LA VALUTAZIONE DEL MICROCLIMA

INCAIL

L'esposizione al caldo e al freddo

Quando è un fattore di discomfort
Quando è un fattore di rischio per la salute

2018

COLLANA **SALUTE E SICUREZZA**

LA VALUTAZIONE DEL MICROCLIMA

INAIL

L’esposizione al caldo e al freddo

Quando è un fattore di discomfort
Quando è un fattore di rischio per la salute

2018

Pubblicazione realizzata da

Inail
Direzione regionale per la Campania

Responsabili scientifici
Michele del Gaudio[1], Daniela Freda[2]

Autori
Michele del Gaudio[1], Daniela Freda[2], Paolo Lenzuni[3], Pietro Nataletti[4], Raffaele Sabatino[2]

Collaborazioni
Angela Nicotera[5]

[1] Inail, Unità Operativa Territoriale di Avellino
[2] Inail, Dipartimento di innovazioni tecnologiche e sicurezza degli impianti, prodotti e insediamenti antropici
[3] Inail, Unità Operativa Territoriale di Firenze
[4] Inail, Dipartimento di medicina, epidemiologia, igiene del lavoro e ambientale
[5] Inail, Direzione regionale Campania

Immagine di copertina
Annachiara Di Salvio

per informazioni
Inail - Direzione regionale Campania
via Nuova Poggioreale - 80143 Napoli
campania@inail.it
www.inail.it

Inail - U.O.T. Avellino
Via F. Iannaccone 12/14 - 83100 Avellino
avellino-uotcvr@inail.it

© 2018 Inail
isbn 978-88-7484-114-1

Gli autori hanno la piena responsabilità delle opinioni espresse nelle pubblicazioni, che non vanno intese come posizioni ufficiali dell'Inail.
Distribuita gratuitamente. Vietata la vendita e la riproduzione con qualsiasi mezzo. È consentita solo la citazione con l'indicazione della fonte.

Tipolitografia Inail - Milano, luglio 2018

Indice

Presentazione 7

Premessa 9

Capitolo 1 - Inquadramento normativo 11
- **1.1 Gli agenti fisici** 11
- **1.2 La valutazione del rischio da agenti fisici** 12
- **1.3 Il microclima nel titolo VIII del d.lgs. 81 del 9 aprile 2008 e s.m.i.** 14
- **1.4 Il microclima nell'allegato IV del d.lgs. 81 del 9 aprile 2008 e s.m.i.** 15

Capitolo 2 - Ambienti con rischio termico e ambienti con discomfort termico 19
- **2.1 Il microclima** 19
- **2.2 Ambienti moderabili ed ambienti vincolati** 20

Capitolo 3 - Ambienti ad obiettivo comfort (moderabili) 25
- **3.1. Metodo PMV (Predicted Mean Vote)** 26
  - ***3.1.1 I principi del metodo*** 26
  - ***3.1.2 Parametri necessari per il metodo*** 30
  - ***3.1.3 Applicabilità del metodo PMV*** 32
  - ***3.1.4 Indici di comfort locale*** 33
  - ***3.1.5 Limiti di accettabilità*** 39
  - ***3.1.6 Proposta di metodo per la classificazione termica degli ambienti*** 40
  - ***3.1.7 Comfort a lungo termine*** 43
  - ***3.1.8 Sintesi e sequenza operativa*** 46
- **3.2 Misure dei parametri fisici** 46
  - ***3.2.1 Quantità oggetto della misura*** 47
  - ***3.2.2 Collocazione spaziale e numero delle postazioni di misura*** 47

3.2.3 Collocazione temporale delle misure 48
3.2.4 Durata delle misure e intervallo fra due misure successive 49
3.3 Stima dei parametri soggettivi 51
3.3.1 Metabolismo 51
3.3.2 Isolamento termico dell'abbigliamento 54
3.4 Indici di comfort per ambienti moderabili ma non moderati 57
3.4.1 Heat Index 58
3.4.2 Humidex 59
3.5 Controllo del microclima ai fini del raggiungimento del comfort 61
3.5.1 Temperatura dell'aria 61
3.5.2 Umidità relativa 62
3.5.3 Velocità dell'aria 62
3.5.4 Temperatura radiante 63

Capitolo 4 - Ambienti vincolati caldi 67
4.1 Metodo PHS (Predicted Heat Strain) 68
4.1.1 I principi del metodo 68
4.1.2 Parametri necessari per il metodo 69
4.1.3 Applicabilità del metodo 69
4.1.4 Descrittori di rischio 70
4.1.5 Limiti di accettabilità 71
4.1.6 Tempi massimi di esposizione 71
4.1.7 Pause ed esposizioni multifase 72
4.1.8 Sintesi e sequenza operativa 76
4.2 Misure dei parametri fisici 76
4.2.1 Quantità oggetto della misura 76
4.2.2 Collocazione spaziale e numero delle postazioni di misura 77
4.2.3 Collocazione temporale delle misure 77
4.3 Stima dei parametri soggettivi 78
4.3.1 Metabolismo 78
4.3.2 Isolamento termico dell'abbigliamento 81
4.4 Controllo del microclima in ambienti termici caldi 84

Capitolo 5 - Ambienti vincolati freddi 89
5.1 Metodo IREQ (Insulation REQired) 89
5.1.1 I principi del metodo 89
5.1.2 Parametri necessari per il metodo IREQ 90
5.1.3 Applicabilità del metodo IREQ 90
5.1.4 Descrittori di rischio 91
5.1.5 Limiti di accettabilità 93

5.1.6 Tempi massimi di esposizione 93
5.1.7 Pause 94
5.2 Misure dei parametri fisici 95
5.2.1 Numero di misure per postazione 95
5.2.2 Collocazione spaziale e numero delle postazioni di misura 95
5.2.3 Collocazione temporale delle misure 96
5.3 Stima dei parametri soggettivi 97
5.3.1 Metabolismo 97
5.3.2 Isolamento termico dell'abbigliamento 100
5.4 Controllo del microclima in ambienti termici freddi 102

Capitolo 6 - Strumenti di misura 107
6.1 Temperatura dell'aria (t_a) 107
6.2 Pressione del vapore acqueo – Umidità relativa (pH_2O - U.R.) 108
6.3 Temperatura media radiante (t_r) e di globo nero (t_g) 108
6.4 Velocità dell'aria (v_a) 109
6.5 Temperatura del pavimento (t_f) 110
6.6 Temperatura piana radiante (t_{pr}) 110
6.7 Taratura degli strumenti di misura 111

Capitolo 7 - Bibliografia 113
7.1 Riferimenti normativi 113
7.2 Riferimenti scientifici 114
7.3 Immagini 116

Presentazione

Le condizioni microclimatiche di un luogo di lavoro e di vita, possono interferire significativamente con le attività degli occupanti. In ambienti d'ufficio o domestici si possono creare condizioni non confortevoli che possono ridurre la produttività ma anche favorire il verificarsi di infortuni e di piccoli malesseri. Negli ambienti di lavoro in cui il ciclo produttivo richiede condizioni ambientali estreme con temperature particolarmente elevate o estremamente basse è addirittura necessario proteggere la salute dei lavoratori modificando, quando è possibile, il ciclo produttivo o realizzando adeguati sistemi di protezione collettiva e individuale. Una particolare attenzione deve essere rivolta ai luoghi di lavoro all'aperto in cui, durante la stagione estiva o durante l'inverno, i lavoratori possono essere esposti a condizioni climatiche estreme. I settori dell'agricoltura e dell'edilizia, caratterizzati dalla maggiore frequenza di infortuni e malattie professionali, sono particolarmente esposti a queste problematiche anche perché in questi settori è maggiormente diffusa la manodopera irregolare.
Benché il d.lgs. 81/08 abbia inserito il microclima nel rischi fisici da valutare ai sensi del Titolo VIII, l'assenza di uno specifico capo non fornisce, alla pari degli altri rischi come rumore, vibrazioni ecc., delle univoche indicazioni su come valutare tale rischio. La valutazione del microclima viene effettuata facendo riferimento alla normativa tecnica internazionale e nazionale basata su principi indiscussi da oltre quarant'anni. La Direzione regionale Inail Campania, avvalendosi degli esperti del settore Certificazione, Verifica e Ricerca, ha voluto realizzare questo opuscolo per fornire ai datori di lavoro, ai responsabili dei servizi di prevenzione e protezione e a tutti coloro che si occupano di prevenzione nei luoghi di lavoro, un momento di sintesi sulle attuali conoscenze e permettere loro di valutare nel migliore dei modi i rischi legati alle condizioni microclimatiche del luogo di lavoro e di realizzare le migliori azioni correttive.
.

Daniele Leone
Direttore regionale Inail Campania

Premessa

Questo documento è dedicato al microclima nei luoghi di lavoro. Il tema viene affrontato dal punto di vista dell'impatto sui soggetti esposti, contemplando tutte le casistiche possibili, dal discomfort, indotto da condizioni ambientali non ottimali, al danno alla salute.
Lo studio si concentra esclusivamente sull'analisi e quindi gli aspetti legati alla misura o all'eventuale simulazione delle condizioni ambientali, e la valutazione e quindi gli aspetti legati alla quantificazione degli effetti.
È stata esclusa la fase di gestione del rischio a meno di pochi aspetti di tipo impiantistico e organizzativo trattati in modo estremamente superficiale. Questi aspetti, che intervengono nei processi di gestione e controllo sia dell'ambiente termico trattato in questo documento sia della qualità dell'aria indoor (IAQ), saranno oggetto di un successivo quaderno. Si è scelto inoltre di non trattare aspetti di carattere fisiologico, per i quali esistono già numerosi testi di riferimento che, con diverso livello di approfondimento e quindi con diversi target di riferimento, trattano questo argomento in modo sicuramente esauriente.

Capitolo 1 - Inquadramento normativo

1.1 Gli agenti fisici

Gli agenti fisici rappresentano dei fattori, governati da leggi fisiche, che provocano una trasformazione delle condizioni ambientali nelle quali essi si manifestano.
La loro presenza determina un'immissione di energia, negli ambienti di vita e di lavoro, che, oltre i valori tollerati, risulta potenzialmente dannosa per la salute umana.
I rischi fisici contemplati nel Testo Unico della Sicurezza (d.lgs. 81 del 9 aprile 2008 e s.m.i.) riguardano il rumore, le vibrazioni meccaniche, i campi elettromagnetici, le radiazioni ottiche di origine artificiale, il microclima, gli infrasuoni, gli ultrasuoni e le atmosfere iperbariche.

Figura 1.1 - Rischi da agenti fisici

Peraltro, anche le radiazioni ottiche naturali sono ricomprese nel Testo Unico, in virtù dell'obbligo generale di valutazione di tutti i rischi (art. 28); per quanto riguarda, invece, le radiazioni ionizzanti, il Testo Unico rimanda al d.lgs. 230 del 17 marzo 1995 e s.m.i., che verrà prossimamente sostituito dal decreto di recepimento della direttiva 2013/59/Euratom.
I rischi derivanti da agenti fisici nell'ambiente lavorativo debbono essere rimossi, o ridotti il più possibile, attraverso le seguenti azioni:

- corretta progettazione e pianificazione dei processi lavorativi sul luogo di lavoro;
- riduzione della presenza di agenti fisici nell'ambiente di lavoro in base alle necessità lavorative;
- diminuzione della durata e dell'intensità di esposizione;
- restrizione al minimo del numero dei lavoratori potenzialmente esposti;

- corretta formazione ed informazione dei lavoratori;
- somministrazione di attrezzature adeguate alla specifica attività e indicazione delle relative procedure di manutenzione;
- determinazione di idonee misure tecnico-organizzative.

L'esposizione in ambiente lavorativo ad agenti di rischio di tipo fisico coinvolge in Italia milioni di lavoratori.

1.2 La valutazione del rischio da agenti fisici

I rischi da agenti fisici rappresentano l'oggetto del Titolo VIII del d.lgs. 81/2008. Nel seguito viene sintetizzata la situazione normativa inerente gli obblighi, e le relative decorrenze, inerenti il Titolo VIII del d.lgs. 81 del 9 aprile 2008 e s.m.i.
Il Capo I (Disposizioni generali) è pienamente in vigore dal 1 gennaio 2009, per tutti gli obblighi in esso richiamati ed in tutte le realtà produttive.
Va specificato che mentre tale data è la stessa anche per l'entrata in vigore del Capo II (rumore) e del Capo III (vibrazioni), con la precisazione che le modifiche introdotte dal d.lgs.106 del 3 agosto 2009 al d.lgs. 81 del 9 aprile 2008 sono in vigore dal 20 agosto 2009, per il Capo IV (campi elettromagnetici) e il Capo V (radiazioni ottiche artificiali), con le deroghe di cui all'art. 306, comma 3, il Legislatore ha previsto un'entrata in vigore differita.

Tabella 1.1 - Riferimenti legislativi

Agenti fisici	Riferimenti legislativi
Rumore	d.lgs. 81/08 e s.m.i. (Titolo VIII, Capo I; Titolo VIII, Capo II)
Vibrazioni	d.lgs. 81/08 e s.m.i. (Titolo VIII, Capo I; Titolo VIII, Capo III)
Campi elettromagnetici	d.lgs. 81/08 e s.m.i. (Titolo VIII, Capo I; Titolo VIII, Capo IV)
Radiazioni ottiche artificiali	d.lgs. 81/08 e s.m.i. (Titolo VIII, Capo I; Titolo VIII, Capo V)
Radiazioni Ionizzanti	d.lgs. 230 del 17 marzo 1995 e s.m.i.
Microclima	d.lgs. 81/08 e s.m.i. (Titolo VIII, Capo I)
Infrasuoni, Ultrasuoni	d.lgs. 81/08 e s.m.i. (Titolo VIII, Capo I)
Atmosfere iperbariche	d.lgs. 81/08 e s.m.i. (Titolo VIII, Capo I)

Relativamente ai campi elettromagnetici, l'entrata in vigore del Capo IV è avvenuta il 2 settembre 2016, a seguito dell'emanazione del d.lgs. 159 del 1 agosto 2016 che ha recepito la Direttiva 2013/35/UE (che a sua volta ha abrogato la Direttiva 2004/40/CE cui era ispirata l'originale formulazione del Capo IV). Il Capo V (radiazioni ottiche artificiali) è invece pienamente in vigore dal 26 aprile 2010.
Alla luce del d.lgs. 81 del 9 aprile 2008 e s.m.i. la valutazione del rischio di un agente fisico, come del resto previsto dall'art. 28 e in particolare, per gli agenti fisici, dagli articoli del Titolo VIII, va fondamentalmente intesa come una sezione del generale Documento di Valutazione di tutti i Rischi per la salute e sicurezza (DVR), unitamente alla *relazione tecnica*, redatta da *personale qualificato*[1], comprensiva di eventuali misurazioni, da tenersi in Azienda in vista della programmazione e dell'attuazione delle misure di prevenzione e protezione e, ovviamente, a disposizione degli organi di vigilanza.
Il Documento di Valutazione dovrà, pertanto, riportare le misure di prevenzione e protezione in essere ed indicare il programma delle misure atte a garantire nel tempo il miglioramento dei livelli di salute e sicurezza, con le relative procedure aziendali e dei ruoli dell'organizzazione che vi debbono provvedere, a cui debbono essere assegnati soggetti in possesso di adeguate competenze e poteri.
Nella valutazione del rischio di ogni agente fisico vanno indicati i seguenti elementi:

A. data certa di esecuzione della valutazione dell'agente fisico, con eventuali misurazioni;
B. dati identificativi del *personale qualificato* che ha provveduto alla valutazione;
C. dati identificativi del Medico Competente (se previsto ai sensi degli artt. 41 e 185) e del RSPP che hanno partecipato alla valutazione del rischio;
D. dati identificativi del RLS o, ove assente, dei lavoratori, consultati ai sensi dell'art. 50, comma 1, e delle modalità della relativa consultazione e informazione;
E. dati identificativi della *relazione tecnica* allegata (es.: data, estremi del protocollo, numero di pagine, ecc.) che deve contenere, almeno:
   - l'elenco delle sorgenti riconducibili agli agenti fisici e le loro principali caratteristiche connesse al rischio in esame;
   - il quadro di sintesi degli esposti all'agente fisico, suddiviso per fasce di rischio con individuazione delle aree a rischio;
   - la valutazione della presenza di rischi potenzianti (ad es.: ototossici, vibrazioni meccaniche, segnali di avvertimento, condizioni di lavoro estreme (fredde e/o umide), materiali esplosivi e/o infiammabili, ecc.) e di approfondimenti specifici per singolo agente fisico (ad es.: valutazione dell'efficienza e dell'efficacia dei DPI uditivi);
   - la valutazione dei rischi legati alla presenza di lavoratori particolarmente

1 Si definisce *personale qualificato* un operatore in possesso di esperienza specifica nel settore o di conoscenze specifiche acquisite, ad esempio, attraverso la partecipazione a specifici corsi di formazione; in assenza di ulteriori specifiche è possibile valutare l'operato del valutatore in base alla qualità dell'elaborato prodotto e in base all'aderenza alle normative cogenti e di buona tecnica.

sensibili, alla differenza di genere, all'età, alla provenienza da altri paesi ed alla tipologia contrattuale;
- le proposte relative a soluzioni preventive e protettive adottabili nelle differenti situazioni di rischio presenti nei luoghi di lavoro.

F. programma delle misure tecniche e organizzative che si adotteranno per eliminare, o ridurre, il rischio da esposizione all'agente fisico, con l'indicazione della tempistica, delle modalità e delle figure aziendali preposte alla loro attuazione.

È necessario che i Datori di lavoro, responsabili del processo di valutazione, esplicitino chiaramente i termini del *mandato* al *personale qualificato*, specie laddove esterno, e verifichino puntualmente i contenuti della prestazione affidata; tanto più che eventuali carenze della *relazione tecnica* dovranno successivamente essere gestite e risolte nel DVR.
Si segnala, che dal 31 maggio 2013 non è più possibile avvalersi della "autocertificazione" inizialmente prevista all'art. 29, comma 5, del d.lgs. 81 del 9 aprile 2008 e s.m.i., per effetto della Legge 228 del 24 dicembre 2012. Pertanto anche le aziende occupanti fino a dieci lavoratori debbono predisporre il DVR, che potrà essere redatto secondo le previsioni del D.M. 30 novembre 2012 ("Procedure standardizzate"), ferme restando le altre condizioni imposte dal Legislatore, o secondo le modalità previste dagli artt. 28 e 29, con riferimento ai singoli agenti fisici dettagliati al Titolo VIII.
Rimane quindi inalterato l'obbligo del Datore di lavoro che deve comunque effettuare la valutazione dei rischi da esposizione ad agenti fisici secondo le modalità indicate al Titolo VIII e, in particolare, a cura di *personale qualificato* che, identificate le sorgenti e gli esposti, determini in quale classe di rischio i lavoratori sono stati collocati e quali misure preventive e protettive sono state adottate e previste.

1.3 Il microclima nel titolo VIII del d.lgs. 81 del 9 aprile 2008 e s.m.i.

Il titolo VIII del d.lgs. 81 del 9 aprile 2008 e s.m.i definisce all'art. 180 il microclima come uno degli agenti di rischio fisico. Poiché, come anticipato al precedente punto 1.2, non esiste un capo del titolo VIII specificamente dedicato al microclima, a questo si applicano le disposizioni generali contenute negli articoli 181 - 186.
Si sottolinea a questo proposito il principio affermato in generale all'art. 28, e ribadito relativamente agli agenti fisici all'art. 181, che obbliga il Datore di lavoro alla valutazione di tutti i rischi per la salute e la sicurezza, incluso pertanto anche quello dovuto all'esposizione a microclima, in relazione ai quali esiste quindi l'obbligo (sanzionabile) alla valutazione ed all'identificazione delle misure preventive e protettive per minimizzare il rischio.
Sussiste inoltre l'obbligo, di cui all'art. 184, di provvedere affinché i lavoratori esposti a rischi derivanti da agenti fisici sul luogo di lavoro, e i loro rappresentanti, ven-

gano informati e formati in relazione al risultato della valutazione dei rischi. Tale obbligo assume particolare rilevanza nel caso dei lavoratori particolarmente sensibili al rischio ove una corretta informazione può condurre il lavoratore a formulare motivata richiesta di sorveglianza sanitaria come previsto dall'art. 41. A norma dell'art. 181, comma 2, la valutazione dei rischi derivanti da esposizioni ad agenti fisici è programmata ed effettuata, con cadenza almeno quadriennale, oltreché aggiornata in occasione di modifiche del processo produttivo o della organizzazione del lavoro significative ai fini della salute e sicurezza dei lavoratori.

Lo scopo che si prefigge la presente pubblicazione è quello di raccogliere gli elementi essenziali inerenti la gestione dei rischi dovuti all'esposizione alle *condizioni microclimatiche*, avendo in obiettivo di aggregare, in un contesto operativo, una serie di informazioni utili agli attori del sistema di sicurezza aziendale, Datori di lavoro e Responsabili del Servizio di Prevenzione e Protezione in primis.

1.4 Il microclima nell'allegato IV del d.lgs. 81 del 9 aprile 2008 e s.m.i.

In aggiunta alle disposizioni contenute nel titolo VIII, il d.lgs. 81 del 9 aprile 2008 e s.m.i si occupa di microclima anche in una parte dell'allegato IV (Luoghi di lavoro), a sua volta richiamato dall'art. 63 (Requisiti di salute e sicurezza), il quale richiede la conformità dei luoghi di lavoro agli elementi ivi indicati. In particolare il microclima compare ai punti 1.9.2 e 1.9.3 del citato allegato IV, che riportiamo integralmente:

1.9.2. Temperatura dei locali

1.9.2.1. La temperatura nei locali di lavoro deve essere adeguata all'organismo umano durante il tempo di lavoro, tenuto conto dei metodi di lavoro applicati e degli sforzi fisici imposti ai lavoratori.

1.9.2.2. Nel giudizio sulla temperatura adeguata per i lavoratori si deve tener conto della influenza che possono esercitare sopra di essa il grado di umidità ed il movimento dell'aria concomitanti.

1.9.2.3. La temperatura dei locali di riposo, dei locali per il personale di sorveglianza, dei servizi igienici, delle mense e dei locali di pronto soccorso deve essere conforme alla destinazione specifica di questi locali.

1.9.2.4. Le finestre, i lucernari e le pareti vetrate devono essere tali da evitare un soleggiamento eccessivo dei luoghi di lavoro, tenendo conto del tipo di attività e della natura del luogo di lavoro.

1.9.2.5. Quando non è conveniente modificare la temperatura di tutto l'ambiente, si deve provvedere alla difesa dei lavoratori contro le temperature

troppo alte o troppo basse mediante misure tecniche localizzate o mezzi personali di protezione.

1.9.2.6. Gli apparecchi a fuoco diretto destinati al riscaldamento dell'ambiente nei locali chiusi di lavoro di cui al precedente articolo, devono essere muniti di condotti del fumo privi di valvole regolatrici ed avere tiraggio sufficiente per evitare la corruzione dell'aria con i prodotti della combustione, ad eccezione dei casi in cui, per l'ampiezza del locale, tale impianto non sia necessario.

1.9.3 Umidità

1.9.3.1 Nei locali chiusi di lavoro delle aziende industriali nei quali l'aria è soggetta ad inumidirsi notevolmente per ragioni di lavoro, si deve evitare, per quanto è possibile, la formazione della nebbia, mantenendo la temperatura e l'umidità nei limiti compatibili con le esigenze tecniche.

1.5 Il microclima nelle strutture sanitarie e nelle scuole.

Per gli ambienti scolastici e per le strutture sanitarie bisognerà anche tener conto di due specifiche norme di legge :
Legge 11 gennaio 1996, n. 23.
"Norme per l'edilizia scolastica"
Decreto del Presidente della Repubblica 14 Gennaio 1997 n. 37.
"Atto d'indirizzo e coordinamento alle regioni e alle province autonome di Trento e di Bolzano, in materia di requisiti strutturali, tecnologici ed organizzativi minimi per l'esercizio delle attività sanitarie da parte delle strutture pubbliche e private".

Comfort termico e rischio termico

Capitolo 2 - Ambienti con rischio termico e ambienti con discomfort termico

2.1 Il microclima

Per microclima si intende il complesso dei parametri climatici dell'ambiente nel quale un individuo vive o lavora. L'interazione dell'individuo con l'ambiente termico che lo circonda può dar luogo ad una serie di effetti estremamente varia che spazia da aspetti di tipo percettivo (comfort/discomfort) ad aspetti di tipo prestazionale fino ad aspetti che coinvolgono elementi fisiologici e finanche le funzioni vitali dell'individuo stesso (Parsons 2003).
Differentemente da quanto avviene per la valutazione degli altri agenti fisici, la legge non disciplina questa materia se non con disposizioni di carattere generale. Indicazioni su procedure, indici di valutazione, valori limite o, ancora, caratteristiche degli strumenti di misura sono da ricercarsi nella normativa o in altri documenti tecnici, primo fra tutti quello edito dal Coordinamento tecnico per la sicurezza nei luoghi di lavoro delle Regioni e delle Province autonome.
Tali documenti, convenzionalmente, distinguono gli ambienti "moderati" da quelli "severi" secondo il seguente criterio:

1) gli ambienti "moderati" sono ambienti nei quali gli scambi termici fra soggetto e ambiente consentono il raggiungimento di condizioni prossime all'equilibrio termico, ovvero di comfort;
2) gli ambienti "severi" sono, al contrario, quelli in cui le condizioni ambientali sono tali da determinare nel soggetto esposto uno squilibrio termico tale da poter rappresentare un fattore di rischio per la sua salute.

Questa distinzione è tuttavia relativa alle condizioni che si realizzano in un ambiente (*ex-post*) e non alle condizioni che è possibile realizzare, e di conseguenza devono essere realizzate in un ambiente (*ex-ante*). Essa pertanto non coglie la distinzione fra ambienti nei quali non esistono ostacoli allo stabilirsi di condizioni di comfort ed ambienti nei quali, al contrario tali ostacoli esistono, distinzione che rappresenta l'unico vero elemento discriminante pertinente.
In generale la legge italiana non considera esposizioni professionali ad agenti fisici se non in quanto possibili elementi di rischio. Tuttavia, nel caso particolare del microclima, il d.lgs. 81/2008 contiene disposizioni in due parti chiaramente distinte:
a) nell'Allegato IV punto 1.9 il microclima viene considerato come requisito di

salute e sicurezza, sottolineando la necessità di "adeguatezza" della temperatura, dell'umidità, e della velocità dell'aria nonché la relazione tra questi parametri ed i *metodi di lavoro applicati e degli sforzi fisici imposti ai lavoratori* in un'ottica di massimizzazione del comfort;

b) nel Titolo VIII il microclima viene invece considerato come uno degli agenti fisici *che possono comportare rischi per la salute e la sicurezza dei lavoratori*. Qui sottolinea l'urgenza di intervento mirato alla minimizzazione e ove possibile alla eliminazione del rischio laddove il microclima impatta sulla salute del lavoratore.

Far coincidere la classe a) con la classe 1) "moderati" e la classe b) con la classe 2) "severi" definite in precedenza dalla normativa tecnica, è un errore. Si può giungere infatti, nel migliore dei casi ad un'interpretazione troppo ampia da parte del valutatore del concetto di "adeguatezza" con conseguente realizzazione di condizioni poco vicine a quelle del benessere anche nei casi più semplici e, nel peggiore dei casi, ad una grave sottovalutazione del rischio per la salute.

2.2 Ambienti moderabili ed ambienti vincolati

Si configura pertanto la necessità di operare una discriminazione fra due tipologie di ambienti termici, diversa da quella operata dalla normativa tecnica. Vengono così definiti:

- ambienti termicamente moderabili: ambienti nei quali non esistono vincoli in grado di pregiudicare il raggiungimento di condizioni di comfort;
- ambienti termicamente vincolati: ambienti nei quali esistono vincoli, in primo luogo sulla temperatura e sulle altre quantità ambientali, ma anche sull'attività metabolica e sul vestiario, in grado di pregiudicare il raggiungimento di condizioni di comfort.

Risulta pertanto essenziale, a monte della valutazione vera e propria, acquisire tutte le informazioni atte a fornire un quadro completo relativamente alle postazioni di lavoro occupate e ai tempi di permanenza nelle stesse; quindi prendere atto della presenza di:

- eventuali vincoli, posti dall'attività lavorativa, relativamente alle condizioni termo-igrometriche ambientali;
- eventuali vincoli, posti dall'attività lavorativa, relativamente all'abbigliamento e/o all'attività metabolica del soggetto.

La strada più opportuna per raccogliere tali informazioni è mediante una ricognizione diretta. In subordine è possibile acquisire elementi utili anche mediante documenti forniti dall'azienda alla quale fa riferimento l'ambiente di lavoro oggetto dell'indagine.

Se tali vincoli non esistono, nell'ambiente oggetto di indagine sono realisticamente perseguibili condizioni di comfort. L'ambiente termico è di conseguenza definito "moderabile" e deve essere valutato in un'ottica di perseguimento del comfort ai sensi del punto 1.9.2 dell'Allegato IV del d.lgs. 81/2008. Gli ambienti moderabili sono oggetto del capitolo 3 di questo documento.

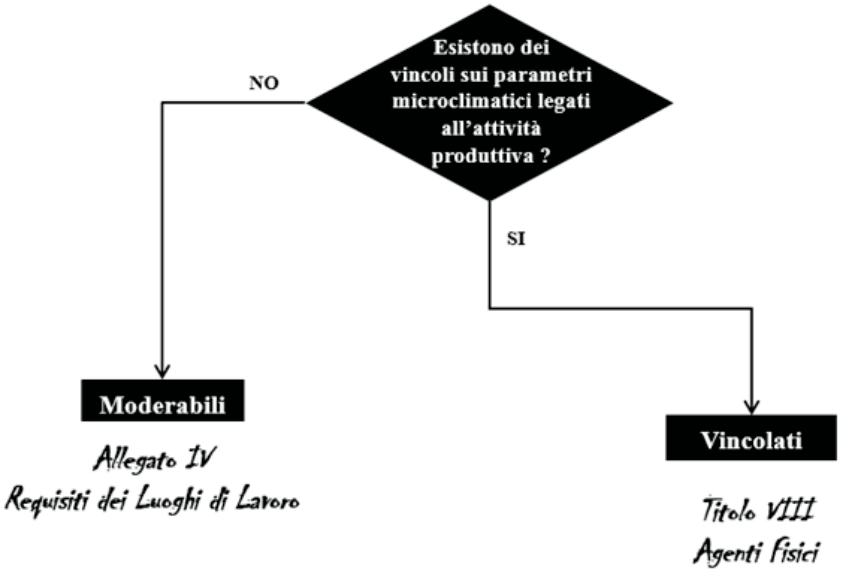

Figura 2.1 - Discriminazione radicale fra ambienti ad obiettivo comfort (Moderabili) ed ambienti ad obiettivo tutela della salute (Vincolati)

Se al contrario tali vincoli esistono, e sono in grado di pregiudicare il raggiungimento di condizioni di comfort, l'ambiente termico è definito "vincolato" e deve essere valutato in un'ottica di tutela della salute. Tali ambienti sono disciplinati dal Titolo VIII del d.lgs. 81/2008, e precisamente dal capo I, articoli 180 - 186.
Gli ambienti vincolati possono essere caldi, e quindi determinare possibili rischi da ipertermia, ovvero freddi, e quindi determinare possibili rischi da ipotermia. Tali ambienti sono oggetto, rispettivamente, del capitolo 4 e del capitolo 5 di questo documento.
La Figura 2.1 riassume il percorso logico che conduce ad identificare l'approccio corretto alla valutazione del microclima in un ambiente di lavoro.

Comfort termico

Capitolo 3 - Ambienti ad obiettivo comfort (moderabili)

Un microclima confortevole è quello che suscita nella maggioranza degli individui presenti una sensazione di soddisfazione per l'ambiente, da un punto di vista termo-igrometrico, convenzionalmente identificata col termine "benessere termo-igrometrico", ma più spesso indicata per brevità come "benessere termico" o semplicemente "benessere" o "comfort". Sulla base della definizione data nella precedente sezione 2, negli ambienti moderabili non esistono vincoli in grado di pregiudicare il raggiungimento di condizioni di comfort. La valutazione da eseguire deve pertanto mirare a verificare l'esistenza e quantificare l'entità dell'eventuale discomfort.
Il testo dell'allegato IV del d.lgs. 81/2008 contiene importanti riferimenti ad una serie di quantità fisiche (temperatura, umidità, irraggiamento solare, movimento dell'aria) di cui tener conto nella valutazione di un eventuale discomfort in relazione ai *metodi di lavoro applicati e degli sforzi fisici imposti ai lavoratori*.
Va evidenziato tuttavia che esso non contiene alcuna indicazione né riguardo agli indici sintetici da utilizzare né riguardo ad eventuali valori limite di accettabilità. Le uniche indicazioni a riguardo sono limitate a raccomandazioni generiche. Di conseguenza per tutti gli aspetti quantitativi esso rimanda alle opportune norme di buona tecnica.
Di seguito, sono discussi i principali indici validati a livello internazionale per la valutazione del comfort in condizioni ambientali differenti. In particolare nella sezione 3.1 viene approfondito l'indice PMV (Predicted Mean Vote), oggetto della norma UNI EN ISO 7730, validato per ambienti termo-igrometricamente controllati. Nella sezione 3.4 vengono invece presentati brevemente indici (Heat Index, Humidex) adeguati per ambienti moderabili ma non moderati. Si tratta di ambienti nei quali, tipicamente per deficienze organizzative/gestionali, pur in assenza di vincoli allo stabilirsi di condizioni di comfort, non è raro riscontrare forti deviazioni da condizioni di accettabilità. Non di rado anche ambienti ad alto tasso di sensibilità, ad esempio le scuole (Giovinazzo et al. 2015) vanno a far parte di questa categoria.
Si è scelto di non trattare il Comfort Adattivo, una tematica molto diffusa per la gestione di ambienti termo-igrometricamente non controllati. L'approccio adattivo viene comunemente applicato in ambienti residenziali, specie di nuova concezione, ma risulta al contrario inadeguato in ambienti di lavoro dove si presta facilmente ad

abusi. In particolare esso tende a dare enfasi ad aspetti soggettivi come l'adattabilità e la percezione di controllo, per ammettere condizioni termo-igrometriche decisamente lontane da quelle considerate confortevoli secondo l'approccio tradizionale. Per tale motivo, il Comfort Adattivo è stato escluso da questa trattazione. Si rimanda alle norme EN 16798-1 e EN 16798-2 per eventuali approfondimenti.

3.1 Metodo PMV (Predicted Mean Vote)

3.1.1 I principi del metodo

La norma tecnica UNI EN ISO 7730 è, ad oggi, il documento cardine per la valutazione del comfort termo-igrometrico. Essa fornisce un criterio di quantificazione del discomfort basato su un indice detto PMV, acronimo di Predicted Mean Vote (voto medio previsto) che rappresenta la miglior sintesi delle disposizioni dell'allegato IV: integra le quantità fisiche citate (*temperatura, umidità, irraggiamento solare, movimento dell'aria*) con gli indicatori soggettivi relativi all'abbigliamento e al dispendio metabolico del soggetto (*metodi di lavoro applicati e sforzi fisici imposti*).
Il vantaggio del PMV è che esso, basandosi su considerazioni strettamente fisiologiche e essendo stato validato su un campione significativo di soggetti, ripropone su basi oggettive una sensazione di soddisfazione che per sua stessa natura è intrinsecamente soggettiva.
Di fatto la procedura si fonda sull'esistenza di una relazione biunivoca fra bilancio energetico del corpo umano, e sensazione termica, con associato comfort o discomfort.
In forma sintetica, il bilancio energetico del corpo umano può essere descritto dall'equazione:

$$S = M - W \pm C_{RES} \pm E_{RES} \pm K \pm C \pm R - E \qquad (3.1)$$

nella quale:

M potenza termica prodotta dai processi metabolici (nelle più recenti normative viene usato il termine "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);
S differenza tra la potenza termica acquisita e dissipata dal corpo umano.

I termini C_{RES}, E_{RES}, K, C, R compaiono nella (3.1) con il segno + se nello scambio ter-

mico si ha guadagno netto di energia, e viceversa sono preceduti dal segno - se si ha perdita netta di energia.
Sulla base di migliaia di prove sperimentali condotte in una molteplicità di condizioni ambientali, è stato dimostrato che la sensazione di massimo comfort è associata alla condizione di equilibrio energetico (omeotermia) del corpo umano, mentre sensazioni di crescente discomfort risultano associate a condizioni via via più distanti dall'equilibrio. Matematicamente la relazione che lega l'indice PMV allo squilibrio termico è

$$PMV = (0{,}303\ e^{-0{,}036M} + 0{,}028) \times S \qquad (3.2)$$

ovvero:

S = 0 → viene stabilita la condizione di omeotermia con conseguente sensazione termicamente neutra.

S > 0 → la potenza termica in ingresso è maggiore di quella in uscita, con conseguente sensazione di caldo.

S < 0 → la potenza termica in ingresso è minore di quella in uscita, con conseguente sensazione di freddo.

Il significato di questa equivalenza è che il confort globale è intimamente legato al mantenimento della neutralità termica del corpo umano attraverso una fisiologica risposta del sistema di termoregolazione. Quest'ultimo ha il compito di mantenere la temperatura del nucleo corporeo costante o comunque di contenerne le oscillazioni entro un intervallo molto ristretto compatibile con l'espletamento ottimale delle funzioni vitali (McArdle et al. 2014).
Per definizione il PMV, rappresenta il giudizio medio potenzialmente espresso da un campione infinito di soggetti di diversa età, sesso, etnia, relativo al complesso delle variabili microclimatiche e dei parametri individuali che caratterizza l'ambiente in esame. Esso viene espresso in una scala di sensazione termica a 7 punti (-3 = molto freddo ..... 0 = neutro ..... +3 = molto caldo).

+ 3	Hot
+ 2	Warm
+ 1	Slightly warm
0	Neutral
– 1	Slightly cool
–2	Cool
– 3	Cold

Figura 3.1 - Corrispondenza fra sensazione termica e PMV secondo la scala ASHRAE a 7 punti

Poiché si tratta di un giudizio medio, esso implica l'esistenza di una variabilità nella risposta individuale. In pratica tale variabilità implica che anche per un gruppo di individui esposti ad identiche condizioni microclimatiche, e che eseguono la stessa attività utilizzando lo stesso abbigliamento, non è possibile individuare una situazione ideale, valida per tutti.

Tabella 3.1 - Distribuzione della risposta individuale in corrispondenza di diversi valori di PMV (UNI EN ISO 7730 Tabella 2)

PMV	PPD	Persons predicted to vote [a] %		
		0	−1, 0 or +1	−2, −1, 0, +1 or +2
+2	75	5	25	70
+1	25	30	75	95
+0,5	10	55	90	98
0	5	60	95	100
−0,5	10	55	90	98
−1	25	30	75	95
−2	75	5	25	70

[a] Based on experiments involving 1 300 subjects.

La Tabella 3.1 illustra la distribuzione delle risposte individuali, quantificate mediante la sensazione termica espressa nella scala ASHRAE a 7 punti (Figura 3.1) in funzione del PMV. La tabella illustra chiaramente che il benessere termico è una sensazione soggettiva largamente ma non universalmente condivisa: anche per valori di PMV che individuano una sensazione complessiva di caldo/freddo (PMV = ±1), una frazione non piccola di soggetti (30%) esprime un giudizio neutro. Viceversa per PMV = 0, il 35% dei soggetti esprime un voto pari ±1 dichiarando in tal modo una sensazione di leggero caldo/freddo.

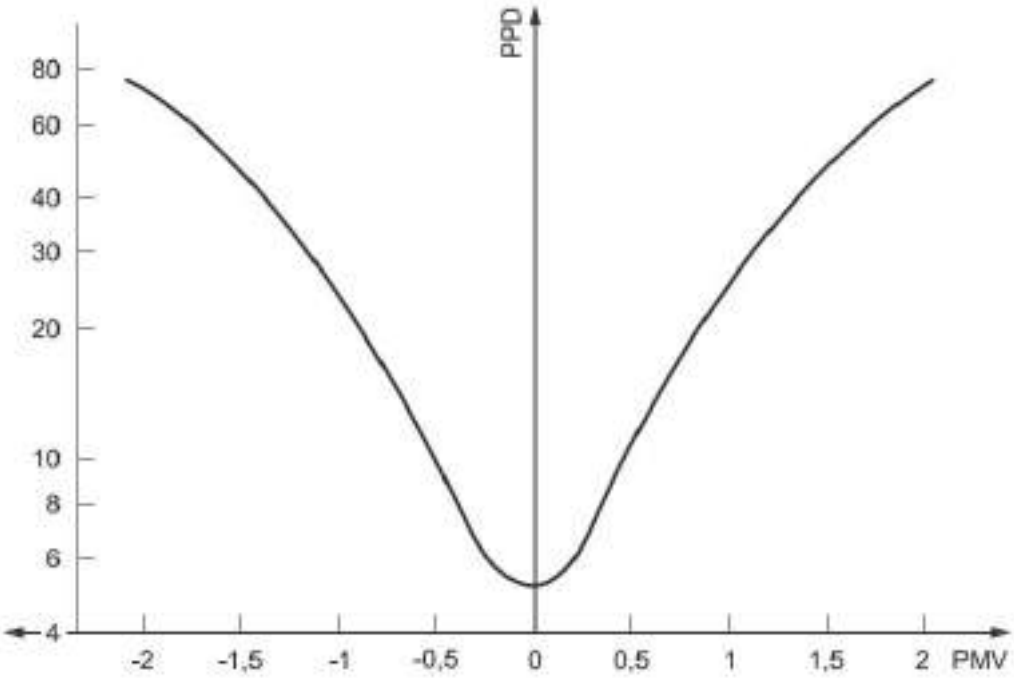

Figura 3.2 - La percentuale prevista di insoddisfatti PPD in funzione del voto medio previsto (PMV) (UNI EN ISO 7730, Figura 1)

Questo concetto è esplicitato mediante la quantità PPD, acronimo di Predicted Percentage of Dissatisfied. Il PPD indica la percentuale di soggetti che si ritengono insoddisfatti dalle condizioni microclimatiche in esame, ovvero quelli il cui giudizio termico è rappresentato dai voti in valore assoluto maggiori o uguali a 2.
La relazione fra PPD e PMV, mostrata nella Figura 3.2, è approssimata dalla espressione analitica:

$$PPD = 100 - 95 \times \exp -(0{,}03353 \times PMV^4 + 0{,}2179 \times PMV^2) \qquad (3.3)$$

dalla quale si deduce che esiste un valore minimo di PPD pari al 5% in corrispondenza di PMV = 0. Va sottolineato che poiché il PPD è funzione soltanto del PMV, esso non contiene alcuna informazione aggiuntiva sull'ambiente.

3.1.2 Parametri necessari per il metodo

In prima approssimazione i termini che compaiono nella equazione (3.1) possono essere espressi complessivamente in funzione di soltanto sei parametri, di cui quattro sono quantità fisiche e vengono identificate come parametri ambientali e due risultano descrittori di specifiche caratteristiche dell'individuo e sono identificati come parametri individuali. La Tabella 3.2 ne riassume denominazioni, simboli ed unità di misura.

Tabella 3.2 - Parametri ambientali ed individuali che caratterizzano il rapporto individuo-ambiente

Parametri	Quantità	Simbolo	Unità di misura
FISICI	temperatura dell'aria	t_a	°C o K
	temperatura media radiante	t_r	°C o K
	pressione parziale del vapore acqueo	p_a	Pa (1 Pa = 1 N/m^2)
	velocità relativa dell'aria	v_a	m/s
INDIVIDUALI	attività metabolica (ovvero dispendio metabolico ovvero metabolismo energetico)	M	W/m^2 o met (1 met = 58,2 W/m^2) pari a 104,8 W per la superficie corporea standard di un individuo adulto (1,8 m^2)
	isolamento termico del vestiario	I_{cl}	m^{2}K/W o clo (1 clo = 0,155 m^{2}K/W)

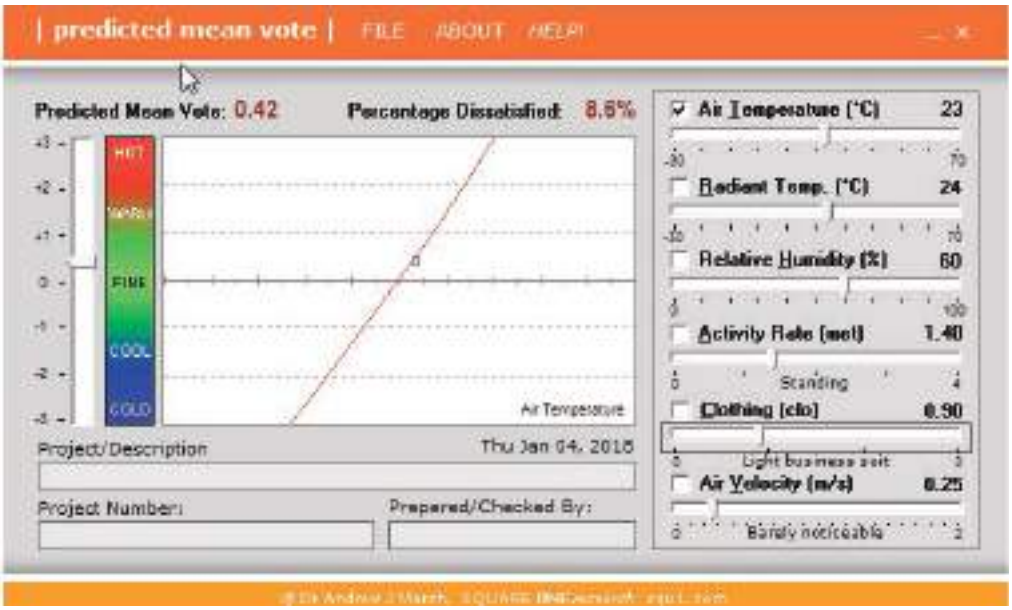

Figura 3.3 - Schermata del software "PMV_Tool"

Il calcolo dell'indice PMV/PPD, è completamente basato sulla misura e/o sulla stima delle quantità contenute nella Tabella 3.2. Esso tuttavia consiste nella soluzione di un'equazione algebrica piuttosto complessa che richiede metodi iterativi. Pertanto, ancorché concettualmente fattibile, di rado essa viene risolta con metodi analitici diretti. Il calcolo del PMV viene invece più comunemente eseguito mediante software:

- fornito a corredo di una centralina di misura;
- freeware (es. PMV_Tool, vedi Figura 3.3);
- on-line (es. http://comfort.cbe.berkeley.edu/, vedi Figura 3.4).

Figura 3.4 - Schermata del software on-line "Thermal Comfort Tool"

È altresì possibile calcolare gli indici PMV e PPD utilizzando (ad esempio all'interno di una macro di Excel) il codice di calcolo (BASIC) fornito nell'appendice D della norma UNI EN ISO 7730.

3.1.3 Applicabilità del metodo PMV

Come tutti gli indici basati sull'analisi di dati sperimentali, l'indice PMV risulta validato soltanto sotto certe condizioni. In particolare, secondo quanto indicato nella stessa norma UNI EN ISO 7730, il metodo PMV risulta applicabile soltanto se:

a) l'ambiente può essere definito "moderato", ovvero se la distanza dalle condizioni ideali di comfort, così come risultante dalle misurazioni, è moderata. Quantitativamente ciò richiede che il valore di PMV risulti in valore assoluto inferiore a 2;
b) i quattro parametri ambientali (t_a, t_r, p_a, v_a) e le due quantità soggettive (M, I_{cl}) sono all'interno dei rispettivi intervalli di applicabilità indicati nel prospetto B.1 della norma, qui riportato nella Tabella 3.3.

In particolare se risulta non soddisfatta la condizione a), ovvero in condizioni in cui la percentuale prevista di insoddisfatti è molto elevata (oltre il 75%), l'associazione del PMV con la sensazione di comfort termico non è adeguatamente supportata da evidenze sperimentali. Ambienti di questo tipo, benché in linea di principio moderabili, non sono moderati e di conseguenza non possono essere valutati mediante il metodo PMV. Essi vengono identificati come "ambienti a forte discomfort". Da un punto di vista bio-fisico, negli ambienti a forte discomfort l'indice PMV perde progressivamente di significato:

- negli ambienti caldi per l'insufficiente sensibilità all'umidità ambientale;
- negli ambienti freddi per la sottostima del rischio termico che si manifesta spesso già in prossimità di PMV = -2.

Tabella 3.3 - Intervalli di applicabilità dei parametri ambientali ed individuali nel calcolo del PMV

Parametri	Quantità	Simbolo	Unità di misura
FISICI	t_a	°C	+10 ÷ +30
	t_r	°C	+10 ÷ +40
	p_a	Pa	0 ÷ 2700
	v_a	m/s	0 ÷ 1
INDIVIDUALI	M	met	0,8 ÷ 4
	I_{cl}	clo	0 ÷ 2

La Figura 3.5 fornisce un quadro d'insieme del percorso di valutazione degli ambienti moderabili, sia quelli moderati (mediante il metodo PMV) sia quelli non moderati.

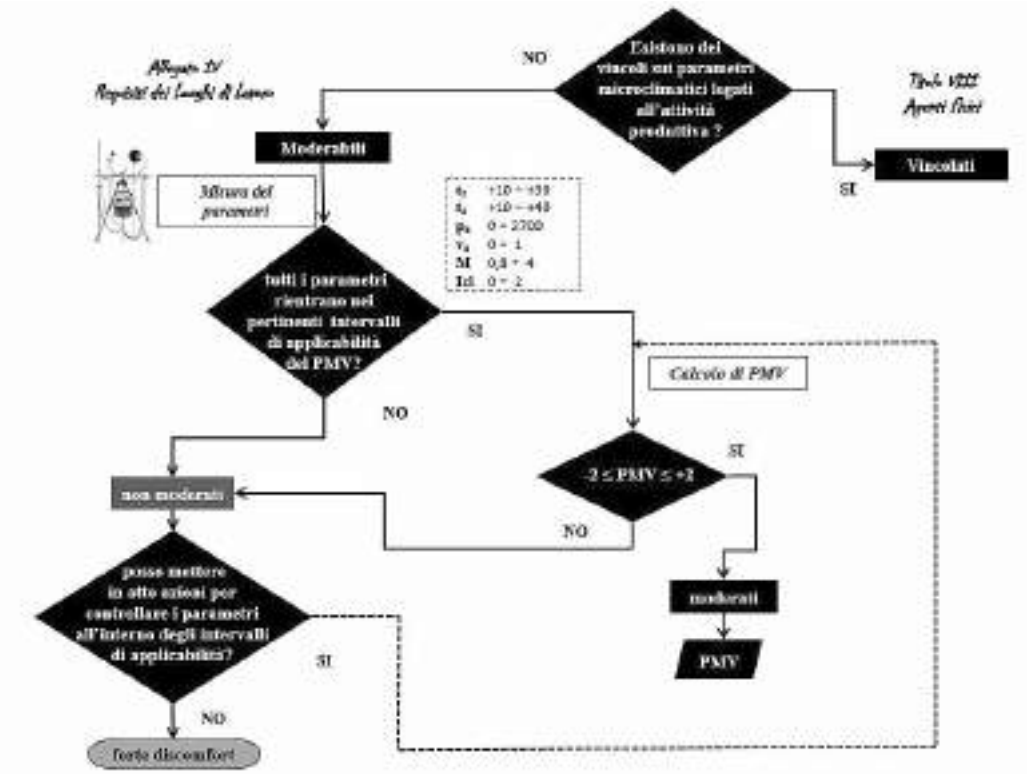

Figura 3.5 - Percorso di valutazione degli ambienti moderabili

Finora non sono stati sviluppati metodi standardizzati per la quantificazione del discomfort in questi ambienti. Una sintetica illustrazione di possibili metodologie di valutazione è presentata nella sezione 3.4. Per ulteriori approfondimenti si vedano ad esempio i lavori di del Gaudio e Lenzuni (2006a e 2006b).

3.1.4 Indici di comfort locale

Accanto al PMV che, in quanto associato al bilancio energetico del corpo umano è un indice intrinsecamente globale, la norma UNI EN ISO 7730 contiene anche alcuni indici detti di discomfort "locale". Il discomfort locale è legato alla limitazione degli scambi termici localizzati in specifiche aree, ovviamente superficiali, del corpo umano. La situazione ottimale si raggiunge annullando ogni possibile causa

che possa indurre nel soggetto sensazioni di discomfort. La norma UNI EN ISO 7730 definisce quattro diversi fattori di discomfort "locale" legati alla presenza di:

- correnti d'aria;
- differenze verticali di temperatura;
- pavimenti con temperatura eccessivamente alta o bassa;
- asimmetrie radianti.

CORRENTI D'ARIA

Le correnti d'aria sono la più comune causa di discomfort locale. In ambienti termicamente confortevoli si possono trovare postazioni di lavoro esposte ad un flusso di aria diretta, percepita solo localmente come disturbo. È frequente che le unità locali di trattamento aria (ventilconvettori, fan coil ecc.) e la postazione fissa di lavoro siano posizionati senza aver cura di questo aspetto. La norma UNI EN ISO 7730 contiene un'equazione per il calcolo della quantità "Draught Rate" (DR) corrispondente alla percentuale di soggetti disturbati

$$DR = (34 - t_{a,l}) \times (v_{a,l} - 0{,}05)^{0.62} \times (0{,}37\, v_{a,l}\, Tu + 3{,}14) \qquad (3.4)$$

$t_{a,l}$ = temperatura locale dell'aria [°C];
$v_{a,l}$ = velocità locale media dell'aria [m/s];
Tu = turbolenza locale [%], definita come il rapporto fra la deviazione standard e la media della velocità dell'aria.

Si nota che il calcolo di DR mediante l'equazione (3.4) richiede la conoscenza della temperatura locale ($t_{a,l}$) e della velocità locale dell'aria ($v_{a,l}$). Queste quantità vanno pertanto stimate nel punto in cui il flusso d'aria presunto disturbante incide sul soggetto.
Come chiarito dalla norma UNI EN ISO 7730, questo approccio si applica soltanto ad individui seduti, con attività metabolica leggera, e con sensazione termica approssimativamente neutra. Il modello fornisce previsioni affidabili per correnti che impattano la zona del collo. Al livello delle braccia o delle gambe il discomfort è normalmente inferiore a quello previsto dalla equazione (3.4), così come inferiore è il discomfort se l'attività del soggetto è significativa (superiore a 1,2 met).
L'equazione (3.4) si applica per temperature comprese fra 20 e 26°C, velocità dell'aria comprese fra 0,05 e 0,5 m/s (per $v_{a,l}$ inferiore a 0,05 m/s DR viene imposto pari a 0), e turbolenze comprese fra 10 e 60% (se questa quantità non è conosciuta, può essere utilizzato un valore pari al 40%). La Figura 3.6 mostra la percentuale di insoddisfatti da correnti d'aria per diversi valori della velocità temperatura e della temperatura del flusso d'aria.
Uno studio dell'importanza della direzione del flusso nel determinare il disturbo è stato presentato da Lenzuni, Freda e del Gaudio 2011.

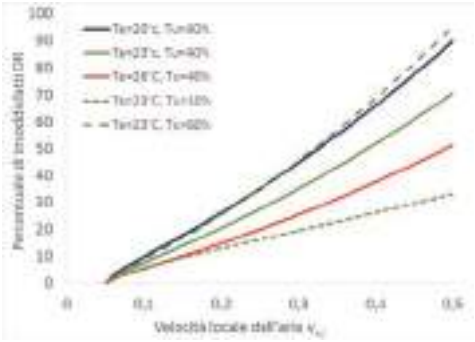

Figura 3.6 - Percentuale di insoddisfatti da correnti d'aria per diversi valori di velocità e di temperatura del flusso d'aria

DIFFERENZA VERTICALE DI TEMPERATURA

Per il discomfort dovuto ad una differenza verticale di temperatura fra la zona della testa e la zona delle caviglie $\Delta t_{a,v}$, è possibile stimare la percentuale di insoddisfatti PD dalla Figura 3.7, o mediante l'equazione (3.5a), entrambe estratte dalla norma UNI EN ISO 7730. Si richiede che la differenza verticale di temperatura sia inferiore ad 8°C.

$$PD = \frac{100}{1+\exp(5{,}76-0{,}856 \times \Delta t_{a,v})} \qquad (3.5a)$$

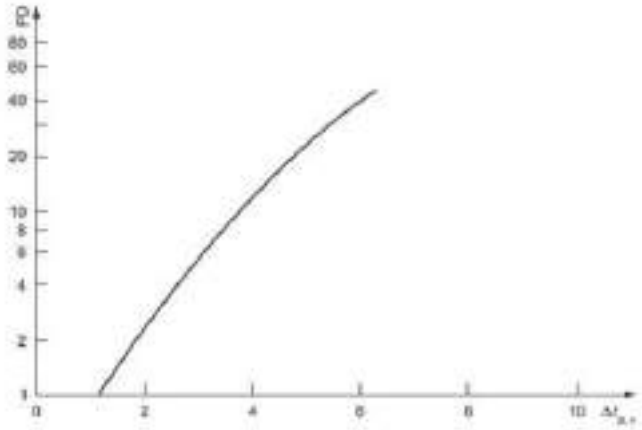

Figura 3.7 - Percentuale di insoddisfatti per la differenza verticale di temperatura fra testa e caviglie (UNI EN ISO 7730, Figura 2)

TEMPERATURA DEL PAVIMENTO

Per il discomfort dovuto alla temperatura del pavimento t_f è possibile stimare la percentuale di insoddisfatti PD dalla Figura 3.8, ovvero mediante l'equazione (3.5b), sotto la condizione (5°C < t_f < 35°C).

$$PD = 100 - 94 \times \exp(-1{,}387 - 0{,}118 \times t_f - 0{,}0025 \times t_f^2) \quad (3.5b)$$

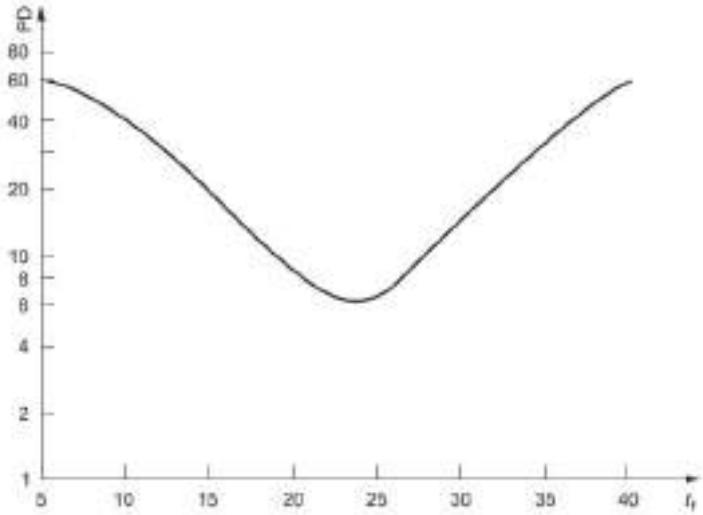

Figura 3.8 - Percentuale di insoddisfatti da pavimenti caldi o freddi (UNI EN ISO 7730, Figura 3)

ASIMMETRIA RADIANTE

Per il discomfort dovuto ad una asimmetria radiante è possibile stimare la percentuale di insoddisfatti PD dalla Figura 3.9, ovvero mediante le equazioni (3.5c – 3.5f), nelle quali Δt_{pr} è la differenza fra le temperature di due superfici piane contrapposte. Nel dettaglio si ha:

per l'asimmetria radiante da soffitto caldo (warm ceiling) ($\Delta t_{p,r}$ < 23°C):

$$PD = \frac{100}{1+\exp(2{,}84-0{,}174 \times \Delta t_{pr})} - 5{,}5 \qquad (3.5c)$$

per l'asimmetria radiante da parete fredda (cool wall) ($\Delta t_{p,r}$ < 15°C):

$$PD = \frac{100}{1+\exp(6{,}61-0{,}345 \times \Delta t_{pr})} \qquad (3{,}5d)$$

per l'asimmetria radiante da soffitto freddo (cool ceiling) ($\Delta t_{p,r}$ < 15°C):

$$PD = \frac{100}{1+\exp(9{,}93-0{,}50 \times \Delta t_{pr})} \qquad (3.5e)$$

per l'asimmetria radiante da parete calda (warm wall) ($\Delta t_{p,r}$ < 35°C):

$$PD = \frac{100}{1+\exp(3{,}72-0{,}052 \times \Delta t_{pr})} - 3{,}5 \qquad (3.5f)$$

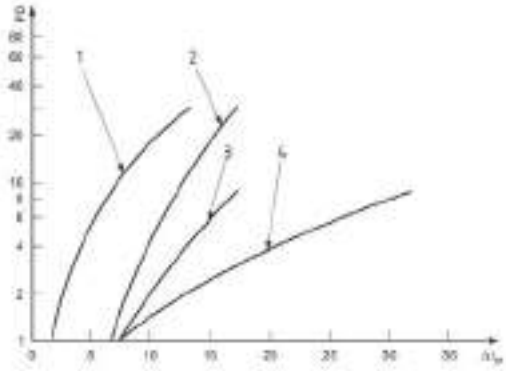

Figura 3.9 - Percentuale di insoddisfatti da asimmetria radiante. 1-soffitto caldo; 2-parete fredda; 3-soffitto freddo; 4-parete calda (UNI EN ISO 7730, Figura 4)

3.1.5 Limiti di accettabilità

Appurata l'applicabilità del metodo mediante il rispetto delle condizioni a) e b) esplicitate nella sezione 3.1.3, effettuate le misure ed eseguito il calcolo del PMV ed eventualmente di uno o più degli indici di discomfort locale, affinché l'ambiente possa ritenersi "confortevole", secondo la UNI EN ISO 7730, è necessario che siano rispettati opportuni valori limite.
Poiché il discomfort, al contrario del rischio, non si determina a seguito di processi cumulativi di guadagno/perdita di energia, ma al contrario si manifesta in tempi brevi, esso può essere identificato già a valle di una singola determinazione.
La norma UNI EN ISO 7730 contiene valori limite di accettabilità (Tabella 3.4) sia per l'indice PMV di comfort globale sia per i quattro indici di discomfort locale. Un ambiente termico moderato viene considerato confortevole secondo la norma UNI EN ISO 7730 quando sono simultaneamente soddisfatti i criteri di confort globale e locali ovvero se:

a) PMV risulta in valore assoluto pari o inferiore all'opportuno valore limite di accettabilità;
b) ciascuno degli indici di discomfort locale risulta inferiore al proprio limite di accettabilità.

È impossibile prevedere esattamente la percentuale di individui complessivamente insoddisfatti dai fattori di discomfort locale, in quanto sono spesso gli stessi soggetti a dimostrarsi sensibili ai diversi fattori. In questo senso, le percentuali di insoddisfatti dovute a cause diverse non vanno mai sommate.

Tabella 3.4 - Limiti di accettabilità per il comfort termico-igrometrico (UNI EN ISO 7730, Tabella A.1)

Category	Thermal state of the body as a whole		Local discomfort			
	PPD %	PMV	DR %	PD % caused by		
				vertical air temperature difference	warm or cool floor	radiant asymmetry
A	< 6	− 0,2 < PMV < + 0,2	< 10	< 3	< 10	< 5
B	< 10	− 0,5 < PMV < + 0,5	< 20	< 5	< 10	< 5
C	< 15	− 0,7 < PMV < + 0,7	< 30	< 10	< 15	< 10

Si nota immediatamente come nella Tabella 3.4 i valori limite siano assegnati separatamente per tre diverse categorie (A B C). Tuttavia né la norma UNI EN ISO 7730 né alcun altro standard tecnico contengono criteri utili per l'assegnazione di un ambiente e/o di una data condizione lavorativa all'una o all'altra delle tre cate-

gorie. Nella successiva sezione 3.1.6 viene presentata una proposta di metodo di classificazione.

3.1.6 Proposta di metodo per la classificazione termica degli ambienti

Un metodo per operare una oggettiva classificazione termica degli ambienti ai fini della identificazione della corretta categoria, e quindi del corretto intervallo di accettabilità da utilizzare ai fini della valutazione del comfort, è stato sviluppato negli ultimi anni, partendo dalle indicazioni presentate nella tabella 3 della EN 16798-2, qui riportate nella Tabella 3.5. Il lavoro di del Gaudio, Freda e Lenzuni (2010) contiene la presentazione dettagliata del metodo, e da tale lavoro sono estratte le tabelle presentate in questa sezione.
Innanzitutto va sottolineato il fatto che la EN 16798-1 e la EN 16798-2 articolano gli ambienti su quattro categorie e non su tre, come invece fa la UNI EN ISO 7730. I limiti di accettabilità delle categorie che la EN 16798-1 e la EN 16798-2 indicano con I II e III coincidono con i limiti che la UNI EN ISO 7730 propone per le categorie A B e C, stabilendo in tal modo una precisa corrispondenza biunivoca. Di conseguenza la categoria IV della EN 16798-1 e EN 16798-2 si configura come una categoria aggiuntiva.
Nella Tabella 3.5 risultano di particolare importanza:

1) l'associazione delle prime tre categorie con altrettanti livelli di "aspettativa" termica;
2) l'associazione esplicita della categoria I con individui con requisiti termici speciali (disabili, malati, bambini, anziani);
3) l'indicazione che la categoria IV risulta accettabile soltanto "per una parte limitata dell'anno".

Tabella 3.5 - Definizione qualitativa delle categorie

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

Il metodo sviluppato per la classificazione termica degli ambienti è di fatto un tentativo per rendere quantitativi, e quindi oggettivi, i criteri presentati nella Tabella 3.5, che in quanto qualitativi si prestano ad inevitabili interpretazioni e quindi ad un'ampia variabilità fra i diversi soggetti che si trovano ad applicarla in diversi contesti. Esso si basa su tre elementi ai quali risultano assegnati altrettanti fattori:

- la sensibilità termica del soggetto (F_S),
- l'accuratezza del compito svolto (F_A),
- la praticabilità delle soluzioni tecniche (F_T).

Sensibilità termica

Il fattore di sensibilità termica del soggetto (F_S) è determinato secondo la seguente Tabella 3.6:

Tabella 3.6 - Fattore di sensibilità termica

Individuo	Fattore di sensibilità F_S
Età y < 14 anni	$F_S = 7{,}5 + 2{,}5 \times \tanh\left(\frac{7-y}{3}\right)$
Età y > 60 anni	$F_S = 7{,}5 + 2{,}5 \times \tanh\left(\frac{y-72}{6}\right)$
Disabili o soggetti affetti da handicap motorio	10
Donne in gravidanza	8
Tutti gli altri	5
Presenza di patologie che riducono la termoregolazione del soggetto	+2

Accuratezza del compito

Per la determinazione del fattore di accuratezza del compito (F_A) è stata ricavata una tabella con criterio analogo alla norma tecnica UNI EN 12464-1 che indica le necessità di illuminazione dei luoghi di lavoro. La Tabella 3.7 riporta un estratto, mentre la versione completa è reperibile nel lavoro di del Gaudio, Freda e Lenzuni (2010).

Tabella 3.7 - Fattore di accuratezza dell'attività

Attività	Fattore di accuratezza F_A
attività artigianali	
artigiano ed operaio	6
artigiani e operai specializzati	6/8
artigiano ed operaio specializzato delle lavorazioni comportanti rischi particolari per la salute	8
cliente	4
addetto alle pulizie	4
guardarobiere	2
assistente di sala	4
portiere/custode	4/6
addetto alla security	6/8
addetto al magazzino/carico e scarico merci	4
barbiere	6

Tabella 3.8 - Fattore di manipolabilità tecnica

Tipologia di edificio	Manipolabilità	Fattore tecnico F_T
Edificio in cemento armato e in acciaio	Completa	8-10
Edificio prefabbricato	Forte	5-7
Edificio di pietra/mattoni	Limitata	3-5
Edificio con vincoli storici	Nulla	2

La "praticabilità" di soluzioni di manipolazione termica (condizionamento o riscaldamento) dell'ambiente, viene quantificata mediante il descrittore F_T, associato all'ambiente nel quale avviene l'esposizione. Essa assume un valore più alto quan-

do non esistono seri impedimenti alla realizzazione di condizioni di comfort, mentre assume un valore più basso quando tali impedimenti esistono. La Tabella 3.8 contiene i valori di F_T attribuiti alle diverse tipologie di ambienti.
I tre fattori così quantificati vengono opportunamente pesati e combinati mediante l'algoritmo

$$F_C = (F_S)^{5/3} \times (F_A)^{4/3} \times (F_T)^1 \qquad (3.6)$$

Il valore Fc permette di individuare la categoria da assegnare all'ambiente o alla specifica condizione lavorativa presa in esame:

- 3000 < Fc ≤ 10000 classe A
- 500 < Fc ≤ 3000 classe B
- 0 < Fc ≤ 500 classe C

Seppure privo di valenza normativa, il criterio basato sul punteggio F_C consente di assegnare a qualsiasi situazione microclimatica una categoria (A B C) e di conseguenza stabilire quali siano i corretti limiti di accettabilità (Tabella 3.4).
Negli ambienti in cui coesistono individui con sensibilità diverse e/o che eseguono compiti che richiedono una diversa accuratezza, esistono due possibilità:

1) se fattibile, si realizzano condizioni termo-igrometriche diverse in zone diverse, ovvero ad eseguire una partizione dello spazio che assicuri ai diversi individui le specifiche condizioni di comfort;
2) altrimenti, per il principio di maggior cautela, si suggerisce di utilizzare per tutti i soggetti presenti la classe di comfort più elevata.

In ultimo va sottolineato come, in una procedura rigorosa che tenesse conto delle incertezze sia sui parametri soggettivi che su quelli ambientali, l'assegnazione alla classe A di un ambiente risulterebbe assai difficoltosa per non dire impossibile (d'Ambrosio et al. 2011a). Tuttavia, alla luce dell'assenza nel testo di legge, di qualsiasi riferimento all'incertezza nella valutazione del comfort (come pure del rischio) termico, è per il momento possibile ignorare questo problema.

3.1.7 Comfort a lungo termine

L'appendice H della norma UNI EN ISO 7730 introduce il concetto di comfort termico a lungo termine e presenta, ancorché in modo sommario, diversi metodi con i quali quantificare il comfort termico integrandolo su un intero anno. Tuttavia essa nulla dice riguardo alla frazione dell'anno durante la quale il superamento dei limiti sia tollerato né riguardo all'entità del superamento stesso ritenuta accettabile.

Tabella 3.9 - Intervalli raccomandati (di progetto) dalle EN 16798-1 e EN 16798-2

Categoria	PPD (%)	PMV
I	< 6	-0,2 < PMV < +0,2
II	< 10	-0,5 < PMV < +0,5
III	< 15	-0,7 < PMV < +0,7
IV	< 25	-1 < PMV < +1

Informazioni utili ai fini della precisazione di questo concetto sono contenute nella EN 16798-1 e nella EN 16798-2. Come già osservato all'inizio della sezione 3.1.6, gli intervalli raccomandati nelle EN 16798-1 e EN 16798-2 in ambito comfort termico (vedi Tabella 3.1.9) coincidono perfettamente, per le prime tre categorie, con quelli indicati nella UNI EN ISO 7730 (Tabella 3.4), a parte il fatto che le categorie sono identificate con I II III invece che con A B C. La EN 16798-1 e la EN 16798-2 contengono inoltre come elemento innovativo l'introduzione della categoria IV (assente nella UNI EN ISO 7730), la quale tuttavia risulta accessibile soltanto per una frazione del tempo complessivo di esposizione, come esplicitamente indicato nella Tabella 3.5.
Si è pertanto deciso di ritenere accettabili, per un ambiente di categoria C, non soltanto valori di PMV compresi nell'intervallo (-0,7 < PMV < +0,7), ma anche valori di PMV compresi nell'intervallo (-1 < PMV < +1) indicato nella EN 16798-1 e nella EN 16798-2 per la categoria IV, limitatamente ad una frazione minoritaria del tempo di esposizione. Riguardo alla quantificazione di tale "frazione minoritaria" di tempo nella quale accettare questa che di fatto è una deroga alle definizioni date nella UNI EN ISO 7730, è stato assunto un valore del 10%, in coerenza con il fatto che tale valore definisce spesso la soglia di accettabilità in diversi ambiti della UNI EN ISO 7730.
È importante sottolineare che la deroga agli intervalli di accettabilità definiti nella UNI EN ISO 7730 riguarda soltanto gli ambienti di categoria C. In considerazione della maggior tutela che si intende assicurare negli ambienti di categoria A e B, si ritiene infatti inopportuno, sebbene l'appendice H della UNI EN ISO 7730 nulla dica in proposito, estendere agli ambienti di queste due categorie la deroga in base alla quale condizioni anche esterne all'intervallo originale possono essere ritenute accettabili, se limitate ad una piccola frazione dell'anno.
La Figura 3.10 sintetizza il percorso che conduce all'identificazione dei corretti limiti di accettabilità per gli ambienti moderabili.

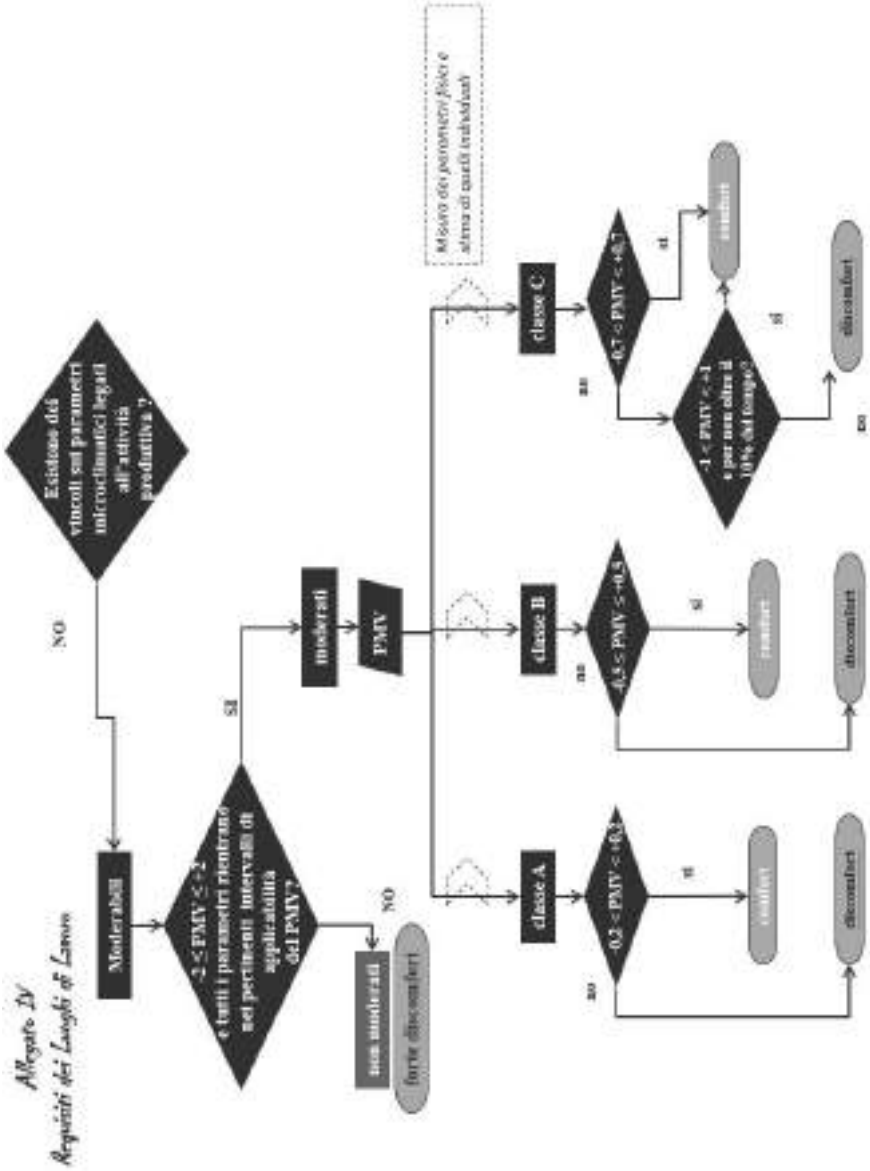

Figura 3.10 - Diagramma di flusso degli ambienti termici moderabili

3.1.8 Sintesi e sequenza operativa

La sequenza operativa per la valutazione del discomfort in ambienti moderati è la seguente:

1) identificazione dell'ambiente di lavoro come moderabile, escludendo eventuali vincoli;
2) identificazione delle postazioni di misura e del corretto momento di misura;
3) verifica della compatibilità dei valori delle quantità fisiche e dei parametri individuali con l'intervalli di applicabilità del metodo PMV;
4) calcolo dell'indice PMV;
5) verifica della presenza di elementi di possibile discomfort locale e conseguente misura degli indici di discomfort locale;
6) individuazione della categoria applicabile (A B C);
7) determinazione dei corretti limiti di accettabilità per il PMV e eventualmente per i fattori di discomfort locale;

7a) se i limiti risultano rispettati, l'ambiente è considerato confortevole;
7b) se almeno un limite non risulta rispettato, occorre individuare le opportune azioni necessarie per garantire condizioni di comfort.

3.2 Misure dei parametri fisici

Per agenti fisici quali rumore e vibrazioni la norma tecnica che stabilisce i descrittori di esposizione da utilizzare per la valutazione del rischio/comfort (rispettivamente UNI EN ISO 9612 e UNI EN ISO 5349 parti 1 e 2) contiene anche una serie di indicazioni pratiche relative alla collocazione temporale e spaziale delle misure da eseguire, al numero di misure e alle caratteristiche richieste per la strumentazione. Ciò non avviene per il comfort termo-igrometrico, visto che la norma UNI EN ISO 7730 non contiene alcuna indicazione al riguardo. Per colmare questa lacuna il pertinente comitato tecnico ISO TC159 SC5 "Ergonomics of the physical environment" aveva messo in cantiere un documento dal titolo "Guide for working practices for moderate thermal environments" (progetto ISO 16594). Tale progetto è stato tuttavia cancellato dal programma operativo nell'aprile 2016. Manca quindi ad oggi un documento con riconosciuta autorità internazionale relativo a tutti gli aspetti pratici della misura finalizzata alla valutazione del comfort. Le indicazioni fornite in questa sezione 3.2 sono dunque solo in parte contenute all'interno della normativa tecnica. In altre parti esse risultano invece originali o sviluppano concetti già apparsi in alcuni convegni di settore (Merlino 2015; Tura e Fontana 2015).

3.2.1 Quantità oggetto della misura

Tabella 3.10 - Quantità da misurare per la quantificazione del discomfort locale

Fattore di discomfort locale	Quantità da misurare
Differenza termica verticale	Temperatura dell'aria alla caviglia (0,1 m) Temperatura dell'aria alla testa (1,1 m se seduto, 1,7 m se eretto)
Correnti d'aria	Temperatura del flusso d'aria Velocità del flusso d'aria Turbolenza del flusso d'aria
Asimmetria radiante	Temperatura radiante delle pareti contrapposte solidali con il sistema di riferimento cartesiano dell'ambiente
Temperatura del pavimento	Temperatura del pavimento

Come anticipato nella sezione 3.1.2, per il calcolo del PMV è necessario conoscere le seguenti quantità termo-igrometriche:
- temperatura dell'aria
- temperatura media radiante
- umidità relativa
- velocità relativa dell'aria.

Qualora sia ipotizzabile la presenza di uno o più fattori di discomfort termico locale, vanno eseguite ulteriori misure. La Tabella 3.10 contiene l'indicazione dei possibili fattori di discomfort termico locale trattati dalla UNI EN ISO 7730, e delle relative quantità da misurare.
I sensori da utilizzare per la misura di queste quantità saranno discussi nella sezione 6.

3.2.2 Collocazione spaziale e numero delle postazioni di misura

Le postazioni di misura vanno identificate in modo tale che esse risultino rappresentative di tutte le postazioni occupate nella abituale attività lavorativa dei soggetti dei quali si intende valutare il possibile discomfort termico.
Le misure vanno eseguite all'altezza dell'addome (1,1 m per soggetti in piedi e 0,6 m per soggetti seduti (UNI EN ISO 7726, tabella 5).
Nel caso di pochi soggetti è possibile identificare e di conseguenza valutare tutte le postazioni nei quali essi operano regolarmente.
Nel caso di grandi ambienti e/o lavorazioni molto frammentate nello spazio, è pos-

sibile limitare il numero delle postazioni di lavoro, mantenendo comunque una buona rappresentatività, utilizzando un numero minimo di postazioni. Come indicazioni di massima:

- in presenza di superfici vetrate su più di una parete e di dimensioni complessive significative rispetto all'area in pianta del locale, l'ambiente tende ad essere termicamente omogeneo e due-tre misure risultano sufficienti a dare una buona caratterizzazione di tutta l'area;
- in presenza di superfici vetrate su un'unica parete si crea una stratificazione termica lungo la direzione perpendicolare alla superficie vetrata stessa. Inoltre le zone ai bordi tendono ad essere meno sensibili all'irraggiamento solare. In queste circostanze, a seconda delle dimensioni dell'ambiente, possono essere necessarie fino a 5-6 misure.

Numeri intermedi (3-5 misure) risultano appropriati per ambienti di caratteristiche intermedie fra quelli sopra descritti. Per ulteriori approfondimenti si veda Cervino 2017.
Nel caso di edifici nei quali le stesse condizioni di esposizione alla radiazione solare si ripetono identiche su più piani ($N_{Piani\text{-}totale}$), la misura deve essere eseguita almeno su

$$N_{Piani-min} = \mathrm{int}\left[\frac{N_{Piani\text{-}totale}}{2}\right] \qquad (3.7)$$

mantenendo la massima distanza possibile fra i piani nei quali si esegue la misura. Ad esempio, in un edificio con quattro piani fuori terra (terreno, primo, secondo e terzo) si eseguono misure al piano terreno e al terzo piano. In un edificio con sette piani fuori terra (terreno ..... sesto) si eseguono misure al piano terreno, al terzo piano e al sesto piano.
Non sussistendo la necessità di un'analisi statistica mirata alla stima dell'incertezza, per ciascuna postazione è sufficiente che sia eseguita una sola misura.

3.2.3 Collocazione temporale delle misure

Poiché l'ambiente termico del quale si intende valutare l'accettabilità è presumibilmente variabile nel tempo sia su scala giornaliera che su scala stagionale, va chiarito quali siano gli intervalli temporali nei quali eseguire una misura che abbia senso nell'ottica della valutazione del comfort.
A tal fine, mutuando un concetto già presente nella legislazione in tema di esposizione professionale a rumore (d.lgs. 81/2008, art. 189 comma 3) e esposizione professionale a vibrazioni (d.lgs. 81/2008, art. 201 comma 2), si raccomanda di esegui-

re le misure in condizioni termiche associate ad una situazione di "massimo discomfort ricorrente". Tale situazione identifica le condizioni termo-igrometriche peggiori fra quelle che si ripetono regolarmente.
Nel caso di discomfort caldo, la situazione peggiore si verifica nelle ore centrali dei mesi estivi. Si considera rappresentativa del "massimo discomfort ricorrente" una misura eseguita quando la temperatura dell'aria esterna è non inferiore alla media della temperatura massima del mese più caldo. Le medie mensili delle temperature massime sono reperibili facilmente per quasi tutti i comuni e sintetizzati su varie statistiche. A titolo di esempio, facciamo riferimento alla statistica Ispra (2014) dove per Firenze la minima temperatura esterna utile risulta pari a 32,2°C, per Campobasso 26,6°C.
Nel caso di discomfort freddo, la situazione peggiore si verifica nelle prime ore del mattino dei mesi invernali. Si considera rappresentativa del "massimo discomfort ricorrente" una misura eseguita quando la temperatura dell'aria esterna è non superiore alla media della temperatura media del mese più freddo. Ad esempio, facendo riferimento ancora a Ispra (2014) in questo caso per il comune di Piacenza, la massima temperatura esterna utile è 1,9°C, per Lecce 8,4°C.

3.2.4 Durata delle misure e intervallo fra due misure successive

L'esecuzione di una misura deve avvenire nel momento in cui tutte le sonde hanno raggiunto una condizione di equilibrio termodinamico con l'ambiente. Ciò richiede un tempo non inferiore al maggiore dei tempi di risposta (T95) indicati dal costruttore per le diverse sonde utilizzate.
Normalmente il più elevato dei valori di T95 è quello del globotermometro, che per le sue caratteristiche strutturali possiede la maggiore inerzia termica. In assenza di informazioni di dettaglio sul tempo di risposta del globotermometro, è possibile procedere come descritto nel seguito:
se la differenza di temperatura del globotermometro fra due postazioni di misura successive (1 e 2) è $T_{g2} - T_{g1} = \Delta T$, la risposta del globotermometro nel tempo, a partire dall'istante in cui esso viene spostato dalla postazione 1 e (istantaneamente) riposizionato nella postazione 2, segue una legge del tipo

$$T_g(t) = T_{g1} + \Delta T \times \left(1 - e^{-t/\tau}\right) \qquad (3.8)$$

nella quale τ è la costante di tempo del globotermometro. La Figura 3.11 illustra a titolo di esempio l'andamento nel tempo della risposta del globotermometro standard ad un salto termico di 8,5°C. La figura mostra sia la risposta ottenuta mediante una misura sperimentale, sia l'approssimazione analitica mediante l'equazione

(3.8) nella quale è stato usato un valore della costante di tempo τ = 335 secondi. Al fine di rendere l'errore sulla temperatura di globotermomentro confrontabile con l'errore massimo legato alla precisione finita della strumentazione (±2°C, UNI EN ISO 7726 Tabella 2), la distanza temporale fra due misure deve essere non inferiore ad un tempo

$$\Delta t_{\min} = \tau \times \ln(\Delta T / 2) \qquad (3.9)$$

La quantità ΔT, essendo oggetto di misura, non è conosciuta a priori. Si consiglia pertanto di utilizzare l'equazione (3.9) come indicazione di massima utilizzando valori di ΔT ipotizzabili sulla base di considerazioni preliminari qualitative.

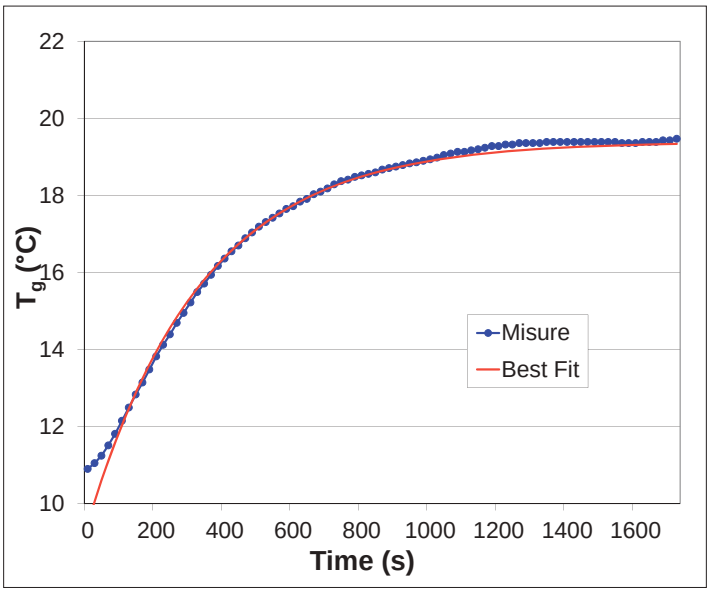

Figura 3.11 - Andamento sperimentale della temperatura di globotermometro in risposta ad una transizione istantanea fra due ambienti a diversa temperatura

Si ritiene che una durata della misura di 3 minuti, al netto del tempo di risposta (T95), sia sufficiente a fornire una descrizione adeguata delle variabili fisiche. Tale valore coincide fra l'altro con quello raccomandato per la misura della velocità dell'aria nel contesto del discomfort da correnti d'aria (UNI EN ISO 7730).
Misure prolungate risultano particolarmente indicate nei casi in cui non è possibile conoscere a priori in quale momento si verificheranno le condizioni di massimo discomfort (si veda ad esempio Tura 2010).

3.3 Stima dei parametri soggettivi

È evidente che sia l'attività svolta dal soggetto, ed in particolare l'energia dissipata dal corpo per il lavoro svolto, sia le caratteristiche del vestiario ai fini dello scambio del calore tra il soggetto e l'ambiente, incidono con forza nella sensazione di benessere.
In effetti nel calcolo dell'indice PMV questi aspetti confluiscono sotto forma di due quantità comunemente identificate come "parametri soggettivi", ovvero l'attività metabolica (o metabolismo) e l'isolamento termico.

3.3.1 Metabolismo

L'attività metabolica è un importante fattore determinante del comfort. È la potenza sviluppata da una serie di processi di ossidazione, detti appunto processi metabolici, che trasformano in calore l'energia chimica contenuta negli alimenti.
Come già mostrato nella Tabella 3.2, il metabolismo viene indicato con il simbolo M e viene misurato in met

$$1 \text{ met} = 58{,}2 \text{ Wm}^{-2}$$

Considerata la superficie del corpo umano medio maschile pari a 1,8 m^2, 1 met risulta pari a circa 104,8 W.

Tabella 3.11 - Metabolismo associato ad una serie di attività lavorative (UNI EN ISO 8996, Tabella A.1)

Occupation		Metabolic rate ($W \cdot m^{-2}$)
Office work	Sedentary work	55 to 70
	Clerical work	70 to 100
	Janitor	80 to 115
Craftsmen	Bricklayer	110 to 160
	Carpenter	110 to 175
	Glazier	90 to 125
	Painter	100 to 130
	Baker	110 to 140
	Butcher	105 to 140
	Clock and watch repairer	55 to 70
Mining industry	Haulage operator	70 to 85
	Coal hewer	110
	Cokeoven worker	115 to 175
Iron and steel industry	Blast furnace worker	170 to 220
	Electric furnace worker	125 to 145
	Hand moulder	140 to 240
	Machine moulder	105 to 165
	Foundry man	140 to 240
Iron and metal-working industry	Smith	90 to 200
	Welder	75 to 125
	Turner	75 to 125
	Drilling machine operator	80 to 140
	Precision mechanic	70 to 110
Graphic occupations	Hand compositor	70 to 95
	Book-binder	75 to 100
Agriculture	Gardener	115 to 190
	Tractor driver	85 to 110
Traffic	Car driver	70 to 100
	Bus driver	75 to 125
	Tramway driver	80 to 115
	Crane operator	65 to 145
Various occupations	Laboratory assistant	85 to 100
	Teacher	85 to 100
	Shop assistant	100 to 120
	Secretary	70 to 85

Il metabolismo totale è formato da una parte M_b detta metabolismo basale, che vale circa 1 W per Kg di peso corporeo (ovvero circa 0,7 met o 40 Wm^{-2} per un individuo del peso di 70 Kg, con una leggera differenza fra i due sessi) ed una parte M_a

associata all'attività svolta. Quest'ultima a sua volta comprende più contributi dovuti rispettivamente: alla postura, al tipo di lavoro, e al movimento del corpo. In ambienti moderabili tali contributi non superano complessivamente i 3 met (Tabella 3.3).
L'attività metabolica che va considerata nella valutazione del comfort è quella caratteristica dell'attività lavorativa eseguita. Va fatta dunque attenzione ad evitare di considerare attività collaterali che il soggetto potrebbe eseguire ma che niente hanno a che fare con l'attività lavorativa oggetto dell'indagine.
La misura diretta dell'attività metabolica, per quanto in linea di principio possibile, risulta impraticabile negli ambienti di lavoro. Si ricorre pertanto ad una determinazione indiretta mediante opportune tabelle. La norma UNI EN ISO 7730 contiene nell'appendice B una tabella con alcuni valori di metabolismo legati allo svolgimento di alcune attività. Si tratta comunque di una indicazione molto grossolana. Un livello di approfondimento più adeguato è disponibile nella norma UNI EN ISO 8996, la quale propone diversi metodi due dei quali risultano adeguati per ambienti nei quali si esegua una valutazione del comfort.
Una prima possibilità è di utilizzare un approccio "per compiti": se l'attività in esame compare nella Tabella 3.11, il metabolismo viene stimato direttamente; se al contrario l'attività in esame non compare nella Tabella 3.11, il metabolismo va stimato indirettamente ovvero individuando il valore che corrisponde all'attività più prossima (da un punto di vista energetico) a quella in esame. In alternativa si può utilizzare un approccio basato sul movimento dei diversi distretti corporei. In pratica l'attività viene inizialmente analizzata sulla base delle parti del corpo in movimento e dell'impegno richiesto (Tabella 3.12). Dopodiché si aggiunge un eventuale contributo dovuto alla postura (Tabella 3.13).

Tabella 3.12 - Attività metabolica associata al movimento di diverse parti del corpo (UNI EN ISO 8996, Tabella B.1)

Body segment		Workload (Wm^{-2})		
		Light	Medium	Heavy
Both hands	Mean	70	85	95
	Range	<75	75 to 90	>90
One arm	Mean	90	110	130
	Range	<100	100 to 120	>120
Both arms	Mean	120	140	160
	Range	<130	130 to 150	>150
The body	Mean	180	245	335
	Range	<210	210 to 285	>285

Tabella 3.13 - Contributo addizionale all'attività metabolica, associato alla postura (UNI EN ISO 8996, Tabella B.2)

Body posture	Metabolic rate ($W \cdot m^{-2}$)
Sitting	0
Kneeling	10
Crouching	10
Standing	15
Standing stooped	20

3.3.2 Isolamento termico dell'abbigliamento

Salvo rare eccezioni un lavoratore indossa normalmente alcuni capi di vestiario che limitano gli scambi termici con l'ambiente circostante.

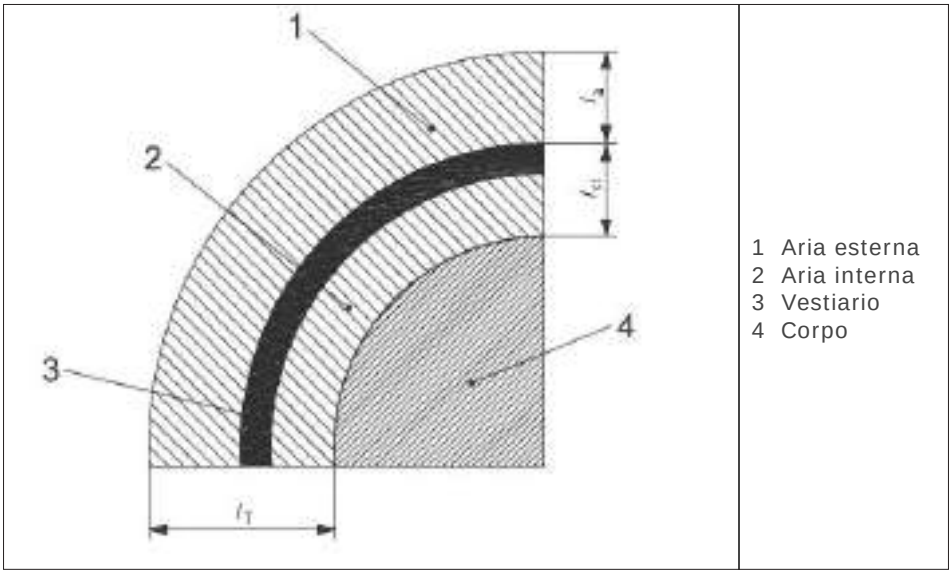

Figura 3.12 - Rappresentazione geometrica dei contributi all'isolamento

Tabella 3.14 - Isolamento termico per tipologie di combinazioni di vestiti (UNI EN ISO 7730, Tabella C.1)

Work clothing	I_{cl} clo	I_{cl} $m^2 \cdot K/W$	Daily wear clothing	I_{cl} clo	I_{cl} $m^2 \cdot K/W$
Underpants, boiler suit, socks, shoes	0,70	0,110	Panties, T-shirt, shorts, light socks, sandals	0,30	0,050
Underpants, shirt, boiler suit, socks, shoes	0,80	0,125	Underpants, shirt with short sleeves, light trousers, light socks, shoes	0,50	0,080
Underpants, shirt, trousers, smock, socks, shoes	0,90	0,140	Panties, petticoat, stockings, dress, shoes	0,70	0,105
Underwear with short sleeves and legs, shirt, trousers, jacket, socks, shoes	1,00	0,155	Underwear, shirt, trousers, socks, shoes	0,70	0,110
Underwear with long legs and sleeves, thermo-jacket, socks, shoes	1,20	0,185	Panties, shirt, trousers, jacket, socks, shoes	1,00	0,155
Underwear with short sleeves and legs, shirt, trousers, jacket, heavy quilted outer jacket and overalls, socks, shoes, cap, gloves	1,40	0,220	Panties, stockings, blouse, long skirt, jacket, shoes	1,10	0,170
Underwear with short sleeves and legs, shirt, trousers, jacket, heavy quilted outer jacket and overalls, socks, shoes	2,00	0,310	Underwear with long sleeves and legs, shirt, trousers, V-neck sweater, jacket, socks, shoes	1,30	0,200
Underwear with long sleeves and legs, thermo-jacket and trousers, Parka with heavy quilting, overalls with heavy quilting, socks, shoes, cap, gloves	2,55	0,395	Underwear with short sleeves and legs, shirt, trousers, vest, jacket, coat, socks, shoes	1,50	0,230

In alcuni casi il vestiario è una divisa o costituisce una protezione e può addirittura costituire un vincolo che interviene ad impedire il raggiungimento del comfort. Come già mostrato nella Tabella 3.2, l'isolamento termico dell'abbigliamento viene indicato con il simbolo I_{cl} e viene misurato in Clo

$$1 \text{ Clo} = 0{,}155 \text{ m}^2 \text{ K W}^{-1}$$

Tabella 3.15 - Isolamento termico associato ad una serie capi di abbigliamento - (UNI EN ISO 7730, Tabella C.2)

Garment	I_{clu}	
	clo	$m^2 \cdot K/W$
Underwear		
Panties	0,03	0,005
Underpants with long legs	0,10	0,016
Singlet	0,04	0,006
T-shirt	0,09	0,014
Shirt with long sleeves	0,12	0,019
Panties and bra	0,03	0,005
Shirts/Blouses		
Short sleeves	0,15	0,023
Light-weight, long sleeves	0,20	0,031
Normal, long sleeves	0,25	0,039
Flannel shirt, long sleeves	0,30	0,047
Light-weight blouse, long sleeves	0,15	0,023
Trousers		
Shorts	0,06	0,009
Light-weight	0,20	0,031
Normal	0,25	0,039
Flannel	0,28	0,043
Dresses/Skirts		
Light skirts (summer)	0,15	0,023
Heavy skirt (winter)	0,25	0,039
Light dress, short sleeves	0,20	0,031
Winter dress, long sleeves	0,40	0,062
Boiler suit	0,55	0,085
Sweaters		
Sleeveless vest	0,12	0,019
Thin sweater	0,20	0,031
Sweater	0,28	0,043
Thick sweater	0,35	0,054
Jackets		
Light, summer jacket	0,25	0,039
Jacket	0,35	0,054
Smock	0,30	0,047
High-insulative, fibre-pelt		
Boiler suit	0,90	0,140
Trousers	0,35	0,054
Jacket	0,40	0,062
Vest	0,20	0,031
Outdoor clothing		
Coat	0,60	0,093
Down jacket	0,55	0,085
Parka	0,70	0,109
Fibre-pelt overalls	0,55	0,085
Sundries		
Socks	0,02	0,003
Thick, ankle socks	0,05	0,008
Thick, long socks	0,10	0,016
Nylon stockings	0,03	0,005
Shoes (thin soled)	0,02	0,003
Shoes (thick soled)	0,04	0,006
Boots	0,10	0,016
Gloves	0,05	0,008

Come descritto dettagliatamente dalla norma UNI EN ISO 9920, l'isolamento termico totale I_T risulta costituito dall'isolamento intrinseco I_{cl} garantito dal tessuto e dallo strato d'aria compreso fra corpo e capo d'abbigliamento, e dall'isolamento I_a dovuto allo strato d'aria che il tessuto trascina con sé nel suo movimento (Figura 3.12). La quantità I_a non dipende dallo specifico vestiario indossato.
Pertanto il calcolo del PMV richiede come dato di input soltanto l'isolamento "globale" del vestiario indossato I_{cl}. È fondamentale sottolineare che l'abbigliamento il cui isolamento termico va inserito nella procedura di valutazione del comfort è quello caratteristico dell'attività lavorativa eseguita. Nel caso in cui tale mansione richieda un "dress code" questo non lascia spazio ad ambiguità o interpretazioni soggettive. In caso contrario va fatta attenzione ad identificare un abbigliamento che risulti consono all'attività, all'ambiente e alla stagione. Si tratta, come è chiaro, di una scelta in qualche misura soggettiva, ma che comunque mira ad escludere abbigliamenti particolari utilizzati da soggetti con specifiche sensibilità (termiche e non solo) come pure abbigliamenti forzati dal datore di lavoro per gestire, in modo ovviamente improprio, il comfort termico.
La misura diretta dell'isolamento termico è impossibile negli ambienti di lavoro. Si ricorre pertanto ad una determinazione indiretta mediante opportune tabelle. La norma UNI EN ISO 7730 contiene due tabelle che possono essere utilizzate per la stima dell'isolamento di un vestiario costituito da diversi capi di abbigliamento. La Tabella 3.14 mostra alcuni valori dell'isolamento termico complessivo I_{cl} di alcuni vestiari sia pensati per un utilizzo civile che per un utilizzo lavorativo. Tali valori possono essere utilizzati come prima approssimazione.
Qualora invece si richieda un livello maggiore di accuratezza, è consigliato l'utilizzo della Tabella 3.15 che contiene l'isolamento termico I_{clu} di numerosi capi di abbigliamento. Quando si procede partendo dai dati relativi ai singoli capi, si raccomanda di utilizzare l'equazione

$$I_{cl} = 0{,}161 + 0{,}835 \sum I_{clu} \qquad (3.10)$$

che, a fronte di un "costo" computazionale decisamente moderato, fornisce un'approssimazione decisamente migliore della semplice somma.
Altre caratteristiche del vestiario, come la permeabilità al vapore e la permeabilità all'aria, verranno discusse rispettivamente nel contesto dello stress termico da caldo (sezione 4.3.2) e dello stress termico da freddo (sezione 5.3.2), dove il loro ruolo diventa critico.

3.4 Indici di comfort per ambienti moderabili ma non moderati

Esistono diversi indici che eseguono una determinazione semplificata delle condizioni di comfort/stress termico approssimando la percezione del caldo/freddo

come funzione di due sole quantità, ovvero temperatura e umidità. I fattori di tipo soggettivo quali metabolismo e isolamento non sono presi in considerazione.

3.4.1 Heat Index

Tra i più utilizzati, spesso anche per le previsioni climatiche, c'è l'Heat Index. Questo indice è basato sul lavoro originale di Steadman (1979a, 1979b).
Valori accurati entro ±0,7°C possono essere ottenuti mediante il seguente algoritmo

$$HI = c_1 + c_2T + c_3R + c_4TR + c_5T^2 + c_6R^2 + c_7T^2R + c_8TR^2 + c_9T^2R^2 \quad (3.11)$$

valido per temperature superiori a 27°C ed umidità relative pari o superiori al 40%.

In questa equazione:
HI = Heat Index (in gradi Fahrenheit)
T = temperatura (in gradi Fahrenheit)
R = umidità relativa (fra 0 e 100)

ed i coefficienti assumono i seguenti valori numerici:

$c_1 = -42.379$, $c_2 = 2.049\,015\,23$, $c_3 = 10.143\,331\,27$,
$c_4 = -0.224\,755\,41$, $c_5 = -6.837\,83 \times 10^{-3}$, $c_6 = -5.481\,717 \times 10^{-2}$,
$c_7 = 1.228\,74 \times 10^{-3}$, $c_8 = 8.5282 \times 10^{-4}$, $c_9 = -1.99 \times 10^{-6}$.

I valori dell'Heat Index sono tipicamente rappresentati in un formato matriciale (vedi Figura 3.13). L'elemento di base è rappresentato dal fatto che in presenza di una elevata umidità la sensazione termica del soggetto esposto corrisponde a quella che avrebbe in presenza di una temperatura dell'aria più elevata. Un'influenza significativa quanto più è alta la temperatura. L'elevata influenza dell'umidità sulla sensazione termica è una caratteristica degli ambienti non moderati che il PMV non coglie.

La Figura 3.13 mostra l'esistenza di cinque categorie che vanno dalla categoria 1 (bianco = comfort buono) fino alla categoria 5 (rosso = condizioni ambientali pericolose). Di queste le più rilevanti ai fini della quantificazione del discomfort negli ambienti moderabili ma non moderati sono le categorie 3 e 4.

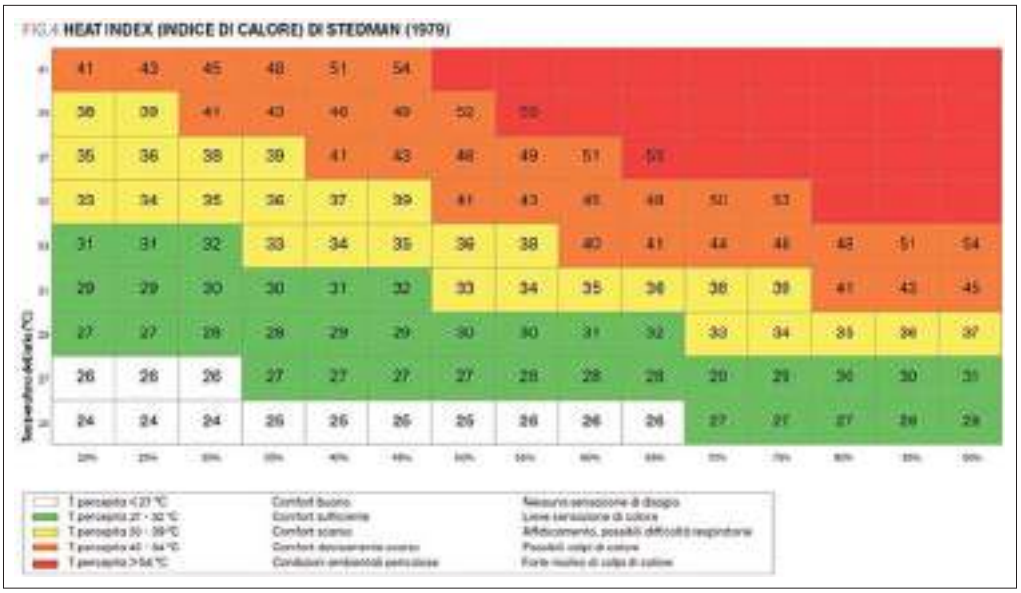

Figura 3.13 - Classificazione di un ambiente moderabile secondo l'indice Heat Index

Sono disponibili in rete numerosi siti in cui è possibile calcolare l'Heat Index. Si segnalano ad esempio:
http://www.dst.unina.it/calcolo-indici-di-calore
http://www.wpc.ncep.noaa.gov/html/heatindex.shtml

3.4.2 Humidex

L'Humidex è un indice sviluppato nel 1965 da alcuni meteorologi canadesi e più formalmente codificato da Masterton e Richardson (1979).
Analogamente all'Heat Index, l'Humidex è un indice a due parametri e rappresenta una temperatura "apparente", risultante dalla combinazione delle sensazioni dovute alla temperatura dell'aria e alla umidità. L'espressione matematica per il calcolo di questo indice è molto più semplice di quella dell'Heat Index dove t_a è la

$$\text{Humidex} = t_a + [5{,}555 * (p_a - 1{,}013)] \qquad (3.12)$$

temperatura dell'aria in gradi Celsius e p_a è la pressione parziale del vapore acqueo espressa in KPa (KiloPascal).

Quest'ultima quantità è a sua volta deducibile facilmente dalla umidità relativa e dalla temperatura dell'aria, ovvero dalle due temperature di bulbo umido e di bulbo asciutto, sia in modo analitico (ad esempio mediante le espressioni contenute nella norma UNI EN ISO 7726), che grafico (mediante un diagramma psicrometrico).
Come mostrato nella Figura 3.14, l'indice Humidex identifica 4 livelli termici. Di questi i più rilevanti ai fini della quantificazione del discomfort negli ambienti moderabili ma non moderati sono i livelli 2 ("un certo discomfort") e 3 ("molto discomfort").
È possibile calcolare l'Humidex mediante il calcolatore on-line disponibile sul sito:
http://www.dst.unina.it/calcolo-indici-di-calore
già segnalato in precedenza per il calcolo dell'Heat Index.
Alcune criticità legate all'uso di indici semplificati temperatura-umidità sono state rimarcate da d'Ambrosio et al. 2011b.

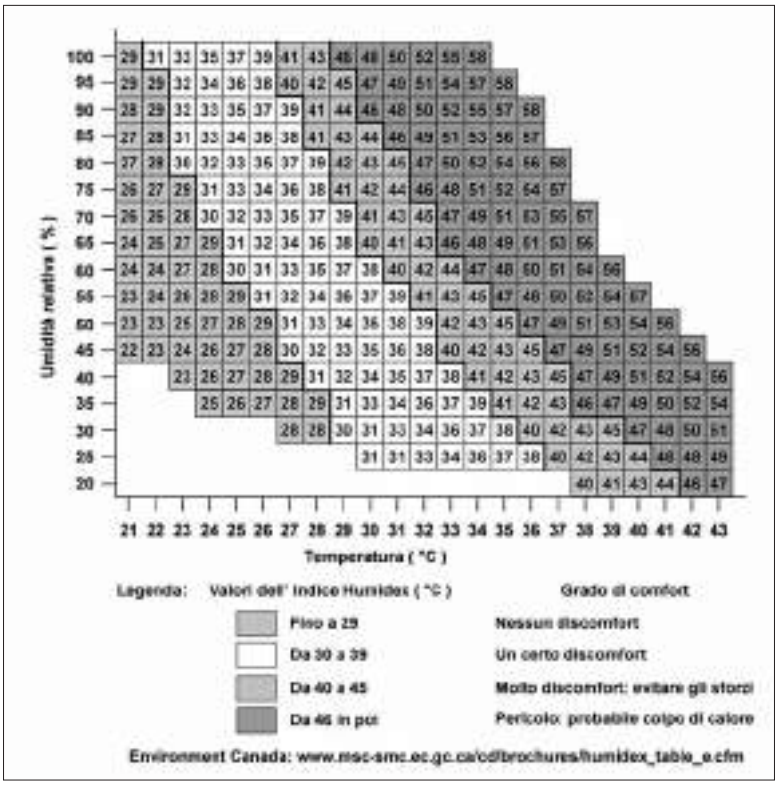

Figura 3.14 - Classificazione di un ambiente moderabile secondo l'indice Humidex

3.5 Controllo del microclima ai fini del raggiungimento del comfort

In tutti i casi in cui sia tecnicamente possibile, il datore di lavoro deve provvedere a rendere il microclima degli ambienti lavorativi il più possibile prossimo alla zona di benessere termico. Come abbiamo visto, la creazione di un microclima confortevole passa per il raggiungimento di una situazione nella quale le condizioni termo-igrometriche sia generali sia locali sono considerate soddisfacenti da una larga maggioranza dei presenti.
Premesso che è fondamentale mettere in atto tutte le misure utili a raggiungere condizioni di comfort in modo naturale, nel caso in cui ciò non fosse possibile devono venire adottati provvedimenti che modifichino le condizioni ambientali agendo su una o più quantità fisiche in modo da portare gli indici di qualità all'interno degli intervalli di accettabilità.
L'ordine con il quale verranno discusse nel seguito le diverse quantità fisiche riflette la scala di priorità. Tale sequenza viene stabilita in base a considerazioni legate sia all'efficacia dell'intervento, sia agli eventuali effetti collaterali, sia alla interferenza con l'attività lavorativa. Quest'ultimo concetto in particolare impone che modifiche all'abbigliamento debbano venire viste soltanto come extrema ratio e che, fatta eccezione per interventi su comportamenti individuali che vanno contro il "buon senso", non vengano mai utilizzate come strumento di controllo del microclima in ambienti termici moderati.

3.5.1 Temperatura dell'aria

La temperatura dell'aria t_a è senz'altro il parametro sul quale intervenire per primo ogni qualvolta si verifichino scostamenti considerevoli dalle condizioni di confort. In condizioni tipiche di ambienti moderati ($t_a \approx 20°C$, UR ≈ 50%, $v_a \approx 0$), la sola variazione della temperatura dell'aria induce una variazione ΔPMV = 0,1 unità per $\Delta t_a = 1°C$. Va tuttavia considerato il fatto che una variazione di t_a porta necessariamente con sé, anche se non immediatamente, un cambiamento anche della temperatura media radiante e dell'umidità, e questo introduce un ulteriore variazione del PMV di segno concorde.
L'alterazione della temperatura dell'aria in un determinato ambiente può essere effettuata utilizzando impianti che riscaldano/raffreddano l'aria immessa dall'esterno o che ricircolano l'aria presente nell'ambiente, oppure possono essere utilizzati impianti alimentati da fluidi caldi e freddi che attraverso terminali scambiatori, quali convettori o radiatori, riscaldano/raffreddano l'aria ambiente. I due sistemi possono coesistere in impianti cosiddetti "misti" che permettono di gestire autonomamente il ricambio d'aria ed il trattamento termico della stessa.

3.5.2 Umidità relativa

L'umidità relativa è un parametro secondario relativamente da un punto di vista strettamente microclimatico. Le variazioni indotte sul PMV da variazioni di umidità relativa (ΔPMV = 0,06 unità per ΔUR = 10%) risultano infatti insufficienti a modificare il comfort in modo apprezzabile. È comunque auspicabile che il sistema di regolazione termo-igrometrica sia sempre in grado di mantenere l'umidità in un intervallo tale da minimizzare reazioni negative. Gli intervalli all'interno dei quali si suggerisce di mantenere l'umidità relativa sono mostrati, in funzione della categoria assegnata all'ambiente (vedi sezione 3.1.6), nella Tabella 3.16, estratta dalla EN 16798-1.
Con riferimento alla classificazione dei sistemi di alterazione termica introdotta in precedenza, i sistemi aria che introducono aria esterna sono in grado di compensare la variazione di umidità relativa che altrimenti aumenterebbe quando l'aria viene raffreddata o diminuirebbe quando viene riscaldata. Il processo di umidificazione avviene mediante il passaggio dell'aria attraverso una opportuna sezione dell'impianto nella quale vengono mantenute condizioni di umidità prossime alla saturazione, e/o viene spruzzata acqua da una serie di ugelli. All'opposto, una deumidificazione efficiente avviene facendo transitare a bassa velocità il vapore acqueo diffuso in aria su superfici fredde, con conseguente condensazione.

Tabella 3.16 - Intervalli di umidità consigliati in funzione della categoria - (EN 16798-1)

Type of building/space	Category	Design relative humidity for dehumidification,%	Design relative humidity for humidification,%
Spaces where humidity criteria are set by human occupancy. Special spaces (museums, churches, etc.) may require other limits	I	50	30
	II	60	25
	III	70	20

I sistemi aria che non introducono aria esterna, sono più raramente dotati di tecnologie integrate che permettono il controllo dell'umidità limitandosi nel maggior parte dei casi al solo controllo della temperatura.

3.5.3 Velocità dell'aria

Anche la velocità dell'aria è un parametro relativamente secondario dal punto di vista del comfort globale, ma molto importante come possibile causa di discomfort locale.

L'impatto sul confort globale della velocità dell'aria è quantificabile calcolando la variazione dell'indice PMV al variare della velocità dell'aria: $\Delta PMV = 0{,}20$ unità per $\Delta v_a = 0{,}1$ m/s. Le velocità tipiche che si stabiliscono in un ambiente nel quale viene correttamente immessa aria sufficiente a garantire un ricambio adeguato alle esigenze degli occupanti (qualche cm/s) sono, da questo punto di vista, del tutto trascurabili.
La velocità dell'aria è invece molto più influente in termini di discomfort locale. Poiché il disturbo aumenta abbastanza velocemente con la velocità del flusso (vedi Figura 3.6), è importante fare attenzione a non posizionare le postazioni di lavoro lungo il flusso d'aria delle bocchette di entrata (e ripresa), eventualmente utilizzando dei deviatori di flusso.

3.5.4 Temperatura radiante

Analogamente a quanto discusso per la velocità dell'aria, la temperatura radiante possiede implicazioni sia per il comfort globale che per il confort locale. La presenza di superfici radianti ovvero di superfici vetrate è infatti assai raramente isotropa (ovvero simile in tutte le direzioni). Pertanto in questi casi, accanto all'effetto sul PMV esiste normalmente un effetto locale di asimmetria radiante, legato cioè alla differenza fra la temperatura radiante di due superfici contrapposte.
Per quanto riguarda il comfort globale, va notato come le superfici molto calde e/o caratterizzate da un elevato flusso radiante siano normalmente di dimensioni limitate. Di conseguenza il valore medio della temperatura radiante, che è quello che entra nel calcolo del PMV, è di solito largamente inferiore a quello (effettivo per superfici calde, equivalente per superfici vetrate) delle superfici stesse, e raramente distante dalla temperatura dell'aria. Pertanto, anche se la dipendenza del PMV da t_r ($\Delta PMV = 0{,}15$ unità per $\Delta t_r = 1°C$) non è in sé modesta, in pratica si tratta di un problema minore.
Il problema del discomfort locale legato alla asimmetria radiante può divenire al contrario piuttosto serio. Per questo motivo, sistemi di riscaldamento che facciano uso di superfici calde (stufe, pannelli radianti) sono da considerare con attenzione se la temperatura delle superfici radianti risulta molto più alta di quella ambientale.
La presenza di ampie superfici vetrate è un ulteriore elemento in grado di generare notevole discomfort sia in inverno che in estate. In particolare, in presenza di condizioni esterne fredde, elementi con modeste proprietà isolanti tendono ad assumere una temperatura notevolmente inferiore alla temperatura dell'ambiente indoor, generando condizioni di forte asimmetria radiante e mettendo in moto flussi d'aria per via convettiva. Per minimizzare effetti di questo tipo è importante utilizzare finestre capaci di garantire un alto isolamento termico.
In condizioni di forte soleggiamento è importante fare ricorso a sistemi di schermatura, mediante tende (in plastica o stoffa) o frangisole; tali sistemi ovviamente

risultano tanto migliori quanto più sono flessibili e consentono quindi di filtrare una frazione arbitraria del flusso solare.
Infine è sempre bene fare attenzione a non avere postazioni di lavoro nelle immediate vicinanze di ampie superfici vetrate, in quanto, per motivi essenzialmente geometrici, esse risulteranno particolarmente esposte a rischi di asimmetria radiante.
Per gli edifici realizzati con tipologie costruttive che utilizzano pannelli metallici o in vetro per compensare l'effetto radiante sulle facciate esposte a sud può essere indicata una differenziazione verticale degli impianti in modo da gestire in modo indipendente i locali a diversa esposizione.

Stress termico da caldo

Capitolo 4 - Ambienti vincolati caldi

Sulla base della definizione data nella precedente sezione 2, negli ambienti vincolati caldi esistono vincoli ineludibili che forzano una situazione di squilibrio termico nella quale i guadagni energetici superano le perdite, e di conseguenza impediscono il raggiungimento di condizioni di comfort. La valutazione da eseguire deve pertanto mirare a verificare innanzitutto l'esistenza e successivamente l'entità di un eventuale stress termico.
Il riferimento legislativo fondamentale per la valutazione degli ambienti termici vincolati (tanto caldi quanto freddi) è il capo I del Titolo VIII del d.lgs. 81/2008. In particolare negli articoli 180 - 185 viene chiarito che il microclima è a tutti gli effetti un agente di rischio fisico e che di conseguenza va eseguita una valutazione del rischio secondo quanto specificato nello stesso decreto all'art. 28. Tuttavia, al contrario di quanto avviene per il rischio rumore e altri rischi fisici, la legge non contiene alcuna indicazione relativa ai metodi mediante i quali verificare la presenza e valutare uno stress termico. In assenza di disposizioni di legge, la materia è di conseguenza interamente delegata alle *norme tecniche*.

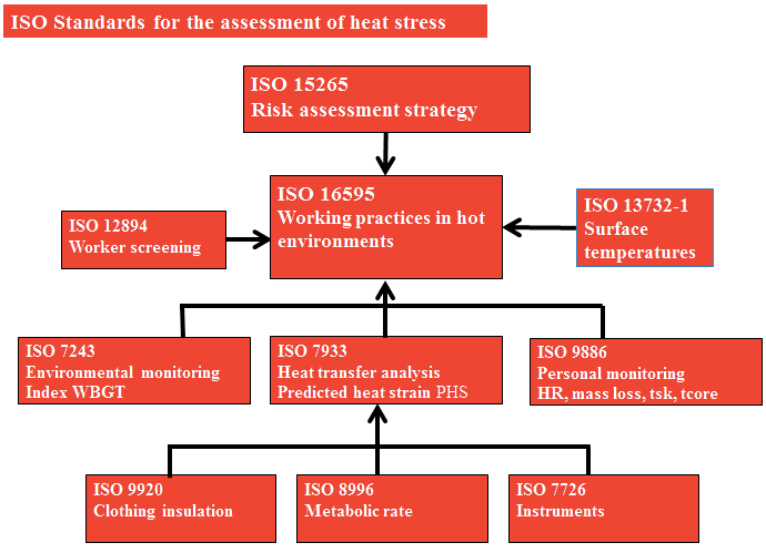

Figura 4.1 - Schema a blocchi dei rilevanti standard ISO nella valutazione dello stress termico da caldo

La Figura 4.1 presenta uno schema a blocchi dei rilevanti standard ISO che intervengono in un ideale percorso di valutazione dello stress termico in ambienti caldi. Si noti, fra l'altro, che a differenza di quanto avviene per gli ambienti moderabili, negli ambienti vincolati caldi è in via di sviluppo uno standard dal titolo "Working practices for hot environments" (indicata inizialmente con ISO 16595, vedi Figura 4.1, e successivamente rinumerata a ISO/WD 23451) di supporto allo standard di valutazione del rischio.
La stessa figura 4.1 chiarisce che la vigente normativa tecnica sulla valutazione degli ambienti caldi consente di procedere applicando sia il metodo WBGT, descritto nella norma UNI EN ISO 7243:2017 sia il metodo PHS, descritto nella norma UNI EN ISO 7933:2005. Il metodo WBGT è indubbiamente più semplice ed ha alle spalle molti decenni di applicazione (d'Ambrosio et al. 2014). Tuttavia il metodo PHS risulta largamente preferibile per i seguenti motivi:

a) richiede la misura delle stesse quantità già richieste per l'applicazione del metodo PMV per la quantificazione del comfort termico e quindi non impone strumentazione aggiuntiva; il metodo WBGT richiede al contrario l'uso aggiuntivo del termometro a bulbo bagnato a ventilazione naturale.
b) può essere applicato ad una ampia casistica di situazioni sperimentali, sia in termini di vestiario indossato, dimostrandosi assai più flessibile del metodo WBGT.
c) segue l'evoluzione nel tempo delle quantità di interesse fisiologico ai fini della identificazioni dello stress termico.
d) può essere applicato a situazioni ambientali variabili nel tempo, sempre che esse non siano caratterizzate da transienti troppo rapidi.
e) produce una quantificazione del rischio termico molto più accurata, che si basa su di un'analisi precisa dell'equilibrio energetico dell'organismo del soggetto esposto e della risposta di questo a situazioni di stress termico. Al contrario il metodo WBGT può unicamente identificare, nel caso di non superamento del limite, situazioni che sicuramente non implicano stress termico. Se l'opportuno limite di accettabilità viene superato, il metodo WBGT richiede che venga eseguita un'analisi più accurata mediante un diverso metodo (ovvero il PHS). Non si vede per quale motivo non si possa utilizzare il metodo PHS fin dall'inizio del processo di valutazione.

Per tutti questi motivi, per la valutazione dello stress termico in ambienti caldi, in questo documento faremo riferimento unicamente al metodo PHS.

4.1 Metodo PHS (Predicted Heat Strain)

4.1.1 I principi del metodo

Come il metodo PMV per il comfort termico, anche il metodo PHS ("Predicted Heat Strain"), descritto nella norma UNI EN ISO 7933, si basa sulle equazioni del bilan-

cio termico dell'organismo umano. Al contrario di ciò che avviene nel metodo PMV tuttavia, in ambienti caldi non è possibile assumere la stazionarietà della temperatura interna dell'individuo esposto.
Il metodo PHS si basa al contrario su un codice iterativo che analizzando istante per istante tutti gli scambi di energia fra soggetto ed ambiente, fornisce ad ogni passo l'incremento di energia dovuto allo squilibrio termico dell'organismo e da questo deduce conseguente aumento di temperatura del core. La struttura del codice, con una dipendenza esplicita dal tempo, fa sì che il metodo PHS calcoli l'andamento nel tempo di tutte le quantità descrittive del soggetto e dello scambio termico di quest'ultimo con l'ambiente che lo circonda.

4.1.2 Parametri necessari per il metodo

Tabella 4.1 - Parametri ambientali ed individuali che caratterizzano il rapporto individuo-ambiente

Parametri	Quantità	Simbolo	Unità di misura
FISICI	temperatura dell'aria	t_a	°C o K
	temperatura media radiante	t_r	°C o K
	pressione parziale del vapore acqueo	p_a	Pa (1 Pa = 1 N/m^2)
	velocità relativa dell'aria	v_a	m/s
INDIVIDUALI	attività metabolica (ovvero dispendio metabolico ovvero metabolismo energetico)	M	W/m^2 o met (1 met = 58,2 W/m^2) pari a 104,8 W per la superficie corporea standard di un individuo adulto (1,8 m^2)
	isolamento termico del vestiario	I_{cl}	m^{2}K/W o clo (1 clo = 0,155 m^{2}K/W)

Le quantità richieste per l'applicazione del metodo PHS sono le stesse su cui basa il metodo PMV, ovvero quattro quantità fisiche identificate come parametri ambientali e due descrittori di specifiche caratteristiche dell'individuo identificati come parametri individuali. La Tabella 4.1 ne riassume denominazioni, simboli ed unità di misura.

4.1.3 Applicabilità del metodo

Secondo quanto indicato all'interno della stessa norma UNI EN ISO 7933, l'affidabilità del metodo PHS risulta verificata soltanto all'interno di determinati intervalli stabiliti sia per i parametri ambientali che per i parametri individuali, riportati nella sottostante Tabella 4.2.

Tabella 4.2 - Intervalli di applicabilità dei parametri ambientali ed individuali

Quantità	Simbolo	Intervallo utile	Unità di misura
temperatura dell'aria	ta	+15 .....+50	°C
differenza fra tr e ta	tr – ta	0 ..... +60	°C
pressione parziale del vapore acqueo	pa	0 ..... 4.500	Pa
velocità relativa dell'aria	va	0 3	m/s
attività metabolica	M	0,8 4,5	met
isolamento termico del vestiario	Icl	0,1 1	clo

È importante notare che il valore relativamente modesto (1 clo) dell'estremo superiore dell'intervallo utile dell'isolamento termico del vestiario (ultima riga della Tabella 4.2) preclude formalmente l'utilizzo del metodo PHS in situazioni nella quali viene richiesto l'uso di vestiario con specifiche caratteristiche protettive (ad esempio protezioni per le braccia, giacca con rinforzi in alluminio). La norma UNI EN ISO 9920 lista nella sua Tabella A.6 otto diverse combinazioni di indumenti considerate protettive contro il caldo ed una combinazione considerata protettiva contro agenti chimici. Il valore più alto dell'isolamento termico di queste nove combinazioni è 1,74 clo. È presumibile che il metodo PHS possa comunque fornire indicazioni almeno approssimativamente corrette quando, come in questo caso, soltanto uno dei parametri si trova al di fuori dell'intervallo utile e lo sforamento non è enorme. Pertanto se l'abbigliamento protettivo in esame è assimilabile ad uno di questi 9 insiemi contemplati dalla UNI EN ISO 9920, si suggerisce di usare comunque il metodo PHS.
Se l'abbigliamento protettivo in esame possiede caratteristiche diverse dai nove che sono contenuti nella UNI EN ISO 9920, ed in particolare se è presumibile che possieda un isolamento termico superiore a 1,5 clo, il metodo PHS risulta impraticabile. Casi di questo tipo ricadono con alta probabilità nella categoria delle esposizioni intense e di breve durata, analoghe a quelle per le quali la norma UNI EN ISO 7933 richiede una supervisione medica diretta (si veda a questo proposito il successivo punto 4.1.6).

4.1.4 Descrittori di rischio

Il metodo PHS utilizza due descrittori di strain termico:
- la temperatura del core t_{core}; essa descrive lo stato termico della parte più interna del corpo umano ma non corrisponde alla temperatura di alcun organo in particolare. Essa viene comunemente approssimata mediante la temperatura rettale t_{re}.
- la quantità di liquido perduto nel corso dell'esposizione D.

Il calcolo degli indici sintetici di strain (t_{re}, D), può venire eseguito con facilità mediante il software PHS, che fa parte del pacchetto "hytrprogrammes.exe" scaricabile gratuitamente alla pagina web:
http://www.deparisnet.be/chaleur/Chaleur.htm#programmes

È altresì possibile applicare il metodo PHS utilizzando (ad esempio all'interno di una macro di Excel) il codice di calcolo (Quick Basic) fornito nell'appendice E della norma UNI EN ISO 7933. L'appendice E della stessa norma contiene numerosi esempi dei risultati dell'applicazione del modello a casi pratici, i quali possono essere utilizzati per verificare l'esattezza di eventuali codici messi a punto dall'utente sulla base di quello fornito nella norma.

4.1.5 Limiti di accettabilità

I limiti massimi di accettabilità dei due descrittori di strain termico sono i seguenti:
- temperatura rettale $t_{re\text{-}max}$: 38°C;
- quantità di liquido perduto nel corso dell'esposizione D_{max}: 5% della massa del soggetto.

4.1.6 Tempi massimi di esposizione

Dal confronto fra i limiti di accettabilità indicati al punto precedente e l'evoluzione nel tempo dei descrittori di strain termico t_{re} e D, possono essere ottenute due stime indipendenti del tempo massimo di esposizione all'ambiente in esame:
- $D_{lim\text{-}tre}$ rappresenta il tempo dopo il quale la temperatura rettale t_{re} raggiunge il valore limite $t_{re\text{-}max}$;
- $D_{limloss95}$ rappresenta il tempo dopo il quale la quantità di liquido perduto supera il valore limite D_{max}.

Il tempo massimo di esposizione viene posto pari al più piccolo di questi due valori:

$$D_{lim} = \min(D_{lim\text{-}tre}; D_{limloss95})$$

Per quanto discusso dalla norma UNI EN ISO 7933 ai punti B.4 e B.5, la perdita di liquidi in quantità tali da superare il limite consentito del 5% della massa corporea avviene quasi sempre su tempi superiori a 4 ore. Poichè i tempi di reintegro dei liquidi sono difficilmente prevedibili, ma sicuramente non brevi, è cautelativamente opportuno stabilire che a seguito del superamento del limite sulla perdita di liquidi la giornata lavorativa debba considerarsi conclusa. La norma UNI EN ISO 7933 raccomanda al punto 6.3 di trattare con particolare cura le situazioni nelle quali il tempo massimo di esposizione risulti inferiore a

30 minuti, nelle quali l'innesco della sudorazione avviene con modalità e su tempi scala non adeguatamente trattati dal metodo PHS. In queste circostanze viene richiesta una supervisione medica diretta e personalizzata sui soggetti a rischio.

Tabella 4.3 - Parametri ambientali ed individuali dell'esposizione

Parametri	Quantità	Simbolo	Valore
AMBIENTALI	temperatura dell'aria	t_a	40°C
	temperatura media radiante	t_r	40°C
	umidità relativa	**UR**	34%
	velocità relativa dell'aria	v_a	0,30 ms^{-1}
INDIVIDUALI	attività metabolica	**M**	2,58 met (150W/m^2)
	isolamento termico del vestiario	I_{cl}	0,77 clo

La Figura 4.2 mostra gli andamenti nel tempo dei due indici di strain, ottenuti n risposta alle condizioni ambientali e ai parametri individuali elencati nella Tabella 4.3, con le due condizioni collaterali relative alla posizione (eretta) e all'acclimatamento (positivo).

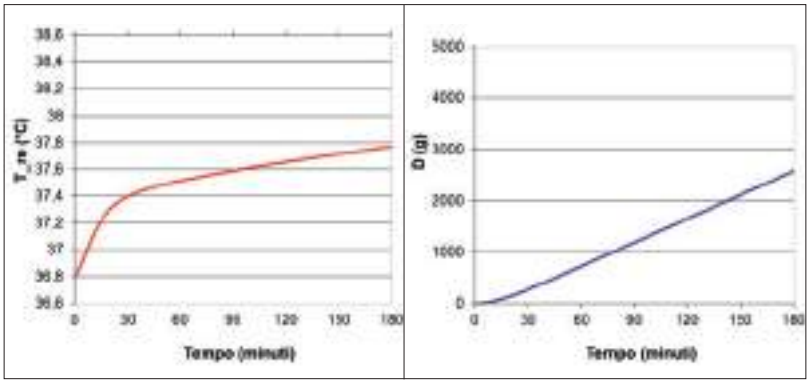

Figura 4.2 - Andamento nel tempo della temperatura rettale e della quantità di liquido perduto per l'esposizione descritta nella Tabella 4.3

4.1.7 Pause ed esposizioni multifase

Al termine di una qualsiasi fase lavorativa che prevede un'esposizione con apprezzabile strain termico, è naturale inserire una pausa. In ogni caso la pausa va assolutamente inserita nel momento in cui, dopo un'esposizione di durata D_{lim}, viene raggiunto uno dei due valori limite. La durata della pausa dipende da due elementi principali:

a) le condizioni fisiologiche, ed in particolare la temperatura rettale, al termine della fase lavorativa;
b) le condizioni ambientali nelle quali avviene il recupero.

Qualitativamente, la durata della pausa deve essere più lunga se:

- l'esposizione ha generato condizioni di stress più marcate;
- il recupero avviene in zone caratterizzate da condizioni ambientali che non favoriscono la dissipazione del calore (ovvero calde, specie caldo/umide); normalmente ciò avviene se non si dispone di un ambiente climatizzato dedicato e il recupero avviene nello stesso ambiente nel quale è avvenuta l'esposizione.

In generale l'inserimento ed il dimensionamento delle pause all'interno della giornata lavorativa deve essere eseguito con grande attenzione, soprattutto perché nell'ambiente termico non esiste niente di analogo al "principio di uguale energia" che sta alla base degli attuali metodi di valutazione del rischio da esposizione al rumore e vibrazioni. Secondo tale principio, il dettaglio temporale dell'esposizione è irrilevante a patto che l'energia complessiva alla quale il soggetto viene esposto sia la stessa. Numerosi studi sperimentali hanno quantificato con precisione questa che è comunque una sensazione intuitivamente evidente. La Figura 4.3 riporta a questo proposito i risultati di Gagnon e Kenny (2011), che mostrano in modo inequivocabile come con una frequenza più alta del ciclo lavoro-pausa la temperatura rettale non raggiunga mai valori estremamente alti ma al contempo non si riesca mai a completare veramente l'azione di recupero. Al termine dei 120 minuti complessivi sui quali è stata condotta l'analisi, la temperatura rettale risulta una funzione inversa del periodo del ciclo esposizione/pausa.
L'elemento fisiologico fondamentale in questo comportamento è il tempo di recupero della temperatura rettale, che è notevolmente più lungo di quello di altri distretti corporei (ad esempio l'esofago o in misura ancor più evidente il canale uditivo e la pelle), come mostrato ad esempio da Kenny et al. (2008). Di fatto un pieno recupero, definito come il ritorno della temperatura rettale a livelli pre-esposizione, può richiedere anche diverse ore. Va sottolineato che l'invalidità del principio di uguale energia si estende fino al livello in cui una semplice sequenza di due esposizioni diverse E1 ed E2 produce risultati fisiologici diversi a seconda che venga eseguita nell'ordine E1 - E2 ovvero E2 - E1.

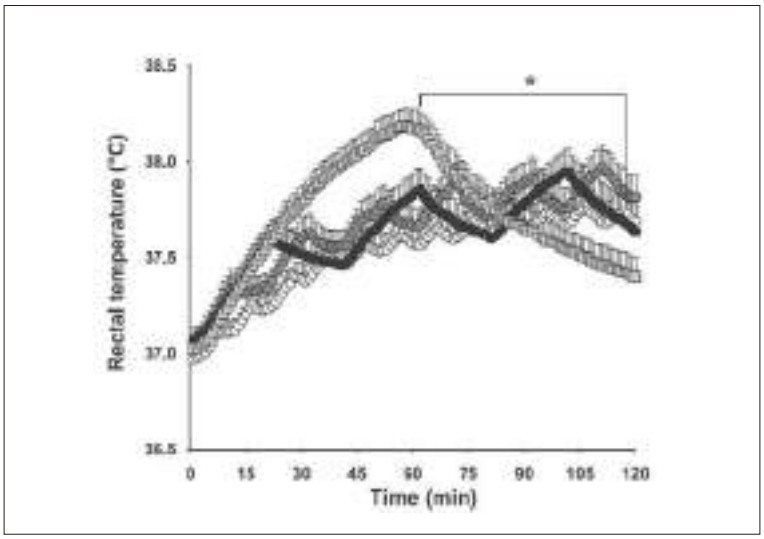

Figura 4.3 - Andamento nel tempo della temperatura rettale per diverse sequenze con lo stesso tempo totale (60 minuti) di esposizioni e di pause (Gagnon & Kenny 2011, Figura 5)

Un ulteriore elemento di cautela è il fatto che, al contrario di ciò che avviene nell'esposizione a rumore o a vibrazioni, un possibile danno legato ad assorbimento cumulativo di energia non si manifesta su tempi lunghi (mesi/anni), bensì in tempi assai rapidi (ore). Di conseguenza non esistono di fatto margini per recuperare errori commessi in fase di programmazione dell'esposizione.
Ai fini pratici della programmazione della giornata lavorativa, il criterio base è quello di disegnare una sequenza di esposizioni e pause (qui indicata anche come "esposizione multifase") che risulti compatibile con il mantenimento di condizioni organiche accettabili, e comunque con il vincolo che nessuno dei due indici di strain (t_{re}, D) superi mai il rispettivo valore massimo ammissibile ($t_{re,max}$, D_{max}) indicato nella sezione 4.1.5.
Il metodo PHS risulta applicabile, per sua stessa ammissione (sezione 6.2 della norma UNI EN ISO 7933), a qualsiasi sequenza ovvero a qualsiasi esposizione multifase nella quale non si determinino condizioni esterne agli intervalli della tabella 4.2.
L'andamento nel tempo degli indici di strain (t_{re}, D) che consente di verificare il rispetto del vincolo, può pertanto essere calcolato con il metodo PHS. Tuttavia il codice fornito nell'appendice E della norma UNI EN ISO 7933 si applica ad esposizioni monofase in condizioni ambientali costanti. Il codice è stato pertanto adattato per poter trattare esposizioni multifase, frequenti negli ambienti di lavoro.
La valutazione di esposizioni multifase può essere eseguita mediante il file **PHS-Multifase** allegato alla versione online del presente documento sul sito www.inail.it. Il calcolo richiede che in input vengano inserite, indipendentemente per ogni fase sia di esposizione che di pausa, l'attività metabolica, la resistenza termica del vestiario e i quattro parametri ambientali (vedi tabella 4.2).

La Figura 4.4 mostra, a titolo di esempio, l'andamento nel tempo della temperatura rettale ottenuto in risposta alla sequenza temporale di esposizioni e pause descritta nella Tabella 4.4. In rosso la fase A, in violetto la fase B, in azzurro le pause.

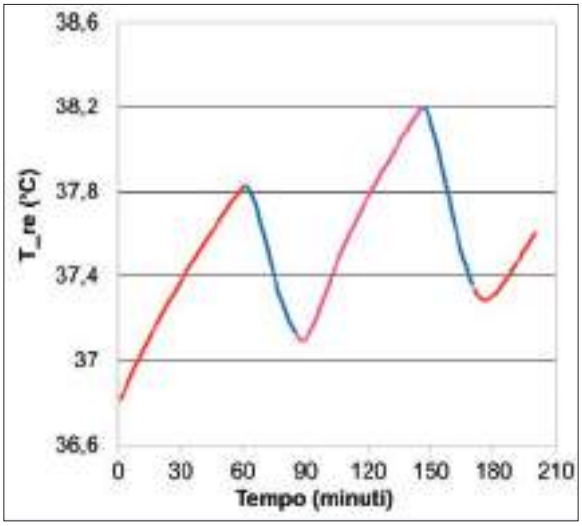

Figura 4.4 - Andamento nel tempo della temperatura rettale per l'esposizione multifase descritta nella Tabella 4.4

Tabella 4.4 - Parametri ambientali ed individuali dell'esposizione multifase

Quantità	Ambiente		
	A	B	Pausa
temperatura dell'aria (°C)	35	35	25
temperatura media radiante (°C)	35	58,4	26,4
umidità relativa (%)	71,2	35	45
velocità relativa dell'aria (m/s)	0,30	0,30	0,3
attività metabolica (met)	2,58	3,44	0,9
isolamento termico del vestiario (clo)	0,5	1	0,5
Sequenza Temporale: A (60 minuti); Pausa (25 minuti); B (60 minuti); Pausa (25 minuti); A (30 minuti)			

Va notato prima di concludere che, in contrasto con la versione attualmente in vigore ISO 7933:2004, la bozza della nuova versione ISO/DIS 7933 rilasciata ad aprile 2018 prevede che la procedura PHS sia applicabile solo in condizioni stazionarie ("Only constant working conditions"). Nel caso in cui questo vincolo permanesse anche nella nuova versione ufficiale dello standard ISO 7933 prevista per metà 2019, il codice PHS non potrebbe più essere utilizzato per la valutazione di esposizioni intermittenti.

4.1.8 Sintesi e sequenza operativa

La sequenza operativa per la valutazione del rischio di strain ambienti caldi è la seguente:

1) identificazione dell'ambiente di lavoro come vincolato;
2) identificazione della/e postazione/i di lavoro, della/e postazione/i di pausa, e del corretto momento nel quale eseguire la misura;
3) verifica della compatibilità dei valori delle quantità fisiche e dei parametri individuali con l'intervalli di applicabilità del metodo PHS;
4) acquisizione, mediante stima diretta o dedotta dalle dichiarazioni del responsabile, dei tempi di esposizione nelle diverse postazioni, nonché della sequenza con la quale tali esposizioni avvengono;
5) uso del metodo PHS per ricavare gli andamenti in funzione del tempo della temperatura rettale e della quantità di liquido perduto in risposta alla sequenza di esposizioni e pause, ovvero all'esposizione multifase, identificata al punto 4);
6) verifica del rispetto dei limiti massimi di accettabilità:

6a) se nessuno dei due limiti viene mai superato, l'esposizione è ammissibile;

6b) se almeno uno dei due limiti viene superato in almeno un istante, l'esposizione è inaccettabile. Di conseguenza devono essere messe in atto azioni o di tipo organizzativo (riducendo o frammentando la durata dell'esposizione negli ambienti a più alta criticità) o di tipo tecnico (riducendo la temperatura dell'aria e/o la temperatura radiante nelle postazioni maggiormente critiche).

Si ripete la verifica di cui al punto 6) fintantoché non si perviene ad una situazione accettabile.

4.2 Misure dei parametri fisici

L'esecuzione delle misure avviene sulla base delle informazioni raccolte durante la fase di ricognizione (sezione 2.2). Per le caratteristiche della strumentazione da utilizzare si rimanda alla sezione 6.

4.2.1 Quantità oggetto della misura

Come anticipato nella sezione 4.1.2, nel metodo PHS è necessario eseguire la misura delle seguenti quantità termo-igrometriche:

- temperatura dell'aria;
- temperatura media radiante;
- umidità dell'aria;
- velocità dell'aria.

4.2.2 Collocazione spaziale e numero delle postazioni di misura

Al contrario di ciò che accade per il comfort termico, nel caso di possibile stress termico le postazioni di misura vanno identificate in modo tale che esse risultino rappresentative di tutte le postazioni occupate nella abituale attività lavorativa del soggetto del quale si intende valutare l'esposizione a microclima.
La sonda per la misura della temperatura va possibilmente posizionata all'ombra.
Le misure vanno eseguite all'altezza dell'addome (1 m per soggetti in piedi e 0,75 m per soggetti seduti (ISO/WD 23451, punto 5.2.4).
Non sussistendo la necessità di un'analisi statistica mirata alla stima dell'incertezza, per ciascuna postazione è sufficiente che sia eseguita una sola misura.

4.2.3 Collocazione temporale delle misure

Ambienti Outdoor

Nel caso di ambienti outdoor l'identificazione degli intervalli temporali nei quali eseguire una misura che sia realmente utilizzabile per verificare l'esistenza di un rischio termico assume un'importanza determinante.
In analogia a quanto fatto in precedenza nella sezione 3.2 per il comfort termico, mutuando un concetto già presente nella legislazione italiana in tema di esposizione professionale a rumore (d.lgs. 81/2008, art. 189 comma 3) e esposizione professionale a vibrazioni (d.lgs. 81/2008, art. 201 comma 2), si raccomanda di eseguire le misure in condizioni termiche associate ad una situazione di "massimo rischio ricorrente". Tale situazione identifica le condizioni termo-igrometriche peggiori fra quelle che si ripetono regolarmente.
Nel caso di esposizioni ad ambienti outdoor le condizioni variano sostanzialmente nel corso della giornata. È pertanto essenziale disporre di misure (o di stime derivate da rilevazioni meteo eseguite da stazioni di pubblico servizio ARPA/aeroportuali ...) delle quantità ambientali rilevanti. Di conseguenza il requisito indicato in precedenza relativamente alla situazione di massimo rischio ricorrente viene ritenuto soddisfatto quando la temperatura massima della giornata nella quale si esegue la misura è non inferiore alla media della temperatura massima del mese più caldo. Le medie mensili delle temperature massime sono reperibili su Ispra 2014.

Ambienti Indoor

Se l'ambiente indoor risulta caratterizzato da condizioni microclimatiche sostanzialmente indipendenti dalle condizioni meteorologiche esterne (ad esempio nelle fonderie), la misura eseguita in qualsiasi momento risulta comunque rappresen-

tativa. Se al contrario le condizioni microclimatiche nell'ambiente indoor mostrano una dipendenza, più o meno marcata, dalle condizioni esterne (ad esempio nelle serre, Diano et al. 2015), la scelta del momento di misura diventa importante, dato che tra la stagione estiva ed invernale possono verificarsi variazioni significative, ed anche all'interno della stessa giornata possono determinarsi notevoli differenze dovute al variare della esposizione alla radiazione solare. Si applica di conseguenza lo stesso criterio già utilizzato per il comfort termico, considerando rappresentativa del "massimo rischio ricorrente" una misura eseguita in un momento in cui la temperatura dell'aria esterna è non inferiore alla media della temperatura massima del mese più caldo.
Relativamente alla distanza temporale fra due misure successive e alla durata della misura, valgono le considerazioni già fatte nella sezione 3.2.4 per le misure finalizzate alla determinazione del comfort termico.

4.3 Stima dei parametri soggettivi

Ancor più di quanto avviene in ambienti moderabili, in ambienti caldi sia l'attività metabolica del soggetto (si veda ad esempio Molinaro et al. 2008, del Ferraro e Molinaro 2010), sia l'isolamento termico del vestiario risultano elementi critici per l'insorgenza di un eventuale strain termico. Nel dettaglio:

- elevati livelli di produzione di energia metabolica associati con il lavoro muscolare aumentano infatti la quantità di calore da dissipare, per lo più mediante sudore;
- elevati livelli di isolamento termico del vestiario rendono più difficoltoso lo smaltimento del calore prodotto.

Va quindi fatta particolare attenzione a stimare con quanta più accuratezza possibile entrambe queste quantità.

4.3.1 Metabolismo

L'attività metabolica è la potenza sviluppata da una serie di processi di ossidazione, detti appunto processi metabolici, che trasformano in calore l'energia chimica contenuta negli alimenti. L'attività metabolica M viene misurata in met, dove 1 met = 58,2 Wm^{-2}. Considerata la superficie del corpo umano medio maschile pari a 1,8 m^2, 1 met risulta pari a circa 104,8 W.
L'effetto del metabolismo sullo strain che il soggetto subisce è molto significativo. A titolo di esempio la figura 4.5 mostra l'andamento temporale della temperatura rettale per diverse assunzioni riguardo al metabolismo del soggetto esposto, a parità di condizioni ambientali (t_a = t_r = 40°C, U.R. = 34%, v_a = 0,3 m/s, M = 150 W/m^2) e di isolamento termico del vestiario (I_{cl} = 0,8 clo). Si nota in particolare come

per M ≤ 2 met il sistema di termoregolazione sia in grado di stabilizzare la temperatura rettale. Ciò al contrario non avviene per valori superiori di M, con il risultato che il tempo massimo di esposizione si porta intorno a 120 minuti per M = 3 met calando poi a 70 minuti per M = 3,5 met.

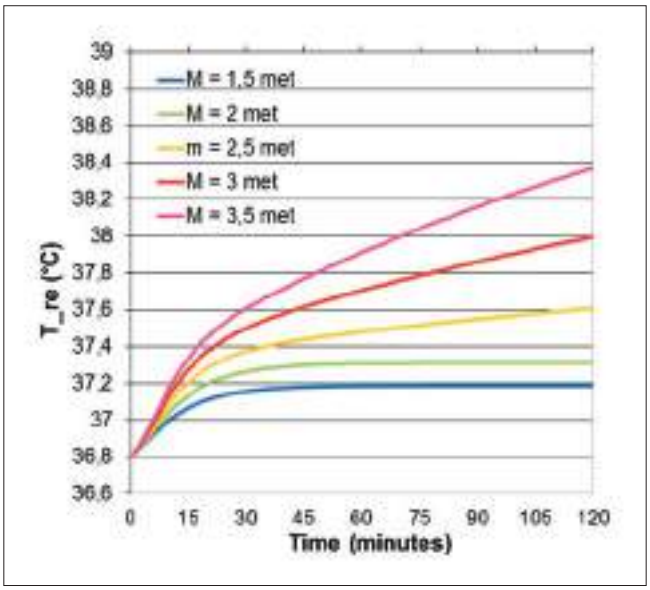

Figura 4.4 - Andamento nel tempo della temperatura rettale per l'esposizione multifase descritta nella Tabella 4.4

In ambienti vincolati caldi l'attività metabolica è generalmente rigidamente determinata dal ciclo produttivo. Al contrario di ciò che avviene negli ambienti moderabili, non esistono quindi margini per interpretazioni soggettive.
La stima più accurata dell'attività metabolica si ottiene a partire dalla misura del consumo di ossigeno. Tale misura risulta tuttavia impraticabile negli ambienti di lavoro. Un livello di accuratezza inferiore, ma comunque buono, si ottiene utilizzando misure di frequenza cardiaca.

Tabella 4.5 - Attività metabolica in funzione della frequenza cardiaca, dell'età e della massa di soggetti maschili e femminili (UNI EN ISO 8996, Tabella C.1)

Age (years)	Weight (kg)				
	50 kg	60 kg	70 kg	80 kg	90 kg
Women					
20	2,9 × HR – 150	3,4 × HR – 181	3,8 × HR – 210	4,2 × HR – 237	4,5 × HR – 263
30	2,8 × HR – 143	3,3 × HR – 173	3,7 × HR – 201	4,0 × HR – 228	4,4 × HR – 254
40	2,7 × HR – 136	3,1 × HR – 165	3,5 × HR – 192	3,9 × HR – 218	4,3 × HR – 244
50	2,6 × HR – 127	3,0 × HR – 155	3,4 × HR – 182	3,7 × HR – 207	4,1 × HR – 232
60	2,5 × HR – 117	2,9 × HR – 145	3,2 × HR – 170	3,6 × HR – 195	3,9 × HR – 219
Men					
20	3,7 × HR – 201	4,2 × HR – 238	4,7 × HR – 273	5,2 × HR – 307	5,6 × HR – 339
30	3,6 × HR – 197	4,1 × HR – 233	4,6 × HR – 268	5,1 × HR – 301	5,5 × HR – 333
40	3,5 × HR – 192	4,0 × HR – 228	4,5 × HR – 262	5,0 × HR – 295	5,4 × HR – 326
50	3,4 × HR – 186	4,0 × HR – 222	4,4 × HR – 256	4,9 × HR – 288	5,3 × HR – 319
60	3,4 × HR – 180	3,9 × HR – 215	4,5 × HR – 249	4,8 × HR – 280	5,2 × HR – 311

La norma UNI EN ISO 8996 illustra nella sezione 6 diverse possibilità al riguardo, e nell'Appendice C.1 propone una tabella, qui riproposta come Tabella 4.5, che consente il calcolo del metabolismo in funzione, oltre che della frequenza cardiaca, del sesso, dell'età e della massa del soggetto.

Tabella 4.6 - Attività metabolica associata al movimento di diverse parti del corpo (UNI EN ISO 8996, Tabella B.1)

Body segment		Workload (Wm^{-2})		
		Light	Medium	Heavy
Both hands	Mean	70	85	95
	Range	<75	75 to 90	>90
One arm	Mean	90	110	130
	Range	<100	100 to 120	>120
Both arms	Mean	120	140	160
	Range	<130	130 to 150	>150
The body	Mean	180	245	335
	Range	<210	210 to 285	>285

In mancanza dei dati relativi al soggetto, o qualora risulti impossibile la misura della frequenza cardiaca, si ricorre a stime basate sull'esame di tabelle. La norma UNI EN ISO 7933 contiene nell'appendice C tre tabelle contenenti valori di attività metabolica associati a diverse attività. Tuttavia, analogamente a quanto già discusso per il comfort termico, appare più sensato appoggiarsi alle tabelle contenute nell'appendice B della norma UNI EN ISO 8996 che consentono di stimare l'attività metabolica sulla base sia delle parti del corpo coinvolte nel movimento, sia dell'impegno richiesto, sia della postura.
Le originali tabelle B.1 e B.2 della norma UNI EN ISO 8996 vengono qui riproposte rispettivamente come Tabella 4.6 e Tabella 4.7.

Tabella 4.7 - Contributo addizionale all'attività metabolica associata alla postura (UNI EN ISO 8996, Tabella B.2)

Body posture	Metabolic rate ($W \cdot m^{-2}$)
Sitting	0
Kneeling	10
Crouching	10
Standing	15
Standing stooped	20

4.3.2 Isolamento termico dell'abbigliamento

L'impatto dell'abbigliamento sullo strain generato da un'esposizione al caldo è un problema assai complesso e assai rilevante che la normativa tecnica affronta facendo uso di varie approssimazioni (Bethea e Parsons 2002, d'Ambrosio et al. 2015).

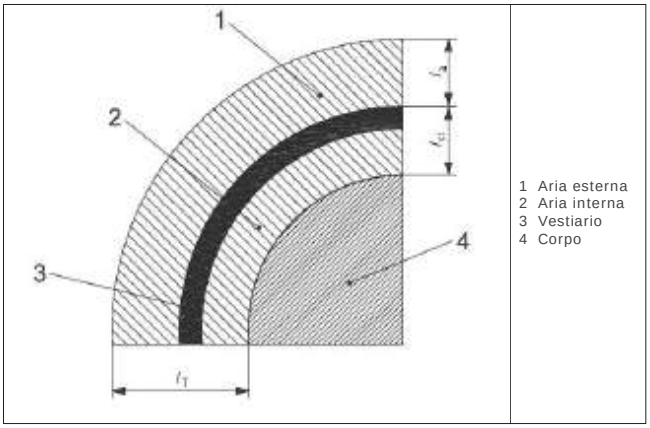

Figura 4.6 - Rappresentazione geometrica dei contributi all'isolamento

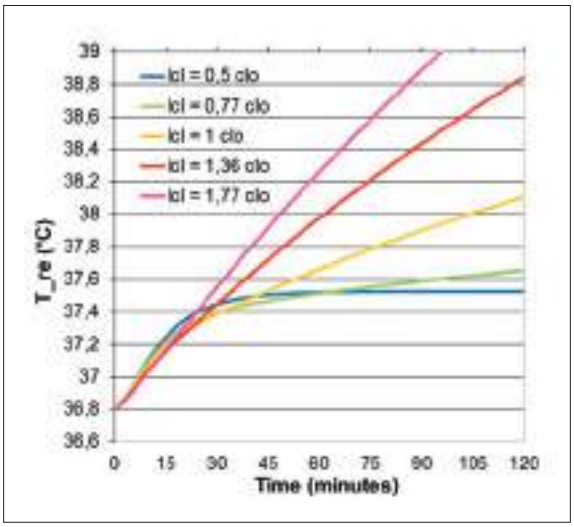

Figura 4.7 - Andamento nel tempo della temperatura rettale per diversi valori di isolamento termico del vestiario I_{cl}

Come descritto dettagliatamente dalla norma UNI EN ISO 9920, l'isolamento termico totale I_T viene assunto costituito dall'isolamento intrinseco I_{cl} garantito dal tessuto e dallo strato d'aria compreso fra corpo e capo d'abbigliamento, e dall'isolamento I_a dovuto allo strato d'aria che il tessuto trascina con sé nel suo movimento (Figura 4.6). La quantità I_a non dipende dallo specifico vestiario indossato. Pertanto, analogamente al metodo PMV, il metodo PHS richiede come dato di input soltanto l'isolamento termico dell'abbigliamento I_{cl}, il quale viene misurato in Clo, dove 1 clo = 0,155 m^2 K W^{-1}. L'effetto dell'isolamento termico sullo strain che il soggetto subisce è molto significativo.

Tabella 4.8 - Isolamento termico associato ad una serie capi di abbigliamento

Garment	I_{clu} clo	I_{clu} $m^2 \cdot K/W$
Underwear		
Panties	0,03	0,005
Underpants with long legs	0,10	0,016
Singlet	0,04	0,006
T-shirt	0,09	0,014
Shirt with long sleeves	0,12	0,019
Panties and bra	0,03	0,005
Shirts/Blouses		
Short sleeves	0,15	0,023
Light-weight, long sleeves	0,20	0,031
Normal, long sleeves	0,25	0,039
Flannel shirt, long sleeves	0,30	0,047
Light-weight blouse, long sleeves	0,15	0,023
Trousers		
Shorts	0,06	0,009
Light-weight	0,20	0,031
Normal	0,25	0,039
Flannel	0,28	0,043
Dresses/Skirts		
Light skirts (summer)	0,15	0,023
Heavy skirt (winter)	0,25	0,039
Light dress, short sleeves	0,20	0,031
Winter dress, long sleeves	0,40	0,062
Boiler suit	0,55	0,085
Sweaters		
Sleeveless vest	0,12	0,019
Thin sweater	0,20	0,031
Sweater	0,28	0,043
Thick sweater	0,35	0,054
Jackets		
Light, summer jacket	0,25	0,039
Jacket	0,35	0,054
Smock	0,30	0,047
High-insulative, fibre-pelt		
Boiler suit	0,90	0,140
Trousers	0,35	0,054
Jacket	0,40	0,062
Vest	0,20	0,031
Outdoor clothing		
Coat	0,60	0,093
Down jacket	0,55	0,085
Parka	0,70	0,109
Fibre-pelt overalls	0,55	0,085
Sundries		
Socks	0,02	0,003
Thick, ankle socks	0,05	0,008
Thick, long socks	0,10	0,016
Nylon stockings	0,03	0,005
Shoes (thin soled)	0,02	0,003
Shoes (thick soled)	0,04	0,006
Boots	0,10	0,016
Gloves	0,05	0,008

A titolo di esempio la figura 4.7 mostra l'andamento temporale della temperatura rettale per diverse assunzioni riguardo all'isolamento termico del vestiario, a parità di condizioni ambientali ($t_a = t_r = 40°C$, U.R. = 34%, $v_a = 0,3$ m/s, M = 150 W/m^2) e di attività metabolica (M = 2,58 met = 150 W/m^2). Si nota in particolare come per $I_{cl} = 0,5$ il sistema di termoregolazione sia in grado di stabilizzare la temperatura rettale per tempi anche molto lunghi. Ciò non avviene per valori più alti di I_{cl}, con il risultato che il tempo massimo di esposizione cala drasticamente fino a portarsi al di sotto di 1 ora per I_{cl} intorno a 1,65 clo.
Analogamente a quanto avviene per il metabolismo, anche per l'abbigliamento si può presumere che esso sia rigidamente determinato dal ciclo produttivo. Di conseguenza anche per questa quantità la possibilità di incertezze legate alla variabilità soggettiva appare remota.
La misura diretta dell'isolamento termico è impossibile negli ambienti di lavoro. Si ricorre pertanto ad una determinazione indiretta mediante opportune tabelle. Analogamente a quanto discusso in precedenza per l'attività metabolica, anche per l'isolamento termico del vestiario l'impatto di questa quantità sullo sviluppo di un eventuale strain termico suggerisce di orientarsi verso una descrizione di livello non elementare. Si può far dunque ricorso alla Tabella 4.8, estratta dalla norma UNI EN ISO 9920, che contiene l'isolamento termico individuale I_{clu} di numerosi capi di abbigliamento.
Quando il soggetto è in movimento il valore di isolamento termico deve essere corretto tenuto conto della velocità di spostamento. Il codice PHS include un algoritmo che tiene automaticamente conto di questo effetto.
I dati relativi ai singoli capi di abbigliamento vanno poi combinati in un dato globale di isolamento termico mediante l'equazione

$$I_{cl} = 0,161 + 0,835 \sum I_{clu} \qquad (4.1)$$

Un secondo elemento chiave nel calcolo del trasporto di calore attraverso un insieme di capi di abbigliamento è la resistenza al passaggio di vapore acqueo (water vapour resistance $R_{e,T}$). La resistenza al passaggio del vapore acqueo viene stimata sulla base dell'isolamento termico e dell'indice di permeabilità. Il codice PHS include un algoritmo che tiene conto di questo effetto assumendo per l'indice di permeabilità un valore costante, pari a 0,38.

4.4 Controllo del microclima in ambienti termici caldi

Gli ambienti caldi, almeno quelli indoor, sono tipicamente caratterizzati dalla presenza di intense fonti di calore che determinano una combinazione di alte temperature dell'aria e alte temperature radianti. La presenza di alti tassi di umidità può rendere ancor più gravoso l'impegno fisico richiesto all'organismo del soggetto esposto, ma non è necessariamente una caratteristica di questi ambienti.

Anche in questi ambienti rimangono validi i principi già espressi nella sezione sugli ambienti termici moderati, che si esplicano nelle seguenti azioni:

- interposizione di schermi che evitino l'esposizione diretta del soggetto alla radiazione emessa dalle superfici calde, almeno durante le operazioni che non necessitano che tale esposizione avvenga. I pannelli devono essere totalmente riflettenti con parziale assorbimento della radiazione incidente e rivestiti di materiali metallici in modo da ridurne l'emissività. L'assenza (o la minor presenza) di corpi a temperature molto elevate nel campo di vista del soggetto produce una riduzione della temperatura media radiante. Naturalmente, quando possibili, interventi di coibentazione diretta della sorgente risultano ancor più efficaci, in quanto riducendone la temperatura superficiale abbassano lo scambio termico con il soggetto, che avviene sia per irraggiamento che per convezione.
- estrazione di grandi volumi di aria dalle immediate vicinanze delle sorgenti di calore. L'alta temperatura dell'aria è infatti dovuta in buona parte alla circolazione di aria che è stata riscaldata dal contatto con la superficie calda. Se tale aria viene prontamente ed efficacemente aspirata e sostituita con aria più fresca, si ottiene una apprezzabile diminuzione della temperatura dell'aria in tutta l'area in prossimità della sorgente. Questa soluzione è perseguibile se la sorgente di calore non coincide con la postazione fissa del lavoratore (es. forno per fusione metalli) È bene fare attenzione a che la velocità dell'aria sulla postazione di lavoro non divenga eccessiva.
- installazione di cabine climatizzate, ben isolate dall'ambiente. Questa soluzione è adottabile specialmente in condizioni particolari, come in vicinanza di forni, laminatoi, e simili attrezzature.

Fatto salvo che i lavoratori destinati ad attività con rischio da stress da caldo hanno superato positivamente la visita di idoneità, è sempre utile ricordare che esistono anche regole di semplice e generale applicazione che possono ridurre sensibilmente i rischi da ambienti severi caldi.
Ad esempio, l'acclimatazione progressiva in occasione di esposizioni sistematiche ad alte temperature permette di adattare alcuni parametri fisiologici in modo tale da contenere i rischi; va tuttavia tenuto presente che anche una sola settimana di pausa lavorativa è sufficiente a far perdere tali capacità (ISO/WD 23451, sezione 8.4).
Anche la somministrazione di abbondanti liquidi ai lavoratori, in modo tale da reintegrare, almeno in parte, le quantità perdute con la sudorazione (McArdle et al. 2014; Sawka et al. 1984), fa parte di queste regole. Si ricorda che in assenza di reintegro dei liquidi perduti nel corso dell'attività lavorativa la permanenza a determinate condizioni ambientali è meno della metà di quella consentita con libero accesso a liquidi (UNI EN ISO 7933) e che la somministrazione di acqua deve essere accompagnata da quella dei sali minerali che vengono persi con la sudorazione, in particolar modo sodio e potassio.
Possono inoltre essere adottate misure a carattere procedurale, che si debbono

integrare con i percorsi di informazione e formazione degli operatori (ISO/WD 23451, sezione 7). Le procedure, che è sempre opportuno siano scritte, sono un insostituibile elemento di gestione di condizioni di esposizione:

- tecnicamente non controllabili (es.: l'esposizione a condizioni estreme in luoghi all'aperto);
- ad alto rischio potenziale, se non affrontate con la dovuta attenzione.

Relativamente a questi due aspetti, risulta importante la formalizzazione di procedure per lavori all'aperto, in quota (es.: in edilizia) o isolati (es.: in agricoltura). In questi casi, nei quali l'attività non determina attivamente il microclima presente, e le lavorazioni vengono eseguite anche in pieno sole durante la stagione estiva, è importante definire le condizioni limite per l'effettuazione delle attività più a rischio. Ciò può essere fatto utilizzando i dati termo-igrometrici della zona, associati a dati indicativi per la temperatura radiante t_r = 75°C per lavori agricoli, t_r = 80°C per lavorazioni edili (che possono essere svolte in vicinanza di materiali moderatamente riflettenti). L'indicazione che si fornisce è quella di evitare esposizioni di durata prossima al tempo massimo calcolato dal software PHS per quelle condizioni ambientali, e comunque escludere l'attività quando il tempo massimo risulta inferiore a 30 minuti (vedere il punto 4.1.6).

Stress termico da freddo

Capitolo 5 - Ambienti vincolati freddi

Sulla base della definizione data nella precedente sezione 2, negli ambienti vincolati freddi esistono vincoli ineludibili in grado di pregiudicare il raggiungimento di condizioni di comfort. La valutazione da eseguire deve pertanto mirare a verificare innanzitutto l'esistenza e successivamente l'entità di un eventuale stress termico.
Il riferimento legislativo fondamentale per la valutazione degli ambienti termici vincolati è il capo I del Titolo VIII del d.lgs. 81/2008. In particolare negli articoli 180 - 185 viene chiarito che il microclima è a tutti gli effetti un agente di rischio fisico e che di conseguenza va eseguita una valutazione del rischio secondo quanto specificato nello stesso decreto all'art. 28. Tuttavia, al contrario di quanto avviene per il rischio rumore e altri rischi fisici, la legge non contiene alcune indicazioni relative ai metodi mediante i quali verificare la presenza e valutare uno stress termico. In assenza di disposizioni di legge, la materia è interamente delegata alle *norme tecniche*.

5.1 Metodo IREQ (Insulation REQired)

5.1.1 I principi del metodo

In ambienti freddi la vigente normativa tecnica fa riferimento unicamente al metodo IREQ (Insulation REQuired ovvero isolamento richiesto), discusso nella norma UNI EN ISO 11079:2007. Anche questo metodo, in analogia con il metodo PMV utilizzato in ambienti termici moderati e il metodo PHS utilizzati in ambienti caldi, si fonda sulla nozione che le condizioni ideali coincidono con la condizione di neutralità termica, mentre lo stress termico è sempre più intenso quanto più lo squilibrio energetico (in questo caso negativo, ovvero contraddistinto da una perdita netta di energia) è grande.
Il metodo IREQ si basa sulle equazioni del bilancio termico dell'organismo umano. Il metodo IREQ si basa su un codice che analizzando tutti gli scambi di energia fra soggetto ed ambiente, fornisce l'isolamento termico del vestiario IREQ, richiesto allo scopo di mantenere condizioni organiche accettabili durante l'esposizione. La scelta di risolvere l'equazione assumendo come incognita il vestiario richiesto riflette l'importanza centrale di questo parametro, in assenza di efficienti meccanismi fisiologici di minimizzazione della dissipazione del calore.

Al contrario del codice PHS, il codice IREQ non mostra una dipendenza esplicita dal tempo.

5.1.2 Parametri necessari per il metodo IREQ

Le quantità richieste per l'applicazione del metodo IREQ sono le stesse su cui si basano i metodi PMV e PHS, ovvero quattro quantità fisiche identificate come parametri ambientali e due descrittori di specifiche caratteristiche dell'individuo identificati come parametri individuali.
La Tabella 5.1 ne riassume denominazioni, simboli ed unità di misura.

Tabella 5.1 - Parametri ambientali ed individuali che caratterizzano il rapporto individuo-ambiente in ambienti freddi

Parametri	Quantità	Simbolo	Unità di misura
AMBIENTALI	temperatura dell'aria	t_a	°C o K
	temperatura media radiante	t_r	°C o K
	pressione parziale del vapore acqueo	p_a	Pa (1 Pa = 1 N/m^2)
	velocità relativa dell'aria	v_a	m/s
INDIVIDUALI	attività metabolica (ovvero dispendio metabolico ovvero metabolismo energetico)	M	W/m^2 o met (1 met = 58,2 W/m^2) pari a 104,8 W per la superficie corporea standard di un individuo adulto (1,8 m^2)
	isolamento termico del vestiario	I_{cl}	m^{2}K/W o clo (1 clo = 0,155 m^{2}K/W)

5.1.3 Applicabilità del metodo IREQ

Secondo quanto indicato all'interno della stessa norma tecnica UNI EN ISO 11079, l'affidabilità del metodo IREQ risulta verificata soltanto all'interno di determinati intervalli stabiliti sia per i parametri ambientali che per i parametri individuali, riportati nella sottostante Tabella 5.2. Anche se la Tabella 5.2 non contiene limiti per la resistenza termica del vestiario, esistono vincoli di natura pratica che di fatto restringono questa quantità a valori non superiori a 4,5 clo (unica eccezione: sacchi a pelo).

Tabella 5.2 - Intervalli di applicabilità dei parametri ambientali ed individuali

Quantità	Simbolo	Intervallo utile	Unità di misura
temperatura dell'aria	t_a	> 10	°C
temperatura media radiante		-----	
pressione parziale del vapore acqueo	p_a	-----	Pa
velocità relativa dell'aria	v_a	0,4 18	m/s
attività metabolica	M	1 5	met
isolamento termico del vestiario	I_{cl}	-----	clo

5.1.4 Descrittori di rischio

Il metodo IREQ utilizza un unico descrittore del rischio detto IREQ. Il metodo prevede tuttavia il calcolo di due diversi valori di quest'indice indicati come $IREQ_{min}$ e $IREQ_{neutral}$.

- $IREQ_{min}$ è il valore di isolamento termico in grado di assicurare condizioni minime accettabili, ovvero con presenza di una sensibile, ma tollerabile, sensazione di freddo
- $IREQ_{neutral}$ è il valore di isolamento termico in grado di garantire condizioni di neutralità termica.

La Figura 5.1 mostra l'andamento dei valori $IREQ_{min}$ (linea inferiore di ciascuna coppia) e $IREQ_{neutral}$ (linea superiore di ciascuna coppia) in funzione della temperatura operativa (in pratica equivalente alla temperatura dell'aria) per diverse assunzioni sulla attività metabolica.
Il calcolo degli indici di rischio ($IREQ_{min}$, $IREQ_{neutral}$), può venire eseguito con facilità mediante il software IREQ2009 (attualmente nella versione 4.2), accessibile on-line all'indirizzo:

http://www.eat.lth.se/fileadmin/eat/Termisk_miljoe/IREQ2009ver4_2.html

La Figura 5.2 mostra una schermata del software nella quale compaiono sia i dati di input sia i risultati. Va notato che il software IREQ2009 richiede in input un numero di quantità superiore a quello richiesto dai metodi PMV per il comfort termico e PHS per lo strain termico in ambienti caldi. Nel dettaglio, accanto ai quattro parametri ambientali (t_a, t_r, RH, v_a) e ai due parametri individuali (M, I_{cl}) elencati nella Tabella 5.1, vengono richiesti tre ulteriori quantità, ovvero il lavoro meccanico W, la velocità media di spostamento del soggetto esposto w e la permeabilità all'aria del vestiario p. Per quest'ultima quantità, stante la difficoltà di disporre di dati realistici, vengono forniti all'interno della stessa pagina web dei valori di riferimento. È

importante precisare che nel software IREQ2009 l'accettabilità del vestiario utilizzato nell'ambiente in esame va stabilita confrontando il dato relativo alla sua resistenza termica "AVAILABLE basic clothing insulation" (ultima riga in input) con la quantità "REQUIRED basic clothing insulation" (seconda riga in output).

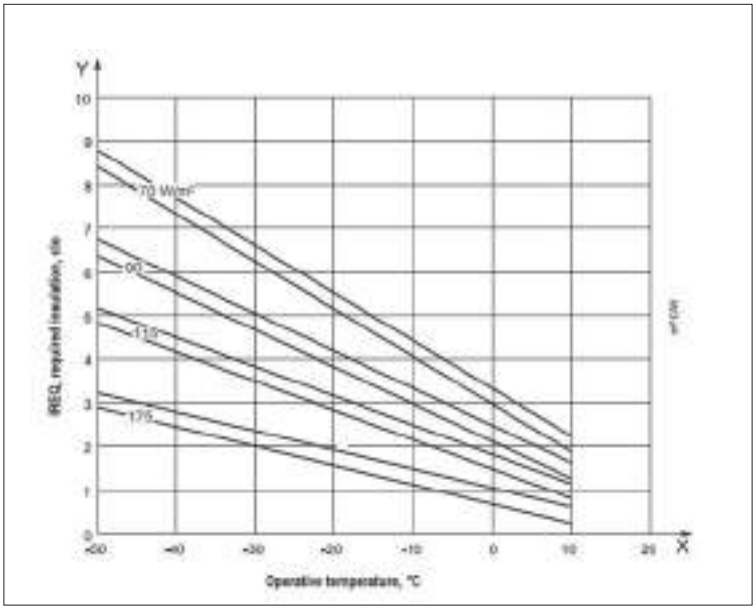

Figura 5.1 - $IREQ_{min}$ e $IREQ_{neutral}$ in funzione della temperatura operativa (UNI EN ISO 11079, Figura E.3)

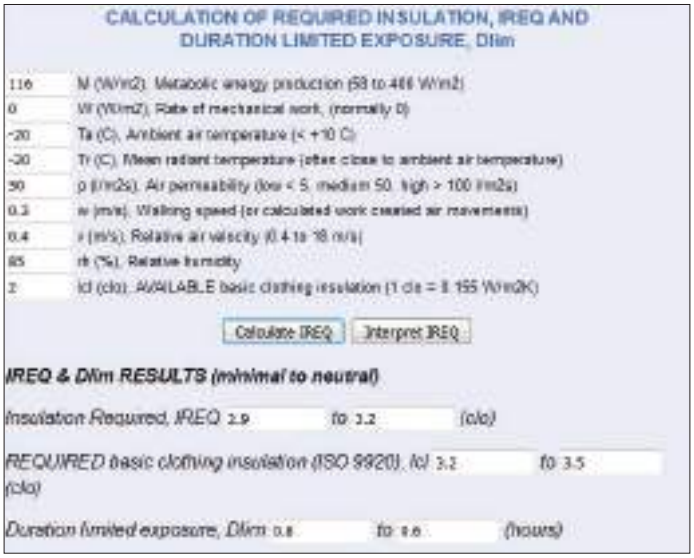

Figura 5.2 - Schermata del software on-line "IREQ2009"

È altresì possibile applicare il metodo IREQ utilizzando (ad esempio all'interno di una macro di Excel) il codice di calcolo (JAVA) reperibile alla pagina web sopra indicata. L'appendice F della stessa norma contiene numerosi esempi dei risultati dell'applicazione del modello a casi pratici, i quali possono essere utilizzati per verificare l'esattezza di eventuali codici messi a punto dall'utente sulla base di quello fornito nella norma.

5.1.5 Limiti di accettabilità

Dal confronto di queste due quantità con l'isolamento termico I_{cl} associato all'abbigliamento realmente utilizzato, si determina l'appartenenza del caso in esame ad uno dei tre seguenti:

- $I_{cl} < IREQ_{min}$ implica protezione insufficiente, e conseguente rischio di ipotermia;
- $I_{cl} > IREQ_{neutral}$ implica iper-protezione, e conseguente rischio di sudorazione, che, in presenza di un ambiente esterno rigido, può produrre effetti nocivi;
- $IREQ_{neutral} > I_{cl} > IREQ_{min}$ definisce l'intervallo di accettabilità, garantendo condizioni organiche caratterizzate da una sensazione soggettiva di freddo che varia da minima a significativa, senza tuttavia mai indurre derive termiche e conseguenti possibili ipotermie.

5.1.6 Tempi massimi di esposizione

L'esposizione ad ambienti severi freddi risulta limitata ad una durata massima:

$$D_{lim} = Q_{lim} / S \qquad (5.1)$$

dove Q_{lim} è la massima perdita di energia tollerabile senza serie conseguenze, pari a 40 Wh/m^2, ed S è lo squilibrio energetico (ovvero il raffreddamento subito dall'organismo) risultante dalla soluzione dell'equazione di bilancio energetico.

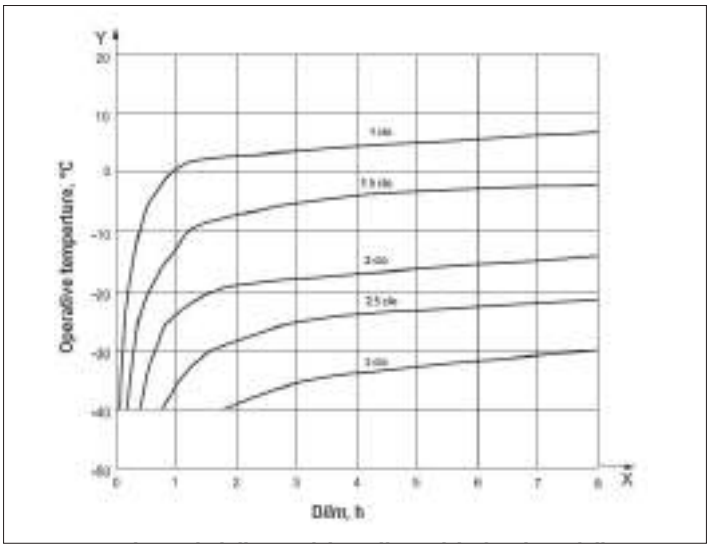

Figura 5.3 - Tempi massimi di esposizione (in ore) in funzione della temperatura operativa e del valore di $IREQ_{neutral}$, (UNI EN ISO 11079, Figura E.7)

La Figura 5.3 mostra a titolo di esempio i valori di D_{lim} (in ore, indicati in ascissa) che si ottengono in corrispondenza di una specifica attività metabolica (145 Wm^{-2} = 2,5 met), in funzione della temperatura operativa e dell'isolamento fornito dall'abbigliamento indossato.
La norma raccomanda particolare cura nel trattare situazioni nelle quali il tempo massimo di esposizione risulti inferiore a 30 minuti.
Alcune criticità nell'uso della norma tecnica UNI EN ISO 11079 per la valutazione di esposizioni ad ambienti caratterizzati da freddo estremo sono state discusse da d'Ambrosio Alfano et al. (2013).

5.1.7 Pause

Una delle opportunità che il metodo IREQ permette è quella di stimare le pause con le quali interrompere l'attività negli ambienti severi freddi. La durata minima di tale pausa (detta D_{rec}) può venire calcolata con lo stesso metodo con il quale viene calcolato D_{lim}, ovvero come:

$$D_{rec} = Q_{lim} / S' \qquad (5.2)$$

dove Q_{lim} è lo stesso usato in precedenza per il calcolo di DLE, e S' è lo squilibrio termico (questa volta positivo) risultante dalla soluzione dell'equilibrio energetico

ottenuta per il soggetto (con l'opportuno abbigliamento e l'opportuna attività metabolica) nell'ambiente usato per la pausa (caratterizzato dai suoi parametri fisici).
Il software IREQ2009 consente, accanto al calcolo di $IREQ_{min}$ e $IREQ_{neutral}$, il calcolo sia della durata massima consentita per l'esposizione (D_{lim}) corrispondenti sia a condizioni di isolamento minimo che a condizioni di isolamento neutro, sia del tempo di recupero D_{rec}. Nel caso di esposizioni multifase, le successive permanenze in ambienti freddi possono essere valutate mediante una nuova applicazione dello stesso software.
Gli ambienti vincolati freddi sono gli unici per i quali è disponibile uno standard di gestione del rischio (UNI EN ISO 15743:2008), a supporto dello standard di valutazione del rischio.
Lo standard contiene checklist per identificare, valutare e gestire i problemi connessi all'esposizione al freddo ($t_a \leq 10°C$) con un esempio (Annex E) esemplificativo dei tre livelli in un'industria alimentare (catena del freddo). Interessante è il questionario (Annex D) suggerito come base per future linee guida relative ad ulteriori esami basati su un controllo sanitario, al fine di accertare eventuali incompatibilità all'esposizione al freddo.

5.2 Misure dei parametri fisici

L'esecuzione delle misure avviene sulla base delle informazioni raccolte durante la fase di ricognizione (sezione 2.2). Per le caratteristiche della strumentazione da utilizzare si rimanda alla sezione 6.

5.2.1 Numero di misure per postazione

Come anticipato nella sezione 5.1.2, nel metodo IREQ è necessario eseguire la misura delle seguenti quantità termo-igrometriche:
- temperatura dell'aria,
- temperatura media radiante,
- umidità dell'aria,
- velocità dell'aria.

Le misure vanno eseguite all'altezza del tronco (tipicamente 1,1 metri).

5.2.2 Collocazione spaziale e numero delle postazioni di misura

Al contrario di ciò che accade per il comfort termico, nel caso di possibile stress termico le postazioni di misura vanno identificate in modo tale che esse risultino

rappresentative di tutte le postazioni occupate nella abituale attività lavorativa del soggetto del quale si intende valutare l'esposizione a microclima.
Non sussistendo la necessità di un'analisi statistica mirata alla stima dell'incertezza, per ciascuna postazione è sufficiente che sia eseguita una sola misura.

5.2.3 Collocazione temporale delle misure

Ambienti Outdoor

Nel caso di ambienti outdoor l'identificazione degli intervalli temporali nei quali eseguire una misura che sia realmente utilizzabile per verificare l'esistenza di un rischio termico assume un'importanza.
In analogia a quanto fatto in precedenza nella sezione 4.2 per il comfort termico, mutuando un concetto già presente nella legislazione italiana in tema di esposizione professionale a rumore (d.lgs. 81/2008, art. 189 comma 3) e esposizione professionale a vibrazioni (d.lgs. 81/2008, art. 201 comma 2), si raccomanda di eseguire le misure in condizioni termiche associate ad una situazione di "massimo rischio ricorrente". Tale situazione identifica le condizioni termo-igrometriche peggiori fra quelle che si ripetono regolarmente.
Nel caso di esposizioni ad ambienti outdoor le condizioni variano sostanzialmente nel corso della giornata. È pertanto essenziale disporre di misure (o di stime derivate da rilevazioni meteo eseguite da stazioni di pubblico servizio ARPA/aeroportuali ...) delle quantità ambientali rilevanti. Di conseguenza il requisito indicato in precedenza relativamente alla situazione di massimo rischio ricorrente viene ritenuto soddisfatto quando la temperatura media della giornata nella quale si esegue la misura è non superiore alla media della temperatura media del mese più freddo. Le medie mensili delle temperature medie sono reperibili su Ispra 2014.

Ambienti Indoor

Se l'ambiente indoor risulta caratterizzato da condizioni microclimatiche sostanzialmente indipendenti dalle condizioni meteorologiche esterne (es. celle frigo), la misura eseguita in qualsiasi momento risulta comunque rappresentativa. Se al contrario le condizioni microclimatiche nell'ambiente indoor mostrano una dipendenza, più o meno marcata, dalle condizioni esterne, la scelta del momento di misura diventa importante, dato che tra la stagione estiva ed invernale possono verificarsi variazioni significative, ed anche all'interno della stessa giornata possono determinarsi notevoli differenze dovute al variare della esposizione alla radiazione solare. Si applica di conseguenza lo stesso criterio già utilizzato per il comfort termico, considerando rappresentativa del "massimo rischio ricorrente"

una misura eseguita in un momento in cui la temperatura dell'aria esterna è non superiore alla media della temperatura media del mese più freddo.
Relativamente alla distanza temporale fra due misure successive e alla durata della misura, valgono le considerazioni già fatte nella sezione 3.2.4 per le misure finalizzate alla determinazione del comfort termico.

5.3 Stima dei parametri soggettivi

Ancor più di quanto avviene in ambienti moderabili, in ambienti freddi sia l'attività metabolica del soggetto, sia l'isolamento termico del vestiario risultano elementi critici per l'insorgenza di un eventuale strain termico.
In particolare, come evidente anche dalla scelta di utilizzarlo come descrittore di rischio, l'isolamento termico del vestiario rappresenta il parametro chiave in questo tipo di ambienti.

5.3.1 Metabolismo

L'attività metabolica è un importante fattore determinante del comfort. È la potenza sviluppata da una serie di processi di ossidazione, detti appunto processi metabolici, che trasformano in calore l'energia chimica contenuta negli alimenti.

Tabella 5.3 - Metabolismo associato ad una serie di attività lavorative

Occupation		Metabolic rate ($W \cdot m^{-2}$)
Office work	Sedentary work	55 to 70
	Clerical work	70 to 100
	Janitor	80 to 115
Craftsmen	Bricklayer	110 to 160
	Carpenter	110 to 175
	Glazier	90 to 125
	Painter	100 to 130
	Baker	110 to 140
	Butcher	105 to 140
	Clock and watch repairer	55 to 70
Mining industry	Haulage operator	70 to 85
	Coal hewer	110
	Cokeoven worker	115 to 175
Iron and steel industry	Blast furnace worker	170 to 220
	Electric furnace worker	125 to 145
	Hand moulder	140 to 240
	Machine moulder	105 to 165
	Foundry man	140 to 240
Iron and metal-working industry	Smith	90 to 200
	Welder	75 to 125
	Turner	75 to 125
	Drilling machine operator	80 to 140
	Precision mechanic	70 to 110
Graphic occupations	Hand compositor	70 to 95
	Book-binder	75 to 100
Agriculture	Gardener	115 to 190
	Tractor driver	85 to 110
Traffic	Car driver	70 to 100
	Bus driver	75 to 125
	Tramway driver	80 to 115
	Crane operator	65 to 145
Various occupations	Laboratory assistant	85 to 100
	Teacher	85 to 100
	Shop assistant	100 to 120
	Secretary	70 to 85

Come negli ambienti caldi, anche negli ambienti vincolati freddi l'attività metabolica è generalmente rigidamente determinata dal ciclo produttivo. Al contrario di ciò che avviene negli ambienti moderabili, non esistono quindi margini per interpretazioni soggettive.
La misura diretta dell'attività metabolica, per quanto in linea di principio possibile, risulta impraticabile negli ambienti di lavoro. Si ricorre pertanto ad una determinazione indiretta mediante opportune tabelle. La norma UNI EN ISO 11079 contiene nell'appendice C una tabella con alcuni valori di metabolismo legati allo svolgimento di alcune attività. Si tratta comunque di una indicazione molto grossolana.

È preferibile, in analogia a quanto avviene in ambienti moderabili ed in ambienti caldi, utilizzare le informazioni disponibili nella norma UNI EN ISO 8996, la quale propone diversi metodi due dei quali risultano adeguati per ambienti nei quali di esegua una valutazione del comfort.
Una prima possibilità è di utilizzare un approccio "per compiti": se l'attività in esame compare nella Tabella 5.3, il metabolismo viene stimato direttamente; se al contrario l'attività in esame non compare nella Tabella 5.3, il metabolismo va stimato indirettamente ovvero individuando il valore che corrisponde all'attività più prossima (da un punto di vista energetico) a quella in esame.
In alternativa si può utilizzare un approccio basato sul movimento dei diversi distretti corporei. In pratica l'attività viene inizialmente analizzata sulla base delle parti del corpo in movimento e dell'impegno richiesto (Tabella 5.4). Dopodiché si aggiunge un eventuale contributo dovuto alla postura (Tabella 5.5).

Tabella 5.4 - Attività metabolica associata al movimento di diverse parti del corpo (UNI EN ISO 8996, Tabella B.1)

Body segment		Workload (Wm^{-2})		
		Light	Medium	Heavy
Both hands	Mean	70	85	95
	Range	<75	75 to 90	>90
One arm	Mean	90	110	130
	Range	<100	100 to 120	>120
Both arms	Mean	120	140	160
	Range	<130	130 to 150	>150
The body	Mean	180	245	335
	Range	<210	210 to 285	>285

Tabella 5.5 - Contributo addizionale all'attività metabolica, associato alla postura (UNI EN ISO 8996, Tabella B.2)

Body posture	Metabolic rate ($W \cdot m^{-2}$)
Sitting	0
Kneeling	10
Crouching	10
Standing	15
Standing stooped	20

5.3.2 Isolamento termico dell'abbigliamento

Analogamente al metodo PMV e al metodo PHS, il metodo IREQ richiede come dato di input per il calcolo della durata massima dell'esposizione, l'isolamento termico dell'abbigliamento I_{cl}.

Figura 5.4 - Etichetta tipo raccomandata dalla UNI EN 342

Analogamente a quanto avviene in ambienti cadi, anche in ambienti freddi si può presumere che esso sia rigidamente determinato dal ciclo produttivo. Di conseguenza anche per questa quantità la possibilità di incertezze legate alla variabilità soggettiva appare remota.
In aggiunta alla resistenza termica I_{cl}, il metodo IREQ richiede anche che venga indicata (vedi Figura 5.2) la permeabilità all'aria (*p*) dell'abbigliamento.
Entrambe queste quantità dovrebbero essere fornite dal produttore di ciascun capo, certificato come DPI secondo la UNI EN 342:2004 e la UNI EN 14058:2004. Nella Figura 5.4 viene mostrata a titolo di esempio il prototipo di etichetta suggerito dalla UNI EN 342. Tuttavia i capi certificati secondo la UNI EN 342 /UNI EN 14058 sono pochi, e comunque tutti orientati a protezioni da grande freddo. Appare pertanto più proficuo utilizzare le informazioni contenute nella norma UNI EN ISO 9920, che contiene informazioni relative all'isolamento termico individuale I_{clu} di un gran numero di indumenti, all'isolamento termico di insiemi di indumenti ed anche alla permeabilità all'aria di diversi materiali.

Tabella 5.6 - Permeabilità dell'aria per diversi materiali (estratto dalla tabella B.3 della UNI EN ISO 9920)

Code	Type/construction	Fibre content	Thickness[a] mm	Fabric insulation[b] $m^2 \cdot K/W^{-1}$	Fabric surface density $g \cdot m^{-2}$	Air permeability[c] $l \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$
01	Broadcloth/plain weave	65 % polyester, 35 % cotton	0,38	0,029	110	426
02	Flannel/plain weave	80 % cotton, 20 % polyester	1,08	0,045	150	355
03	Double knit/weft knit	100 % cotton	0,96	—	—	426
04	Double knit/weft knit	100 % polyester	1,06	0,022	—	1 453
05	Fleece-backed double knit	50 % polyester, 38 % cotton, 12 % viscose	2,23	—	—	1 072
06	Jersey/weft knit	100 % acrylic	1,62	—	—	1 407
07	Jersey/weft knit	85 % wool, 15 % nylon	3,55	—	—	1 631
08	Double knit/weft knit	50 % cotton, 50 % polyester	1,1	—	—	1 727
09	Denim/twill weave	100 % cotton	0,8	0,023	206	246
10	Tweed/plain weave	50 % wool, 50 % polyester	1,27	0,04	310	899

Si suggerisce di procedere come segue:

a) dalla tabella A.4 della UNI EN ISO 9920 si ottiene una stima iniziale I_{cl0} pari all'isolamento termico dell'insieme di indumenti più vicino a quello realmente utilizzato. Se necessario si modifica l'insieme individuato sostituendo un indumento. Indichiamo con ΔI_{clu} la differenza fra l'isolamento termico dell'indumento introdotto e quella dell'indumento sostituito. Il valore finale di I_{cl} si determina (UNI EN ISO 9920) utilizzando l'equazione

$$I_{cl} = I_{cl0} + 0{,}835 \times \Delta I_{clu} \qquad (5.3)$$

b) dalla tabella B.3 della UNI EN ISO 9920 (qui riportata come Tabella 5.6) si ricavano le permeabilità all'aria dei diversi materiali presenti nell'abbigliamento utilizzato. Non esistono metodi standardizzati per combinare le permeabilità all'aria di diversi materiali. La permeabilità all'aria complessiva può essere stimata attraverso una media dei valori p_i relativi ai materiali in cui sono realizzati gli indumenti dello strato più esterno, pesati dalla frazione A_i (UNI EN ISO 9920 appendice B, ed in particolare figure B.4, B.5, B.8 e B.9) che essi occupano sulla superficie corporea, ovvero

$$p = \Sigma(A_i\, p_i) / \Sigma A_i \qquad (5.4)$$

c) Si inseriscono i valori di I_{cl} e di p così ottenuti nella procedura di calcolo del metodo IREQ.

5.4 Controllo del microclima in ambienti termici freddi

Gli ambienti indoor severi freddi sono caratterizzati da temperature molto basse e tipicamente uniformi, il cui scopo è generalmente quello di mantenere nel tempo sostanze che a temperature più elevate si degraderebbero velocemente. È pertanto difficile, spesso impossibile, intervenire sui parametri ambientali in quanto ciò determinerebbe una incompatibilità con il risultato che si intende conseguire con l'uso di un simile ambiente.
L'unico suggerimento progettuale che può essere dato con una certa generalità di applicazione riguarda la velocità dell'aria, che è una significativa concausa di problemi di ipotermia, e che pertanto va sempre mantenuta ai livelli più bassi possibili.
Il principale metodo di controllo del microclima in ambienti severi freddi è senz'altro l'abbigliamento. Come discusso estensivamente nella precedente sezione 5.1, l'effetto legato all'utilizzo di abbigliamento con diverse caratteristiche di isolamento termico è trattato, ed è anzi il punto centrale della procedura di valutazione dello stress descritta dalla norma tecnica UNI EN ISO 11079.
L'altro strumento di contenimento del rischio è la definizione di un adeguato schema di lavoro. In particolare, una opportuna scelta delle quantità DLE e RT, ovvero il tempo massimo di permanenza continuativa nell'ambiente e la durata minima della pausa (UNI EN ISO 11079) consente di abbassare notevolmente il rischio di ipotermia. La definizione di queste quantità è naturalmente condizionata alla conoscenza delle condizioni ambientali e dell'abbigliamento disponibile.
Fatto salvo che i lavoratori destinati ad attività con rischio da stress da freddo hanno superato positivamente la visita di idoneità, è sempre utile ricordare che esistono anche regole di semplice e generale applicazione che possono ridurre sensibilmente i rischi da ambienti severi freddi.
Esistono poi tutta una serie di misure che permettono di contenere al minimo i disagi legati al lavoro in ambienti severi freddi, quali:

- la realizzazione di un percorso controllato nei tempi e nei parametri termo-igrometrici tra le condizioni estive (che in estate possono superare i 40°C) e gli ambienti di lavoro (che possono essere anche a -20°C o -25°C). Particolare importanza assumono gli spogliatoi che, in condizioni estreme, vanno preceduti e/o seguiti da ambienti di acclimatazione in modo da ridurre l'entità degli sbalzi termici ed aumentare i tempi in cui questi sono subiti dai lavoratori;
- la realizzazione di impianti di raffreddamento con flussi d'aria direzionati nelle aree non frequentate dai lavoratori (corridoi in cui vengono movimentate le merci manualmente o con o mezzi meccanici). Nel caso la frequentazione da parte dei lavoratori sia occasionale, il flusso d'aria deve disattivarsi all'apertura della porta d'accesso.
- l'installazione di uffici/box/cabine opportunamente climatizzate, ben isolate dall'ambiente, può consentire di ridurre la permanenza negli ambienti severi ai soli "tempi tecnici", ritrovando temperature gradevoli per le altre attività in cui non sono presenti particolari esigenze produttive che impongano di rimanere al

freddo. Questi ambienti a microclima controllato sono anche la soluzione ideale per la fruizione delle pause soprattutto se dispongono di punti di erogazione di bevande calde.

Oltre alle misure suddette possono essere adottate importanti misure a carattere procedurale, che si debbono integrare con i percorsi di informazione e formazione degli operatori.
Ci si riferisce in primo luogo alle pause ed alle loro modalità di fruizione, che è consigliato avvenga in ambienti termicamente confortevoli, ma ci si riferisce anche alla tutela della salute e della sicurezza di operatori che possono trovarsi ad operare in condizioni di basse/bassissime temperature in condizioni di emergenza. Ecco allora che l'illuminazione di sicurezza delle celle frigo, la certezza di un sistema di apertura manuale per l'uscita in ambienti a temperatura confortevole, l'utilizzo di dispositivi atti a segnalare eventuali malori in posizioni non presidiate da altri lavoratori, sono tutti esempi di soluzioni che possono salvare una vita.

Strumentazione

Capitolo 6 - Strumenti di misura

I parametri ambientali che è necessario misurare ai fini del calcolo degli indici microclimatici, sia in ambienti moderabili che in ambienti vincolati, sono:
- Temperatura dell'aria;
- Umidità relativa dell'aria;
- Velocità dell'aria;
- Temperatura media radiante.

Nel caso si esegua una indagine mirata ai fattori di discomfort locale, si richiede inoltre la misura di:
- Temperatura del pavimento;
- Temperatura piana radiante.

Tanto i principi fisici di funzionamento quanto le specifiche tecniche degli strumenti adeguati ad una corretta misura di queste quantità sono discussi estensivamente nella norma tecnica UNI EN ISO 7726:2002 che in particolare dedica una appendice a ciascuna delle prime quattro quantità. La norma UNI EN ISO 7726 fornisce tanto le principali indicazioni per la misura dei parametri microclimatici quanto le caratteristiche della strumentazione da utilizzare.
È necessario sempre verificare che la strumentazione sia adatta alle misure che si intende eseguire. In particolare per quanto riguarda gli ambienti molto caldi o molto freddi, è necessario verificare che la strumentazione (Data logger, sonde ed accessori) sia in grado di funzionare correttamente nelle condizioni termo-igrometriche oggetto dell'indagine.
È inoltre necessario rispettare i tempi di taratura previsti dal costruttore rivolgendosi a centri abilitati.

6.1 Temperatura dell'aria (t_a)

È la temperatura dell'aria presente nell'ambiente di lavoro e che avvolge il lavoratore. Gli strumenti utilizzati per la misura sono termometri, termocoppie o termistori. La durata della misura deve essere pari ad almeno 1,5 volte il tempo di risposta dello strumento. La risposta è più rapida per i sensori di dimensioni minori, e quanto

migliore è il coefficiente di scambio termico con l'ambiente esterno (aumentando la circolazione dell'aria attorno allo strumento mediante una ventolina).
È necessario evitare che la sonda risenta delle radiazioni provenienti da sorgenti di calore vicine; la temperatura misurata sarebbe intermedia fra quella dell'ambiente e la temperatura media radiante. Questo effetto può essere evitato con la riduzione dell'emittenza dello strumento utilizzando vernici lucide, l'adozione di schermi tra le sorgenti e lo strumento.

6.2 Pressione del vapore acqueo - Umidità relativa (pH_2O - U.R.)

È necessario distinguere l'umidità assoluta (pH_2O) dall'umidità relativa (U.R.). La prima grandezza rappresenta la pressione parziale del vapore d'acqua presente nell'aria. La seconda invece esprime il rapporto fra la pressione parziale del vapore d'acqua presente nell'aria e la pressione massima del vapore d'acqua nell'aria alla stessa temperatura (detta anche tensione di vapor saturo).
L'umidità assoluta viene misurata direttamente, mediante igrometri a sali di cloruro di litio, a capello e a punto di rugiada.
L'umidità relativa viene misurata indirettamente con uno psicrometro. Questo strumento è costituito da due sonde di temperatura: la prima sonda a diretto contatto con l'aria, misura la "temperatura di bulbo asciutto" la seconda sonda, avvolta da una garza inumidita e dotata di un sistema di ventilazione che facilita l'evaporazione dell'acqua, misura la "temperatura di bulbo bagnato". Per effetto del raffreddamento dovuto all'evaporazione, la sonda bagnata misura una temperatura tanto più bassa quanto minore e l'umidità dell'aria (un ambiente già umido non favorisce l'evaporazione e quindi il raffreddamento della sonda bagnata).
Dal confronto delle due temperature mediante opportuni diagrammi (detti psicrometrici) o algoritmi si risale al valore di umidità relativa. Il tasso di umidità presente in un ambiente di lavoro è responsabile di problemi legati alla respirazione, della maggiore percezione da parte dei lavoratori, del caldo o del freddo ed anche della maggiore percezione degli odori.

6.3 Temperatura media radiante (t_r) e di globo nero (t_g)

La temperatura media radiante è la temperatura uniforme di una cavità immaginaria in cui lo scambio termico radiativo dal corpo umano è uguale allo scambio termico radiativo nell'ambiente termico non uniforme.
Lo strumento utilizzato per ottenere una stima di t_r è il globotermometro, costituito da un globo di rame cavo, ricoperto da vernice nera opaca, al centro del quale è posto un sensore di temperatura. Con una certa approssimazione, il globotermometro simula il corpo del soggetto esposto. Per la sua forma sferica, la radiazione proveniente da tutte le superfici presenti nell'ambiente viene direttamente

integrata in un valore medio. All'equilibrio, la temperatura della sfera in rame, dell'aria in esso contenuta e del sensore sono tutte uguali, e costituiscono la temperatura del globo nero (t_g). Nota la temperatura dell'aria (t_a) e la velocità dell'aria (v_a), è possibile ricavare, partendo da t_g, la temperatura media radiante t_r utilizzando l'algoritmo contenuto nella UNI EN ISO 7726 (equazioni 6 e 8). Nell'utilizzo del globotermometro occorre considerare che il tempo di risposta è normalmente superiore ai 20 minuti.
Il globotermometro standard ha un diametro di 150 mm; diametri inferiori sono formalmente ammessi, ed è possibile convertire la temperatura misurata con un globotermometro di dimensioni arbitrarie (t_{gd}) nella temperatura del globotermometro standard (t_{g150}), mediante l'equazione

$$t_{g_{150}} = t_a + \frac{1 + 1{,}13\, v_a^{0{,}6} d^{-0{,}4}}{1 + 2{,}41\, v_a^{0{,}6}} \left(t_{gd} - t_a \right)$$

dove d è il diametro, in metri, del globotermometro. L'uso del globo standard risulta normalmente preferibile perché un globo di dimensioni inferiori risulta maggiormente sensibile alla temperatura dell'aria e alla velocità dell'aria, con conseguente maggiore incertezza nella misura.
Quando la radiazione è eterogenea, è opportuno effettuare tre misure alle tre altezze di riferimento (testa, addome, caviglie) effettuando poi una media pesata attribuendo a ciascuna misura i pesi indicati nella norma UNI EN ISO 7726: testa = 1; addome = 2; caviglie = 1.
La temperatura media radiante può essere anche calcolata attraverso la misura delle temperature delle superfici presenti nell'ambiente, tenendo conto della loro forma e della loro posizione rispetto all'uomo. Si veda a tal proposito l'appendice B della norma UNI EN ISO 7726.

6.4 Velocità dell'aria (v_a)

La velocità dell'aria è una grandezza vettoriale definita dalla sua intensità e dalla sua direzione. La velocità efficace dell'aria è definita dal modulo del vettore nel punto di misura considerato.
Per la scelta dello strumento da utilizzare occorre considerare: la sensibilità alla direzione del flusso, la sensibilità alle variazioni di velocità dell'aria, la possibilità di ottenere una velocità media relativa ad un certo periodo di tempo.
I più utilizzati sono sensori ad elemento caldo. Il principio di funzionamento si basa sulla potenza elettrica da fornire per mantenere costante la temperatura controbilanciando il raffreddamento indotto dal flusso d'aria sull'elemento caldo:

- I sensori a sfera calda sono isotropi, ovvero mostrano sensibilità uguale a flussi provenienti da tutte le direzioni dello spazio, ma per la loro massa risultano

più lenti nella risposta, e quindi inadatti ad inseguire le rapide variazioni di un flusso d'aria turbolento;
- I sensori a filo caldo sono direzionali e quindi la loro sensibilità varia significativamente fra il piano perpendicolare al filo e la direzione parallela al filo stesso. Essi sono però molto veloci nella risposta.

Sonde a ventolina sono direzionali e risultano tipicamente meno sensibili.

Sebbene le norme prevedano un sensore omnidirezionale come l'anemometro a sfera calda, l'utilizzo di un anemometro a filo caldo comporta normalmente errori trascurabili nel contesto del calcolo del PMV. Infatti se la velocità è molto bassa, e non si individua una direzione dominante del flusso, l'effetto della velocità dell'aria è inevitabilmente piccolo. Se al contrario esiste un apprezzabile flusso d'aria, la sua direzione diventa ovvia ed sensore può essere orientato di conseguenza in modo da massimizzarne la sensibilità.

6.5 Temperatura del pavimento (t_f)

La temperatura del pavimento è uno dei possibili fattori di discomfort locale. Essa viene misurata mediante una apposita sonda in metallo che rileva la temperatura della superficie con la quale è a contatto. Data la massa del sensore il tempo di risposta è dell'ordine di qualche minuto.
Oltre che in specifiche attività produttive (es. serre), un pavimento caldo può manifestarsi nei casi in cui si sia optato per un sistema di riscaldamento in cui i panelli radianti sono installati al disotto del pavimento.

6.6 Temperatura piana radiante (t_{pr})

La temperatura piana radiante è la temperatura uniforme di una cavità nella quale la radiazione incidente su una faccia di un piccolo elemento piano è la stessa che si ha nell'ambiente reale non uniforme.
La misura della temperatura piana radiante si esegue nel contesto della verifica di un ipotetico discomfort indotto da una asimmetria della temperatura piana radiante (Dt_{pr}). Si tratta della differenza misurata fra due superfici contrapposte, ad esempio soffitto e pavimento o due pareti opposte.
Lo strumento utilizzato per la misura di (Dt_{pr}) è il radiometro così detto "netto", costituito da due dischi opposti, ricoperti da una pellicola di polietilene per evitare gli effetti della temperatura dell'aria. I due dischi assorbono calore per irraggiamento, se esiste una differenza di temperatura fra le due superfici si crea un flusso di calore fra i due dischi che attiva una termocoppia, producendo corrente elettrica che, opportunamente misurata fornisce la misura della radiazione netta.

Esistono radiometri che misurano la temperatura piana radiante. Un tipo è costituito da due dischi uno riflettente (lucido) e l'altro assorbente (opaco). Entrambi sono riscaldati per convezione ma quello opaco possiede un Dt dovuto alla radiazione piana radiante che, come prima, creerà un flusso di calore tra i due dischi.
Un ulteriore tipo di radiometro è costituito da due dischi tenuti a temperatura costante, quello che assorbe la radiazione radiante maggiore consumerà una quantità di energia minore per conservare la temperatura costante. Dalla differenza di energia fornita ai due dischi si risale all'asimmetria della temperatura radiante.

6.7 Taratura degli strumenti di misura

In assenza di indicazioni di legge e/o normativi, per la strumentazione deve essere eseguita la verifica periodica della rispondenza alle caratteristiche costruttive, con la periodicità indicata dal costruttore.
Tale verifica (indicata per semplicità con taratura) deve comunque avvenire dopo un evento traumatico per gli strumenti o dopo una riparazione degli stessi. Le verifiche periodiche devono essere eseguite presso centri di taratura LAT o dell'European Cooperation for the Accreditation (EA). La data dell'ultima taratura ed il nome del laboratorio che l'ha eseguita devono essere registrati ed inclusi nella relazione di misura.

Capitolo 7 - Bibliografia

7.1 Riferimenti normativi

UNI EN ISO 5349-1:2004, Vibrazioni meccaniche - Misurazione e valutazione dell'esposizione dell'uomo alle vibrazioni trasmesse alla mano - Parte 1: Requisiti generali

UNI EN ISO 5349-2:2015, Vibrazioni meccaniche - Misurazione e valutazione dell'esposizione dell'uomo alle vibrazioni trasmesse alla mano - Parte 2: Guida pratica per la misurazione al posto di lavoro

UNI EN ISO 7726:2002, Ergonomia degli ambienti termici - Strumenti per la misurazione delle grandezze fisiche

UNI EN ISO 7730:2006, Ergonomia degli ambienti termici - Determinazione analitica e interpretazione del benessere termico mediante il calcolo degli indici PMV e PPD e dei criteri di benessere termico locale

UNI EN ISO 7933:2005, Ergonomia dell'ambiente termico - Determinazione analitica ed interpretazione dello stress termico da calore mediante il calcolo della sollecitazione termica prevedibile

UNI EN ISO 8996:2005, Ergonomia dell'ambiente termico - Determinazione del metabolismo energetico

UNI EN ISO 9612:2011, Acustica - Determinazione dell'esposizione al rumore negli ambienti di lavoro - Metodo tecnico progettuale

UNI EN ISO 9920:2009, Ergonomia dell'ambiente termico - Valutazione dell'isolamento termico e della resistenza evaporativa dell'abbigliamento

UNI 10349-1:2016, Riscaldamento e raffrescamento degli edifici - Dati climatici - Parte 1: Medie mensili per la valutazione della prestazione termo-energetica dell'edificio e metodi per ripartire l'irradianza solare nella frazione diretta e diffusa e per calcolare l'irradianza solare su di una superficie inclinata

UNI EN ISO 11079:2008, Ergonomia degli ambienti termici - Determinazione e interpretazione dello stress termico da freddo con l'utilizzo dell'isolamento termico dell'abbigliamento richiesto (IREQ) e degli effetti del raffreddamento locale

UNI EN 12464-1:2011, Luce e illuminazione - Illuminazione dei posti di lavoro - Parte 1: Posti di lavoro in interni

UNI EN ISO 15743:2008, Ergonomia dell'ambiente termico - Posti di lavoro al freddo - Valutazione e gestione del rischio

EN 16798-1:2018, Energy performance of buildings - Part 1: Indoor environmental input parameters for design and assessment of energy performance of buildings addressing indoor air quality, thermal environment, lighting and acoustics - Module M1-6

EN 16798-2:2017, Energy performance of buildings - Part 2: Indoor environmental input parameters for design and assessment of energy performance of buildings addressing indoor air quality, thermal environment, lighting and acoustics - Module M1-6 - Technical report - Interpretation of the requirements in EN 16798-1

ISO/WD 23451:2018, Ergonomics of the thermal environment: working practices in hot environments - strategy for risk assessment and management

7.2 Riferimenti scientifici

Bethea D., Parsons K. (2002), The development of a practical heat stress assessment methodology for use in UK industry, Health and Safety Executive Research Report 008

Coordinamento tecnico per la prevenzione nei luoghi di lavoro delle Regioni e delle Province autonome (2006), Microclima, Aerazione e Illuminazione nei luoghi di lavoro, Requisiti e standard - Indicazioni operative e progettuali

D'Ambrosio Alfano F.R., Palella B. I., Riccio G. (2011a), The role of measurement accuracy on the thermal environment assessment by means of PMV index. Building and Environment, 46, 1361-1369

D'Ambrosio Alfano F.R., Riccio G., Palella B. I. (2011b), Thermal environment assessment reliability using temperature-humidity indices, Industrial health 49, 95-106

D'Ambrosio Alfano F.R., Palella B. I., Riccio G. (2013), Notes on the implementation of the IREQ model for the assessment of extreme cold environments, Ergonomics, 56, 707-724

D'Ambrosio Alfano F.R., Malchaire J., Palella B. I., Riccio G. (2014), WBGT Index Revisited After 60 Years of Use, Annals of Occupational Hygiene, 58, 955-970

D'Ambrosio Alfano F.R., Palella B. I., Riccio G., Malchaire J. (2015), On the Effect of Thermophysical Properties of Clothing on the Heat Strain Predicted by PHS Model, Annals of Occupational Hygiene 60, 231-251

Del Ferraro S., Molinaro V. (2010), Lo studio dell'attività metabolica per una corretta valutazione del rischio da esposizione ad ambienti termici, Med Lav 101(6): 38-48

Del Gaudio M., Lenzuni P. (2006), La valutazione del rischio termico in ambienti moderabili caldi, Giornale degli Igienisti Industriali, 31 (3): 210-219

Del Gaudio M., Lenzuni P. (2006), La valutazione del rischio termico in ambienti moderabili freddi, Giornale degli Igienisti Industriali, 31 (3): 220-230

Del Gaudio M., Freda D., Lenzuni P. (2010), Proposta di classificazione degli ambienti termici moderati, Atti del convegno dBA 2010, Modena, 6 - 7 ottobre 2010

Diano M., Valentini M., Samele P., di Gesù I. (2015), Lo stress termico dei lavoratori impegnati nelle lavorazioni in serra: studio delle variabilità del rischio in funzione delle condizioni di lavoro, Atti del convegno dBA 2015, Modena, 27 maggio 2015

Gagnon D., Kenny G.P. (2011), Exercise-rest cycles do not alter local and whole body heat loss responses, Am J Physiol Regul Integr Comp Physiol. 300, R958-R968

Giovinazzo R., Incocciati E., Nappi F., Piccioni R., Rughi D., Amatucci S., Cipolloni F., De Matteis F. (2015), Sicurezza e benessere nelle scuole - Indagine sulla qualità dell'aria e sull'ergonomia, INAIL Consulenza Tecnica Accertamento Rischi e Prevenzione (CONTARP)

Kenny G.P., Webb P., Ducharme M.B., Reardon F.D., Jay O. (2008) Calorimetric measurement of post-exercise net heat loss and residual body heat storage, Medicine & Science in Sports & Exercise 40(9): 1629-1636

Lenzuni P., Freda D., del Gaudio M. (2011), Il ruolo della Direzione del Flusso nel Discomfort indotto da Correnti d'Aria, Atti del 66° Convegno ATI, Cosenza, 5 - 9 settembre 2011

McArdle W.D., Katch F.I., Katch V.L. (2014), Exercise Physiology, Nutrition, Energy, and Human Performance, Wolters Kluwer

Masterton J.M., Richardson F.A. (1979), Humidex, A Method of Quantifying Human Discomfort Due to Excessive Heat and Humidity, CLI 1-79, Environment Canada, Atmospheric Environment Service, Downsview, Ontario

Merlino A. (2015), Aspetti operativi della misurazione del microclima: dove, quando e quanto monitorare. Interpretazione e valorizzazione dei singoli parametri, Atti del convegno dBA 2015, Modena, 27 maggio 2015

Molinaro V., Piccioni R., Rughi D., Del Ferraro S. (2008), L'importanza di una corretta valutazione dell'attività metabolica per mansioni a rischio da stress microclimatico, Atti del 14° Convegno di Igiene Industriale, Corvara (Bz), 1-4 aprile 2008

Pagliano L., Carlucci S., Zangheri P. (2012), Analisi critica degli indicatori per la valutazione del comfort termico indoor

Parsons K.C. (2003), Human Thermal Environments. The Effects of Hot, Moderate, and Cold Environments on Human Health, Comfort and Performance, Taylor & Francis

Sawka M.N., Francesconi R.P., Young A.J., Pandolf K.B. (1984), Influence of hydration level and body fluids on exercise performance in the heat, 252(9):1165-1169

Steadman R.G. (1979a), The Assessment of Sultriness. Part I: A Temperature-Humidity Index Based on Human Physiology and Clothing Science, Journal of Applied Meteorology, 18 (7): 861-873

Steadman R.G. (1979b), The Assessment of Sultriness. Part II: Effects of Wind, Extra Radiation and Barometric Pressure on Apparent Temperature, Journal of Applied Meteorology, 18 (7): 874-885

Tura P. (2010), Ambiente termico moderato. Indagine strumentale e valutazione dell'ambiente microclimatico in alcune cabine di guida di locomotori, Atti del convegno dBA 2010, Modena, 6 - 7 ottobre 2010

Tura P., Fontana M. (2015), Microclima in ambiente moderato, 2003-2015: il punto di 12 anni di attività ispettiva. Strumenti, metodologie e criticità legate alla caratterizzazione e valutazione dell'esposizione lavorativa, Atti del convegno dBA 2015, Modena, 27 maggio 2015

7.3 Immagini

Le immagini sono tratte dalla banca dati Inail

https://www.inail.it/intracs/intranet/informazioni/minisiti/direzioni-centrali/direzione-centrale-pianificazione-e-comunicazione/prodottieservizi_servizicomunicazione/dcpc_contenuto_bancadatiimmagini.html

Pag. 19 la foto in alto a destra è tratta da https://www.eurohatria.com/it/blog/rischi-per-i-lavori-svolti-al-freddo-54a

Pag. 89 la foto a destra è tratta da http://www.lavoripubblici.net/al-freddo-al-gelo-gruppo-merlo-festeggia-30-anni-presenza-al-polo-sud/