

IL RISCHIO DA MICROCLIMA NEI CASEIFICI E NELLE SALE DI MUNGITURA

*Monarca D., Bedini R., Cecchini M., Colantoni A., Di Giacinto S., Marucci A., Menghini G. *, Porceddu P.R. ***

*Università degli Studi della Tuscia - Laboratorio Ergolab - Dip. DAFNE – Viterbo

**Università degli Studi di Perugia – Dip. Scienze Agrarie e Ambientali

1. INTRODUZIONE

L'approccio alla sicurezza sul lavoro non va inteso esclusivamente nella sola prevenzione degli infortuni per i lavoratori, legati principalmente all'utilizzo di macchine e attrezzature, ma anche al raggiungimento di determinate condizioni di comfort e benessere termico.

La valutazione di tale rischio, quindi, risulta complessa come risultano di difficile applicazione idonee misure di prevenzione e protezione.

Risulta fondamentale valutare questi aspetti anche in funzione di idonei elementi in grado di guidare le scelte progettuali, finalizzate non solo alla realizzazione di nuovi ambienti di lavoro ed impianti, ma anche alla bonifica di quelli esistenti e alla corretta organizzazione del lavoro (Monarca et al., 2005). Numerosi sono stati i metodi introdotti per valutare le condizioni di benessere termico sulla base di studi teorici e di indagini sperimentali, come pure si è cercato di correlare tra loro indici descrittivi per verificarne la consistenza. I confronti tra indici descrittivi del benessere termico si basano sui dati relativi all'ambiente di lavoro con condizioni microclimatiche moderate e severe caldi e/o freddi, evidenziando in particolare, il notevole peso che hanno il metabolismo e il vestiario nell'influenzare gli indici e come piccole variazioni degli stessi possano portare a risultati molto diversi tra loro se non addirittura contrastanti. Si definiscono ambienti moderati tutti quei luoghi di lavoro in cui la condizione di omeotermia (costanza della temperatura corporea) del corpo umano è raggiunta con un moderato intervento dei meccanismi di termoregolazione. In particolare si tratta di luoghi con condizioni ambientali omogenee e pressoché costanti nel tempo e nei quali il lavoro svolto richiede un'attività fisica leggera a carico di tutti i lavoratori. In particolare per ambienti severi caldi e freddi si intendono quegli ambienti dove non è possibile mantenere, contemporaneamente, condizioni termiche e igrometriche, di ventilazione e purezza dell'aria, compresi nei limiti richiesti per il benessere delle persone in tutte le stagioni. Appartengono a questa categoria di ambienti gran parte delle industrie alimentari ove, per motivi legati alle caratteristiche dei prodotti, non è possibile intervenire artificialmente sui vari parametri microclimatici, modificandoli al fine di renderli idonei al benessere dell'uomo. Le problematiche relative al microclima in ambiente di lavoro attengono al complesso di fattori ambientali che condizionano gli scambi termici tra l'uomo e l'ambiente. In molti ambienti di lavoro agricoli ed agroindustriali il benessere termico è difficilmente realizzabile, perché l'uomo si trova spesso ad operare all'aperto o in presenza di animali, o in condizioni di temperatura elevata (serre) o molto bassa (celle frigorifere) o in situazioni in cui i parametri climatici devono essere tenuti all'interno di determinati intervalli, per garantire produzioni conformi agli standards di preparazione, di maturazione e di conservazione dei prodotti.

I principali fattori che influenzano questi scambi sono: il clima esterno, le caratteristiche strutturali dell'edificio, le caratteristiche degli impianti di condizionamento (freddo, caldo), il numero degli occupanti l'ambiente in esame e il tipo di attività svolta. Particolare rilievo assume inoltre, specie nelle industrie agroalimentari, la presenza di escursioni termiche tali da comportare un rischio per la salute dei lavoratori.

Tra i fattori sopra elencati, negli ambienti "vincolati" si può intervenire soltanto sugli ultimi tre. Negli ambienti con microclima definito "severo" si può agire solamente sulla durata dell'esposizione e sull'organizzazione del lavoro in modo da modificare il carico termico prevedibile.

Attraverso meccanismi fisiologici e comportamentali l'organismo cerca di realizzare le condizioni di equilibrio termico riducendo il tempo di transizione dovuto al cambiamento delle condizioni ambientali o soggettive in cui tale equilibrio non è più garantito. Lo scambio termico che si instaura tra uomo ed ambiente può essere descritto a partire dal primo principio della termodinamica applicato al sistema corpo umano. In particolare la sommatoria S degli scambi di calore tra il corpo umano e l'esterno può essere descritta, in termini di potenza (W), dalla nota equazione:

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

dove:

S = variazione di energia interna del corpo umano nell'unità di tempo;

M = Metabolismo energetico;

W = potenza meccanica impegnata per compiere lavoro meccanico;

C_{res} = potenza termica scambiata nella respirazione per convezione;

E_{res} = potenza termica scambiata nella respirazione per evaporazione;

K = potenza termica scambiata per conduzione;

C = potenza termica scambiata per convezione;

R = potenza termica scambiata per irraggiamento;

E = potenza termica ceduta per evaporazione (traspirazione e sudorazione).

Nella formula i termini C_{res} , E_{res} , K, C e R sono preceduti dal segno - quando sono ceduti dal sistema uomo all'ambiente esterno, con il segno + quando viceversa sono assorbiti. Tutti i termini della (1) sono espressi in W.

2. MATERIALI E METODI

Sulla base della normativa vigente le norme tecniche che si considerano sono quelle rappresentate dagli standard ISO, recepiti dal CEN come norme EN ed in Italia dall'UNI. Per la normativa nazionale il microclima è uno dei rischi fisici definiti dall'art. 180 del decreto legislativo 81/08 che si limita a generiche indicazioni di "adeguatezza" e benessere. In attesa di uno specifico capitolo questa carenza viene colmata dal riferimento a normative tecniche; queste ultime propongono alcuni indici microclimatici di comfort e/o di stress, indici che permettono di interpretare le condizioni microclimatiche ambientali integrate con il tipo di attività svolta dagli addetti.

In tabella 1 sono riportate le principali norme tecniche in relazione agli ambienti microclimatici.

Tab. 1- Normativa tecnica in relazione agli ambienti microclimatici

AMBIENTI MODERATI	UNI EN ISO 7730:2006	Determinazione degli indici <i>PMV</i> e <i>PPD</i> e specifiche per le condizioni di benessere termico
AMBIENTI SEVERO CALDI	UNI EN 27243:96	Valutazione dello stress termico per l'uomo negli ambienti di lavoro, basata sull'indice <i>WBGT</i>
	UNI EN ISO 7933:2005	Determinazione analitica ed interpretazione dello stress termico da calore mediante il calcolo della sollecitazione termica prevedibile <i>PHS</i>
AMBIENTI SEVERO FREDDI	UNI EN ISO 11079:2008	Valutazione ambienti freddi. Determinazione dell'isolamento richiesto dagli indumenti I_{REQ}
CARICO TERMICO	UNI EN ISO 9886:2004	Valutazione del carico termico previsto tramite misure dei parametri fisiologici
METABOLISMO ENERGETICO	UNI EN ISO 8996: 2005	Valutazione del metabolismo energetico
RESISTENZA TERMICA DELL'ABBIGLIAMENTO	UNI EN ISO 9920:2009	Valutazione dell'isolamento termico dell'abbigliamento
GRANDEZZE STRUMENTALI	UNI EN ISO 7726:98	Valutazione delle grandezze strumentali per il calcolo dei principali indici negli ambienti microclimatici.

Tab. 2 - Principali strumenti e caratteristiche tecniche per la determinazione del rischio microclima

STRUMENTO	CARATTERISTICHE
SONDA ANEMOMETRICA A FILO CALDO	misure della velocità dell'aria e della turbolenza campo di misura V_a 0÷20 m/s, campo di misura intensità di turbolenza 0÷100%
SONDA A BULBO UMIDO A VENTILAZIONE NATURALE	sonda termometrica a bulbo umido a ventilazione naturale grandezze ottenibili: <i>WBGT</i> int/ext, campo di misura tra 0 e 80°C e sostituzione calza di cotone quando sporca, durata acqua distillata 10 giorni con RH% media del 50%
SONDA DOPPIA PER LA MISURA DELLA TEMPERATURA SUPERFICIALE DEL PAVIMENTO E DELL'ARIA H. 20 CM	campo di misura -10 ÷ +50°C, indici ottenuti (ISO 7730): % insoddisfatti t pavimento, % insoddisfatti da differenze verticali di t, quando abbinata a sonda di t dell'aria
PSICROMETRO	sonda psicrometrica a ventilazione forzata con serbatoio d'acqua distillata, n° 2 canali utilizzati (analogici) campo di misura temperatura -5 ÷ + 60°C, campo di misura umidità 0÷100%
GLOBOTERMOMETRO	rame nero opaco riflessione <2% misura t media radiante, campo di misura + 40 ÷ + 80°C sonda globotermometrica, in accordo con ISO 7243, UNI EN 27726 / 27243; sensore: Pt100 a 4 fili, precisione 1/3DIN; diametro medio del globo: 150 mm
CENTRALINA DI ACQUISIZIONE	Multiacquisitore a più ingressi per valutazione indici microclimatici

I principali strumenti di misura utilizzabili ai fini della valutazione del rischio microclimatico sono riportati in tabella 2, dove si descrivono anche le principali caratteristiche tecniche di sonde attualmente in commercio.

La strumentazione utilizzata per la misura dei parametri microclimatici precedentemente illustrati deve sottostare a specifici requisiti, in base al tipo di valutazione che deve essere condotta. Nella tabella 3, secondo quanto fissato dalla norma ISO 7726, vengono riportati i requisiti minimi che devono possedere gli strumenti di misura delle quantità fisiche, per misure in ambienti moderati.

Tab. 3 - Specifiche per gli strumenti di misura delle quantità fisiche

Parametro	Intervallo di misura	Precisione richiesta	Precisione desiderabile
Temperatura dell'aria	10 – 40 °C	± 0,5 °C	± 0,2 °C
Umidità dell'aria (espressa come pressione parziale del vapore d'acqua)	0,5 – 3,0 kPa	± 0,15 kPa	
Velocità dell'aria	0,05– 1,00 m/s	± (0,05 + 0,05 V_a) m/s	± (0,02 + 0,07 V_a) m/s
Temperatura media radiante	10 – 40 °C	± 2,0 °C	± 0,2 °C
Temperatura piana radiante	0 – 50 °C	± 0,5 °C	± 0,2 °C
Temperatura superficiale	0 – 50 °C	± 1,0 °C	± 0,5 °C

La norma raccomanda inoltre che la quota di misura delle grandezze microclimatiche sia pari a 0,6 m per soggetti seduti e di 1,1 m per soggetti in piedi (UNI EN ISO 7726 2002) (fig. 1).

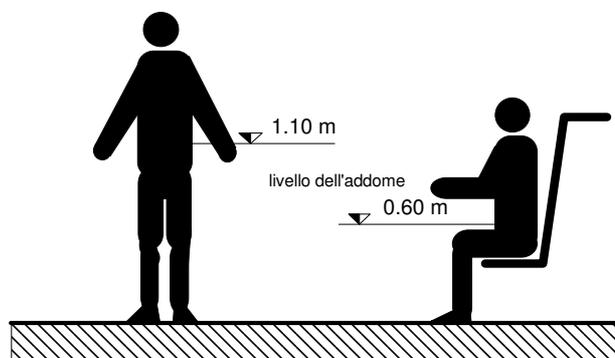


Fig. 1 - Quota di misura delle grandezze microclimatiche

Infine per la valutazione della differenza verticale di temperatura, la quota di misura della temperatura dell'aria al livello delle caviglie deve essere di 0,1 m, mentre al livello della testa deve essere di 1,1 m per soggetti seduti e di 1,7 m per soggetti in piedi (fig. 2).

La valutazione degli ambienti termici moderati viene attuata per mezzo della norma ISO 7730, che ha lo scopo di presentare il metodo di previsione della sensazione termica e del grado di discomfort di persone esposte ad un ambiente termico moderato e di specificare le condizioni ambientali termicamente accettabili per il benessere termico. La condizione di benessere viene valutata utilizzando gli indici della teoria di *Fanger*, mentre i requisiti prestazionali per l'ambiente sono scelti in modo tale da mantenere la

percentuale di persone insoddisfatte al di sotto della soglia del 10%, sia per quanto riguarda il comfort globale che per le condizioni di discomfort localizzato. Per la valutazione del comfort globale viene utilizzato l'indice *PMV* (voto medio previsto) ed il correlato *PPD* (percentuale di insoddisfatti) (UNI EN ISO 7726 2002).

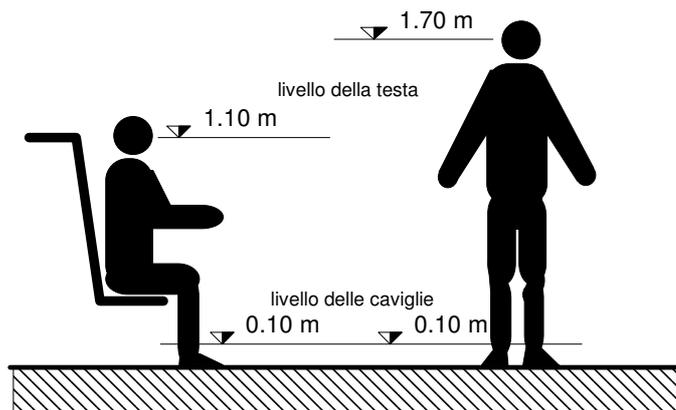


Fig. 2 - Quota di misura delle temperature per la valutazione del discomfort dovuto a differenza verticale di temperatura

A tal riguardo, nel testo della norma sono contenute sia la relazione analitica che consente il calcolo del *PMV*, che una serie di tabelle per varie attività metaboliche, da cui, in funzione dell'isolamento termico dell'abbigliamento, della velocità relativa dell'aria e della temperatura operativa, è possibile determinare il valore del *PMV*. Per quanto riguarda i requisiti di benessere si raccomanda di mantenere la percentuale di insoddisfatti al di sotto del 10%, il che corrisponde a ritenere accettabili le condizioni nel momento in cui risulti $-0,5 < PMV < +0,5$.

Nella norma è anche fornito il diagramma di figura 3, che consente di determinare la temperatura operativa ottimale, corrispondente a $PMV=0$, in funzione dell'attività e dell'abbigliamento, nonché le oscillazioni massime della temperatura operativa ottimale tali da mantenere la condizione $-0,5 < PMV < +0,5$. Il diagramma è utilizzabile per umidità relativa del 50% e per velocità relativa dell'aria $V_a = 0,3 (M-1)$ m/s.

2.1 Valutazione della temperatura esterna del corpo umano abbigliato

Gli scambi sensibili per convezione e irraggiamento dipendono dalla temperatura media della superficie esterna del corpo umano abbigliato, t_{cl} , che è di difficile determinazione. È possibile tuttavia eliminare questa dipendenza facendo alcune considerazioni sulla potenza termica secca, data dalla somma della potenza termica per convezione e quella per irraggiamento ($R+C$).

Se si considera infatti il corpo umano abbigliato è possibile individuare uno strato di aria tra la pelle e la superficie interna degli abiti ed uno strato costituito dal tessuto degli stessi abiti (fig. 3).

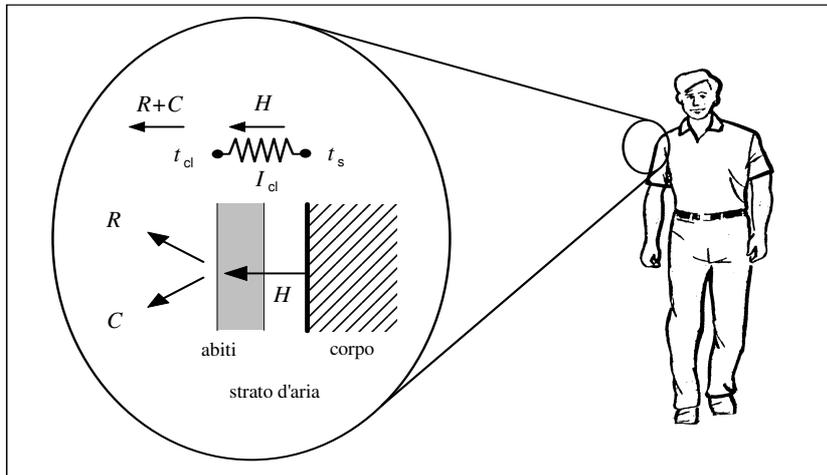


Fig. 3 - Meccanismo di scambio termico secco sulla superficie del corpo abbigliato

I due strati opporranno una resistenza al trasferimento del calore generato per effetto della differenza di temperatura esistente tra la superficie della pelle, t_s , e la superficie esterna degli abiti, t_{cl} . In condizioni stazionarie si può ipotizzare che lo scambio termico sensibile attraverso gli abiti, Q_s , eguagli lo scambio termico complessivo per convezione, Q_c , e per irraggiamento, Q_r , che lascia la superficie del corpo abbigliato. Si avrà allora:

$$Q_s = Q_c + Q_r \quad (2)$$

Inoltre il termine dovuto allo scambio termico sensibile attraverso gli abiti può essere valutato con la relazione:

$$Q_s = \frac{t_s - t_{cl}}{I_{cl}} \quad (3)$$

dove I_{cl} rappresenta l'isolamento termico del vestiario [m^2K/W]. Dalla (3) è possibile ricavare:

$$t_{cl} = t_s - I_{cl}(Q_c + Q_r) \quad (4)$$

Poiché sia lo scambio per convezione che lo scambio per radiazione sono funzione della temperatura dell'abbigliamento, il calcolo della stessa con l'equazione (4) richiede un processo di tipo iterativo.

Tuttavia utilizzando la (4) viene a mancare nell'equazione di bilancio (1) la dipendenza dalla temperatura degli abiti, che, come è stato anticipato, è difficilmente valutabile, e subentra la dipendenza da un parametro fisiologico quale la temperatura della pelle.

3. METODOLOGIE DI VALUTAZIONE NEGLI AMBIENTI SEVERI

3.1. Il "Predict Heat Strain" (ISO 7933)

Il modello *PHS* introdotto dalla norma ISO 7933 [16], utilizza, come dati di input, parametri ambientali quali: la temperatura dell'aria t_a , la temperatura media radiante t_r e la velocità dell'aria V_a . Inoltre, sono considerati anche dei parametri soggettivi che fanno riferimento all'operatore: il metabolismo energetico, l'isolamento termico previsto (I_{cl}), la durata dell'attività, il peso e l'altezza dell'operatore (per il calcolo della superficie corporea tramite formula di *Du Bois*), la possibilità di integrare facilmente le perdite d'acqua, la velocità con cui è svolto il lavoro in relazione alla direzione del vento, ed infine l'acclimatazione del lavoratore.

In risposta il modello *PHS* fornisce alcuni output che permettono di valutare, date le condizioni ambientali e personali, l'eventuale probabilità di un collasso termico per gli operatori che lavorano in ambienti severo caldi.

I parametri finali e di interesse per la determinazione del carico termico previsto sono:

1. Temperatura rettale t_{re} [°C]: rappresenta la temperatura interna dell'operatore ed ha un valore limite pari a 38°C;
2. Perdita idrica totale [g]: stabilisce la massima perdita d'acqua compatibile con il mantenimento dei normali parametri fisiologici dell'individuo, in funzione dell'attività svolta;
3. $D_{limloss50}$ [min]: rappresenta il tempo dopo il quale la quantità di acqua complessivamente perduta supera il valore limite D_{max50} , massima perdita d'acqua compatibile con il mantenimento dei normali parametri fisiologici dell'individuo con l'obiettivo di proteggere da effetti nocivi (disidratazione) il 50% dei soggetti esposti;
4. $D_{limloss95}$ [min]: rappresenta il tempo dopo il quale la quantità di acqua complessivamente perduta supera il valore limite D_{max95} , massima perdita d'acqua compatibile con il mantenimento dei normali parametri fisiologici dell'individuo con l'obiettivo di proteggere da effetti nocivi (disidratazione) il 95 % dei soggetti esposti (valore più cautelativo rispetto al precedente);
5. D_{limtre} [min]: rappresenta il tempo dopo il quale la temperatura rettale raggiunge il valore limite.

Una fondamentale misura di prevenzione negli ambienti severi caldi consiste, pertanto, nel far sì che l'attività lavorativa venga limitata ad un tempo massimo D_{lim} dato da:

$$D_{lim} = \min(D_{limtre}, D_{limloss95}) \quad (5)$$

Tab. 4 - Intervalli di applicabilità dei parametri ambientali ed individuali

Quantità	Simbolo	Intervallo
temperatura dell'aria	t_a	+15 ÷ +50 °C
differenza fra t_a e t_r	$t_r - t_a$	0 ÷ +60 °C
pressione parziale del vapore acqueo	p_a	0 ÷ 4.500 Pa
velocità dell'aria	V_a	0 ÷ 3 m/s
attività metabolica	M	100 ÷ 450 W
isolamento termico del vestiario	I_{cl}	0,1 ÷ 1 clo

L'applicazione del modello *PHS* risulta molto laboriosa e per agevolare il calcolo analitico si può utilizzare un software sviluppato tramite algoritmi definiti dalla norma UNI EN ISO 7933:2005 (Alfano et al., 1998).

L'affidabilità del metodo *PHS* è verificata soltanto all'interno di specifici intervalli stabiliti, sia per i parametri ambientali che per i parametri individuali (tab. 4).

Si raccomanda particolare cura in caso di situazioni ove si abbia un valore negativo di E_{max} . In questi casi si ha, infatti, condensazione di vapore acqueo sulla pelle e non evaporazione. La norma, inoltre, non tratta adeguatamente i casi in cui il tempo massimo di esposizione D_{lim} è inferiore a 30 minuti. In tali casi è richiesta una supervisione medica diretta e personalizzata sui soggetti a rischio.

3.2 L'indice WBGT

La metodologia di valutazione delle condizioni di lavoro negli ambienti severi caldi è descritta dalla norma UNI EN 27243, che introduce l'indice *WBGT (Wet Bulb Globe Temperature)*. La finalità di questo indice è quella di tenere sotto controllo lo stress termico eccessivo dei lavoratori operanti in ambiente caldo, assumendo come limite superiore quello che comporta un aumento limitato (1°C) della temperatura corporea.

L'indice si calcola con le seguenti equazioni:

$$WBGT = 0,7 t_{nw} + 0,2 t_g + 0,1 t_a \quad (6)$$

(in ambiente esterno con esposizione solare)

oppure:

$$WBGT = 0,7 t_{nw} + 0,3 t_g \quad (7)$$

(in ambiente interno ed esterno senza esposizione solare)

ove: t_{nw} rappresenta la temperatura [°C] misurata da un bulbo ricoperto da mussola inumidita con acqua distillata, t_g è la temperatura del globo termometro, e t_a è la temperatura [°C] dell'aria misurata da un bulbo asciutto non soggetto ad irraggiamento termico e con ventilazione compresa tra 2 e 4 m/s. I rilievi sono eseguiti all'interno di aree omogenee, cioè dove la temperatura media radiante, la temperatura, l'umidità e la velocità dell'aria possono essere considerate uniformi.

Gli indici *WBGT* ricavati vanno confrontati con i limiti di riferimento in funzione dei dispendi metabolici dei lavoratori, considerando anche la possibilità che questi ultimi possano essere abituati o meno al tipo di attività che svolgono.

3.3 L'indice IREQ

Al contrario degli ambienti caldi, è possibile, negli ambienti freddi, contrastare lo scambio termico mediante un vestiario con isolamento termico appropriato o con dispositivi di protezione individuale, con le seguenti limitazioni:

- un isolamento troppo spinto può limitare i movimenti dell'operatore;
- un eccessivo isolamento termico può impedire la traspirazione determinando un accumulo di sudore;
- ad una situazione termica neutra complessiva dell'organismo può associarsi un raffreddamento eccessivo di alcuni distretti (mani, piedi, viso).

Quando l'isolamento termico dell'abbigliamento indossato è minore dell'isolamento richiesto, l'esposizione all'ambiente severo deve essere limitata nel tempo, per evitare un raffreddamento del nucleo. Tuttavia si può accettare che una piccola riduzione di energia interna del corpo umano possa essere tollerata per una esposizione che si protragga per un tempo limitato; la "durata limite di esposizione", indicata con l'acronimo *DLE*, può allora essere ricavata tramite l'utilizzo di particolari indici. Si fa riferimento alla norma UNI EN ISO 11079 "Valutazione degli ambienti freddi – Determinazione dell'isolamento richiesto dagli indumenti (I_{REQ})". In tale norma vengono definiti due indici di stress di estrema importanza: a) indice di raffreddamento complessivo; b) indice di raffreddamento locale. L'indice di raffreddamento complessivo è utilizzato per la valutazione dello stress termico da raffreddamento complessivo ed esprime l'isolamento termico dell'abbigliamento richiesto che prende il nome di I_{REQ} ($m^2 \text{ }^\circ\text{C/W}$).

Lo scambio termico attraverso l'abbigliamento ha luogo per conduzione, convezione e irraggiamento (scambio termico sensibile) e per evaporazione del sudore (calore latente).

L'effetto dell'abbigliamento sullo scambio termico sensibile è determinato dall'isolamento termico degli abiti e del gradiente di temperatura tra la pelle e la superficie degli indumenti. Il flusso termico sensibile attraverso la superficie degli indumenti è equivalente allo scambio di energia termica tra la superficie dell'abbigliamento e l'ambiente.

Quindi lo scambio termico attraverso l'abbigliamento può essere espresso in termini di un isolamento dell'abbigliamento risultante I_{cl} .

L' I_{REQ} può essere considerato, pertanto, un indicatore dello stress termico determinato dagli effetti combinati dell'energia metabolica e dello scambio termico con l'ambiente. Per un assegnato livello di attività, quanto più grande è il potere raffreddante dell'ambiente, tanto maggiore è quindi l' I_{REQ} .

L'equilibrio termico può essere raggiunto a diversi livelli di *strain* termoregolatorio, definito in termini di temperatura media della pelle, sudorazione (percentuale di pelle bagnata) e variazione dell'energia termica corporea.

Si suggerisce di definire I_{REQ} per due livelli di *strain* fisiologico:

- I_{REQmin} l'isolamento termico minimo necessario per mantenere il corpo in equilibrio termico a livello di temperatura media corporea più basso del normale. Rappresenta il più alto livello di *strain* fisiologico al quale l'uomo può essere sottoposto in condizioni lavorative;
- $I_{REQneutro}$ l'isolamento termico necessario per mantenere condizioni di neutralità termica, per esempio l'equilibrio termico mantenuto a un livello normale di temperatura media corporea. Questo livello corrisponde ad un raffreddamento minimo o nullo del corpo umano.

L'intervallo tra I_{REQmin} e $I_{REQneutro}$ può essere considerato come una zona di regolazione dell'abbigliamento, dove ogni individuo sceglie il livello di protezione adatto. Per valori di isolamento termico minori di I_{REQmin} esiste un rischio di progressivo raffreddamento del corpo. Per valori di isolamento termico maggiori di $I_{REQneutro}$ la sensazione termica sarà di caldo e si può avere surriscaldamento.

Quando l'abbigliamento è insufficiente a garantire una neutralità termica è necessario stimare la *DLE*. Per esposizioni di poche ore si può accettare una certa riduzione del

contenuto di energia termica (Q), il cui valore può essere usato per calcolare la durata dell'esposizione se l'accumulo è noto; quindi:

$$DLE = Q_{lim}/S \quad (8)$$

dove:

Q_{lim} è il valore limite di Q ;
e $S = M-W-C_{res}-E_{res}-E-R-C$.

L'indice di raffreddamento locale è l'indice utilizzato per la valutazione dello stress termico da raffreddamento locale è viene indicato *Wind Chill Index (WCI)*. Esso esprime l'entità della potenza termica per unità di superficie perduta dall'organismo in funzione della temperatura e delle velocità dell'aria.

4. LE INDUSTRIE AGROALIMENTARI: I CASEIFICI

Le industrie agro-alimentari sono caratterizzate da particolari lavorazioni che prevedono la presenza di notevoli escursioni termiche tra luoghi diversi all'interno degli stabilimenti, anche in conseguenza della specificità del ciclo produttivo. Si consideri, ad esempio, la produzione di formaggi: le fasi che possono presentare punti critici per la salute dei lavoratori dal punto di vista microclimatico sono:

- la maturazione tramite stagionatura in grotte (fig. 4) o in forni;
- il mantenimento delle caratteristiche organolettiche tramite l'immagazzinamento nelle celle frigorifere;
- la lavorazione di formaggi freschi e delle ricotte.

In particolare gli addetti che operano all'interno delle aree di stagionatura (grotte) sono soggetti ad una esposizione, oltre che alle basse temperature (media della temperatura ambiente t_a di 9-10°C), soprattutto ad un elevato tasso di umidità relativa U_r , compresa in un range tra il 70% e l'80%.



Fig. 4 - Stagionatura del pecorino romano in grotta presso un'azienda romana

4.1 Un caso pratico

Si riportano, a titolo di esempio, i risultati di una indagine effettuata presso un caseificio del centro Italia (Monarca et al., 2002). I rilievi hanno riguardato 7 ambienti differenti, e sono stati ripetuti, a fine inverno e in estate, negli stessi orari (in orario di lavoro). L'azienda è sita in una valle a circa 250 m s.l.m., vicino a un corso d'acqua: ciò comporta, in inverno, numerosi periodi con temperature sotto zero.



Fig. 5 - Layout del caseificio

Il locale, il cui layout è schematizzato in figura 5, è caratterizzato da un grado di umidità elevato, sul quale non si può intervenire per non nuocere alla produzione della ricotta. In media vi operano 4 addetti. Il locale salamoia è collegato con la cucina tramite una porta costituita da due spessori di pvc apribili. Al centro è posta la vasca per la salatura, con acqua a una temperatura di circa 10°C: ciò spiega perché la temperatura è notevolmente più bassa rispetto a quella degli altri locali.

Nel locale, ove operano in media 4 addetti, avviene anche il raffreddamento delle ricotte. Il corridoio mette in comunicazione la zona di lavorazione con le celle di stagionatura e la zona di vendita.

Le celle frigorifere sono rivestite esternamente con materiale isolante, tuttavia, a causa delle porte non totalmente sigillanti, il freddo tende a disperdersi nel corridoio, raffreddandolo.

La struttura del magazzino 1, dove lavorano in media 10 addetti, è costituita da una tamponatura perimetrale in pannelli di cemento prefabbricato dello spessore di 10 cm, mentre la copertura non si differenzia dalle altre zone.

Un problema del magazzino è costituito dal fatto che il materiale per il confezionamento dei formaggi è posto all'esterno del locale, in un'altra stanza, per cui gli operatori devono uscire con qualunque condizione atmosferica. Ciò comporta uno stress soprattutto d'estate, quando all'interno si hanno circa 17°C, mentre nel piazzale esterno si raggiungono temperature anche superiori ai 30°C. Nel magazzino del sottovuoto lavorano in media 7 addetti. La struttura è la stessa della cucina. Il locale è collegato, tramite una porta aperta, al magazzino 1.

Nelle tabelle 4 e 5 si riportano i dati rilevati (valori massimi, minimi e medi) e gli indici ottenuti dalla loro elaborazione.

È importante notare come, durante le rilevazioni, le condizioni microclimatiche esterne si siano molto modificate durante la giornata: infatti la temperatura, nel periodo invernale, è passata da 2°C alle ore 6.00, a 18°C alle 12.00, per poi ridiscendere intorno a 16°C alle ore 18.00.

Anche l'umidità ha seguito lo stesso andamento, portandosi dal 100% al mattino al 58,2% la sera, con una punta minima di 51,2%.

In tutti gli ambienti il personale indossava lo stesso vestiario, di tipo estivo, con maglietta maniche corte, pantaloni leggeri, grembiule, calze lunghe e stivali.

Questo abbigliamento non si adatta bene a due ambienti: l'interno delle celle e il corridoio che unisce il reparto salamoia ai magazzini.

Infatti, analizzando i parametri *PMV* e *PPD* riferiti al personale più a rischio (chi preleva dalle celle il formaggio per la vendita e chi trasporta le ricotte dalla zona salamoia alla cella), si vede che gli insoddisfatti sfiorano la totalità.

I valori degli indici, poi, mostrano come in alcuni ambienti (es.: cella) risulti inappropriato parlare di microclima moderato (occorre applicare i criteri di valutazione propri dei microclimi severi freddi).

I risultati evidenziano in primo luogo che sarebbe necessario far vestire più pesantemente gli operatori che transitano nei due locali suddetti: con abbigliamento più pesante (maglietta maniche corte, camicia leggera a maniche lunghe, pantaloni pesanti e giacca pesante), i valori medi di *PMV* e *PPD* passerebbero a valori più prossimi all'accettabilità.

Un altro aspetto, legato all'organizzazione del lavoro, riguarda gli spostamenti che i lavoratori effettuano, attraverso il corridoio, dal magazzino alla cella per prelevare il formaggio, e talvolta all'esterno, per prelevare gli imballaggi, sottoponendosi a notevoli sbalzi termici.

Ancor più evidente lo stress per gli addetti della sala ricotta, che si recano nelle celle per depositare le ricotte precedentemente raffreddate nel locale salamoia: lo sbalzo termico sfiora i 20°C e può causare gravi danni alla salute.

Sarebbe perciò necessario dedicare specificamente a tali spostamenti alcuni addetti abbigliati in modo opportuno.

Tab. 4 - Valori dei parametri rilevati nel caseificio oggetto di studio e determinazione dei principali indici per il periodo estivo

Ambiente	T _a	T _g	V _a	RH	PMV	PPD	PD	To
	°C	°C	ms ⁻¹	%		%	%	°C
	Periodo estivo:							
Cucina	22,21	22,24	0,07	68,71	0,74	16,87	3,63	22,21
	23,49	23,30	0,27	73,95	0,97	24,67	10,15	23,20
	21,24	21,36	0,00	63,42	0,54	11,08	0,00	21,25
Ricotta (spingere i carrelli)	25,98	25,88	0,16	85,21	0,89	22,47	9,37	25,93
	27,70	27,32	0,41	89,17	1,22	36,04	12,78	27,33
	24,59	25,00	0,56	79,48	0,66	14,17	5,79	24,93
Ricotta (grattare le caldaie)	25,99	25,89	0,16	85,16	0,90	22,97	9,37	25,92
	27,70	27,32	0,41	89,17	1,26	38,08	12,78	27,32
	24,59	25,12	0,00	79,48	0,65	13,85	5,79	24,96
Corridoio	15,49	16,30	0,01	86,27	-1,26	38,44	0,00	15,79
	16,81	116,54	0,11	95,47	-1,14	46,07	0,00	16,27
	14,30	15,78	0,00	74,85	-1,41	32,32	0,00	15,14
Salamoia	24,09	23,08	0,04	90,78	1,22	36,39	0,42	23,66
	25,00	24,13	0,18	94,96	1,34	42,32	2,17	24,19
	22,92	22,42	0,00	82,85	1,08	29,80	0,00	23,04
Cella	6,47	6,98	0,01	96,29	-3,11	99,47	0,00	6,64
	8,06	8,70	0,18	100,00	-2,94	99,62	0,00	7,52
	6,24	6,66	0,00	93,16	-3,16	98,82	0,00	6,43
Magazzino 1	21,90	21,98	0,04	73,99	-0,01	5,23	0,54	21,93
	23,18	25,84	0,44	85,34	0,29	6,79	3,44	23,35
	21,24	21,43	0,00	69,31	-0,10	5,00	0,00	21,47
Magazzino sottovuoto	22,83	23,27	0,04	64,29	-0,18	6,70	0,75	23,10
	24,51	23,90	0,46	70,65	0,03	11,64	5,70	23,88
	19,84	22,31	0,00	57,04	-0,56	5,00	0,00	21,82

La situazione in estate vede (tab. 4), a causa delle temperature più elevate, un marcato peggioramento in tutti i locali di lavorazione, con un lieve miglioramento per il corridoio.

I dati rilevati evidenziano come nel caseificio il disagio è dovuto soprattutto ai passaggi degli operatori nelle stanze tenute a diverse condizioni di temperatura ed umidità.

Dalle indagini effettuate, perciò, si può concludere che, ai fini della tutela della salute dei lavoratori, sarebbe opportuno che gli operatori stessi modificassero il loro abbigliamento all'atto di questi passaggi. Tuttavia questo comporterebbe un allungamento dei tempi per le diverse operazioni, dovendo anche prevedere ulteriori ambienti in cui gli operatori possano coprirsi o scoprirsi a seconda delle esigenze.

Tab. 5 - Valori dei parametri rilevati nel caseificio oggetto di studio e determinazione dei principali indici per il periodo invernale

Ambiente	Valori	T _a	T _g	V _a	RH	PMV	PPD	PD	To
		°C	°C	ms ⁻¹	%		%	%	°C
Periodo invernale:									
Cucina	med	17,51	16,74	0,06	86,04	-0,24	6,60	8,38	17,20
	max	18,66	17,91	0,39	94,49	-0,02	9,46	26,28	18,23
	min	15,25	15,59	0,00	78,78	-0,46	5,01	0,00	16,27
Ricotta (spingere i carrelli)	med	23,24	23,13	0,54	96,02	0,15	6,74	77,39	23,17
	max	24,55	24,43	2,04	100,00	0,45	9,28	100,00	24,41
	min	21,40	21,09	0,03	91,77	-0,34	5,24	47,89	21,25
Ricotta (grattare le caldaie)	med	23,24	23,13	0,54	96,02	0,05	6,57	77,39	23,16
	max	24,55	24,43	2,04	100,00	0,38	10,55	100,00	24,41
	min	21,40	21,09	0,03	91,77	-0,52	5,01	47,89	21,23
Corridoio	med	10,80	11,55	0,02	92,80	-2,37	85,83	0,00	11,09
	max	11,35	12,83	0,15	100,00	-2,15	91,12	0,00	11,54
	min	9,50	10,97	0,00	87,08	-2,40	83,05	0,00	10,47
Salamoia	med	18,47	18,25	0,04	95,49	0,06	5,21	1,07	18,38
	max	19,38	19,54	0,16	100,00	0,20	5,81	5,29	18,97
	min	16,69	17,87	0,00	90,93	-0,08	5,00	0,00	17,82
Cella	med	6,47	6,98	0,01	96,29	-3,11	99,47	0,00	6,64
	max	8,06	8,70	0,18	100,00	-2,94	99,62	0,00	7,52
	min	6,24	6,66	0,00	93,16	-3,16	98,82	0,00	6,43
Magazzino 1	med	15,88	15,37	0,04	64,74	-1,37	44,08	2,40	15,67
	max	16,24	15,74	0,23	67,42	-1,30	51,92	17,18	15,98
	min	15,52	13,32	0,00	60,98	-1,52	40,07	0,00	14,94
Magazzino sottovuoto	med	17,56	17,97	0,05	59,24	-1,63	57,86	4,88	17,80
	max	18,47	18,21	0,36	63,71	-1,49	70,93	17,94	18,16
	min	16,58	17,41	0,00	53,33	-1,88	50,36	0,00	17,50

6 AZIENDE AGROZOOTECNICHE: LE SALE DI MUNGITURA

Le strutture di allevamento sono caratterizzate dal mantenimento, anche forzato tramite sistemi di ventilazione naturale e/o forzata, di un microclima favorevole agli animali; questo a volte può provocare disagi per gli operatori (elevata temperatura dell'aria ed elevato tasso di umidità causato dal vapore acqueo prodotto dagli animali e dall'evaporazione dalle superfici bagnate). In questa ricerca si è cercato di analizzare il microclima nella settimana più calda dell'anno (18-24 luglio), valutando se vi è la presenza di un discomfort termico per gli operatori attraverso i principali indici definiti dalle norme tecniche nazionali ed internazionali (Cecchini et al., 2005).

6.1 Un caso pratico

L'azienda in esame è sita nel comune di Viterbo: al suo interno è presente una stalla per bovine da latte, con 250 bovine in lattazione, dotata di tettoie realizzate con semplici lastre di fibro-cemento per la protezione degli animali sia nella zona di riposo a cuccette sia nella zona di alimentazione sia, infine, in quella di attesa prima della mungitura. Il ricovero, nelle zone di riposo, di alimentazione e di attesa è dotato anche di impianti per il raffrescamento dell'aria composti ciascuno da un turboventilatore e da una serie di ugelli per la nebulizzazione dell'acqua (figura 6).

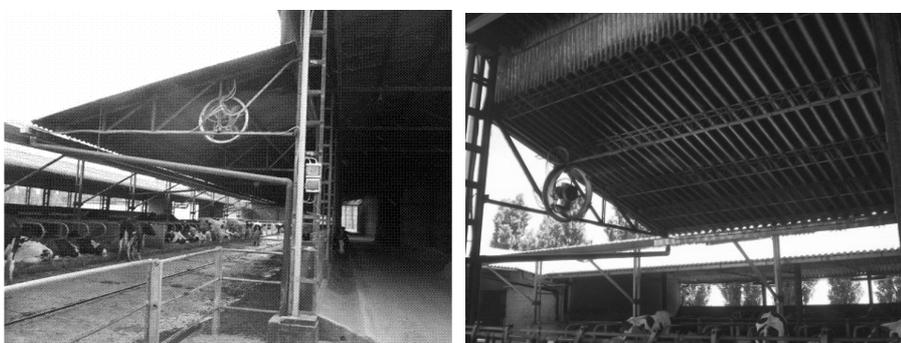


Fig. 6 - Particolari della stalla oggetto della ricerca: in evidenza il sistema di turboventilazione con ugelli per la nebulizzazione dell'acqua.

Per i rilevamenti strumentali sono state utilizzate le sonde per la misura della temperatura dell'aria, della temperatura radiante, dell'umidità relativa e della velocità dell'aria installate all'altezza di circa 1,5 m nell'area interessata anche dall'impianto di raffrescamento per la nebulizzazione dell'acqua. I sensori per la misura dei parametri sopra elencati sono stati collegati ad un "data logger" CR10 della Campbell (*Campbell Scientific, Inc., Logan, Utah*) che, ad intervalli di tempo di 15 minuti, ha registrato su memorie allo stato solido i segnali rilevati dai sensori. Le misure sono state eseguite dal 10 luglio al 5 settembre 2010.

In figura 6 sono riportati gli andamenti della temperatura dell'aria e del PMV rispettivamente misurata e calcolata nella settimana dal 18 al 24 luglio 2010. La temperatura massima si è mantenuta sempre superiore a 30°C, con punte di 35-36°C nel periodo più caldo, mentre i valori minimi si sono mantenuti tra i 16 e i 19°C. In conseguenza degli elevati valori raggiunti dalla temperatura dell'aria anche l'indice PMV supera rapidamente la soglia di +2, portando l'ambiente microclimatico da moderato ad ambiente severo caldo. Al fine di evidenziare la criticità delle soglie di superamento dei suddetti limiti è stata individuata la durata della permanenza del PMV al di sotto ed al di sopra del limite di +2 (figura 4). Successivamente le fasce di permanenza al di sotto ed al di sopra dei limiti sono state poste in relazione con le attività svolte dagli operatori (mungitura, alimentazione, pulizia e sorveglianza). Ciò ha consentito di individuare le eventuali condizioni di discomfort termico in concomitanza con le diverse attività svolte nell'allevamento. Negli ambienti con valori di PMV superiori a +2, il microclima non è più considerabile "moderato", ma "severo caldo": in queste condizioni l'indice WBGT consente di determinare i periodi di stress termico per

gli operatori acclimatati.

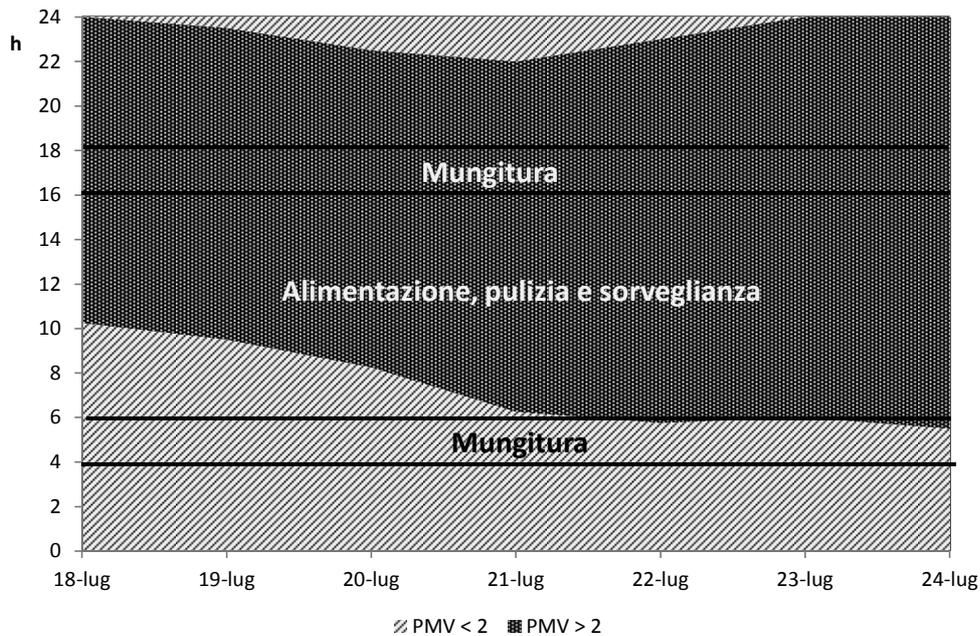


Fig. 7 - Superamento del limite $PMV \geq 2$ in relazione alle attività degli operatori

Riguardo alle fasce orarie di permanenza dei limiti di PMV al di sopra ed al di sotto dei limiti, nella settimana considerata, il superamento del limite + 2 da parte del PMV (fig. 7) si verifica a partire dalle ore 10 nel primo giorno e si riduce progressivamente fino alle ore 6 negli ultimi giorni della settimana, il PMV poi si mantiene superiore al limite fino alle 23-24. Mettendo in relazione quanto detto con le attività svolte dagli operatori, risulta che la mungitura del mattino avviene sempre in condizioni di comfort termico, mentre la mungitura del pomeriggio avviene sempre in condizioni di discomfort termico. Le attività intermedie, sebbene di breve durata, avvengono anche queste in condizioni di disagio per gli operatori. Per un ulteriore approfondimento del discomfort termico non è stato utilizzato il calcolo della sollecitazione termica prevedibile (PHS - *Predicted Heat Stress*) (UNI EN ISO 7933:2005) in quanto la situazione studiata si trova al limite di applicabilità del suddetto modello. Si è ritenuto invece più significativo osservare l'andamento del WBGT (fig. 6). L'indice WBGT supera sempre ed ampiamente la soglia per gli operatori acclimatati per intervalli prossimi al superamento del PMV pari a +3. Per mitigare queste condizioni di grave stress termico, si potrebbero adottare alcuni accorgimenti tecnici, quali: la scelta di un abbigliamento più idoneo (riduzione dell'indice I_{cl} da 0,7 a 0,5 *clo*) e la riduzione dei tempi di esposizione con pause in ambienti riparati dalle alte temperature e con possibilità di integrare i liquidi persi dalla sudorazione. Una migliore e più efficace azione di riduzione dello stress termico potrebbe essere ottenuta in fase di progettazione dell'edificio adottando tutte quelle soluzioni tecniche (scelta dei materiali, coibentazione, ventilazione, ecc.) che consentono di ridurre l'innalzamento termico

nell'ambiente maggiormente interessato dalla presenza dagli operatori.

7. CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE

Le modalità di valutazione del microclima negli ambienti di lavoro costituiscono la base di partenza per un intervento tecnico, volto a realizzare condizioni di comfort e di benessere per gli addetti.

In particolare tale intervento si articola in quattro fasi:

1. valutazione delle condizioni ambientali del luogo di lavoro e dei parametri soggettivi dei lavoratori, che conduce all'individuazione del *PMV* e quindi alla possibilità di definire il microclima come moderato, severo caldo o severo freddo;
2. calcolo degli indici appropriati in funzione del punto precedente;
3. eventuale utilizzo di modelli di previsione delle caratteristiche dell'ambiente di lavoro, in funzione dei risultati ottenuti da brevi periodi di rilievo dei parametri ambientali;
4. proposta progettuale.

Quest'ultima è finalizzata alla realizzazione di interventi di bonifica, attuabili nei confronti dell'operatore e/o dell'intero ambiente di lavoro. In particolare è possibile cambiare il vestiario indossato, modificando la sua resistenza termica, e/o il dispendio metabolico, introducendo delle pause nei turni di lavoro o realizzando una rotazione dei compiti. Si può invece intervenire sull'ambiente di lavoro agendo su singole zone di questo o direttamente sulle sorgenti termiche. L'esposizione al calore prevede l'utilizzo di indumenti leggeri, se per una particolare lavorazione non è possibile soddisfare tale richiesta si dovrà utilizzare un indumento speciale che non impedisca la sudorazione o che abbia potere isolante adeguato.

Uno degli aspetti che meritano, a parere degli autori, un maggiore approfondimento da parte della ricerca, riguarda l'acclimatazione dei lavoratori alle temperature estreme e alla protezione dagli sbalzi di temperatura. L'acclimatazione al caldo comporta una serie di adattamenti fisiologici e psicologici durante le prime 2 settimane di esposizione. Cautele aggiuntive dovrebbero essere adottate durante questo periodo e quando lavoratori in cattiva forma fisica debbono essere esposti a condizioni di stress termico.

Per quanto concerne la situazione connessa con i lavori in cella frigorifera, quanto più elevata è la velocità dell'aria e quanto minore la temperatura nella zona di lavoro, tanto maggiore deve essere il grado di isolamento degli indumenti protettivi. Infatti la velocità dell'aria è una significativa concausa di problemi di ipotermia, e pertanto va sempre mantenuta ai livelli più bassi possibili. Una possibile soluzione tecnica di facile applicazione è quella di collegare lo spegnimento dei ventilatori delle celle frigorifere all'apertura delle porte per il passaggio dei muletti.

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).

Un fatto è certo, ovvero che le azioni cautelative da prendere in esame dipendono dalle condizioni fisiche dei lavoratori.

In pratica le principali indicazioni preventive riguardano:

- l'introduzione di una organizzazione del lavoro che limiti la durata di permanenza del lavoratore negli ambienti troppo freddi (o troppo caldi);
- l'indossare un abbigliamento idoneo a mantenere la giusta temperatura corporea e, in situazioni estreme, utilizzare dispositivi di protezione individuale adeguati, prestando particolare attenzione alla difesa di mani, piedi e testa più sensibili al freddo;
- la limitazione del fenomeno noto come "pumping effect".

Per quanto riguarda quest'ultimo occorre considerare che, generalmente, l'abbigliamento è composto da più capi e, quindi, da più strati di tessuti diversi tra i quali sono interposti strati di aria; quando le persone si muovono quest'aria, insieme a quella che entra attraverso le aperture dei capi, quali polsini e colletti, entra in movimento determinando un effetto, noto appunto come "pumping effect". Tale effetto può essere causato anche da elevati valori di velocità dell'aria, dovuti ad esempio alla presenza di vento, che possono provocare una compressione degli strati di tessuto, riducendone lo spessore con conseguente variazione sia dell'isolamento termico che della resistenza evaporativa.

BIBLIOGRAFIA

- ALFANO G., D'AMBROSIO F.R., RICCIO G. (1998). *Disagio e stress termico: effetti, normative, valutazione e controllo*. Atti Convegno dBA, Modena 17-19 settembre 1998.
- CECCHINI M., MONARCA D., NELLI S. (2005). *Indagine sul microclima nei caseifici dell'Italia centrale*. Atti Convegno dBA incontri, Microclima, aerazione e illuminazione nei luoghi di lavoro, Bologna, 13-15 settembre 2005, pp. 249-264.
- CECCHINI M., MONARCA D., PORCEDDU P.R. (2005). *Workers' safety in milking premises*. Journal Of Agricultural Safety And Health, vol. 11(3); pp. 293-300, ISSN: 1074-7583.
- COLANTONI A., DI GIACINTO S., MONARCA D., CECCHINI M., PETRELLI M. (2011). *Thermal discomfort for workers in the agro-food industry: an experimental survey in a milk processing plant*. Irish Meeting on Agriculture Occupational Safety and Health. Dublino (Irlanda), 22-24 agosto 2011.
- MARUCCI A., COLANTONI A., MONARCA D., CECCHINI M., BEDINI R. (2011). *Thermal discomfort for workers employed in livestock facilities with natural ventilation*. Irish Meeting on Agriculture Occupational Safety and Health. Dublino (Irlanda), 22-24 agosto 2011.
- MONARCA D., CECCHINI M., COLANTONI A. (2007). *Lo stress termico in ambienti severi caldi per gli operatori agricoli in campo e in serra*. Atti 13° Convegno di Igiene Industriale AIDII "Le giornate di Corvara". Corvara (BZ), 26-28 marzo 2007
- MONARCA D., CECCHINI M., NELLI S., PANARO V., SANTORO F. (2002). *Il rischio da microclima: esperienze per alcuni dei principali ambienti di lavoro agroindustriali*. Atti Convegno dBA, Modena, 25-27 settembre 2002, pp. 99-114.
- MONARCA D., PORCEDDU P.R., CECCHINI M., BABUCCI V. (2005). *La valutazione del rischio da microclima negli ambienti di lavoro agroindustriali*. Rivista di Ingegneria Agraria, 4, pp. 89-93.

Il contributo alla impostazione e allo svolgimento del lavoro va suddiviso in maniera paritetica tra gli Autori.

Abstract

Agro-industry workers are exposed to various risks, including chemical agents, noise, and many other factors. One of the most characteristic and least known risk factor is constituted by the microclimatic conditions in the different phases of work (in field, in greenhouse, etc). A typical condition is the thermal stress due to high and low temperatures during operations in dairies and milking premises. The risk is connected to a series of both environmental and physiological variables, that play an important role and involve the necessity of "objective" measurements of the microclimatic parameters in the several situations.