

LA VALUTAZIONE DEGLI AMBIENTI FREDDI TERMICAMENTE SEVERI

Francesca Romana D'Ambrosio

Dipartimento di Ingegneria Meccanica, Università degli Studi di Salerno

SOMMARIO

Negli ultimi anni c'è stato un forte sviluppo della ricerca nel settore degli ambienti termici, soprattutto per quanto riguarda gli ambienti severi, sia caldi che freddi. Infatti, mentre per gli ambienti moderati si è ormai arrivati ad un livello di conoscenza notevole, testimoniato se non altro dall'elevato numero di norme specifiche (Alfano, 2002), per gli ambienti severi ci sono ancora molti studi in corso e la normativa è ancora carente.

In particolare per quanto riguarda gli ambienti freddi, solo nel 1988 (Holmér, 1988) è stato proposto un indice, l'isolamento termico richiesto IREQ, che nei primi anni '90 è diventato oggetto di un Technical Report dell'ISO (ISO, 1993), recepito dal CEN come norma sperimentale e quindi anche dall'UNI (UNI, 2001). D'altra parte, le occasioni in cui l'uomo si trova a lavorare in ambienti freddi sono sempre più frequenti; basti pensare ai lavori all'aperto nella stagione invernale o ad alcuni processi dell'industria alimentare; ne deriva la necessità di approfondire il problema della risposta fisiologica dell'uomo al freddo e di trovare metodi efficaci di valutazione degli ambienti freddi.

1 - CENNI DI TERMOREGOLAZIONE AL FREDDO

L'uomo è un essere omeotermo, riesce cioè a mantenere quasi costante la sua temperatura corporea nonostante le ampie variazioni della temperatura esterna.

Il mantenimento della temperatura corporea è affidato al sistema di termoregolazione, che è in grado di registrare il valore effettivo e la velocità di variazione delle temperature rilevate dai recettori termici, sensori sparsi in varie parti del corpo, di elaborare tali dati e di mettere in funzione i meccanismi di termoregolazione vasomotoria e quelli di termoregolazione comportamentale (Bligh, 1988; Hensel, 1981), deputati appunto ad assicurare l'omeotermia.

In particolare, al freddo c'è un campo di parametri ambientali nel quale il mantenimento del bilancio termico si ottiene sia con la regolazione vasomotoria, che determina la chiusura degli sfinteri dei capillari periferici (vasocostrizione) riducendo la quantità di sangue diretta alle zone esterne, con conseguente diminuzione dello

scambio termico, che utilizzando alcuni artifici, quali la variazione della postura del corpo (per modificare l'area della superficie corporea offerta allo scambio termico) e la scelta di un abbigliamento opportuno. Quando l'insieme delle condizioni ambientali è tale che, nonostante la vasocostrizione, la quantità di energia termica ceduta dal corpo è maggiore di quella prodotta, i recettori termici continuano ad inviare al sistema nervoso centrale un segnale che indica che il soggetto è sottoposto a stress da freddo. In risposta, il sistema di termoregolazione reagisce con l'attivazione dei gruppi muscolari, determinando quindi il brivido, fenomeno al quale si associa generazione di energia termica. Si sottolinea come, a causa di alcune limitazioni fisiologiche (per esempio l'esaurimento dell'energia legata alle reazioni di ossidoriduzione del cibo, oppure la fatica muscolare) l'energia termica prodotta attraverso il brivido tende col tempo a decrescere e quindi l'uomo non può contare su tale meccanismo, se non per un periodo di tempo limitato.

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

Convenzionalmente, con il termine "ipotermia" si indica una temperatura del nucleo inferiore a 35°C. Nel campo di temperature comprese fra 35°C e 32°C il corpo reagisce con violenti brividi, mentre al di sotto di 32°C interviene uno stato di confusione mentale o la perdita di coscienza. Questa evenienza è particolarmente dannosa, poiché impedisce alla vittima dello stress da freddo acuto di prendere i provvedimenti, spesso elementari, che potrebbero arrestare il progredire dell'ipotermia. Per temperature inferiori subentra la morte, in genere per fibrillazione ventricolare e conseguente arresto cardiaco (Mc Intyre, 1980).

I valori riportati non sono da intendersi in senso assoluto, poiché esiste una notevole variabilità in dipendenza di numerosi fattori soggettivi. Ad esempio, alcuni studi (Mc Intyre, 1980) hanno mostrato come gli anziani ed i bambini di età inferiore ad un anno siano particolarmente sensibili agli effetti deleteri dello stress da freddo. Ancora, individui colpiti da patologie croniche, ormonali, muscolari (p.e. distrofia) o metaboliche, sono maggiormente esposti al rischio di ipotermia. Ancora (Le Blanc, 1975), il rapporto tra superficie esposta e massa corporea influenza il fenomeno: le persone grasse rischiano molto meno rispetto alle persone magre, gli adulti meno dei bambini. Infine, va ricordato che l'esercizio muscolare, aumentando la vascolarizzazione, favorisce la sopportazione del freddo.

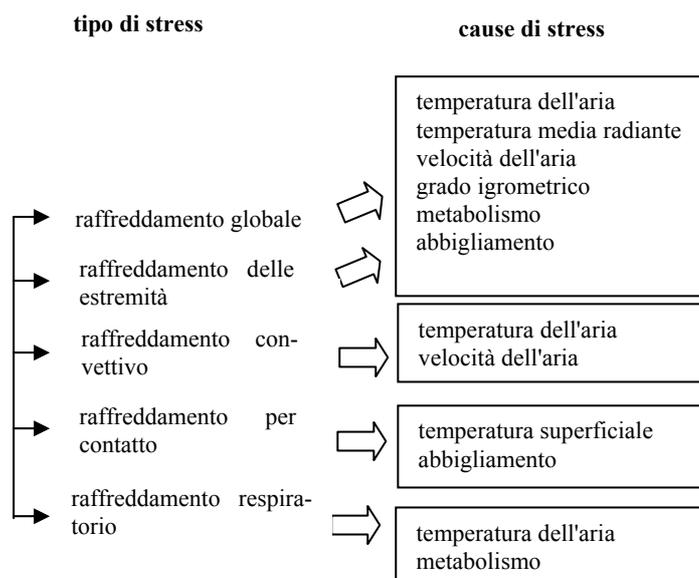
2 - IL RISCHIO NEGLI AMBIENTI FREDDI

I rischi legati al freddo sono di vario tipo, come mostrato in figura 1, nella quale per ogni tipo di stress sono riportati i fattori che lo determinano. Secondo il tipo di stress, i rischi legati all'esposizione al freddo vanno dal discomfort alle difficoltà respiratorie, dal dolore all'ipotermia senza contare che il freddo può provocare anche incidenti legati all'intorpidimento muscolare.

In particolare va fatta distinzione tra il lavoro svolto in ambienti esterni, nei quali le

condizioni ambientali possono variare nel tempo ed ambienti interni, nei quali le condizioni ambientali si mantengono generalmente costanti e possono essere più facilmente controllate.

Figura 1 : Relazione tra i diversi tipi di stress ed i fattori fisici che li determinano. Da (Holmér, 1988c) con modifiche.



3 - LA VALUTAZIONE DEL RISCHIO NEGLI AMBIENTI FREDDI

E' ormai opinione comune che nei posti di lavoro vada applicata un'attenta politica di prevenzione del rischio, a monte della quale, evidentemente, va prevista un'accurata valutazione dell'analisi e dell'interpretazione delle cause di rischio.

Per quanto riguarda il rischio microclimatico, il protocollo, sperimentato in campo in situazioni di caldo (Malchaire et al., 1999) in differenti tipi di industrie localizzate in diversi Paesi tra cui l'Italia, è simile sia negli ambienti caldi che in quelli freddi¹ (ISO, 2001a; ISO, 2002a). In particolare, il protocollo prevede tre livelli: una fase iniziale di *osservazione*, che consente di verificare quali sono le situazioni da prendere in considerazione, di identificare, con l'aiuto dei lavoratori e nell'ambito delle situazioni scelte, le condizioni di lavoro che effettivamente presentano problemi e di trovare a questi ultimi una soluzione. Se dopo la fase di osservazione dovessero ancora esserci problemi, si passa alla fase di *analisi*, condotta da personale competente, per esempio i professionisti della prevenzione, che effettua una valutazione di tipo quantitativo allo scopo di definire le soluzioni tecniche da adottare; se anche la

¹ La norma BS 7915 (BSI, 1988) definisce freddi gli ambienti in cui la temperatura dell'aria è minore di 12 °C.

fase di analisi non dovesse portare alla soluzione del problema, si passa all'ultimo livello, che è quello delegato agli specialisti, che è evidentemente il più complesso, perché richiede la presenza di personale estremamente competente e l'uso di tecniche di misura sofisticate. In tabella 1 sono riportate le caratteristiche di questi livelli.

Tabella 1 : Caratteristiche dei 3 livelli di strategia. Da (Malchaire et al., 1999).

	osservazione	analisi	valutazione specialistica
Quando?	quando si individua un problema	situazioni complicate	situazioni molto complicate
come?	osservazioni qualitative	misure di routine	misure specialistiche
costo?	basso	medio	alto
ordine di grandezza della durata	2 h	1 giorno	qualche giorno
chi?	lavoratori e management	lavoratori, management e professionisti	lavoratori, management, professionisti e specialisti
condizioni di lavoro	alte	medie	basse
contributo ergonomico	medio	alto	specialistico

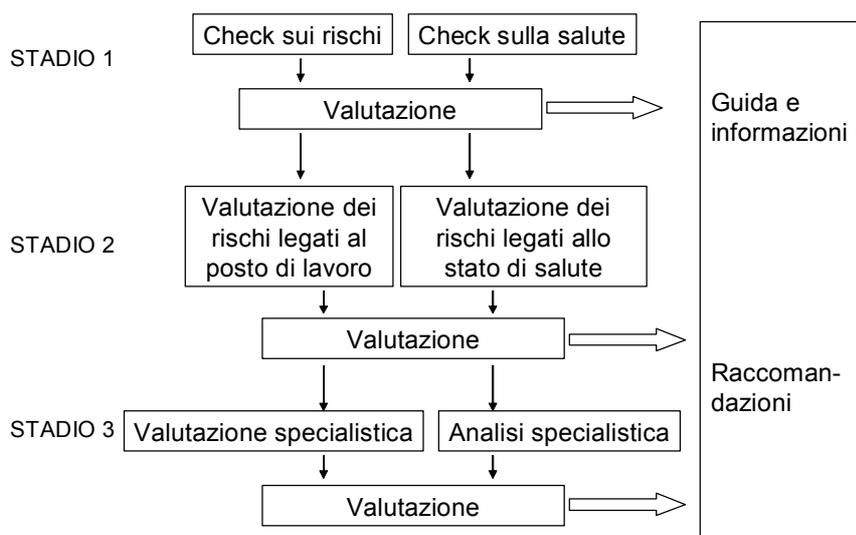
Il working draft ISO/WD 15743 (ISO, 2002a), prevede per la fase di osservazione l'uso di una checklist, nella quale vengono raccolte informazioni riguardanti la temperatura e la velocità dell'aria, l'eventuale contatto con superfici fredde, l'eventuale utilizzo di abbigliamento protettivo o di dispositivi di protezione contro il freddo; tali informazioni vanno riferite non solo all'istante di osservazione, ma alle condizioni medie di lavoro, il che comporta il coinvolgimento dei lavoratori nella loro raccolta.

In realtà, il working draft prevede anche una fase di valutazione dello stato di salute dei lavoratori, allo scopo di definirne l'attitudine al lavoro al freddo. Questa valutazione, che prevede anch'essa tre livelli, si basa innanzitutto sulla somministrazione di un questionario per la rilevazione di eventuali problemi che possono costituire controindicazioni, quali disturbi cardiovascolari o ortopedici, asma o diabete (Parsons, 1988); dopo questo primo screening, è prevista una visita medica per indagare sui problemi eventualmente emersi dal questionario cui, eventualmente, segue una visita medica specialistica. Ovviamente, la valutazione dello stato di salute è funzionale al tipo di lavoro che l'individuo in questione deve svolgere ed è quindi strettamente correlata alla valutazione dei rischi, così come mostrato in figura 2.

Passando al problema del rischio da contatto, va detto che questo dipende da una serie di fattori interagenti tra loro, che sono le proprietà e la temperatura della superficie, la natura e la durata del contatto. In particolare, la proposta di norma ISO/DIS 13732-3 (ISO, 2001b) consiglia l'utilizzo di un protocollo di valutazione che preve-

de la raccolta di informazioni sulla superficie di contatto (accessibilità, materiali, temperatura, ...) e sulla superficie del corpo che è a contatto (dita, mano), sul contatto stesso (frequenza, intensità, durata ...), sugli effetti del contatto (dolore, intorpidimento, congelamento).

Figura 2 : Relazione tra la valutazione dei rischi legati al posto di lavoro e quella sullo stato di salute. Da (ISO, 2002a).



4 - IL RUOLO DELL'ABBIGLIAMENTO NELLA PROTEZIONE CONTRO IL FREDDO

Dal punto di vista dell'adattamento dell'uomo agli ambienti termici freddi, i dati e le ricerche disponibili in letteratura (Fanger, 1973) non permettono di trarre conclusioni definitive sull'esistenza di un fenomeno di acclimatazione generale del soggetto, fenomeno riconosciuto e sperimentato invece negli ambienti caldi. Alcuni autori (Le Blanc, 1975) comunque, concordano sull'esistenza di un tipo di adattamento locale di singole parti del corpo, avendo dimostrato che i soggetti abitualmente impegnati in attività al freddo con le mani nude possono meglio conservare doti di destrezza e capacità tattili rispetto agli individui non acclimatati.

In ogni caso, l'uomo ha approntato una serie di tecniche per proteggersi dal freddo, e tra queste rientra l'abbigliamento protettivo, che gioca il ruolo di unico elemento di protezione in situazioni nelle quali risulta impossibile variare i parametri microclimatici, per esempio durante le esposizioni all'aperto negli ambienti freddi. In particolare, l'abbigliamento svolge il compito di isolare termicamente il soggetto, regolando il flusso convettivo e radiativo di energia termica tra l'individuo e l'ambiente.

La capacità di isolamento fornita dall'abbigliamento viene valutata in termini di resistenza termica opposta allo scambio di energia tra l'uomo e l'ambiente (Alfano et al., 1997).

Si ricorda che la resistenza termica viene espressa in $m^2\text{°C/W}$, oppure in clo, unità di misura incoerente pari a $0,155 m^2\text{°C/W}$. Il valore della resistenza termica dell'abbigliamento, I_{cl} , può essere ricavato da tabelle (CEN, 2001) che riportano valori ottenuti con misure sperimentali complesse e perciò eseguite da laboratori altamente specializzati; oppure, in alternativa, può essere valutato utilizzando relazioni analitiche che legano I_{cl} ad altre grandezze, per esempio la massa del capo, lo spessore del tessuto, etc. (CEN, 2001).

5. GLI INDICI PER LA DETERMINAZIONE DELLO STRESS DA FREDDO

Da quanto detto, emerge la necessità di fissare opportune procedure non solo per quantificare il rischio legato al freddo, ma anche per verificare che i provvedimenti che si intende attuare siano corretti. Per far ciò, occorrerebbe definire per ciascuna delle situazioni indicate (raffreddamento globale, locale o per contatto; raffreddamento in ambiente interno o esterno) opportuni indici con i corrispondenti valori limite. In realtà, ci sono solo due indici che vengono utilizzati, uno per il raffreddamento globale e l'altro per il raffreddamento convettivo, ambedue oggetto di norma. Nei paragrafi che seguono saranno discussi questi due indici e saranno presentati i metodi per la determinazione quantitativa degli altri tipi di stress.

5.1. L'INDICE IREQ PER IL RAFFREDDAMENTO GLOBALE

Partendo dalla considerazione che con un'opportuna resistenza termica dell'abbigliamento l'uomo si può proteggere dal freddo, negli anni '80 (Holmér, 1984, 1988a) è stato proposto un indice di stress da freddo per il corpo nel suo complesso, chiamato IREQ, che ha riscosso notevole successo.

L'indice IREQ (da "I", simbolo della resistenza termica dell'abbigliamento e "REQ" di required, richiesto) è definito come la resistenza termica dell'abbigliamento che, nell'ambiente in esame, sarebbe capace di mantenere indefinitamente il corpo umano a livelli accettabili di temperatura corporea e di temperatura della pelle; si tratta quindi di un riferimento con il quale va confrontata la resistenza termica dell'abbigliamento effettivamente indossato dal soggetto in esame: se quest'ultima risulta minore di quella richiesta, evidentemente l'abbigliamento indossato non è adeguato. Può essere utilizzato per esposizioni continue o intermittenti, all'interno o all'esterno.

L'indice IREQ svolge diverse funzioni. In primo luogo rappresenta una stima dello stress termico prodotto dall'ambiente freddo, per gli effetti combinati dei 4 parametri microclimatici (temperatura dell'aria, temperatura media radiante, umidità e velocità dell'aria) e dell'attività; contemporaneamente, provvede ad una valutazione quantitativa della protezione dell'abbigliamento, espressa in termini di resistenza termica necessaria a mantenere condizioni di regime stazionario per il corpo umano; ancora, è

un metodo di valutazione dell'abbigliamento effettivamente indossato.

E' stato ricordato che le condizioni di regime permanente possono essere raggiunte in corrispondenza di diversi livelli di attivazione del sistema termoregolatorio; per questo motivo l'IREQ viene generalmente calcolato nelle due condizioni estreme (Holmér, 1988b, 1992): la condizione limite di inizio di attivazione del sistema comportamentale e quella di neutralità termica (che si può vedere anche come la condizione limite di inizio di attivazione del sistema termoregolatorio vasomotorio). I due valori dell'indice IREQ vengono detti, rispettivamente, $IREQ_{min}$ ed $IREQ_{neu}$; evidentemente, il valore di $IREQ_{min}$ è sempre minore di quello di $IREQ_{neu}$.

5.1.1. Il calcolo di IREQ

L'indice IREQ, come detto, è oggetto del Technical Report ISO/TR 11079 (ISO, 1993), recepito dal CEN come norma sperimentale e quindi anche dall'UNI (UNI, 2001) attualmente in revisione (ISO, 2002b); tra il Technical Report del '93 e la sua proposta di revisione del 2002 ci sono alcune differenze che verranno evidenziate volta per volta qui di seguito.

Per calcolare IREQ, si parte dalla nota equazione generale del bilancio termico sul corpo umano:

$$M - W = E_{res} + C_{res} + E_{sk} + C_k + R + C + S \quad (1)$$

con:

M = metabolismo energetico, W/m^2 ;

W = potenza meccanica scambiata fra il corpo e l'ambiente, W/m^2 ;

E_{res} = potenza termica dispersa per evaporazione nella respirazione, W/m^2 ;

C_{res} = potenza termica dispersa per convezione nella respirazione, W/m^2 ;

E_{sk} = potenza termica scambiata per evaporazione dalla superficie della pelle, W/m^2 ;

C_k = potenza termica dispersa dal corpo per conduzione, W/m^2 ;

R = potenza termica dispersa dal corpo per irraggiamento, W/m^2 ;

C = potenza termica dispersa dal corpo per convezione, W/m^2 ;

S = variazione dell'energia interna del corpo umano nell'unità di tempo, W/m^2 ;

dalla quale:

- trascurando il termine C_k se, come accade spesso, esso risulta piccolo rispetto ad altri che compaiono nell'Eq. 1,
- imponendo $S=0$, ovvero imponendo che vi siano condizioni di regime permanente per il corpo umano,
- ricordando la definizione di resistenza termica dell'abbigliamento:

$$R + C = (t_{sk} - t_{cl})/I_{cl} \quad (2)$$

con:

t_{cl} = temperatura media della superficie esterna del corpo umano vestito, °C,

t_{sk} = temperatura media della pelle, °C,

- imponendo $I_{cl} = IREQ$,

si ricavano due equazioni nelle incognite IREQ e t_{cl} :

$$\text{IREQ} = (t_{sk} - t_{cl}) / (M - W - E_{res} - C_{res} - E_{sk}) \quad (3)$$

$$M - W - E_{res} - C_{res} - E_{sk} = R + C \quad (4)$$

Il sistema delle due equazioni (3) e (4)² va risolto per iterazione, sia perché t_{cl} compare alla quarta potenza in R sia perché in R e in C compare il coefficiente di area dell'abbigliamento, f_{cl} , (Fanger, 1970) che è funzione di I_{cl} . Variabili indipendenti del problema risultano, tra le altre, due grandezze fisiologiche: t_{sk} , temperatura media della pelle, e w , percentuale di pelle bagnata che assumono i seguenti valori nel calcolo di IREQ_{\min} e IREQ_{neu}

per IREQ_{\min}

$$t_{sk} = 30^{\circ}\text{C} ; w = 0,060 \quad (\text{ISO}, 1993) \quad (5)$$

$$t_{sk} = (33,34 - 0,0354M) ^{\circ}\text{C} ; w = 0,060 \quad (\text{ISO}, 2002b) \quad (5b)$$

per IREQ_{neu}

$$t_{sk} = 35,7 - 0,0285M ; w = 0,0010M \quad (6)$$

IREQ è stato finora sperimentato da diversi ricercatori (Olesen, 1989; Holmér, 1989; Gavhed e Holmér; 1991, Griefhan, 2000; Gavhed et al., 1988), che ne hanno dato complessivamente un giudizio positivo. Tutti però concordano sulla necessità di ulteriori sperimentazioni che devono mirare a far luce sugli aspetti che sembrano non ancora chiari, quali l'influenza del sesso (sembra che il modello sia più adatto agli uomini che non alle donne), del metabolismo (sembra che il modello non risponda bene per attività particolarmente leggere o particolarmente pesanti), dell'età (sulla quale si hanno pareri contrastanti). Indubbiamente, la valutazione del metabolismo e della resistenza termica dell'abbigliamento a partire dalle tabelle (UNI, 1996; CEN, 2001), può portare ad errori di valutazione dell'isolamento termico richiesto, tanto più che, nel caso in cui il soggetto dovesse sudare e il sudore inumidisse i vestiti, le proprietà termoigrometriche dell'abbigliamento cambierebbero.

5.1.2. L'interpretazione di IREQ e il DLE

Si è detto che dal confronto tra i valori di IREQ_{\min} e IREQ_{neu} , calcolati con il metodo esposto sopra, e quello della resistenza termica dell'abbigliamento effettivamente indossato si ha una valutazione dell'adeguatezza di quest'ultimo. Nella realtà, c'è un problema, non evidenziato nel TR del 1993 e dovuto al fatto che generalmente il valore della resistenza termica dell'abbigliamento è ricavato da tabelle (CEN, 2001) e non tiene conto di parametri che influenzano fortemente la resistenza termica, in particolare riducendola, quali il movimento del corpo, la postura, la velocità dell'aria, la permeabilità all'aria dei tessuti, l'aderenza dell'abito al corpo (Havenith,

² In appendice si riportano le relazioni più usate per il calcolo delle grandezze che compaiono nelle Equazioni 3 e 4.

1990a, 1990b). In definitiva, si può scrivere:

$$I_{clr} = f(I_{cl}, v_a, w_a, ap) \quad (7)$$

con:

I_{clr} = resistenza termica risultante dell'abbigliamento, clo;

I_{cl} = resistenza termica intrinseca dell'abbigliamento, clo;

ap = permeabilità all'aria dei tessuti, l/m^2s ;

v_a = velocità dell'aria, m/s;

w_a = velocità alla quale si cammina, m/s.

e la relazione di calcolo di I_{clr} risulta la seguente (ISO, 2002b):

$$I_{clr} = I_{t,r} - \frac{I_{a,r}}{f_{cl}} \quad (8)$$

Per quanto riguarda poi l'effetto della permeabilità al vapore dell'abbigliamento, i_m (Woodcock, 1962), sull'indice IREQ, considerato che i_m varia tra 0 (per un abbigliamento completamente impermeabile al vapore) e 1 (per un soggetto nudo) e che la resistenza evaporativa (Alfano et al., 1989) è funzione³ del reciproco di i_m , si ha che all'aumentare di i_m e a parità di v_a , M , t_a e t_r , la resistenza evaporativa decresce e una maggior quantità di energia termica può essere scambiata con l'ambiente per evaporazione dalla pelle. Ne consegue che, dovendosi verificare il bilancio di energia, la quantità scambiabile con l'ambiente per convezione ed irraggiamento sarà minore e quindi IREQ aumenterà.

Una volta calcolati $IREQ_{min}$, $IREQ_{neu}$, e I_{clr} , si possono verificare tre situazioni diverse:

- a) $IREQ_{min} < I_{clr}$ \Rightarrow il soggetto avverte una sensazione di caldo
- b) $IREQ_{min} < I_{clr} < IREQ_{neu}$ \Rightarrow il soggetto è in neutralità termica
- c) $I_{clr} < IREQ_{neu}$ \Rightarrow il soggetto avverte una sensazione di freddo, c'è rischio di progressivo raffreddamento del corpo

nel caso in cui dovesse verificarsi la situazione a), va calcolato il tempo limite di esposizione, DLE, che rappresenta il tempo massimo di esposizione compatibile con l'abbigliamento effettivamente indossato dal soggetto. Il DLE è dato dalla relazione:

$$DLE = \frac{Q_{lim}}{S} \quad (9)$$

con:

DLE = tempo limite di esposizione, h

Q_{lim} = diminuzione accettabile di energia interna per il corpo umano, = 40 Wh/m²;

S = variazione dell'energia interna del corpo umano nell'unità di tempo, W/m²;

³ Cfr. appendice.

Una volta raggiunto il tempo limite, l'esposizione deve essere interrotta ed alla persona va concesso di riposarsi in un ambiente riscaldato per tutto il tempo necessario a ristabilire le condizioni di neutralità termica.

L'accumulo negativo di energia termica corporea, S , si ricava ovviamente ancora dalle equazioni (1) e (2) che possono essere riscritte come:

$$S = M - W - C_{res} - E_{res} - E_{sk} - R - C \quad (10)$$

$$t_{cl} = t_{sk} - I_{cl}(M - W - C_{res} - E_{res} - E_{sk} - S) \quad (11)$$

le equazioni (11) e (12) si risolvono per iterazione nelle variabili S e t_{cl} .

La proposta di revisione della ISO/TR 11079 (ISO, 2002b), prevede anche che, dopo l'esposizione al freddo, ci sia un periodo di recupero, calcolato con la relazione:

$$RT = \frac{Q_{lim}}{S^*} \quad (12)$$

con:

RT = tempo di recupero, h;

Q_{lim} = diminuzione accettabile di energia interna per il corpo umano, = 40 Wh/m²;

S^* = variazione dell'energia interna del corpo umano nell'unità di tempo, calcolata con le equazioni (10) e (11) e riferita alle condizioni di esposizione durante il tempo di recupero, W/m².

5.2. GLI INDICI WCI E T_{CH} PER IL RAFFREDDAMENTO CONVETTIVO

Allo scopo di determinare il danno provocato dall'esposizione al freddo di singole parti scoperte del corpo, tipicamente il viso, l'unico metodo attualmente esistente consiste nell'utilizzazione del Wind Chill Index, definito per la prima volta nel 1945 (Siple e Passel, 1945; ISO, 2002b). Il WCI è un indice empirico proposto per esposizioni all'aperto, che rappresenta (ASHRAE, 2001) il flusso termico che si disperde nell'ambiente reale da un cilindro tenuto con la superficie esterna a 33 °C e che vuole simulare le dispersioni che si hanno da parti del corpo umano non protette; è calcolabile con la relazione:

$$WCI = 1,16 (10,45 + 10 \sqrt{v_{ar}} - v_{ar}) (33 - t_a) \quad (13)$$

con:

WCI = Wind Chill Index, W/m²;

v_{ar} = velocità relativa dell'aria, m/s;

t_a = temperatura dell'aria, °C.

Nella (13) il valore 1,16 rappresenta il fattore di conversione da kcal/hm² a W/m²: quando fu ricavata la formula, infatti, l'energia termica si misurava in kcal. Si noti anche che nella (13) non compare la temperatura media radiante in quanto la formula presuppone che l'ambiente sia uniforme.

L'equazione (13) è molto criticata per i seguenti motivi (Alfano et al., 1997):

- fu ricavata per un cilindro di plastica di 57 mm di diametro, quindi con caratteri-

stiche radianti, di curvatura e di rugosità molto diverse da quelle delle parti del corpo umano che si vuole simulare;

- non tiene conto del carico radiante e di quello solare né degli scambi evaporativi;
- non dipende dalla temperatura superficiale, che può essere diversa da 33 °C;
- la funzione che lega WCI a v_{ar} ha un massimo in corrispondenza di circa 25 m/s (90 km/h) per poi diminuire, laddove evidentemente il flusso termico non può diminuire con la velocità relativa dell'aria.

In ogni caso, attualmente il WCI è l'indice più utilizzato per valutare gli effetti localizzati del raffreddamento anche se, in base all'ultima osservazione, il suo uso è limitato a velocità dell'aria minori di 90 km/h.

Talvolta, anziché usare il WCI si adopera la Chilling Temperature o Equivalent Wind Chilling Temperature, t_{ch} , data dalla relazione (ISO, 2002b):

$$t_{ch} = 33 - \frac{WCI}{25,5} \quad (14)$$

con t_{ch} = Chilling Temperature, °C.

La t_{ch} è la temperatura dell'ambiente fittizio caratterizzato da una velocità dell'aria di 1,8 m/s = 6,4 km/h che produce lo stesso potere raffreddante, ovvero lo stesso WCI, dell'ambiente reale. Per ambienti esterni, la velocità di 1,8 m/s è rappresentativa di condizioni di aria abbastanza calma; mentre per ambienti interni 1,8 m/s rappresenta una velocità notevolmente elevata, il che rende l'indice non applicabile.

In tabella 2 sono riportati per alcuni valori del WCI i corrispondenti valori della t_{ch} e l'effetto sulle parti esposte.

Va infine sottolineato (Alfano et al., 1997) che un raffreddamento convettivo può influire sulla valutazione soggettiva dell'ambiente e quindi sul valore di IREQ: in presenza di un raffreddamento convettivo, p.e. al viso, il soggetto spesso è portato a richiedere un valore di I_{clr} maggiore di quello ricavabile da IREQ. E' quindi necessario pervenire ad un metodo razionale di valutazione del raffreddamento localizzato che sia basato, come IREQ, su criteri fisiologici.

6 - IL RAFFREDDAMENTO PER CONTATTO

La ricerca nel settore del raffreddamento per contatto è ancora in grande evoluzione; attualmente si ritiene opportuno considerare dei valori limite che tengano conto tra l'altro (Holmér, 1998c) della temperatura e della conducibilità termica della superficie di contatto, della pressione di contatto, dell'area della superficie di contatto, nonché delle proprietà termofisiche dei tessuti umani.

La proposta di norma ISO 13732-3 (ISO, 2001b) contiene una serie di diagrammi dai quali, per diversi materiali e a seconda che il contatto avvenga attraverso le dita o attraverso la mano, è possibile ricavare la temperatura limite della superficie del materiale in funzione del tempo limite di contatto.

Tabella 2 : Corrispondenza tra i valori del Wind Chill Index e della Chilling Temperature con gli effetti ed i criteri di strain. Da (ISO, 2002b).

WCI (W/m ²)	t _{ch} (°C)	Effetto	Criterio di strain
1200	-14	Molto freddo	Strain basso
1400	-22	Freddo rigido	
1600	-30	Le parti esposte congelano entro 1 ora	Strain elevato
1800	-38		
2000	-45	Le parti esposte congelano entro 1 minuto	
2200	-53		
2400	-61	Le parti esposte congelano entro 30 secondi	
2600	-69		

Evidentemente, se la temperatura della superficie risulta minore di quella limite bisogna intervenire con misure di tipo tecnologico (per esempio isolando termicamente la superficie), organizzativo (per esempio pianificando il lavoro in maniera adeguata) o con dispositivi di protezione individuale (per esempio guanti).

7 - IL RAFFREDDAMENTO DELLE ESTREMITÀ

In condizioni di freddo, soprattutto quando l'abbigliamento indossato non è adeguato, l'attivazione della vasocostrizione può portare a un raffreddamento non desiderato delle estremità, in particolare delle mani.

La proposta di revisione dell'ISO/TR 10079 (ISO, 2002b) prevede una temperatura superficiale del dito di 24°C come criterio di discomfort e di 15°C come criterio di alto strain, con comparsa del dolore e riduzione della funzionalità. A questo proposito, uno studio condotto in Scandinavia (Gavhed et al., 1988) suggerisce di verificare tali valori e di tener conto anche del tipo di lavoro svolto.

Al raffreddamento delle estremità si può evidentemente ovviare utilizzando un adeguato dispositivo di protezione, per esempio dei guanti⁴.

⁴ Cfr. la norma EN 511: Protective gloves against cold, 1993.

8 - IL RAFFREDDAMENTO RESPIRATORIO

Il raffreddamento respiratorio è legato allo scambio termico convettivo tra l'aria inspirata, che si trova a temperatura molto bassa, e le mucose dell'apparato respiratorio; va anche considerato la potenza termica scambiata aumenta non solo all'aumentare della differenza di temperatura aria-mucose, ma anche all'aumentare della portata di ventilazione, quindi dell'attività. La proposta di revisione dell'ISO/TR 10079 (ISO, 2002b) prevede i criteri di strain riportati in tabella 3 e raccomanda l'uso di protezioni respiratorie quando la temperatura scende al di sotto dei -40°C.

Tabella 3 : Criteri di strain per il raffreddamento respiratorio. Da (ISO 2002b).

Attività	Basso strain	Strain elevato
$M \leq 115 \text{ W/m}^2$	$t_a = -40^\circ\text{C}$	$t_a = -20^\circ\text{C}$
$M > 115 \text{ W/m}^2$	$t_a = -30^\circ\text{C}$	$t_a = -15^\circ\text{C}$

9 - CONCLUSIONI

L'esposizione dell'uomo ad ambienti freddi può provocare diversi problemi, che vanno dal semplice discomfort all'ipotermia. Le conoscenze in questo campo non sono ancora complete e necessitano di ricerche teoriche e sperimentali. Comunque, negli ultimi anni sono state redatte e sono in preparazione alcune norme che permettono di fare delle buone valutazioni dei possibili rischi. Questi documenti normativi sono ancora poco conosciuti e pertanto poco utilizzati. L'auspicio è che dalla loro utilizzazione possano emergere considerazioni ed osservazioni che spingano ad approfondire le conoscenze del settore ed a migliorare la normativa stessa.

10 - SIMBOLOGIA

a_p	=	permeabilità all'aria dei tessuti, $\text{l/m}^2\text{s}$;
C	=	potenza termica scambiata dal corpo per convezione, W/m^2 ;
C_{res}	=	potenza termica scambiata per convezione nella respirazione, W/m^2 ;
C_k	=	potenza termica dispersa dal corpo per conduzione, W/m^2 ;
DLE	=	tempo limite di esposizione, h;
E_{res}	=	potenza termica scambiata per evaporazione nella respirazione, W/m^2 ;
E_{sk}	=	potenza termica scambiata per evaporazione dalla superficie della pelle, W/m^2 ;
f_{cl}	=	rapporto tra l'area della superficie del corpo umano vestito e l'area della superficie del corpo umano nudo, adim.;
h_c	=	conduttanza termica convettiva, $\text{W/m}^2\text{C}$;
h_r	=	conduttanza termica radiativa, $\text{W/m}^2\text{C}$;
I_a	=	resistenza termica superficiale unitaria soggetto-ambiente, clo;
I_{cl}	=	resistenza termica intrinseca dell'abbigliamento, clo;

I_{clr}	=	resistenza termica risultante dell'abbigliamento, clo;
i_m	=	indice di permeabilità, adim;
IREQ	=	resistenza termica dell'abbigliamento richiesta per avere condizioni di regime permanente, clo;
IREQ _{min}	=	valore di IREQ valutato con il sistema termoregolatorio vasomotorio attivato al massimo ma con il sistema termoregolatorio comportamentale non attivato, clo;
IREQ _{neu}	=	valore di IREQ valutato in condizioni di neutralità termica, clo;
M	=	metabolismo energetico, W/m ² ;
p_a	=	pressione parziale del vapor d'acqua nell'aria alla temperatura dell'aria ambiente, kPa;
p_{ex}	=	tensione di vapore dell'acqua alla temperatura dell'aria espirata, kPa;
$p_{sk,s}$	=	tensione di vapore dell'acqua alla temperatura della pelle, kPa;
Q_{lim}	=	valore limite della perdita di energia termica corporea, Wh/m ² ;
R	=	potenza termica dispersa dal corpo per irraggiamento, W/m ² ;
R_T	=	resistenza evaporativa risultante dell'abbigliamento e dello strato limite, m ² kPa/W;
RT	=	tempo di recupero, h;
S	=	variazione dell'energia termica del corpo umano nell'unità di tempo, W/m ² ;
S*	=	variazione dell'energia interna del corpo umano nell'unità di tempo, calcolata con le equazioni (10) e (11) e riferita alle condizioni di esposizione durante il tempo di recupero, W/m ² ;
t_a	=	temperatura dell'aria ambiente, °C;
t_{cl}	=	temperatura media della superficie esterna del corpo umano vestito, °C;
t_{ex}	=	temperatura dell'aria espirata, °C;
t_r	=	temperatura media radiante, °C;
t_o	=	temperatura operativa, °C
$t_{o,1}$	=	temperatura operativa calcolata con la (8), °C
$t_{o,2}$	=	temperatura operativa calcolata con la (9), °C
t_{sk}	=	temperatura media della pelle, °C;
v_a	=	velocità dell'aria, m/s;
v_{ar}	=	velocità relativa dell'aria, m/s;
W	=	potenza meccanica scambiata tra il corpo e l'ambiente, W/m ² ;
w	=	percentuale di pelle bagnata, adim.;
w_a	=	velocità alla quale si cammina, m/s;
WCI	=	Wind Chill Index, W/m ² ;
Simboli greci		
ϕ	=	grado igrometrico, adim.
Pedici		
r	=	richiesto

11 - BIBLIOGRAFIA

- Alfano G., Cicolecchia S. e d'Ambrosio F.R. 1989. The influence of the vapour permeability of clothing on thermal discomfort. *ASHRAE Transactions*, 95 (2), 309-315
- Alfano G., d'Ambrosio F.R. e Riccio G. 1997. La valutazione delle condizioni termoigrometriche negli ambienti di lavoro: comfort e sicurezza. Napoli: CUEN.
- Alfano. 2002. La normativa vigente ed in preparazione nel campo del thermal comfort. Atti del convegno dBA 2002.
- ASHRAE. 2001. Physiological principles, comfort and health. In: ASHRAE Fundamentals, ch. 8. New York: American Society of Heating, Refrigerating, and Air Conditioning Engineers Inc.
- Bligh J. 1988, Human Cold Exposure and the Circumstances of Hypothermia. *Environmental ergonomics*, 3-21. London: Taylor and Francis.
- BSI. 1998. Ergonomics of the thermal environment. Guide to design and evaluation of working practices for cold indoor environments. British Standard 7915. London: British Standard Institute.
- CEN. 2001. Ergonomics of the thermal environment – Estimation of the thermal insulation and evaporative resistance of a clothing ensemble. Norma EN-ISO 9920. Bruxelles: Comité Européen de Normalisation.
- Fanger P.O, 1970. Thermal Comfort. New York: Mc Graw Hill.
- Fanger P.O. 1973. The influence of age, sex adaptation, season and circadian rhythm on thermal comfort criteria for men. Annexe 1973-2 au Bulletin de l'Institut International du froid, 91-97, Proc. Meeting of IIR (Comm. E1), Vienna.
- Gavhed D., Mäkinen T. e Rintamäki H., Holmér I. 1988. Validation of local temperature criteria in ISO TR 11079. In: Problems with cold work, 42-44.
- Gavhed D. e Holmér I. 1991. Thermal responses to cold exposure. In: Designing for everyone, 115-116. London: Taylor and Francis.
- Griefhan B. 2000. Limits of and possibilities to improve the IREQ cold stress model (ISO/TR 11079). A validation study in the field. *Applied Ergonomics*, 31, 423-431.
- Havenith G., Heus R. e Lotens W.A. 1990a. Clothing ventilation, vapour resistance and permeability index: changes due to posture, movement and wind. *Ergonomics*, 33(8), 989-1005,
- Havenith G., Heus R. e Lotens W.A. 1990b. Resultant clothing insulation: a function of body movement, posture, wind, clothing fit and ensemble thickness, *Ergonomics*, 33(1), 67-84.
- Hensel H. 1981. Thermoreception and Temperature Regulation. Academic Press
- Holmér I. 1984. Heat exchange by sweating in cold protective clothing -

Aspects médicaux et biophysiques des vêtements de protection. Centre de Recherches du Service de Santé des Armées, 306-311, Lyon.

- Holmér I. 1988a. Assessment of cold stress in terms of required clothing insulation–IREQ. *International Journal of Indust. Ergonomics*, 3, 159-166
- Holmér I. 1988b. Protective clothing and heat transfer. *Proc. Seminar on Heat Stress Indices*, 373-411, Luxembourg.
- Holmér I. 1988c. Evaluation of thermal stress in cold regions: a strain assessment strategy. In: Problems with cold work, 31-35.
- Holmér I. 1989. Relevance of required Clothing Insulation (IREQ) for the assessment of cold environments. *The 13th Symposium on Man-Thermal Environment System*, 190-193, Sapporo
- Holmér I. 1992. Prediction of protection requirements in cold. Possibilities and limitations. *Proceedings of Nokobetteff IV*, 212-217, Kittila (Finland).
- ISO 1993. Evaluation of cold environments. Determination of Required Clothing Insulation, IREQ. ISO/TR 11079. Geneva: International Standardization Organization.
- ISO. 2001a. Ergonomics of the thermal environment – Risk assessment strategy for the prevention of stress or discomfort in thermal working conditions. ISO/CD 15265. Geneva: International Standardization Organization.
- ISO. 2001b. Ergonomics of the thermal environment – Touching of cold surfaces – Part 3: Ergonomics data and guidance. ISO/DIS 13732-3. Geneva: International Standardization Organization.
- ISO. 2002a. Ergonomics of the thermal environment – Strategy for risk assessment and management and working practice in cold environment. ISO/WD 15743. Geneva: International Standardization Organization.
- ISO 2002b. Evaluation of cold environments. Determination and interpretation of cold stress when using Required Clothing Insulation (IREQ) and local cooling effects. ISO/CD 11079 revised, revision 2002.02.14. Geneva: International Standardization Organization.
- Le Blanc J. 1975. Man in the cold. Springfield: Charles C. Thomas.
- Malchaire J., Gebhart H.J. e Piette A. 1999. Strategy for evaluation and prevention of risk due to work in thermal environments. *Annals of Occupational Hygiene Society*, 43(5), 367-376.
- Mc Intyre D.A. 1980. Indoor Climate. London: Applied Science Publishers Ltd.
- Parsons K.C. 1988. Working practice in the cold : measures for the alleviation of cold stress. In: Problems with cold work, 48-57.
- Siple P.A. e Passel C.F. 1945. Measurements of dry atmospheric cooling in subfreezing temperatures. *Proceedings of the American Philosophical Society*, 89, 177-199.
- UNI. 1996. Ergonomia - Determinazione della produzione di energia termica metabolica. Norma UNI-EN 28996. Milano: Unificazione Italiana.
- UNI. 2001. Ergonomia degli ambienti termici - Determinazione

dell'isolamento richiesto dagli indumenti. Norma UNI-ENV-ISO 11079. Milano: Unificazione Italiana.

- Woodcock A.H. 1962. Moisture transfer in textile systems. Journal Textile Research, 32, 628-633.

11 – APPENDICE

Relazioni usate per l'ottenimento delle Figure 1 e 2 e delle Tabelle 1, 2 e 3 (il significato e l'unità di misura di ciascun simbolo sono indicati nella Simbologia):

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

$$C_{res} = 0,0014 M (t_{ex} - t_a)$$

$$E_{res} = 0,0173 M (p_{ex} - p_a)$$

$$E_{sk} = \frac{w(p_{sk,s} - p_a)}{R_T}$$

$$f_{cl} = 1,00 + 1,97 I_{cl}$$

$$h_c = 3,5 + 5,2 v_{ar} \quad \text{per } v_{ar} < 1 \quad (\text{ISO, 1993})$$

$$h_c = 8,7 v_{ar}^{0,6} \quad \text{per } v_{ar} > 1 \quad (\text{ISO, 1993})$$

$$h_c = \frac{f_{cl}}{I_a} - h_r \quad \text{per } v_a = 0,4 \div 18 \text{ m/s e } w_a = 0 \div 1,2 \text{ m/s} \quad (\text{ISO, 2002b})$$

$$h_r = \frac{4,1 \cdot 10^{-8} \left[(t_{cl} + 273)^4 - (t_r + 273)^4 \right]}{t_{cl} - t_r} \quad (\text{ISO, 1993})$$

$$h_r = \sigma \varepsilon_{cl} \frac{A_r}{A_D} \frac{\left[(t_{cl} + 273)^4 - (t_r + 273)^4 \right]}{t_{cl} - t_r} \quad (\text{ISO, 2002b}^5)$$

$$I_{a,r} = 0,092 \cdot \exp(-0,15 v_a - 0,22 w_a) - 0,0045 \quad (\text{ISO, 2002b})$$

$$I_{cl} = \frac{I_{cl,r} + \frac{I_{ar}}{f_{cl}} - \frac{0,085}{f_{cl}}}{\frac{I_{t,r}}{I_t}} \quad (\text{ISO, 2002b})$$

⁵ questa relazione coincide con quella fornita dalla (ISO, 1993) se si considerano i seguenti valori: $\varepsilon_{cl} = 0,95$ e $A_r/A_D = 0,77$.

$$\frac{I_{t,r}}{I_t} = 0,54 \cdot \exp[0,075 \ln(ap) - 0,15 v_a - 0,22 w_a] - 0,06 \ln(ap) + 0,5 \quad (\text{ISO, 2002b})$$

$$p_a = \phi p_{ex}$$

$$p_{ex} = \exp\left(18,7 - \frac{4030}{t_{ex} + 235}\right)$$

$$p_{sk,s} = 0,1333 \cdot \exp\left(18,6686 - \frac{4030,183}{t_{sk} + 235}\right)$$

$$R = f_{cl} h_r (t_{cl} - t_r)$$

$$R_T = \frac{0,06}{i_m} \cdot \frac{1}{f_{cl} (h_c + h_r) + I_{cl}} \quad (\text{ISO, 1993})$$

$$R_T = \frac{0,06}{i_m} \cdot \left(\frac{I_a}{f_{cl}} + I_{clr} \right) \quad (\text{ISO, 2002b})$$

$$t_{ex} = 29,0 + 0,20 t_a$$

$$v_{ar} = v_a + 0,0052(M - 58) \quad (\text{ISO, 1993})$$

$$w_a = 0,0052(M - 58) \quad (\text{ISO, 2002b})$$