temperature necessarie per il calcolo del WBGT dovrebbero essere effettuate all'altezza dell'addome del soggetto per il quale si effettua la misura;
- nel caso di ambiente non eterogeneo, con uno o più parametri variabili nel tempo, si effettua una media pesata sul tempo, prendendo come base temporale il periodo di 1h, rappresentativa dello stress termico a cui è esposto il soggetto. Per calcolare il valore medio del generico parametro p si misura il suo andamento nel tempo.

Si suddivide il periodo di misurazione in n tratti a valori costanti ($p_1, p_2, \dots, p_n$) ciascuno di durata ($t_1, t_2, \dots, t_n$).

Il valore medio del parametro p è calcolato tramite la seguente relazione:

$$\bar{p} = \frac{(p_1 \times t_1) + (p_2 \times t_2) + \dots + (p_n \times t_n)}{t_1 + t_2 + \dots + t_n}$$

dove $p_1, p_2, \dots, p_n$ sono i livelli del parametro ottenuti durante i tempi $t_1 + t_2 + \dots + t_n$
 $t_1 + t_2 + \dots + t_n = T = 1$

2.1.2 Modello Predicted Heat Strain (PHS)

Quando è necessario effettuare una valutazione più approfondita dello stress termico determinato da un ambiente caldo, si procede al calcolo della sollecitazione termica prevedibile utilizzando il modello PHS (Predicted Heat Strain).

La norma di riferimento in cui viene descritto il modello PHS è la UNI EN ISO 7933:2005: *“Determinazione analitica ed interpretazione dello stress termico da calore mediante il calcolo della sollecitazione termica prevedibile.”*

Il modello analitico è complesso ed articolato. La procedura di calcolo è di tipo iterativo e permette di seguire nel tempo la risposta fisiologica del corpo umano alla sollecitazione termica restituendo come risultati gli andamenti temporali della temperatura rettale t_{re} e della perdita totale di acqua (SW_{tot}).

E' basata sul principio che lo stress termico è tanto più intenso quanto maggiore è il guadagno di energia (ovvero l'aumento di energia interna al corpo).

Per poter applicare il modello PHS è necessario che i 6 parametri fondamentali assumano valori compresi nei seguenti intervalli

Parametri		Minimo	Massimo
t_a	°C	15	50
p_a	kPa	0	4,5
$t_r - t_a$	°C	0	60
v_a	m/s	0	3
M	W	100	450
I_{cl}	clo	0,1	1,0

N.B. per un individuo medio con $A_{Du} = 1,8m^2 \Rightarrow 56 \frac{W}{m^2} < M < 250 \frac{W}{m^2}$

oppure $1 MET < M < 4,3 ME$.

La procedura è articolata nelle seguenti fasi:

- Calcolo dell'andamento nel tempo della temperatura rettale e della perdita totale di acqua;
- Calcolo dei valori limite per la temperatura rettale e per la perdita totale d'acqua;
- Confronto tra gli andamenti temporali ed i valori limite;
- Calcolo dei tempi in cui si raggiungono i valori limite per la temperatura rettale e per la perdita totale di acqua;
- Determinazione del limite di tempo massimo di esposizione.
 - a w_{max} e SW_{max}
- Calcolo di dS_{eq} (potenza termica dovuta all'incremento della temperatura del nucleo corporeo dalla quale viene calcolata la temperatura rettale) ;
- Temperatura della pelle;
- Temperatura del nucleo;
- Temperatura rettale t_{re} .

- da questi valori vengono calcolati gli scambi termici per l'istante successivo.

I valori limite vengono calcolati nel seguente modo:

Calcolo dei valori limite degli indici di stress SW_{max} e w_{max}

	Soggetto non acclimatato	Soggetto acclimatato
SW_{max}	$2,6 \times (M-32) \times A_{du}$	$3,25 \times (M-32) \times A_{du}$
w_{max}	0,85	1

Calcolo dei limiti per la perdita totale di acqua

D_{max} rappresenta la massima perdita totale di acqua compatibile con il mantenimento dei parametri fisiologici. Si individuano due limiti:

- D_{max50} : protegge il 50% della popolazione lavorativa;
- D_{max95} : protegge il 95% della popolazione lavorativa;

che vengono calcolati nel seguente modo:

	Soggetto libero di bere	Soggetto non libero di bere
D_{max50}	7% della massa corporea	3% della massa corporea
D_{max95}	5% della massa corporea	3% della massa corporea

D_{max95} è ovviamente più protettivo.

Valore limite per la temperatura rettale

$t_{re,max}$ rappresenta il valore massimo accettabile per la temperatura rettale.

La norma pone:

$$t_{re,max} = 38^{\circ}C$$

Calcolo del limite del tempo massimo di esposizione

Confrontando gli andamenti nel tempo della temperatura rettale e della perdita totale di acqua si ottengono due stime indipendenti del tempo di esposizione massimo quotidiano:

D_{limtre} rappresenta il tempo dopo il quale la temperatura rettale raggiunge il valore limite $t_{re,max}$;

$D_{limloss50}$ rappresenta il tempo dopo il quale la perdita totale di acqua supera il limite D_{max50}

$D_{limloss95}$ rappresenta il tempo dopo il quale la perdita totale di acqua supera il limite D_{max95}

Considerando $D_{limloss95}$, in quanto più protettivo rispetto a $D_{limloss50}$, il limite di tempo massimo di esposizione è dato da

$$D_{lim} = \min (D_{limtre}, D_{limloss95})$$

NOTE

Nel caso si intendesse realizzare la procedura con un programma di calcolo la norma mette a disposizione degli esempi numerici già risolti per validare la procedura realizzata.

2.1 AMBIENTI FREDDI

L'esposizione ad ambienti freddi può comportare sia il raffreddamento del corpo nella sua interezza sia il raffreddamento di singole parti (soprattutto le estremità quali mani, piedi e testa), che può comportare il deterioramento delle capacità manuali o fisiche.

La norma di riferimento per la valutazione degli ambienti freddi è la UNI EN ISO 11079: "Ergonomia degli ambienti termici – Determinazione e interpretazione dello stress termico da freddo con l'utilizzo dell'isolamento termico dell'abbigliamento richiesto (IREQ) e degli effetti del raffreddamento locale".

La norma si applica ad esposizioni continue, intermittenti o occasionali; a lavori al chiuso o all'aperto. NON si applica per valutare effetti specifici associati a fenomeni meteorologici (es. precipitazioni) che sono valutati con altri metodi.

La norma valuta il:

- raffreddamento globale: relativo al corpo nella sua totalità, attraverso la quantificazione dell'indice IREQ;
- raffreddamento locale: è il raffreddamento di singole parti del corpo

La norma individua diversi tipi di raffreddamento locale:

Raffreddamento locale	Effetto	Valutazione
Convective cooling	Raffreddamento dovuto all'effetto del vento in presenza di bassa temperatura. Il vento accelera le perdite di calore. Rischio di raffreddamento per le parti non protette (viso e a volte mani).	Viene valutato attraverso la wind chill temperature
Conductive cooling	Raffreddamento da contatto con superfici fredde.	Far riferimento alla norma UNI EN ISO 13732 – 3 "Ergonomia degli ambienti termici. Metodi per la valutazione della risposta dell'uomo al contatto con le superfici. Parte 3: Superfici fredde"
Extremity cooling	Raffreddamento delle estremità (soprattutto dita delle mani e dei piedi) dovuto alla vasocostrizione.	Il raffreddamento delle estremità può essere prevenuto o ridotto utilizzando i guanti. Per i guanti di protezione far riferimento alla UNI EN 511 "Guanti di protezione contro il freddo".
Airway cooling	Raffreddamento delle prime vie respiratorie dovuto all'inalazione di aria a bassa temperatura, che può essere dannoso per i tessuti. Alti livelli di attività fisica rendono questo tipo di raffreddamento evidente perché coinvolgono grandi volumi di aria inspirata.	

2.1.1 RAFFREDDAMENTO GLOBALE

Valutazione dell'IREQ

La valutazione del raffreddamento globale è basata sulla quantificazione dell'indice IREQ e dell'eventuale tempo massimo di esposizione D_{lim} .

IREQ - Insulation Required è l'isolamento termico risultante richiesto nelle condizioni termiche in esame per mantenere il corpo in equilibrio termico per livelli accettabili di temperatura interna del corpo e di temperatura della pelle.

L'equilibrio termico può essere raggiunto a diversi livelli di attivazione del sistema di termoregolazione.

L'indice IREQ viene ricavato risolvendo l'equazione di bilancio termico rispetto a questo parametro, in due particolari condizioni di attivazione del sistema di termoregolazione, ottenendo due valori distinti $IREQ_{min}$ e $IREQ_{neutral}$ così definiti:

Valore di IREQ	Definizione	Condizione del sistema di termoregolazione	Condizioni analitiche impostate
$IREQ_{min}$	Isolamento termico minimo richiesto per mantenere il corpo in equilibrio termico per livelli subnormali di temperatura media interna corporea.	Condizione I – high strain condition condizione limite di inizio di attivazione del sistema di termoregolazione in cui l'equilibrio viene mantenuto attraverso il meccanismo della vasocostrizione in assenza di sudore. In questa condizione una persona percepirebbe la sensazione di “freddo”.	- temperatura sup. della pelle $t_{sk} = 33,34 - 0.0354M$ - Frazione di pelle bagnata $w = 0.06$
$IREQ_{neutral}$	Isolamento termico richiesto per garantire l'equilibrio termico	Condizione I – low strain condition Condizione di neutralità termica con livelli normali di temperatura media interna.	- temperatura sup. della pelle $t_{sk} = (35.7 - 0.0285M)$ - Frazione di pelle bagnata $w = 0.001M$
Con $IREQ_{min} < IREQ_{neutral}$			

La valutazione mediante l'indice IREQ risulta affidabile quando si verificano le seguenti condizioni:

Parametri
$t_a \leq 10^\circ C$
$0,4m/s \leq v_a \leq 18m/s$
$I_{cl} > 0,078m^2K/W$ (0,5 clo)

La procedura è articolata nelle seguenti fasi:

- Valutazione dell'isolamento termico risultante $I_{cl,r}$ (UNI EN ISO 9920);
- Calcolo di $IREQ_{min}$ e $IREQ_{neutral}$;
- Confronto tra $I_{cl,r}$ e $IREQ_{min}$, $IREQ_{neutral}$

Si possono verificare 3 casi:

N°	Condizione	interpretazione	Azione	Necessario calcolare D_{lim} ?
1	$I_{cl,r} < IREQ_{min}$	Isolamento termico insufficiente	- Aumentare l'isolamento termico: l'abbigliamento non fornisce adeguato isolamento per prevenire il raffreddamento; - Dopo l'esposizione al freddo prevedere un periodo di recupero per riportare il corpo in condizioni di equilibrio	Sì. Bisogna calcolare anche la durata del periodo di ricovero D_{rec}
2	$IREQ_{min} < I_{cl,r} < IREQ_{neutral}$	Isolamento termico sufficiente	- Nessuna azione ai fini del raffreddamento globale; - Valutazioni degli effetti dei raffreddamenti locali	No
3	$I_{cl,r} > IREQ_{neutral}$	Isolamento termico eccessivo, rischio di sudorazione	Ridurre abbigliamento	No

- Nel caso di $I_{cl,r} < IREQ_{min}$ è necessario calcolare la durata limite di esposizione (D_{lim}) per prevenire il progressivo raffreddamento del corpo e del periodo di recupero (D_{rec}) necessario per ristabilire il normale equilibrio termico del corpo.

Calcolo della durata limite di esposizione D_{lim}

La durata limite di esposizione al freddo è definita come il massimo tempo di esposizione raccomandato all'ambiente in esame con l'abbigliamento selezionato.

Si calcola attraverso la relazione

$$D_{lim} = \frac{Q_{lim}}{S}$$

dove $Q_{lim} = 144 \text{ KJ/m}^2$

$S = M - W - E_{res} - C_{res} - E - R - C$ calcolata nelle condizioni ambientali in esame.

Calcolo del tempo di recupero D_{rec}

Il tempo necessario per il recupero dell'equilibrio termico in seguito all'esposizione ad ambiente freddo (D_{rec}) viene calcolato nello stesso modo di D_{lim} , sostituendo le condizioni ambientali che non sono più quelle dell'ambiente freddo in esame ma quelle del luogo dove avviene il recupero

$$D_{rec} = \frac{Q_{lim}}{S}$$

dove $Q_{lim} = 144 \text{ KJ/m}^2$

$$S = M - W - E_{res} - C_{res} - E - R - C$$

calcolata nelle condizioni ambientali del luogo dove avviene il recupero

2.1.2 RAFFREDDAMENTO LOCALE

• Raffreddamento locale dovuto al vento (convective cooling)

Tale tipo di raffreddamento viene valutato attraverso il calcolo della Wind Chill Temperature, definita come la temperatura dell'ambiente che, in presenza di una velocità del vento pari a 4,2 Km/h, produce lo stesso potere di raffreddamento (sensazione) dell'ambiente in esame.

La procedura è articolata nelle seguenti fasi:

- Calcolo della Wind Chill Temperature t_{wc} (attraverso la relazione 1 o la Tabella D.1)
- Noto il valore di t_{wc} si individua attraverso la Tabella D.2 la classificazione del rischio e si valutano i possibili effetti dovuti a questo tipo di raffreddamento locale.

Valutazione della Wind Chill Temperature (allegato D)

La Wind Chill Temperature può essere calcolata direttamente attraverso la seguente formula:

$$t_{wc} = 13,12 + 0,6215 \cdot t_a - 11,37 \cdot v_{10}^{0,16} + 0,3965 \cdot t_a \cdot v_{10}^{0,16}$$

dove v_{10} è la velocità del vento definita come il valore meteorologico standard misurato alla quota di 10 m dal livello del terreno.

Tale valore può essere ottenuto dalle stazioni meteo.

Se si misura la velocità del vento v_a a livello del terreno, questa deve essere poi moltiplicata per 1,5 prima di inserire il dato nell'espressione;

oppure dalla tabella D.1 della UNI EN ISO 11079

Tabella D.1- Wind Chill Temperature in funzione della velocità del vento

v_{10}		t_a °C										
km·h ⁻¹	m·s ⁻¹	0	-5	-10	-15	-20	-25	-30	-35	-40	-45	-50
5	1,4	-2	-7	-13	-19	-24	-30	-36	-41	-47	-53	-58
10	2,8	-3	-9	-15	-21	-27	-33	-39	-45	-51	-57	-63
15	4,2	-4	-11	-17	-23	-29	-35	-41	-48	-54	-60	-66
20	5,6	-5	-12	-18	-24	-31	-37	-43	-49	-56	-62	-68
25	6,9	-6	-12	-19	-25	-32	-38	-45	-51	-57	-64	-70
30	8,3	-7	-13	-20	-26	-33	-39	-46	-52	-59	-65	-72
35	9,7	-7	-14	-20	-27	-33	-40	-47	-53	-60	-66	-73
40	11,1	-7	-14	-21	-27	-34	-41	-48	-54	-61	-68	-74
45	12,5	-8	-15	-21	-28	-35	-42	-48	-55	-62	-69	-75
50	13,9	-8	-15	-22	-29	-35	-42	-49	-56	-63	-70	-76
55	15,3	-9	-15	-22	-29	-36	-43	-50	-57	-63	-70	-77
60	16,7	-9	-16	-23	-30	-37	-43	-50	-57	-64	-71	-78
65	18,1	-9	-16	-23	-30	-37	-44	-51	-58	-65	-72	-79
70	19,4	-9	-16	-23	-30	-37	-44	-51	-59	-66	-73	-80
75	20,8	-10	-17	-24	-31	-38	-45	-52	-59	-66	-73	-80
80	22,2	-10	-17	-24	-31	-38	-45	-52	-60	-67	-74	-81

Tabella d.2 della UNI EN ISO 11079

Classificazione del rischio	t_{wc} in °C	Effetti
1	da -10° a -24	Freddo non confortevole
2	da -25 a -34	Molto freddo, rischio di congelamento della pelle
3	da -35 a -59	Freddo pungente, la pelle esposta può congelare in 10 minuti
4	Da -60 in poi	Estremamente freddo, la pelle esposta può congelare in 2 minuti

• **Raffreddamento locale dovuto al contatto di superfici fredde (conductive cooling)**

Si fa riferimento alla norma UNI EN ISO 13732 - 3

• **Raffreddamento locale dovuto al raffreddamento delle estremità (extremity cooling)**

Questo tipo di raffreddamento è dovuto all'attivazione del meccanismo di vasocostrizione che richiama il sangue dalla periferia per riscaldare il "core" provocando il progressivo abbassamento delle temperature delle estremità del corpo (soprattutto delle dita delle mani e dei piedi).

Il raffreddamento delle estremità può essere prevenuto o ridotto utilizzando i guanti.

Per i guanti di protezione si può far riferimento alla UNI EN 511 "Guanti di protezione contro il freddo".

La Tabella B.1 dell'allegato B della norma UNI EN ISO 11079 riporta i seguenti valori di temperatura delle dita per le due condizioni fisiologiche considerate per la valutazione di IREQ.

	Condizione I – high strain condition	Condizione II – low strain condition
Temperatura delle dita	15	24

• **Raffreddamento locale dovuto al raffreddamento delle vie respiratorie (airway cooling)**

Questo tipo di raffreddamento locale viene valutato attraverso l'indicazione della temperatura dell'aria raccomandata per l'inalazione.

Per temperature al di sotto dei -15°C , le protezioni alle vie respiratorie sono raccomandate per livelli di attività elevati (con crescenti volumi di ventilazione).

Per temperature al di sotto dei -30°C , le protezioni alle vie respiratorie sono fortemente raccomandate.

La Tabella B.1 dell'allegato B della norma UNI EN ISO 11079 riporta i seguenti valori di temperatura dell'aria per il tratto respiratorio per le due condizioni fisiologiche considerate per la valutazione di IREQ.

Tratto respiratorio	Condizione I – high strain condition	Condizione II – low strain condition
Attività leggera ($M \leq 115 \text{ W/m}^2$)	$t_a = -40$	$t_a = -20$
Attività intensa ($M \leq 115 \text{ W/m}^2$)	$t_a = -30$	$t_a = -15$