

MICROCLIMA

Premessa

Fra i diversi fattori che incidono sulla qualità degli ambienti di vita e di lavoro, il **microclima**, ovvero il complesso dei parametri ambientali che condizionano lo scambio termico soggetto-ambiente, riveste un'importanza determinante. Infatti il conseguimento del benessere termico, cioè lo stato di piena soddisfazione nei confronti dell'ambiente stesso, costituisce per l'uomo una condizione indispensabile e prioritaria per il raggiungimento del benessere totale.

Il corpo umano, per le sue caratteristiche termiche, può essere paragonato ad una macchina termica alimentata da combustibili sotto forma di alimenti che vengono trasformati parte in lavoro (10-20%) e parte in calorie (80-90%).

Ne consegue che l'uomo, che deve mantenere costante la sua temperatura interna, cioè quella degli organi più importanti (sistema nervoso centrale, cuore, polmoni, visceri, ecc.), deve essere in grado di dissipare nell'ambiente il calore metabolico prodotto in eccesso.

- Questi scambi termici tra uomo e ambiente, che hanno lo scopo di mantenere la temperatura interna dell'organismo attorno a 37°C (**bilancio termico**) avvengono attraverso diverse modalità, sia fisiche (convezione, conduzione, irraggiamento), che fisiologiche (produzione ed evaporazione del sudore).
- La situazione termica di un organismo può essere razionalmente analizzata:
- considerandolo come sistema termico interessato da flussi di energia che entra ed esce attraverso la sua superficie e da generazione di energia al suo interno: quando l'effetto complessivo di tali flussi non abbia modo di essere nullo si osserverà un aumento del contenuto termico del sistema od una diminuzione;
- mediante la sua equazione di **bilancio termico (BT)** che, nella sua forma semplificata, viene espressa nel seguente modo:

$$BT = M + C + R - E$$

dove:

M = calore metabolico prodotto dall'organismo. Può essere distinto nelle due componenti: metabolismo basale e dispendio energetico associato alla specifica attività lavorativa

C = quantità di calore scambiata per CONVEZIONE

R = quantità di calore scambiata per IRRAGGIAMENTO

E = quantità di calore dissipata attraverso l'EVAPORAZIONE del sudore

Il calore metabolico **M** è sempre e soltanto positivo, quello di evaporazione **E** sempre negativo, mentre il calore di convezione **C** e quello di irraggiamento **R** possono essere alternativamente di segno + o - a seconda che gli scambi termici siano rispettivamente diretti dall'ambiente all'uomo

o viceversa.

Trascurabile la quantità di calore scambiata per CONDUZIONE.

Quando il bilancio termico è uguale a zero ($BT=0$) si ha la condizione ideale di **omeotermia**, cioè la stabilità dell'equilibrio termico.

Se il bilancio termico supera lo zero ($BT>0$) la temperatura corporea aumenta; se il bilancio termico è inferiore a zero ($BT<0$) la temperatura corporea diminuisce.

Quando l'equilibrio termico viene mantenuto con un minimo sforzo da parte dei sistemi di termoregolazione, le corrispondenti condizioni microclimatiche possono essere definite di **benessere**; se invece l'equilibrio viene mantenuto con sforzo da parte dei meccanismi di termoregolazione (ad esempio: notevole produzione di sudore) si potrà parlare di condizioni microclimatiche **di equilibrio ma non di benessere**; se infine l'equilibrio termico, nonostante il massimo sforzo da parte dei meccanismi di termoregolazione, non viene mantenuto, si parlerà di condizioni microclimatiche di **disequilibrio**.

Nella formulazione del bilancio termico intervengono numerosi parametri che possono essere, a grandi linee, suddivisi in due gruppi.

Il primo gruppo comprende i fattori oggettivi ambientali (che vengono misurati con opportuna strumentazione), quali: temperatura, umidità, temperatura radiante media, velocità dell'aria (vedi definizioni).

Al secondo gruppo appartengono tutti fattori strettamente legati all'individuo, quali: calore di origine metabolica, temperatura cutanea, emissione di sudore, dimensione corporea, abbigliamento (che vengono simulati), capacità sudorativa fissa, temperatura cutanea e corrispondente tensione parziale di vapore acqueo, ben precisa e costante.

Gli ambienti termici

Convenzionalmente gli ambienti termici vengono distinti in:

- ambienti moderati
- ambienti caldi
- ambienti freddi

Tale distinzione è fondamentalmente concettuale e finalizzata alla utilizzazione delle modalità di analisi e di valutazione appropriate al tipo di situazione in quanto a questi tre tipi di ambiente vengono applicati metodi di analisi e criteri di valutazione distinti.

La misura isolata delle singole variabili ambientali (temperatura, umidità, temperatura radiante, velocità dell'aria) è infatti generalmente insufficiente a quantificare in precisi termini fisici gli

scambi termici uomo-ambiente e quindi a determinare le caratteristiche complessive di un ambiente termico.

Spesso pertanto si ricorre alla utilizzazione di **indici microclimatici sintetici**, i quali tendono a ricondurre la valutazione di un determinato ambiente, alla verifica del valore assunto da una grandezza - indice (di disagio o di stress termico), rispetto a valori di riferimento.

I criteri basati sull'uso di indici sintetici permettono la valutazione dell'ambiente evitando la considerazione analitica delle numerose grandezze che determinano il microclima: l'indice infatti si sostituisce a queste e ne integra l'effetto sull'organismo umano portando ad una semplificazione delle procedure di valutazione estremamente vantaggiosa sul piano applicativo. A causa dell'impossibilità di formulare un solo indice in grado di soddisfare simultaneamente esigenze, condizioni e parametri differenti tra loro, gli indici messi a punto, più o meno semplici, sono diversi.

Tali indici sono il risultato di un differente approccio all'analisi del problema e, come tali, non sempre possono sostituirsi l'uno all'altro, ma è utile integrarli tra loro per formulare un giudizio globale.

Per la valutazione di ambienti moderati e caldi gli indici proposti possono essere suddivisi in due grandi categorie.

Indici di:

- **benessere**: misurabili con metodi fisiologici (es. TE, PMV-PPD)
- **stress calorico**: misurabili con metodi strumentali (WBGT-SWBGT), fisiologici (TEC, P4SR), basati sul BT (ITS, HSI).

Non esistono allo stato attuale criteri di valutazione per ambienti freddi di ampia e affidabile applicabilità. Sono all'esame due metodi:

- il metodo dell'**isolamento termico** (del vestiario) richiesto;
- il metodo di valutazione basato sull'**indice WCI** (proposto anche dalla ACGIH).

Criteri di valutazione per ambienti moderati

- **Indici di benessere**

Gli ambienti moderati sono individuati innanzitutto dal fatto che impongono un "moderato" grado di intervento al sistema di termoregolazione e che vi può risultare facilmente realizzata la condizione di omeotermia del soggetto.

In concreto tali ambienti sono caratterizzati da:

- condizioni ambientali piuttosto omogenee e con ridotta variabilità nel tempo;

- assenza di scambi termici localizzati fra soggetto ed ambiente che abbiano effetti rilevanti sul bilancio termico complessivo;
- attività fisica modesta e sostanzialmente analoga per i diversi soggetti;
- sostanziale uniformità del vestiario indossato dai diversi operatori.

La valutazione di tali ambienti viene realizzata con riferimento al livello di benessere o disagio termico provocato dagli occupanti.

Precisamente il **benessere (o comfort termico)** è definito come "quella condizione mentale in cui viene espressa soddisfazione per l'ambiente termico" e sul piano tecnico viene ad essere frequentemente identificato con la **neutralità termica**, cioè con quello stato in cui il soggetto non esprime preferenza né per un ambiente più caldo né per uno più freddo di quello reale. In realtà, non è sempre possibile identificare completamente benessere e neutralità termici e risulta talvolta opportuno associare all'uso degli indici sintetici di valutazione dell'ambiente, delle ulteriori verifiche mirate ad individuare particolari altri fattori di disagio che non rientrano però nella formulazione degli indici stessi.

La funzione di un indice di benessere è quella di valutare la sensazione termica avvertita nell'ambiente in esame, ovvero il **grado di insoddisfazione soggettivo**.

La sensazione termica è determinata prevalentemente da sei variabili:

- livello di attività fisica
- resistenza termica del vestiario
- temperatura radiante media
- temperatura dell'aria
- umidità relativa
- velocità dell'aria

Altri fattori possono comunque influenzare la sensazione termica: ad esempio la struttura fisica individuale o le ultime situazioni termiche subite.

Per ridurre l'influenza di tali fattori soggettivi è stato valutato sperimentalmente il comportamento e la sensazione termica media di un vasto gruppo di persone in condizioni stabili.

A tale scopo, dall'integrazione dei vari parametri del microclima, sono stati elaborati degli indici a loro volta correlati con l'impressione soggettiva di **benessere o disagio termico**. Gli indici elaborati sono:

2.1.1 TEMPERATURA EFFETTIVA (TE in °C)

Ambienti che abbiano caratteristiche climatiche diverse (cioè diversa temperatura, umidità e

ventilazione) possono dare un'impressione soggettiva equivalente e come tali hanno una **temperatura effettiva** uguale.

In altre parole, ambienti caratterizzati da combinazioni diverse dei tre parametri microclimatici in esame, ma tali da dare luogo allo stesso valore di TE, sono a tutti gli effetti equivalenti dal punto di vista della reazione degli occupanti.

Data la sua semplicità l'indice TE viene adottato come riferimento per la determinazione dei requisiti microclimatici in ambienti di lavoro, assumendo come raccomandabili i seguenti valori:

periodo	TE (°C)
invernale	17,1 - 21,5
estivo	18,8 - 24,6

I dati rappresentano i valori limite delle **zone di gradevolezza invernale** ed estiva del diagramma di benessere, in funzione della TE.

L'indice TE tuttavia, se pur molto usato, presenta un limite importante: il fatto cioè che la determinazione della TE sia basata sulla sensazione avvertita dal soggetto nel passaggio dall'ambiente in esame all'ambiente campione, sensazione che risulta profondamente modificata dopo un adeguato periodo di acclimatamento del soggetto nell'ambiente campione stesso.

2.1.2 INDICI DI FANGER (PMV - PPD)

Questi due indici, strettamente correlati tra loro, consentono di poter valutare le condizioni microclimatiche di un ambiente di lavoro in funzione del giudizio (caldo, freddo, confortevole) espresso dai soggetti in esame e del loro eventuale disagio termico.

Se il complesso di fattori:

- resistenza termica del vestiario
- attività fisica svolta
- parametri ambientali oggettivi

è tale da soddisfare l'equazione del benessere termico per una popolazione numerosa di soggetti, è ragionevole attendersi che mediamente i soggetti stessi esprimeranno una valutazione di piena accettazione nei confronti dell'ambiente termico.

In caso contrario nascerà una insoddisfazione che potrà essere apprezzata qualitativamente, ad esempio, mediante una scala di sensazioni.

2.1.2.1 VOTO MEDIO PREVISTO (PMV)

Questo indice rappresenta il valore medio dei voti di un ampio campione di persone residenti nel medesimo ambiente, le quali esprimono la propria sensazione termica soggettiva attraverso una scala psicofisica comprendente sette voci:

+3 = molto caldo

+2 = caldo

+1 = leggermente caldo

0 = neutro

-1 = leggermente fresco

-2 = fresco

-3 = freddo

Va ricordato che, secondo Fanger, la sensazione termica è proporzionale alla variazione di metabolismo (calore prodotto dal corpo in relazione all'attività fisica svolta) necessaria per soddisfare il bilancio termico quando le altre variabili rimangono costanti.

2.1.2.2 PERCENTUALE PREVISTA DI INSODDISFATTI (PPD)

Individuato il valore medio della sensazione termica espressa dalla popolazione di soggetti nei confronti dell'ambiente (PMV), Fanger ha correlato tale valore numerico al grado di insoddisfazione dei soggetti stessi individuando la percentuale di presumibili soggetti insoddisfatti associata ad ogni valore dell'indice PMV compreso tra +3 e -3.

Viene definito "**soggetto insoddisfatto**" quello che, nell'ambiente in esame si dichiarerebbe decisamente insoddisfatto, ossia voterebbe -3, -2 oppure +2, +3.

La correlazione tra l'indice PMV e PPD è stata elaborata sulla base di ricerche sperimentali che hanno coinvolto complessivamente circa 1300 soggetti indossanti abiti leggeri ed esposti per tre ore consecutive negli ambienti climatizzati in prova.

Dall'esame di tali ricerche è emerso che (v. tabella seguente):

- anche in corrispondenza del valore medio (PMV=0) esiste comunque una percentuale pari al 5% di soggetti insoddisfatti, ossia che voterebbero -3, -2, +2, +3;
- la percentuale di insoddisfatti cresce rapidamente man mano che il valore dell'indice PMV si discosta da zero.

valori % di PPD in funzione di PMV			
PMV	freddo	PPD 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

Fonte: L'ambiente fisico: termico, luminoso, sonoro - LSI Laboratori di Strumentazione Industriale SpA - 1989

La norma ISO 7730, tenendo conto che il mantenimento di un valore di $PMV=0$ in permanenza nei diversi punti di un ambiente è un livello difficilmente raggiungibile sul piano tecnico, propone come obiettivo concreto la verifica che i valori dell'indice si trovino nell'intervallo tra **$PMV = - 0,5$ e $PMV = + 0,5$**

Tale requisito, insieme al controllo dei fattori di disagio termico, dovrebbe consentire il raggiungimento di un valore **$PPD = 10\%$** e il contenimento della percentuale reale di insoddisfatti al di sotto del 20%.

In correlazione con gli indici PMV e PPD devono essere analizzati anche altri indici che contribuiscono a definire un quadro di insieme delle condizioni microclimatiche di un ambiente di lavoro.

2.13 TEMPERATURA OPERATIVA (TO in °C)

Viene definita come la temperatura uniforme di un ambiente virtuale in cui il complesso degli scambi termici per convezione o irraggiamento tra il soggetto e l'ambiente virtuale è pari alla somma degli scambi termici per convezione e irraggiamento fra soggetto e ambiente reale.

In molti casi la TO può essere calcolata con sufficiente approssimazione come la media ponderata tra la temperatura radiante media e la temperatura dell'aria.

2.1.4 TEMPERATURA DI CONFORT (TC in °C)

È quella particolare temperatura operativa che, assegnati il livello di attività, la resistenza termica del vestiario e l'umidità relativa, consente di realizzare il confort termico (ossia $PMV=0$).

2.1.5 TEMPERATURA DIFFERENZIALE (TD in °C)

È la differenza tra la TC e la TO ed esprime la quantità, in OC, di cui occorre modificare la temperatura operativa per assicurare nell'ambiente reale la condizione di benessere termico (PMV=0).

Come riferito all'inizio, al fine di elaborare i suddetti indici di confort, è necessario definire sia il dispendio energetico che la resistenza termica del vestiario che influenzano non poco la sensazione di benessere termico.

2.1.A LIVELLO METABOLICO (in Met)

Si definisce in base al dispendio energetico necessario per lo svolgimento di una determinata attività fisica e si esprime in Met.

A titolo di esempio nella tabella che segue vengono riportati i livelli metabolici corrispondenti ad alcune attività.

livello metabolico in Met (*) corrispondente ad alcune attività

attività	met
riposo	
- dormire	0,7
- stare seduti tranquilli	1,0
- stare in piedi rilassati	1,2
camminare	
- in piano (varie velocità)	da 2,0 a 5,8
- in salita (varie velocità)	da 2,4 a 7,8
carpenteria meccanica	
- segare profilati a macchina	1,8 - 2,2
- segare profilati a mano	4,0 - 4,8
- spianare lamiera con martello	5,6 - 6,4
fonderia	
- sbavatura getti	3,0 - 3,4
- rimozione scoria	7,6
- operazione ai forni	5,0 - 7,0
industria meccanica	
- montaggi leggeri	2,4
- aggiustamento macchine	2,8
- meccanica pesante	4,0 - 7,0
conduzione veicoli	

- auto in traffico leggero	1,2
- auto in traffico intenso	2,0
- autocarro pesante	3,2
lavori pesanti	
- spingere carrelli (57 Kg a 4,5 Km/h)	2,5
- trasportare bagagli di 50 Kg	4,0
- scavare, picconare	4,0 - 4,8
lavori domestici	
- pulire la casa	2,0 - 3,4
- lavare a mano, stirare	2,0 - 3,6
lavori di ufficio	
- scrivere a macchina elettrica	1,2
- classificare, archiviare, ecc.	1,4
occupazioni varie	
- lavoro di laboratorio	1,4 - 2,2
- fabbro	2,2
- calzolaio	2,0
attività sportive	
- ginnastica	3,0 - 4,0
- tennis	3,6 - 4,6
- basket	5,0 - 7,6

(*) 1 Met = 50 Kcal/h per m2 di superficie corporea = 58,2 Watt/m2

2.1.B RESISTENZA TERMICA DEL VESTIARIO (in Clo)

Valuta la resistenza termica che il vestiario stesso oppone alla dispersione del calore. Si misura in "clo" e viene espresso con valori che vanno da zero per persone nude a quattro per abiti polari. Nella tabella che segue vengono riportati alcuni esempi.

valori di resistenza termica in clo (*) per alcuni tipi di abbigliamento	
abbigliamento	Clo
nudo	0,00
calzoncini corti	0,10
tropicale	0,30
leggero estivo	0,50
intermedio	0,60 - 0,70
invernale	0,94 - 1,0
pesante	1,35 - 1,50
polare	4,00

CRITERI DI VALUTAZIONE PER AMBIENTI CALDI

- ***Indici di stress calorico***

Vengono convenzionalmente denominati ambienti (severi) caldi quegli ambienti nei quali è richiesto un notevole intervento del sistema di termoregolazione umano al fine di diminuire il potenziale accumulo di calore nel corpo. L'azione termoregolatrice si esplica primariamente sul piano fisiologico mediante i meccanismi di vasodilatazione dei vasi sanguigni cutanei (con aumento della temperatura della cute) e di sudorazione. Tuttavia in determinate condizioni questi meccanismi non riescono a mantenere le condizioni di omeotermia dell'organismo, la cui temperatura in conseguenza di ciò aumenta anche a livello del nucleo (visceri, cervello,...).

In concreto, e con specifico riferimento agli ambienti di lavoro, le caratteristiche fondamentali degli ambienti caldi sono:

- valori di temperatura elevati in relazione alle caratteristiche dell'attività svolta e del vestiario indossato dagli operatori, eventualmente accompagnati da alti valori di umidità relativa dell'aria e richiedenti un considerevole intervento del meccanismo di scambio termico per sudorazione al fine di conservare l'omeotermia;
- condizioni termoigrometriche differenti da posizione a posizione di lavoro ed eventualmente anche entro una posizione di lavoro;
- sensibile variabilità nel tempo delle condizioni;
- disuniformità del livello di impegno fisico richiesto e del vestiario indossato dagli operatori.

La valutazione degli ambienti caldi viene effettuata con riferimento agli effetti acuti sull'individuo ed in particolare al livello di sollecitazione del sistema di termoregolazione, di norma assumendo come limite quello che comporta un moderato aumento della temperatura del nucleo corporeo (indicativamente di 1°C).

I diversi **criteri per la valutazione dello stress termico in ambienti caldi** si basano generalmente sulla elaborazione dei seguenti indici:

2.2.1 INDICI MISURABILI CON METODI STRUMENTALI

2.2.1.1 WET BULB GLOBE TEMPERATURE (WBGT in °C)

Oggetto della norma ISO 7243, l'indice WBGT è applicabile in ambienti termici caldi. Il suo obiettivo è la tutela dallo stress termico eccessivo (sotto forma di colpo di calore) della maggior

parte degli individui operanti in ambiente caldo, che siano in buono stato di salute ed adatti all'attività svolta. Ciò viene perseguito considerando accettabili solo quelle condizioni ambientali che si ritiene non provochino, alla maggior parte dei lavoratori acclimatati, completamente vestiti e con una adeguata assunzione di acqua e di sale, aumento della temperatura del nucleo corporeo oltre i 38°C

Si considera acclimatato un individuo che possieda una tolleranza adeguata, dal punto di vista termico, alle condizioni di lavoro in esame, ottenuta per abitudinaria esposizione nell'ambiente o mediante un processo graduale di acclimatemento.

I valori WBGT sono calcolati con le equazioni seguenti:

<u>Esterno</u> con esposizione solare	$WBGT = 0,7 TUN + 0,2 TG + 0,1 TS$
<u>Interno o esterno</u> senza esposizione solare	$WBGT = 0,7 TUN + 0,3 TG$

Secondo l'ACGIH i valori limite (espressi in °C) dell'indice WBGT sono i seguenti:

lavoro/riposo	carico di lavoro		
	leggero	moderato	pesante
lavoro continuo	30,0	26,7	25,0
75% lavoro 25% riposo	30,6	28,9	25,9
50% lavoro 50% riposo	31,4	29,4	27,9
25% lavoro 75% riposo	32,2	31,1	30,0

Fonte: Giornale degli Igienisti Industriali - Valori Limite di Soglia ACGIH 1990/91

Esposizioni a temperature superiori a quelle indicate sono permesse solo se i lavoratori sono sottoposti a visita medica e se è stato accertato che essi sopportano il lavoro in ambiente caldo più della media dei lavoratori.

Il WBGT è un indice empirico che non tiene conto esplicitamente delle grandezze ambientali "fondamentali" (TS, TR, UR, V), ma il cui calcolo si basa su grandezze "derivate", determinate da quelle fondamentali tramite le diverse sonde utilizzate.

2.2.1.2 SWEDISCH WET BULB GLOBE TEMPERATURE (SWBGT in °C)

Proposto dagli igienisti svedesi, ricalca il WBGT americano modificandolo con la sostituzione della TUN con la TU e introducendo un fattore di correzione riferito alla ventilazione. I valori vengono calcolati con le seguenti equazioni:

$$V \leq 0,5 \text{ m/s: SWBGT} = 0,7 \text{ TU} + 0,3 \text{ TG} + 2 \text{ (}^\circ\text{C)}$$

$$V > 0,5 \text{ m/s: SWBGT} = 0,7 \text{ TU} + 0,3 \text{ TG (}^\circ\text{C)}$$

Rispetto al WBGT il SWBGT: tiene conto del fattore aggravante del carico calorico costituito da una insufficiente ventilazione, comporta l'uso di tutti i parametri del microclima, valuta con maggiore precisione la temperatura del bulbo umido. Anche il SWBGT è usato per definire valori limite e di conseguenza è confrontabile con i TLV ACGIH.

2.2.2 INDICI MISURABILI CON METODI FISIOLGICI

(tentano di indicare il grado di comfort o meno dell'ambiente termico basandosi sulla valutazione di reazioni fisiologiche dell'organismo)

2.2.2.1 TEMPERATURA EFFETTIVA CORRETTA (TEC in °C)

È un indice di diretta derivazione dall'indice TE precedentemente presentato mediante sostituzione del valore di temperatura globotermometrica al valore di temperatura a bulbo secco nei nomogrammi per la determinazione di TE.

Con riferimento ai valori limite sottoriportati, l'indice TEC può essere utilizzato per la valutazione di ambienti caldi. Esso ha carattere fondamentalmente empirico e, pur essendo il suo valore influenzato dai diversi parametri ambientali e personali che determinano anche la situazione termica dell'organismo, non ne tiene conto in maniera quantitativamente corretta. Si ritiene che, in particolare negli ambienti caldi, tenda a soprastimare l'effetto di umidità relative elevate ed a sottostimare l'effetto di elevate velocità dell'aria.

Valori limite relativi all'indice TEC (°C)			
modalità di lavoro	intensità del lavoro		
	leggero	medio	elevato
continuo	31,1	29,4	27,2
discontinuo 3/1 (*)	33,3	31,1	28,9
2/1	33,9	31,7	29,4
1/1	35,6	33,3	31,1
0,5/1	38,9	36,1	33,3
0,33/1	41,1	38,3	35,6

(*) la prima cifra indica le ore di lavoro di un periodo, la seconda il periodo, sempre di un'ora di lavoro

Fonte: L'ambiente fisico: termico, luminoso, sonoro - LSI Laboratori di Strumentazione Industriale SpA - 1989

2.2.2.2 PREDICTED 4 HOUR SWEAT RATE (P4SR in litri)

(Indice della sudorazione prevista in 4 ore)

È basato sulla misura della sudorazione prodotta in 4 ore da soggetti giovani, sani, vestiti, esposti a varie combinazioni di temperatura radiante media, umidità relativa e velocità dell'aria, dopo un processo di acclimatazione artificiale.

Lo stress dell'ambiente è perciò misurato in funzione dell'affaticamento (sudorazione) causato.

L'indice è empirico e non ha una formulazione analitica.

In funzione delle condizioni ambientali viene stimato mediante appositi nomogrammi.

L'indice P4SR è un ottimo indice per la misura dell'affaticamento calorico, ma non è valido per tutte le condizioni ambientali. Infatti in situazioni molto calde la reale secrezione di sudore non può soddisfare la richiesta ambientale: in questa zona ($P4SR > 5$ litri) il nomogramma stima approssimativamente la produzione di sudore.

I limiti proposti per l'indice sono indicativamente i seguenti:

3,0 litri: limite superiore tollerabile di sudorazione per esposizione giornaliera

4,5 litri: limite superiore massimo accettabile di sudorazione per esposizione breve

(massimo 4 ore)

2.2.3 INDICI BASATI SULLO STUDIO DEL BT

(si rifanno alla considerazione che il carico termico è già elevato quando la produzione di calore supera la possibilità di venire eliminata per convezione e radiazione, ossia quando il BT può equilibrarsi solo con la sudorazione)

2.2.3.1 HEAT STRESS INDEX (HSI)

(Indice di stress termico di Belding-Hatch)

Assunto che:

- l'evaporazione del sudore secreto sia il principale meccanismo di cessione di calore da parte dell'organismo all'ambiente per il mantenimento dell'omeotermia;
- l'effetto termico di tale evaporazione sia tradotto dal termine di scambio per sudorazione dell'equazione di bilancio termico;
- E^{req} indichi il valore di potenza termica, ceduta per sudorazione, necessaria perché il BT sia in equilibrio;
- esista per ogni valore di E^{req} un valore massimo ipotizzabile (E^{max}) di evaporazione del sudore determinato sia dalla capacità del soggetto di produrre sudore nell'intero periodo

lavorativo, sia dalle condizioni ambientali (limite fisiologico di E^{\max} : circa 1 l/h per soggetti adulti e acclimatati);

si definisce l'indice HSI come:

$$HSI = \frac{E^{req}}{E^{\max}} \times 100$$

Il valore di HSI è calcolabile tramite opportuni nomogrammi o mediante sviluppo di formule. Il dato viene interpretato confrontandolo con una scala graduata di valori che evidenziano le implicazioni fisiologiche per esposizioni al calore di 8 ore.

indice HSI	implicazioni fisiologiche per esposizioni di 8 ore
0	Assenza di "affaticamento" calorico
+ 10 + 20 + 30	Lieve e moderato "affaticamento" calorico. Se il lavoro comporta funzioni intellettuali superiori, prontezza, attenzione, c'è da attendersi un sostanziale calo delle prestazioni. Nell'esecuzione di un lavoro fisico pesante, c'è da attendersi un lieve calo in soggetti capaci di svolgere tale attività in ambienti a microclima confortevole in modo efficiente.
+ 40 + 50 + 60	Severo "affaticamento" calorico, che comporta una minaccia alla salute se l'uomo non è fisicamente sano. È richiesto un periodo di acclimatamento preventivo. C'è però da attendersi un calo delle prestazioni nelle attività lavorative. È desiderabile una selezione medica del personale poiché queste condizioni sono incompatibili con una compromissione dell'apparato respiratorio e cardiovascolare o con una dermatite cronica. Queste condizioni sono anche incompatibili con attività che comportino uno sforzo mentale protratto.
+ 70 + 80 + 90	"Affaticamento" calorico molto grave. Solo una piccola percentuale della popolazione è idonea a questa attività. Il personale deve essere selezionato attraverso un esame medico e attraverso prove di lavoro (dopo acclimatazione). Sono necessarie particolari misure per assicurare un adeguato apporto di acqua e di sali minerali. Un miglioramento delle condizioni di lavoro con qualsiasi mezzo disponibile è vivamente consigliabile e comporterà una diminuzione di rischio per la salute e una maggiore efficienza. Lievi "malformazioni" che normalmente non modificano l'efficienza fisica possono rendere il personale operante non idoneo a tali impieghi.

+ 100	Massimo "affaticamento" tollerabile da un individuo giovane e acclimatato.
> 100	Tempo di esposizione limitato. Aumento della temperatura interna corporea (fino ai valori consentiti).

Fonte: L'ambiente fisico: termico, luminoso, sonoro - LSI Laboratori di Strumentazione Industriale SpA - 1989

Quando il valore di HSI supera 100, il BT non è uguale a 0, vi è un guadagno di calore ed il corpo umano tende a scaldarsi. Per evitare che questo riscaldamento produca danni deve essere **limitata la durata dell'esposizione** in ambiente caldo in maniera che la temperatura corporea non aumenti più di 0,90C, corrispondenti ad un accumulo di energia nell'organismo pari a 73,3 Wh. La durata limite dell'esposizione (AET in ore) si valuta mediante l'equazione:

$$AET = 73,3 / (E^{req} - E^{max}) \text{ (h)}$$

In corrispondenza al valore di AET viene fornita anche la possibilità di stimare il **minimo tempo di recupero** (MTR in ore) richiesto per il ritorno a condizioni di temperatura corporea normali.

MTR si calcola mediante la formula:

$$MTR = 73,3 / (E^{max} - E^{req}) \text{ (h)}$$

dove a denominatore si trovano le grandezze E^{max} , E^{req} relative alla zona di riposo.

L'indice HSI utilizza equazioni e schema di calcolo sensibilmente semplificati, come pure semplificata risulta la diagnosi della situazione di esposizione. Queste limitazioni lo rendono inadeguato per la valutazione di situazioni gravose, che implicino brevi tempi di esposizione oppure per esposizioni molto prolungate e ripetute per le quali il limite proposto per la potenza termica massima scambiata per sudorazione risulta non del tutto adeguato ad evitare la disidratazione dell'organismo.

2.2.3.2 INDEX OF THERMAL STRESS (ITS)

È un indice razionale di valutazione degli ambienti caldi proposto anche per situazioni che prevedano l'esposizione alla radiazione solare. È basato sulla equazione di BT dell'organismo.

Il criterio in esame utilizza le seguenti grandezze:

1. evaporazione richiesta per il mantenimento dell'omeotermia (E^{req})
2. sudorazione richiesta (S^{req}) per lo stesso scopo, che esprime la portata di sudore che è necessario l'organismo produca per realizzare l'evaporazione richiesta. Evaporazione e sudorazione richieste differiscono in quanto una parte del sudore secreto può venire dispersa nell'ambiente senza evaporare a livello della cute e quindi senza contribuire alla

cessione di calore da parte dell'organismo; le due grandezze sono fra loro numericamente legate dal rendimento della sudorazione n^{scl} ($S^{req} = E^{req}/n^{scl}$)

3. potenza termica massima cedibile dal corpo per sudorazione (E^{max})
4. rendimento della sudorazione (n^{scl})

L'indice ITS è espresso dall'equazione:

$$ITS = \frac{E^{req}}{0,37 n^{scl}} \text{ (g/h)}$$

dove 0,37 è il fattore di conversione da W/m² a g/h per un individuo standard con superficie cutanea di 1,8 m².

Dal momento che l'indice esprime in g/h la portata di sudore richiesta per il mantenimento dell'omeotermia, può essere verificato sui corrispondenti valori limite fisiologici sia relativi alla portata di sudore che alla quantità giornaliera totale di sudore prodotto.

Rispetto a metodi più articolati, nell'elaborazione dell'indice risulta più semplificato lo schema di calcolo dei parametri che definiscono la situazione termica dell'individuo e quasi inesistente la metodologia di diagnosi di tale situazione. Ne consegue che il criterio in esame non è specificatamente adatto alla valutazione di situazioni termiche particolarmente gravose.

2.2.3.3 METODO DELLA SUDORAZIONE RICHIESTA

Il criterio si basa sulla determinazione e sulla verifica di accettabilità della potenza termica che il soggetto, operante in ambiente caldo, deve cedere all'ambiente stesso attraverso il meccanismo di sudorazione al fine di mantenere l'omeotermia. Utilizza le seguenti grandezze:

1. evaporazione richiesta (E^{req}) per il mantenimento dell'omeotermia
2. evaporazione massima realizzabile (E^{max})
3. frazione di area bagnata richiesta (w^{req}), che esprime il rapporto fra area della cute che è necessario sia ricoperta da sudore per conseguire l'omeotermia ed area cutanea totale; è convenzionalmente assunta pari al rapporto tra evaporazione richiesta ed evaporazione massima realizzabile
4. rendimento della sudorazione (r), che traduce il fatto che una parte del sudore prodotto abbandona, per gocciolamento, la cute senza evaporare e quindi non contribuisce alla cessione di calore da parte dell'organismo; è definito come rapporto tra il sudore evaporato e quello secreto dall'organismo

La sudorazione richiesta (S^{req}) esprime la quantità di sudore che deve essere prodotta per realizzare il valore richiesto di evaporazione; può essere espressa in termini di portata in massa di sudore o di flusso termico ad essa corrispondente mediante le equazioni:

$$S_{req} = \frac{E^{req}}{0,375 r} \quad (\text{g/h}) = \frac{E^{req}}{r} \quad (\text{W/m}^2)$$

(0,375 è di conversione da W/m² a g/h).

È necessario inoltre definire la quantità giornaliera di sudore richiesta (D_{req}) pari alla quantità complessiva di sudore che il soggetto deve produrre nella giornata lavorativa e correlata quindi a durate di esposizione e portate sudorali che devono essere messe in atto nella giornata di lavoro.

La valutazione della situazione ai fini della tutela dallo stress termico, viene poi effettuata per confronto dei valori richiesti di frazione di area bagnata, di portate e quantità giornaliere di sudore con i corrispondenti valori limite distinti sulla base dell'acclimatamento o meno del soggetto e della scelta di una soglia limite di allarme o di pericolo.

La soglia di allarme viene definita come quella condizione limite di esposizione al di sotto della quale nessun soggetto sano e fisicamente adatto all'attività svolta corre rischio di stress termico tale da deteriorare il suo stato di salute. La soglia di pericolo tutela invece la maggior parte dei soggetti esposti, non essendo escluso che alcuni di questi corrano tale rischio.

Nell'ipotesi che i valori richiesti siano superiori ai valori limite e come tali non siano realizzabili, viene ridotta la durata di esposizione ammessa confrontando l'incremento atteso della temperatura del nucleo del soggetto con un valore limite corrispondente a 0,8 - 1 OC.

	soggetto non acclimatato		soggetto acclimatato	
	allarme	pericolo	allarme	pericolo
portata di sudore massima S^{max} (g/h)				
per individuo a riposo	260	390	520	780
per individuo operante	520	650	780	1040
quantità di sudore massima D^{max} (g)	2600	3250	3900	5200

Fonte: L'ambiente fisico: termico, luminoso, sonoro - LSI Laboratori di Strumentazione Industriale SpA - 1989 (modificata)

CRITERI DI VALUTAZIONE PER AMBIENTI FREDDI

Gli ambienti termici freddi sono caratterizzati da condizioni che richiedono un sensibile intervento del sistema di termoregolazione umano per limitare la potenziale eccessiva diminuzione della temperatura caratteristica dei diversi distretti ed in particolare del nucleo corporeo.

L'azione termoregolatrice si traduce sul piano fisiologico nella vasocostrizione dei capillari cutanei, che comporta una diminuzione della temperatura della cute e nell'incremento della produzione di calore per via metabolica, ottenuto mediante i brividi. Tale azione, nel caso di ambienti freddi, non può superare limiti relativamente ristretti per cui in tali ambienti risulta di fondamentale importanza l'azione termoregolatrice volontaria dell'individuo che si esplica nella esecuzione di movimenti non strettamente necessari, nella adozione di un vestiario maggiormente isolante, nell'allontanamento dall'ambiente freddo.

In concreto e con specifico riferimento alle attività lavorative, gli ambienti freddi presentano i seguenti aspetti fondamentali:

- valori di temperatura bassi (indicativamente compresi fra 0 e 10 °C per ambienti moderatamente freddi e inferiori a 0°C per ambienti freddi severi)
- contenuta variabilità spaziale e temporale delle condizioni
- attività fisica e tipologia del vestiario indossato abbastanza uniformi

Come già ricordato non esistono allo stato attuale criteri di valutazione di ampia e affidabile applicabilità. Sono all'esame:

2.3.1 METODO DELL'ISOLAMENTO TERMICO RICHIESTO

Si basa sulla determinazione e sulla verifica di accettabilità del valore di resistenza termica del vestiario richiesta per mantenere l'intero organismo dell'individuo in condizioni di equilibrio termico ($BT=0$) nell'ambiente considerato. Si distinguono in particolare:

- un valore minimo di resistenza del vestiario tale da mantenere l'equilibrio termico del corpo a prezzo di una contenuta sensazione di freddo da parte dell'operatore (connessa ad una diminuzione della sua temperatura cutanea media intorno ai 300C per vasocostrizione dei capillari della cute)
- un valore ottimale tale da mantenere l'equilibrio termico come nel caso precedente ma nell'ipotesi che temperatura cutanea media ed entità dello scambio termico per sudorazione assumano i valori proposti da Fanger corrispondenti al giudizio di neutralità termica dell'individuo.

Poiché in concreto esiste un limite superiore al valore di isolamento termico del vestiario che è possibile realizzare, determinato dalla necessità che l'individuo non venga eccessivamente ostacolato dal vestiario stesso nello svolgimento della sua attività, se il valore di isolamento richiesto non è raggiungibile, si dovrà limitare l'esposizione dell'operatore all'ambiente freddo. Peraltro, valori minori del minimo comportano un graduale raffreddamento del corpo, mentre valori superiori un aumento eccessivo della produzione di sudore che, imbevendo il vestiario, può sensibilmente ridurre la resistenza termica con effetti potenzialmente deleteri.

È opportuno sottolineare inoltre che il criterio in esame fa riferimento alla situazione termica globale dell'organismo. Alcuni distretti corporei periferici, particolarmente soggetti a raffreddamento come mani e piedi, possono richiedere specifici interventi di protezione locale.

2.3.2 WIND-CHILL INDEX (WCI)

L'indice WCI, insieme a quello ad esso correlato della "**equivalent chill temperature (ECT)**" è un metodo di valutazione proposto anche dall'ACGIH.

Secondo questa associazione:

questi TLV si prefiggono lo scopo di proteggere i lavoratori dagli effetti più gravi dello stress da freddo (ipotermia) e dal danno da freddo e di definire le condizioni di lavoro a basse temperature alle quali si ritiene che la maggior parte dei lavoratori possa rimanere esposta ripetutamente senza effetti negativi per la salute. Il TLV ha l'obiettivo di prevenire un abbassamento della temperatura interna corporea al disotto dei 36OC; temperature interne inferiori possono portare ad una riduzione della vigilanza e della capacità decisionale o alla perdita di coscienza con possibili conseguenze fatali.

Oltre alla protezione totale dell'organismo il TLV ha l'obiettivo di salvaguardare dai danni da freddo ogni parte del corpo, in particolare mani, piedi e testa.

Dolori alle estremità rappresentano i segni premonitori del pericolo dello stress da freddo.

Durante l'esposizione al freddo si ha la massima intensità dei brividi quando la temperatura interna scende a 35OC. Questo fatto rappresenta un segno di pericolo per i lavoratori e l'esposizione deve essere interrotta non appena sia evidente una intensità grave dei brividi; la validità del lavoro fisico e mentale è fortemente ridotta in presenza di brividi violenti.

È necessario fornire ai lavoratori indumenti isolanti asciutti idonei a mantenere la temperatura interna al di sopra dei 36OC se il lavoro si svolge a temperature dell'aria inferiori a 4OC.

Il fattore **wind-chill** o potere raffreddante dell'aria (definito come perdita di calore del corpo (espressa in watts per metro quadro) e funzione della temperatura dell'aria e della velocità del vento sul corpo esposto) rappresenta un fattore critico. Quanto più elevata è la velocità del vento e quanto minore la temperatura nella zona di lavoro, tanto maggiore deve essere il grado di isolamento degli indumenti protettivi.

Le **temperature equivalenti di sensazione di freddo (ECT)** (riportate in tabella) sono calcolabili a partire dalla temperatura attuale a bulbo secco dell'aria e dalla velocità del vento. La ECT va utilizzata per la stima dell'effetto combinato del raffreddamento dato dal vento e dalle temperature dell'aria sulla pelle esposta o per determinare il potere isolante degli indumenti richiesto per mantenere la temperatura interna corporea.

Il danno da freddo in parti del corpo che non siano le mani, i piedi e la testa, a meno di circostanze particolari o estreme, raramente si verifica senza la comparsa di segni iniziali di ipotermia.

I lavoratori più anziani o quelli con problemi circolatori necessitano di protezioni cautelative speciali contro il danno da freddo (es: l'uso di indumenti isolanti aggiuntivi e/o la riduzione della durata del periodo di esposizione). Le azioni cautelative da prendere dipendono dalle condizioni fisiche del lavoratore.

potenza raffreddante del vento sul corpo espressa come temperatura equivalente (in condizioni di calma)												
velocità del vento (m/sec)	temperatura attuale letta °c											
	10,0	4,4	-1,1	-6,6	-12,2	-17,7	-23,3	-28,8	-34,4	-40,0	-45,5	-51,5
ECT (temperatura equivalente di sensazione di freddo) °C												
calma	10,0	4,4	-1,1	-6,6	-12,2	-17,7	-23,3	-28,8	-34,4	-40,4	-45,5	-51,5
2,2	9,0	3,1	-2,7	-8,8	-14,4	-20,5	-26,1	-32,2	-37,7	-43,8	-49,4	-55,5
4,4	4,4	2,2	-8,8	15,5	-22,7	-31,1	-36,1	-43,3	-50,0	-56,6	-63,8	-70,5
6,6	2,2	5,5	12,7	20,5	-27,7	-35,5	-42,7	-50,0	-57,7	-65,0	-72,7	-80,0
8,8	0,0	-7,7	15,5	23,3	-31,6	-39,4	-47,2	-55,0	-63,3	-71,1	-78,8	-85,0
11,0	-1,1	-8,8	17,7	26,6	-33,8	-42,2	-50,5	-58,8	-66,6	-75,5	-83,3	-91,6
13,2	-2,2	10,5	18,8	27,7	-36,1	-44,4	-52,7	-61,6	-70,0	-78,3	-87,2	-95,5
15,4	-2,7	11,6	20,0	28,8	-37,2	-46,1	-55,5	-63,3	-72,2	-80,5	-89,4	-98,3
17,6(*)	-3,3	12,2	21,1	29,4	-38,3	-47,2	-56,1	-65,0	-73,3	-82,2	-91,1	100,0
(*)	pericolo limitato			pericolo crescente				grande pericolo				

valori superiori hanno o effetti aggiuntivi	per meno ore con pelle secca; massimo pericolo dovuto a un falso senso di sicurezza	pericolo di congelamento per il corpo esposto entro un minuto	si può avere congelamento del corpo entro trenta secondi
	alle temperature riportate in tabella può verificarsi la sindrome "del piede da trincea"		

Fonte: Giornale degli Igienisti Industriali - Valori Limite di Soglia ACGIH 1990/91

DEFINIZIONI

TS = Temperatura del bulbo secco a ventilazione forzata (in °C).

È la temperatura dell'aria misurata da un bulbo asciutto non soggetto ad irraggiamento termico e sottoposto a ventilazione compresa tra 2 e 4 m/s.

TU = Temperatura del bulbo umido a ventilazione forzata (in °C).

È la temperatura misurata da un bulbo ricoperto da una mussola (calza di cotone) inumidita con acqua distillata a temperatura ambiente, non soggetto ad irraggiamento termico e sottoposto a ventilazione compresa tra 2 e 4 m/s.

TUN= Temperatura del bulbo umido a ventilazione naturale (in °C).

È la temperatura misurata da un bulbo ricoperto da mussola inumidita con acqua distillata a temperatura ambiente, non soggetto ad irraggiamento termico, che risente della ventilazione naturale dell'ambiente.

UR = Umidità relativa (%).

È il rapporto percentuale tra la quantità di vapore acqueo presente nell'atmosfera ad una certa temperatura e la quantità necessaria per saturare l'atmosfera a quella stessa temperatura.

TG = Temperatura globotermometrica (in °C).

È la temperatura misurata tramite il globotermometro di Vernon, consistente in un bulbo posto al centro di una sfera di rame verniciata esternamente in nero opaco. La superficie metallica, riscaldata per irraggiamento, trasmette all'aria contenuta all'interno della sfera una quantità di calore proporzionale all'irraggiamento termico, alla temperatura e alla velocità dell'aria dell'ambiente.

TRM= Temperatura radiante media (in °C).

Viene definita con la media ponderata dei valori di temperatura in funzione della quale le pareti e gli oggetti presenti nell'ambiente, emettono radiazione calorica.

V = Velocità dell'aria (in m/s).

È un fattore indispensabile in quanto favorisce la perdita di calore del corpo umano per l'accelerazione dei moti convettivi dell'aria e dell'evaporazione: difatti il corpo si raffredda più velocemente quanto più elevato è il movimento dell'aria intorno ad esso.

MICROCLIMA

Premessa

Fra i diversi fattori che incidono sulla qualità degli ambienti di vita e di lavoro, il **microclima**, ovvero il complesso dei parametri ambientali che condizionano lo scambio termico soggetto-ambiente, riveste un'importanza determinante. Infatti il conseguimento del benessere termico, cioè lo stato di piena soddisfazione nei confronti dell'ambiente stesso, costituisce per l'uomo una condizione indispensabile e prioritaria per il raggiungimento del benessere totale.

Il corpo umano, per le sue caratteristiche termiche, può essere paragonato ad una macchina termica alimentata da combustibili sotto forma di alimenti che vengono trasformati parte in lavoro (10-20%) e parte in calorie (80-90%).

Ne consegue che l'uomo, che deve mantenere costante la sua temperatura interna, cioè quella degli organi più importanti (sistema nervoso centrale, cuore, polmoni, visceri, ecc.), deve essere in grado di dissipare nell'ambiente il calore metabolico prodotto in eccesso.

- Questi scambi termici tra uomo e ambiente, che hanno lo scopo di mantenere la temperatura interna dell'organismo attorno a 37°C (**bilancio termico**) avvengono attraverso diverse modalità, sia fisiche (convezione, conduzione, irraggiamento), che fisiologiche (produzione ed evaporazione del sudore).
- La situazione termica di un organismo può essere razionalmente analizzata:
- considerandolo come sistema termico interessato da flussi di energia che entra ed esce attraverso la sua superficie e da generazione di energia al suo interno: quando l'effetto complessivo di tali flussi non abbia modo di essere nullo si osserverà un aumento del contenuto termico del sistema od una diminuzione;
- mediante la sua equazione di **bilancio termico (BT)** che, nella sua forma semplificata, viene espressa nel seguente modo:

$$BT = M + C + R - E$$

dove:

M = calore metabolico prodotto dall'organismo. Può essere distinto nelle due componenti: metabolismo basale e dispendio energetico associato alla specifica attività lavorativa

C = quantità di calore scambiata per CONVEZIONE

R = quantità di calore scambiata per IRRAGGIAMENTO

E = quantità di calore dissipata attraverso l'EVAPORAZIONE del sudore

Il calore metabolico **M** è sempre e soltanto positivo, quello di evaporazione **E** sempre negativo, mentre il calore di convezione **C** e quello di irraggiamento **R** possono essere alternativamente di segno + o - a seconda che gli scambi termici siano rispettivamente diretti dall'ambiente all'uomo

o viceversa.

Trascurabile la quantità di calore scambiata per CONDUZIONE.

Quando il bilancio termico è uguale a zero ($BT=0$) si ha la condizione ideale di **omeotermia**, cioè la stabilità dell'equilibrio termico.

Se il bilancio termico supera lo zero ($BT>0$) la temperatura corporea aumenta; se il bilancio termico è inferiore a zero ($BT<0$) la temperatura corporea diminuisce.

Quando l'equilibrio termico viene mantenuto con un minimo sforzo da parte dei sistemi di termoregolazione, le corrispondenti condizioni microclimatiche possono essere definite di **benessere**; se invece l'equilibrio viene mantenuto con sforzo da parte dei meccanismi di termoregolazione (ad esempio: notevole produzione di sudore) si potrà parlare di condizioni microclimatiche **di equilibrio ma non di benessere**; se infine l'equilibrio termico, nonostante il massimo sforzo da parte dei meccanismi di termoregolazione, non viene mantenuto, si parlerà di condizioni microclimatiche di **disequilibrio**.

Nella formulazione del bilancio termico intervengono numerosi parametri che possono essere, a grandi linee, suddivisi in due gruppi.

Il primo gruppo comprende i fattori oggettivi ambientali (che vengono misurati con opportuna strumentazione), quali: temperatura, umidità, temperatura radiante media, velocità dell'aria (vedi definizioni).

Al secondo gruppo appartengono tutti fattori strettamente legati all'individuo, quali: calore di origine metabolica, temperatura cutanea, emissione di sudore, dimensione corporea, abbigliamento (che vengono simulati), capacità sudorativa fissa, temperatura cutanea e corrispondente tensione parziale di vapore acqueo, ben precisa e costante.

Gli ambienti termici

Convenzionalmente gli ambienti termici vengono distinti in:

- ambienti moderati
- ambienti caldi
- ambienti freddi

Tale distinzione è fondamentalmente concettuale e finalizzata alla utilizzazione delle modalità di analisi e di valutazione appropriate al tipo di situazione in quanto a questi tre tipi di ambiente vengono applicati metodi di analisi e criteri di valutazione distinti.

La misura isolata delle singole variabili ambientali (temperatura, umidità, temperatura radiante, velocità dell'aria) è infatti generalmente insufficiente a quantificare in precisi termini fisici gli

scambi termici uomo-ambiente e quindi a determinare le caratteristiche complessive di un ambiente termico.

Spesso pertanto si ricorre alla utilizzazione di **indici microclimatici sintetici**, i quali tendono a ricondurre la valutazione di un determinato ambiente, alla verifica del valore assunto da una grandezza - indice (di disagio o di stress termico), rispetto a valori di riferimento.

I criteri basati sull'uso di indici sintetici permettono la valutazione dell'ambiente evitando la considerazione analitica delle numerose grandezze che determinano il microclima: l'indice infatti si sostituisce a queste e ne integra l'effetto sull'organismo umano portando ad una semplificazione delle procedure di valutazione estremamente vantaggiosa sul piano applicativo. A causa dell'impossibilità di formulare un solo indice in grado di soddisfare simultaneamente esigenze, condizioni e parametri differenti tra loro, gli indici messi a punto, più o meno semplici, sono diversi.

Tali indici sono il risultato di un differente approccio all'analisi del problema e, come tali, non sempre possono sostituirsi l'uno all'altro, ma è utile integrarli tra loro per formulare un giudizio globale.

Per la valutazione di ambienti moderati e caldi gli indici proposti possono essere suddivisi in due grandi categorie.

Indici di:

- **benessere**: misurabili con metodi fisiologici (es. TE, PMV-PPD)
- **stress calorico**: misurabili con metodi strumentali (WBGT-SWBGT), fisiologici (TEC, P4SR), basati sul BT (ITS, HSI).

Non esistono allo stato attuale criteri di valutazione per ambienti freddi di ampia e affidabile applicabilità. Sono all'esame due metodi:

- il metodo dell'**isolamento termico** (del vestiario) richiesto;
- il metodo di valutazione basato sull'**indice WCI** (proposto anche dalla ACGIH).

Criteri di valutazione per ambienti moderati

- **Indici di benessere**

Gli ambienti moderati sono individuati innanzitutto dal fatto che impongono un "moderato" grado di intervento al sistema di termoregolazione e che vi può risultare facilmente realizzata la condizione di omeotermia del soggetto.

In concreto tali ambienti sono caratterizzati da:

- condizioni ambientali piuttosto omogenee e con ridotta variabilità nel tempo;

- assenza di scambi termici localizzati fra soggetto ed ambiente che abbiano effetti rilevanti sul bilancio termico complessivo;
- attività fisica modesta e sostanzialmente analoga per i diversi soggetti;
- sostanziale uniformità del vestiario indossato dai diversi operatori.

La valutazione di tali ambienti viene realizzata con riferimento al livello di benessere o disagio termico provocato dagli occupanti.

Precisamente il **benessere (o comfort termico)** è definito come "quella condizione mentale in cui viene espressa soddisfazione per l'ambiente termico" e sul piano tecnico viene ad essere frequentemente identificato con la **neutralità termica**, cioè con quello stato in cui il soggetto non esprime preferenza né per un ambiente più caldo né per uno più freddo di quello reale. In realtà, non è sempre possibile identificare completamente benessere e neutralità termici e risulta talvolta opportuno associare all'uso degli indici sintetici di valutazione dell'ambiente, delle ulteriori verifiche mirate ad individuare particolari altri fattori di disagio che non rientrano però nella formulazione degli indici stessi.

La funzione di un indice di benessere è quella di valutare la sensazione termica avvertita nell'ambiente in esame, ovvero il **grado di insoddisfazione soggettivo**.

La sensazione termica è determinata prevalentemente da sei variabili:

- livello di attività fisica
- resistenza termica del vestiario
- temperatura radiante media
- temperatura dell'aria
- umidità relativa
- velocità dell'aria

Altri fattori possono comunque influenzare la sensazione termica: ad esempio la struttura fisica individuale o le ultime situazioni termiche subite.

Per ridurre l'influenza di tali fattori soggettivi è stato valutato sperimentalmente il comportamento e la sensazione termica media di un vasto gruppo di persone in condizioni stabili.

A tale scopo, dall'integrazione dei vari parametri del microclima, sono stati elaborati degli indici a loro volta correlati con l'impressione soggettiva di **benessere o disagio termico**. Gli indici elaborati sono:

2.1.1 TEMPERATURA EFFETTIVA (TE in °C)

Ambienti che abbiano caratteristiche climatiche diverse (cioè diversa temperatura, umidità e

ventilazione) possono dare un'impressione soggettiva equivalente e come tali hanno una **temperatura effettiva** uguale.

In altre parole, ambienti caratterizzati da combinazioni diverse dei tre parametri microclimatici in esame, ma tali da dare luogo allo stesso valore di TE, sono a tutti gli effetti equivalenti dal punto di vista della reazione degli occupanti.

Data la sua semplicità l'indice TE viene adottato come riferimento per la determinazione dei requisiti microclimatici in ambienti di lavoro, assumendo come raccomandabili i seguenti valori:

periodo	TE (°C)
invernale	17,1 - 21,5
estivo	18,8 - 24,6

I dati rappresentano i valori limite delle **zone di gradevolezza invernale** ed estiva del diagramma di benessere, in funzione della TE.

L'indice TE tuttavia, se pur molto usato, presenta un limite importante: il fatto cioè che la determinazione della TE sia basata sulla sensazione avvertita dal soggetto nel passaggio dall'ambiente in esame all'ambiente campione, sensazione che risulta profondamente modificata dopo un adeguato periodo di acclimatamento del soggetto nell'ambiente campione stesso.

2.1.2 INDICI DI FANGER (PMV - PPD)

Questi due indici, strettamente correlati tra loro, consentono di poter valutare le condizioni microclimatiche di un ambiente di lavoro in funzione del giudizio (caldo, freddo, confortevole) espresso dai soggetti in esame e del loro eventuale disagio termico.

Se il complesso di fattori:

- resistenza termica del vestiario
- attività fisica svolta
- parametri ambientali oggettivi

è tale da soddisfare l'equazione del benessere termico per una popolazione numerosa di soggetti, è ragionevole attendersi che mediamente i soggetti stessi esprimeranno una valutazione di piena accettazione nei confronti dell'ambiente termico.

In caso contrario nascerà una insoddisfazione che potrà essere apprezzata qualitativamente, ad esempio, mediante una scala di sensazioni.

2.1.2.1 VOTO MEDIO PREVISTO (PMV)

Questo indice rappresenta il valore medio dei voti di un ampio campione di persone residenti nel medesimo ambiente, le quali esprimono la propria sensazione termica soggettiva attraverso una scala psicofisica comprendente sette voci:

+3 = molto caldo

+2 = caldo

+1 = leggermente caldo

0 = neutro

-1 = leggermente fresco

-2 = fresco

-3 = freddo

Va ricordato che, secondo Fanger, la sensazione termica è proporzionale alla variazione di metabolismo (calore prodotto dal corpo in relazione all'attività fisica svolta) necessaria per soddisfare il bilancio termico quando le altre variabili rimangono costanti.

2.1.2.2 PERCENTUALE PREVISTA DI INSODDISFATTI (PPD)

Individuato il valore medio della sensazione termica espressa dalla popolazione di soggetti nei confronti dell'ambiente (PMV), Fanger ha correlato tale valore numerico al grado di insoddisfazione dei soggetti stessi individuando la percentuale di presumibili soggetti insoddisfatti associata ad ogni valore dell'indice PMV compreso tra +3 e -3.

Viene definito "**soggetto insoddisfatto**" quello che, nell'ambiente in esame si dichiarerebbe decisamente insoddisfatto, ossia voterebbe -3, -2 oppure +2, +3.

La correlazione tra l'indice PMV e PPD è stata elaborata sulla base di ricerche sperimentali che hanno coinvolto complessivamente circa 1300 soggetti indossanti abiti leggeri ed esposti per tre ore consecutive negli ambienti climatizzati in prova.

Dall'esame di tali ricerche è emerso che (v. tabella seguente):

- anche in corrispondenza del valore medio (PMV=0) esiste comunque una percentuale pari al 5% di soggetti insoddisfatti, ossia che voterebbero -3, -2, +2, +3;
- la percentuale di insoddisfatti cresce rapidamente man mano che il valore dell'indice PMV si discosta da zero.

valori % di PPD in funzione di PMV			
PMV	freddo	PPD 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

Fonte: L'ambiente fisico: termico, luminoso, sonoro - LSI Laboratori di Strumentazione Industriale SpA - 1989

La norma ISO 7730, tenendo conto che il mantenimento di un valore di $PMV=0$ in permanenza nei diversi punti di un ambiente è un livello difficilmente raggiungibile sul piano tecnico, propone come obiettivo concreto la verifica che i valori dell'indice si trovino nell'intervallo tra **$PMV = - 0,5$ e $PMV = + 0,5$**

Tale requisito, insieme al controllo dei fattori di disagio termico, dovrebbe consentire il raggiungimento di un valore **$PPD = 10\%$** e il contenimento della percentuale reale di insoddisfatti al di sotto del 20%.

In correlazione con gli indici PMV e PPD devono essere analizzati anche altri indici che contribuiscono a definire un quadro di insieme delle condizioni microclimatiche di un ambiente di lavoro.

2.13 TEMPERATURA OPERATIVA (TO in °C)

Viene definita come la temperatura uniforme di un ambiente virtuale in cui il complesso degli scambi termici per convezione o irraggiamento tra il soggetto e l'ambiente virtuale è pari alla somma degli scambi termici per convezione e irraggiamento fra soggetto e ambiente reale.

In molti casi la TO può essere calcolata con sufficiente approssimazione come la media ponderata tra la temperatura radiante media e la temperatura dell'aria.

2.1.4 TEMPERATURA DI CONFORT (TC in °C)

È quella particolare temperatura operativa che, assegnati il livello di attività, la resistenza termica del vestiario e l'umidità relativa, consente di realizzare il confort termico (ossia $PMV=0$).

2.1.5 TEMPERATURA DIFFERENZIALE (TD in °C)

È la differenza tra la TC e la TO ed esprime la quantità, in OC, di cui occorre modificare la temperatura operativa per assicurare nell'ambiente reale la condizione di benessere termico (PMV=0).

Come riferito all'inizio, al fine di elaborare i suddetti indici di confort, è necessario definire sia il dispendio energetico che la resistenza termica del vestiario che influenzano non poco la sensazione di benessere termico.

2.1.A LIVELLO METABOLICO (in Met)

Si definisce in base al dispendio energetico necessario per lo svolgimento di una determinata attività fisica e si esprime in Met.

A titolo di esempio nella tabella che segue vengono riportati i livelli metabolici corrispondenti ad alcune attività

livello metabolico in Met (*) corrispondente ad alcune attività

attività	met
riposo	
- dormire	0,7
- stare seduti tranquilli	1,0
- stare in piedi rilassati	1,2
camminare	
- in piano (varie velocità)	da 2,0 a 5,8
- in salita (varie velocità)	da 2,4 a 7,8
carpenteria meccanica	
- segare profilati a macchina	1,8 - 2,2
- segare profilati a mano	4,0 - 4,8
- spianare lamiera con martello	5,6 - 6,4
fonderia	
- sbavatura getti	3,0 - 3,4
- rimozione scoria	7,6
- operazione ai forni	5,0 - 7,0
industria meccanica	
- montaggi leggeri	2,4
- aggiustamento macchine	2,8
- meccanica pesante	4,0 - 7,0
conduzione veicoli	

- auto in traffico leggero	1,2
- auto in traffico intenso	2,0
- autocarro pesante	3,2
lavori pesanti	
- spingere carrelli (57 Kg a 4,5 Km/h)	2,5
- trasportare bagagli di 50 Kg	4,0
- scavare, picconare	4,0 - 4,8
lavori domestici	
- pulire la casa	2,0 - 3,4
- lavare a mano, stirare	2,0 - 3,6
lavori di ufficio	
- scrivere a macchina elettrica	1,2
- classificare, archiviare, ecc.	1,4
occupazioni varie	
- lavoro di laboratorio	1,4 - 2,2
- fabbro	2,2
- calzolaio	2,0
attività sportive	
- ginnastica	3,0 - 4,0
- tennis	3,6 - 4,6
- basket	5,0 - 7,6

(*) 1 Met = 50 Kcal/h per m2 di superficie corporea = 58,2 Watt/m2

2.1.B RESISTENZA TERMICA DEL VESTIARIO (in Clo)

Valuta la resistenza termica che il vestiario stesso oppone alla dispersione del calore. Si misura in "clo" e viene espresso con valori che vanno da zero per persone nude a quattro per abiti polari. Nella tabella che segue vengono riportati alcuni esempi.

valori di resistenza termica in clo (*) per alcuni tipi di abbigliamento	
abbigliamento	Clo
nudo	0,00
calzoncini corti	0,10
tropicale	0,30
leggero estivo	0,50
intermedio	0,60 - 0,70
invernale	0,94 - 1,0
pesante	1,35 - 1,50
polare	4,00

CRITERI DI VALUTAZIONE PER AMBIENTI CALDI

- ***Indici di stress calorico***

Vengono convenzionalmente denominati ambienti (severi) caldi quegli ambienti nei quali è richiesto un notevole intervento del sistema di termoregolazione umano al fine di diminuire il potenziale accumulo di calore nel corpo. L'azione termoregolatrice si esplica primariamente sul piano fisiologico mediante i meccanismi di vasodilatazione dei vasi sanguigni cutanei (con aumento della temperatura della cute) e di sudorazione. Tuttavia in determinate condizioni questi meccanismi non riescono a mantenere le condizioni di omeotermia dell'organismo, la cui temperatura in conseguenza di ciò aumenta anche a livello del nucleo (visceri, cervello,...).

In concreto, e con specifico riferimento agli ambienti di lavoro, le caratteristiche fondamentali degli ambienti caldi sono:

- valori di temperatura elevati in relazione alle caratteristiche dell'attività svolta e del vestiario indossato dagli operatori, eventualmente accompagnati da alti valori di umidità relativa dell'aria e richiedenti un considerevole intervento del meccanismo di scambio termico per sudorazione al fine di conservare l'omeotermia;
- condizioni termoigrometriche differenti da posizione a posizione di lavoro ed eventualmente anche entro una posizione di lavoro;
- sensibile variabilità nel tempo delle condizioni;
- disuniformità del livello di impegno fisico richiesto e del vestiario indossato dagli operatori.

La valutazione degli ambienti caldi viene effettuata con riferimento agli effetti acuti sull'individuo ed in particolare al livello di sollecitazione del sistema di termoregolazione, di norma assumendo come limite quello che comporta un moderato aumento della temperatura del nucleo corporeo (indicativamente di 1°C).

I diversi **criteri per la valutazione dello stress termico in ambienti caldi** si basano generalmente sulla elaborazione dei seguenti indici:

2.2.1 INDICI MISURABILI CON METODI STRUMENTALI

2.2.1.1 WET BULB GLOBE TEMPERATURE (WBGT in °C)

Oggetto della norma ISO 7243, l'indice WBGT è applicabile in ambienti termici caldi. Il suo obiettivo è la tutela dallo stress termico eccessivo (sotto forma di colpo di calore) della maggior

parte degli individui operanti in ambiente caldo, che siano in buono stato di salute ed adatti all'attività svolta. Ciò viene perseguito considerando accettabili solo quelle condizioni ambientali che si ritiene non provochino, alla maggior parte dei lavoratori acclimatati, completamente vestiti e con una adeguata assunzione di acqua e di sale, aumento della temperatura del nucleo corporeo oltre i 38°C

Si considera acclimatato un individuo che possieda una tolleranza adeguata, dal punto di vista termico, alle condizioni di lavoro in esame, ottenuta per abitudinaria esposizione nell'ambiente o mediante un processo graduale di acclimatamento.

I valori WBGT sono calcolati con le equazioni seguenti:

<u>Esterno</u> con esposizione solare	$WBGT = 0,7 TUN + 0,2 TG + 0,1 TS$
<u>Interno o esterno</u> senza esposizione solare	$WBGT = 0,7 TUN + 0,3 TG$

Secondo l'ACGIH i valori limite (espressi in °C) dell'indice WBGT sono i seguenti:

lavoro/riposo	carico di lavoro		
	leggero	moderato	pesante
lavoro continuo	30,0	26,7	25,0
75% lavoro 25% riposo	30,6	28,9	25,9
50% lavoro 50% riposo	31,4	29,4	27,9
25% lavoro 75% riposo	32,2	31,1	30,0

Fonte: Giornale degli Igienisti Industriali - Valori Limite di Soglia ACGIH 1990/91

Esposizioni a temperature superiori a quelle indicate sono permesse solo se i lavoratori sono sottoposti a visita medica e se è stato accertato che essi sopportano il lavoro in ambiente caldo più della media dei lavoratori.

Il WBGT è un indice empirico che non tiene conto esplicitamente delle grandezze ambientali "fondamentali" (TS, TR, UR, V), ma il cui calcolo si basa su grandezze "derivate", determinate da quelle fondamentali tramite le diverse sonde utilizzate.

2.2.1.2 SWEDISCH WET BULB GLOBE TEMPERATURE (SWBGT in °C)

Proposto dagli igienisti svedesi, ricalca il WBGT americano modificandolo con la sostituzione della TUN con la TU e introducendo un fattore di correzione riferito alla ventilazione. I valori vengono calcolati con le seguenti equazioni:

$$V \leq 0,5 \text{ m/s: SWBGT} = 0,7 \text{ TU} + 0,3 \text{ TG} + 2 \text{ (}^\circ\text{C)}$$

$$V > 0,5 \text{ m/s: SWBGT} = 0,7 \text{ TU} + 0,3 \text{ TG (}^\circ\text{C)}$$

Rispetto al WBGT il SWBGT: tiene conto del fattore aggravante del carico calorico costituito da una insufficiente ventilazione, comporta l'uso di tutti i parametri del microclima, valuta con maggiore precisione la temperatura del bulbo umido. Anche il SWBGT è usato per definire valori limite e di conseguenza è confrontabile con i TLV ACGIH.

2.2.2 INDICI MISURABILI CON METODI FISIOLGICI

(tentano di indicare il grado di comfort o meno dell'ambiente termico basandosi sulla valutazione di reazioni fisiologiche dell'organismo)

2.2.2.1 TEMPERATURA EFFETTIVA CORRETTA (TEC in °C)

È un indice di diretta derivazione dall'indice TE precedentemente presentato mediante sostituzione del valore di temperatura globotermometrica al valore di temperatura a bulbo secco nei nomogrammi per la determinazione di TE.

Con riferimento ai valori limite sottoriportati, l'indice TEC può essere utilizzato per la valutazione di ambienti caldi. Esso ha carattere fondamentalmente empirico e, pur essendo il suo valore influenzato dai diversi parametri ambientali e personali che determinano anche la situazione termica dell'organismo, non ne tiene conto in maniera quantitativamente corretta. Si ritiene che, in particolare negli ambienti caldi, tenda a soprastimare l'effetto di umidità relative elevate ed a sottostimare l'effetto di elevate velocità dell'aria.

Valori limite relativi all'indice TEC (°C)			
modalità di lavoro	intensità del lavoro		
	leggero	medio	elevato
continuo	31,1	29,4	27,2
discontinuo 3/1 (*)	33,3	31,1	28,9
2/1	33,9	31,7	29,4
1/1	35,6	33,3	31,1
0,5/1	38,9	36,1	33,3
0,33/1	41,1	38,3	35,6

(*) la prima cifra indica le ore di lavoro di un periodo, la seconda il periodo, sempre di un'ora di lavoro

Fonte: L'ambiente fisico: termico, luminoso, sonoro - LSI Laboratori di Strumentazione Industriale SpA - 1989

2.2.2.2 PREDICTED 4 HOUR SWEAT RATE (P4SR in litri)

(Indice della sudorazione prevista in 4 ore)

È basato sulla misura della sudorazione prodotta in 4 ore da soggetti giovani, sani, vestiti, esposti a varie combinazioni di temperatura radiante media, umidità relativa e velocità dell'aria, dopo un processo di acclimatazione artificiale.

Lo stress dell'ambiente è perciò misurato in funzione dell'affaticamento (sudorazione) causato.

L'indice è empirico e non ha una formulazione analitica.

In funzione delle condizioni ambientali viene stimato mediante appositi nomogrammi.

L'indice P4SR è un ottimo indice per la misura dell'affaticamento calorico, ma non è valido per tutte le condizioni ambientali. Infatti in situazioni molto calde la reale secrezione di sudore non può soddisfare la richiesta ambientale: in questa zona ($P4SR > 5$ litri) il nomogramma stima approssimativamente la produzione di sudore.

I limiti proposti per l'indice sono indicativamente i seguenti:

3,0 litri: limite superiore tollerabile di sudorazione per esposizione giornaliera

4,5 litri: limite superiore massimo accettabile di sudorazione per esposizione breve

(massimo 4 ore)

2.2.3 INDICI BASATI SULLO STUDIO DEL BT

(si rifanno alla considerazione che il carico termico è già elevato quando la produzione di calore supera la possibilità di venire eliminata per convezione e radiazione, ossia quando il BT può equilibrarsi solo con la sudorazione)

2.2.3.1 HEAT STRESS INDEX (HSI)

(Indice di stress termico di Belding-Hatch)

Assunto che:

- l'evaporazione del sudore secreto sia il principale meccanismo di cessione di calore da parte dell'organismo all'ambiente per il mantenimento dell'omeotermia;
- l'effetto termico di tale evaporazione sia tradotto dal termine di scambio per sudorazione dell'equazione di bilancio termico;
- E^{req} indichi il valore di potenza termica, ceduta per sudorazione, necessaria perché il BT sia in equilibrio;
- esista per ogni valore di E^{req} un valore massimo ipotizzabile (E^{max}) di evaporazione del sudore determinato sia dalla capacità del soggetto di produrre sudore nell'intero periodo

lavorativo, sia dalle condizioni ambientali (limite fisiologico di E^{\max} : circa 1 l/h per soggetti adulti e acclimatati);

si definisce l'indice HSI come:

$$HSI = \frac{E^{req}}{E^{\max}} \times 100$$

Il valore di HSI è calcolabile tramite opportuni nomogrammi o mediante sviluppo di formule. Il dato viene interpretato confrontandolo con una scala graduata di valori che evidenziano le implicazioni fisiologiche per esposizioni al calore di 8 ore.

indice HSI	implicazioni fisiologiche per esposizioni di 8 ore
0	Assenza di "affaticamento" calorico
+ 10 + 20 + 30	Lieve e moderato "affaticamento" calorico. Se il lavoro comporta funzioni intellettuali superiori, prontezza, attenzione, c'è da attendersi un sostanziale calo delle prestazioni. Nell'esecuzione di un lavoro fisico pesante, c'è da attendersi un lieve calo in soggetti capaci di svolgere tale attività in ambienti a microclima confortevole in modo efficiente.
+ 40 + 50 + 60	Severo "affaticamento" calorico, che comporta una minaccia alla salute se l'uomo non è fisicamente sano. È richiesto un periodo di acclimatamento preventivo. C'è però da attendersi un calo delle prestazioni nelle attività lavorative. È desiderabile una selezione medica del personale poiché queste condizioni sono incompatibili con una compromissione dell'apparato respiratorio e cardiovascolare o con una dermatite cronica. Queste condizioni sono anche incompatibili con attività che comportino uno sforzo mentale protratto.
+ 70 + 80 + 90	"Affaticamento" calorico molto grave. Solo una piccola percentuale della popolazione è idonea a questa attività. Il personale deve essere selezionato attraverso un esame medico e attraverso prove di lavoro (dopo acclimatazione). Sono necessarie particolari misure per assicurare un adeguato apporto di acqua e di sali minerali. Un miglioramento delle condizioni di lavoro con qualsiasi mezzo disponibile è vivamente consigliabile e comporterà una diminuzione di rischio per la salute e una maggiore efficienza. Lievi "malformazioni" che normalmente non modificano l'efficienza fisica possono rendere il personale operante non idoneo a tali impieghi.

+ 100	Massimo "affaticamento" tollerabile da un individuo giovane e acclimatato.
> 100	Tempo di esposizione limitato. Aumento della temperatura interna corporea (fino ai valori consentiti).

Fonte: L'ambiente fisico: termico, luminoso, sonoro - LSI Laboratori di Strumentazione Industriale SpA - 1989

Quando il valore di HSI supera 100, il BT non è uguale a 0, vi è un guadagno di calore ed il corpo umano tende a scaldarsi. Per evitare che questo riscaldamento produca danni deve essere **limitata la durata dell'esposizione** in ambiente caldo in maniera che la temperatura corporea non aumenti più di 0,90C, corrispondenti ad un accumulo di energia nell'organismo pari a 73,3 Wh. La durata limite dell'esposizione (AET in ore) si valuta mediante l'equazione:

$$AET = 73,3 / (E^{req} - E^{max}) \text{ (h)}$$

In corrispondenza al valore di AET viene fornita anche la possibilità di stimare il **minimo tempo di recupero** (MTR in ore) richiesto per il ritorno a condizioni di temperatura corporea normali.

MTR si calcola mediante la formula:

$$MTR = 73,3 / (E^{max} - E^{req}) \text{ (h)}$$

dove a denominatore si trovano le grandezze E^{max} , E^{req} relative alla zona di riposo.

L'indice HSI utilizza equazioni e schema di calcolo sensibilmente semplificati, come pure semplificata risulta la diagnosi della situazione di esposizione. Queste limitazioni lo rendono inadeguato per la valutazione di situazioni gravose, che implicino brevi tempi di esposizione oppure per esposizioni molto prolungate e ripetute per le quali il limite proposto per la potenza termica massima scambiata per sudorazione risulta non del tutto adeguato ad evitare la disidratazione dell'organismo.

2.2.3.2 INDEX OF THERMAL STRESS (ITS)

È un indice razionale di valutazione degli ambienti caldi proposto anche per situazioni che prevedano l'esposizione alla radiazione solare. È basato sulla equazione di BT dell'organismo.

Il criterio in esame utilizza le seguenti grandezze:

1. evaporazione richiesta per il mantenimento dell'omeotermia (E^{req})
2. sudorazione richiesta (S^{req}) per lo stesso scopo, che esprime la portata di sudore che è necessario l'organismo produca per realizzare l'evaporazione richiesta. Evaporazione e sudorazione richieste differiscono in quanto una parte del sudore secreto può venire dispersa nell'ambiente senza evaporare a livello della cute e quindi senza contribuire alla

cessione di calore da parte dell'organismo; le due grandezze sono fra loro numericamente legate dal rendimento della sudorazione n^{scl} ($S^{req} = E^{req}/n^{scl}$)

3. potenza termica massima cedibile dal corpo per sudorazione (E^{max})
4. rendimento della sudorazione (n^{scl})

L'indice ITS è espresso dall'equazione:

$$ITS = \frac{E^{req}}{0,37 n^{scl}} \text{ (g/h)}$$

dove 0,37 è il fattore di conversione da W/m² a g/h per un individuo standard con superficie cutanea di 1,8 m².

Dal momento che l'indice esprime in g/h la portata di sudore richiesta per il mantenimento dell'omeotermia, può essere verificato sui corrispondenti valori limite fisiologici sia relativi alla portata di sudore che alla quantità giornaliera totale di sudore prodotto.

Rispetto a metodi più articolati, nell'elaborazione dell'indice risulta più semplificato lo schema di calcolo dei parametri che definiscono la situazione termica dell'individuo e quasi inesistente la metodologia di diagnosi di tale situazione. Ne consegue che il criterio in esame non è specificatamente adatto alla valutazione di situazioni termiche particolarmente gravose.

2.2.3.3 METODO DELLA SUDORAZIONE RICHIESTA

Il criterio si basa sulla determinazione e sulla verifica di accettabilità della potenza termica che il soggetto, operante in ambiente caldo, deve cedere all'ambiente stesso attraverso il meccanismo di sudorazione al fine di mantenere l'omeotermia. Utilizza le seguenti grandezze:

1. evaporazione richiesta (E^{req}) per il mantenimento dell'omeotermia
2. evaporazione massima realizzabile (E^{max})
3. frazione di area bagnata richiesta (w^{req}), che esprime il rapporto fra area della cute che è necessario sia ricoperta da sudore per conseguire l'omeotermia ed area cutanea totale; è convenzionalmente assunta pari al rapporto tra evaporazione richiesta ed evaporazione massima realizzabile
4. rendimento della sudorazione (r), che traduce il fatto che una parte del sudore prodotto abbandona, per gocciolamento, la cute senza evaporare e quindi non contribuisce alla cessione di calore da parte dell'organismo; è definito come rapporto tra il sudore evaporato e quello secreto dall'organismo

La sudorazione richiesta (S^{req}) esprime la quantità di sudore che deve essere prodotta per realizzare il valore richiesto di evaporazione; può essere espressa in termini di portata in massa di sudore o di flusso termico ad essa corrispondente mediante le equazioni:

$$S_{req} = \frac{E^{req}}{0,375 r} \quad (\text{g/h}) = \frac{E^{req}}{r} \quad (\text{W/m}^2)$$

(0,375 è di conversione da W/m² a g/h).

È necessario inoltre definire la quantità giornaliera di sudore richiesta (D_{req}) pari alla quantità complessiva di sudore che il soggetto deve produrre nella giornata lavorativa e correlata quindi a durate di esposizione e portate sudorali che devono essere messe in atto nella giornata di lavoro.

La valutazione della situazione ai fini della tutela dallo stress termico, viene poi effettuata per confronto dei valori richiesti di frazione di area bagnata, di portate e quantità giornaliere di sudore con i corrispondenti valori limite distinti sulla base dell'acclimatamento o meno del soggetto e della scelta di una soglia limite di allarme o di pericolo.

La soglia di allarme viene definita come quella condizione limite di esposizione al di sotto della quale nessun soggetto sano e fisicamente adatto all'attività svolta corre rischio di stress termico tale da deteriorare il suo stato di salute. La soglia di pericolo tutela invece la maggior parte dei soggetti esposti, non essendo escluso che alcuni di questi corrano tale rischio.

Nell'ipotesi che i valori richiesti siano superiori ai valori limite e come tali non siano realizzabili, viene ridotta la durata di esposizione ammessa confrontando l'incremento atteso della temperatura del nucleo del soggetto con un valore limite corrispondente a 0,8 - 1 OC.

	soggetto non acclimatato		soggetto acclimatato	
	allarme	pericolo	allarme	pericolo
portata di sudore massima S^{max} (g/h)				
per individuo a riposo	260	390	520	780
per individuo operante	520	650	780	1040
quantità di sudore massima D^{max} (g)	2600	3250	3900	5200

Fonte: L'ambiente fisico: termico, luminoso, sonoro - LSI Laboratori di Strumentazione Industriale SpA - 1989 (modificata)

CRITERI DI VALUTAZIONE PER AMBIENTI FREDDI

Gli ambienti termici freddi sono caratterizzati da condizioni che richiedono un sensibile intervento del sistema di termoregolazione umano per limitare la potenziale eccessiva diminuzione della temperatura caratteristica dei diversi distretti ed in particolare del nucleo corporeo.

L'azione termoregolatrice si traduce sul piano fisiologico nella vasocostrizione dei capillari cutanei, che comporta una diminuzione della temperatura della cute e nell'incremento della produzione di calore per via metabolica, ottenuto mediante i brividi. Tale azione, nel caso di ambienti freddi, non può superare limiti relativamente ristretti per cui in tali ambienti risulta di fondamentale importanza l'azione termoregolatrice volontaria dell'individuo che si esplica nella esecuzione di movimenti non strettamente necessari, nella adozione di un vestiario maggiormente isolante, nell'allontanamento dall'ambiente freddo.

In concreto e con specifico riferimento alle attività lavorative, gli ambienti freddi presentano i seguenti aspetti fondamentali:

- valori di temperatura bassi (indicativamente compresi fra 0 e 10 °C per ambienti moderatamente freddi e inferiori a 0°C per ambienti freddi severi)
- contenuta variabilità spaziale e temporale delle condizioni
- attività fisica e tipologia del vestiario indossato abbastanza uniformi

Come già ricordato non esistono allo stato attuale criteri di valutazione di ampia e affidabile applicabilità. Sono all'esame:

2.3.1 METODO DELL'ISOLAMENTO TERMICO RICHIESTO

Si basa sulla determinazione e sulla verifica di accettabilità del valore di resistenza termica del vestiario richiesta per mantenere l'intero organismo dell'individuo in condizioni di equilibrio termico ($BT=0$) nell'ambiente considerato. Si distinguono in particolare:

- un valore minimo di resistenza del vestiario tale da mantenere l'equilibrio termico del corpo a prezzo di una contenuta sensazione di freddo da parte dell'operatore (connessa ad una diminuzione della sua temperatura cutanea media intorno ai 300C per vasocostrizione dei capillari della cute)
- un valore ottimale tale da mantenere l'equilibrio termico come nel caso precedente ma nell'ipotesi che temperatura cutanea media ed entità dello scambio termico per sudorazione assumano i valori proposti da Fanger corrispondenti al giudizio di neutralità termica dell'individuo.

Poiché in concreto esiste un limite superiore al valore di isolamento termico del vestiario che è possibile realizzare, determinato dalla necessità che l'individuo non venga eccessivamente ostacolato dal vestiario stesso nello svolgimento della sua attività, se il valore di isolamento richiesto non è raggiungibile, si dovrà limitare l'esposizione dell'operatore all'ambiente freddo. Peraltro, valori minori del minimo comportano un graduale raffreddamento del corpo, mentre valori superiori un aumento eccessivo della produzione di sudore che, imbevendo il vestiario, può sensibilmente ridurre la resistenza termica con effetti potenzialmente deleteri.

È opportuno sottolineare inoltre che il criterio in esame fa riferimento alla situazione termica globale dell'organismo. Alcuni distretti corporei periferici, particolarmente soggetti a raffreddamento come mani e piedi, possono richiedere specifici interventi di protezione locale.

2.3.2 WIND-CHILL INDEX (WCI)

L'indice WCI, insieme a quello ad esso correlato della "**equivalent chill temperature (ECT)**" è un metodo di valutazione proposto anche dall'ACGIH.

Secondo questa associazione:

questi TLV si prefiggono lo scopo di proteggere i lavoratori dagli effetti più gravi dello stress da freddo (ipotermia) e dal danno da freddo e di definire le condizioni di lavoro a basse temperature alle quali si ritiene che la maggior parte dei lavoratori possa rimanere esposta ripetutamente senza effetti negativi per la salute. Il TLV ha l'obiettivo di prevenire un abbassamento della temperatura interna corporea al disotto dei 36OC; temperature interne inferiori possono portare ad una riduzione della vigilanza e della capacità decisionale o alla perdita di coscienza con possibili conseguenze fatali.

Oltre alla protezione totale dell'organismo il TLV ha l'obiettivo di salvaguardare dai danni da freddo ogni parte del corpo, in particolare mani, piedi e testa.

Dolori alle estremità rappresentano i segni premonitori del pericolo dello stress da freddo.

Durante l'esposizione al freddo si ha la massima intensità dei brividi quando la temperatura interna scende a 35OC. Questo fatto rappresenta un segno di pericolo per i lavoratori e l'esposizione deve essere interrotta non appena sia evidente una intensità grave dei brividi; la validità del lavoro fisico e mentale è fortemente ridotta in presenza di brividi violenti.

È necessario fornire ai lavoratori indumenti isolanti asciutti idonei a mantenere la temperatura interna al di sopra dei 36OC se il lavoro si svolge a temperature dell'aria inferiori a 4OC.

Il fattore **wind-chill** o potere raffreddante dell'aria (definito come perdita di calore del corpo (espressa in watts per metro quadro) e funzione della temperatura dell'aria e della velocità del vento sul corpo esposto) rappresenta un fattore critico. Quanto più elevata è la velocità del vento e quanto minore la temperatura nella zona di lavoro, tanto maggiore deve essere il grado di isolamento degli indumenti protettivi.

Le **temperature equivalenti di sensazione di freddo (ECT)** (riportate in tabella) sono calcolabili a partire dalla temperatura attuale a bulbo secco dell'aria e dalla velocità del vento. La ECT va utilizzata per la stima dell'effetto combinato del raffreddamento dato dal vento e dalle temperature dell'aria sulla pelle esposta o per determinare il potere isolante degli indumenti richiesto per mantenere la temperatura interna corporea.

Il danno da freddo in parti del corpo che non siano le mani, i piedi e la testa, a meno di circostanze particolari o estreme, raramente si verifica senza la comparsa di segni iniziali di ipotermia.

I lavoratori più anziani o quelli con problemi circolatori necessitano di protezioni cautelative speciali contro il danno da freddo (es: l'uso di indumenti isolanti aggiuntivi e/o la riduzione della durata del periodo di esposizione). Le azioni cautelative da prendere dipendono dalle condizioni fisiche del lavoratore.

potenza raffreddante del vento sul corpo espressa come temperatura equivalente (in condizioni di calma)												
velocità del vento (m/sec)	temperatura attuale letta °c											
	10,0	4,4	-1,1	-6,6	-12,2	-17,7	-23,3	-28,8	-34,4	-40,0	-45,5	-51,5
ECT (temperatura equivalente di sensazione di freddo) °C												
calma	10,0	4,4	-1,1	-6,6	-12,2	-17,7	-23,3	-28,8	-34,4	-40,4	-45,5	-51,5
2,2	9,0	3,1	-2,7	-8,8	-14,4	-20,5	-26,1	-32,2	-37,7	-43,8	-49,4	-55,5
4,4	4,4	2,2	-8,8	15,5	-22,7	-31,1	-36,1	-43,3	-50,0	-56,6	-63,8	-70,5
6,6	2,2	5,5	12,7	20,5	-27,7	-35,5	-42,7	-50,0	-57,7	-65,0	-72,7	-80,0
8,8	0,0	-7,7	15,5	23,3	-31,6	-39,4	-47,2	-55,0	-63,3	-71,1	-78,8	-85,0
11,0	-1,1	-8,8	17,7	26,6	-33,8	-42,2	-50,5	-58,8	-66,6	-75,5	-83,3	-91,6
13,2	-2,2	10,5	18,8	27,7	-36,1	-44,4	-52,7	-61,6	-70,0	-78,3	-87,2	-95,5
15,4	-2,7	11,6	20,0	28,8	-37,2	-46,1	-55,5	-63,3	-72,2	-80,5	-89,4	-98,3
17,6(*)	-3,3	12,2	21,1	29,4	-38,3	-47,2	-56,1	-65,0	-73,3	-82,2	-91,1	-100,0
(*)	pericolo limitato			pericolo crescente				grande pericolo				

valori superiori hanno o effetti aggiuntivi	per meno ore con pelle secca; massimo pericolo dovuto a un falso senso di sicurezza	pericolo di congelamento per il corpo esposto entro un minuto	si può avere congelamento del corpo entro trenta secondi
	alle temperature riportate in tabella può verificarsi la sindrome "del piede da trincea"		

Fonte: Giornale degli Igienisti Industriali - Valori Limite di Soglia ACGIH 1990/91

DEFINIZIONI

TS = Temperatura del bulbo secco a ventilazione forzata (in °C).

È la temperatura dell'aria misurata da un bulbo asciutto non soggetto ad irraggiamento termico e sottoposto a ventilazione compresa tra 2 e 4 m/s.

TU = Temperatura del bulbo umido a ventilazione forzata (in °C).

È la temperatura misurata da un bulbo ricoperto da una mussola (calza di cotone) inumidita con acqua distillata a temperatura ambiente, non soggetto ad irraggiamento termico e sottoposto a ventilazione compresa tra 2 e 4 m/s.

TUN= Temperatura del bulbo umido a ventilazione naturale (in °C).

È la temperatura misurata da un bulbo ricoperto da mussola inumidita con acqua distillata a temperatura ambiente, non soggetto ad irraggiamento termico, che risente della ventilazione naturale dell'ambiente.

UR = Umidità relativa (%).

È il rapporto percentuale tra la quantità di vapore acqueo presente nell'atmosfera ad una certa temperatura e la quantità necessaria per saturare l'atmosfera a quella stessa temperatura.

TG = Temperatura globotermometrica (in °C).

È la temperatura misurata tramite il globotermometro di Vernon, consistente in un bulbo posto al centro di una sfera di rame verniciata esternamente in nero opaco. La superficie metallica, riscaldata per irraggiamento, trasmette all'aria contenuta all'interno della sfera una quantità di calore proporzionale all'irraggiamento termico, alla temperatura e alla velocità dell'aria dell'ambiente.

TRM= Temperatura radiante media (in °C).

Viene definita con la media ponderata dei valori di temperatura in funzione della quale le pareti e gli oggetti presenti nell'ambiente, emettono radiazione calorica.

V = Velocità dell'aria (in m/s).

È un fattore indispensabile in quanto favorisce la perdita di calore del corpo umano per l'accelerazione dei moti convettivi dell'aria e dell'evaporazione: difatti il corpo si raffredda più velocemente quanto più elevato è il movimento dell'aria intorno ad esso.