



**UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI TRIESTE
UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI UDINE**

DIPARTIMENTO DI AREA MEDICA

**Corso di laurea in Tecniche della prevenzione nell'ambiente e nei luoghi
di lavoro, classe SNT/04**

Tesi di laurea

**Misure microclimatiche in uno stabilimento industriale:
valutazione del rischio e misure di miglioramento**

**RELATORE:
Dott. Bordignon Michele**

**LAUREANDO:
Elena Cleri**

**CORRELATORE:
Dott. Rizzo Marco**

ANNO ACCADEMICO 2022/2023

Sommario

Introduzione	5
Contesto lavorativo	5
Normativa di riferimento	6
Effetti fisiologici sulla salute	8
Obiettivi	10
Materiali e metodi	11
Temperatura dell'aria.....	11
Temperatura media radiante.....	11
Velocità relativa dell'aria	11
Pressione parziale del valore acqueo	11
Metabolismo energetico.....	11
Isolamento termico dell'abbigliamento.....	11
IREQ - insulation required	12
Isolamento termico risultante ($I_{cl,r}$).....	12
Indici PPD e PMV	13
Centralina microclimatica	17
Questionario Ashrae.....	23
Misura temperatura mani, fronte e tempie.....	24
Ambito di svolgimento indagini	25
Classificazione termica dello stabilimento	26
Risultati	28
Dati del campione	28
Parametri microclimatici esterni	29
Parametri microclimatici interni.....	30
Isolamento termico e attività metabolica.....	31
IREQ e ICLR – temperatura neutra e minima.....	32
PMV e PPD	33
Sensazione termica individuale	33
Confronto tra PMV e valutazione termica soggettiva.....	34
Grado di soddisfazione termica	36
Parametri fisiologici.....	37
Relazione tra parametri fisiologici e comfort del lavoratore	39
Discussione	40
Conclusioni	42
Tubi radianti.....	42

Abbigliamento	42
Gilet per riscaldamento	43
<i>Ringraziamenti</i>	44
<i>Bibliografia</i>.....	46

Introduzione

La valutazione dell'esposizione professionale a fattori di rischio lavorativi ambientali rappresenta un argomento che con il passare del tempo sta assumendo sempre più rilevanza. La ricerca costante di un miglioramento progressivo ha come conseguenza un aumento della ricerca tramite le valutazioni del rischio sul campo. In particolare, per gli ambienti termici con esposizione al caldo o freddo hanno avuto un picco di attenzione rendono l'argomento uno dei più emergenti in ambito di indagini.

Negli ambienti di lavoro le condizioni microclimatiche possono interferire in maniera sostanziale con le attività produttive. In base agli stimoli forniti dall'ambiente circostante il corpo umano reagisce cercando di mantenere uno stato di equilibrio, detto omeostasi, tramite meccanismi fisiologici. Nel momento in cui le condizioni microclimatiche dovessero essere inadeguate il corpo umano va incontro a quello che viene definito discomfort o stress termico, direttamente collegato alla produttività o alla possibilità di contrarre infortuni o malesseri.

Con la presente tesi viene proposta una valutazione del microclima durante la stagione invernale all'interno di un'azienda metalmeccanica impiegata nella produzione di bombole a gas compressi per poterne valutare e quantificare il rischio in funzione alle condizioni ambientali e ai parametri fisiologici dei lavoratori nell'arco temporale del turno di lavoro.

Il fine ultimo della tesi è quello di valutare delle misure di miglioramento che possano essere applicate tenendo conto delle limitazioni riconducibili all'ambiente di lavoro come, ad esempio, la difficoltà di scaldare grandi volumi d'aria e i rischi aggiuntivi legati all'uso di lampade riscaldanti ad infrarossi. Si rende cruciale gestire il rischio e raggiungere gli obiettivi di benessere in funzione alla tipologia di ambiente esaminato.

La campagna di misurazione è stata svolta nell'arco temporale che va da gennaio a febbraio 2024 per poterne valutare il rischio microclimatico dovuto all'esposizione al freddo nelle ore lavorative. Uno degli aspetti fondamentali è quello di comprendere la portata degli effetti sulla salute dovuti all'esposizione al freddo.

Come metodi di misura sono stati utilizzati gli Indici PMV e PPD (indici di discomfort termico) e il metodo IREQ.

Contesto lavorativo

L'azienda nasce nel 1972, sita nella regione Friuli-Venezia Giulia ed impiegata nella produzione di bombole in acciaio per gas compressi ad alta pressione, bombole sub e sistemi di stoccaggio di metano per il settore automobilistico con un processo di

deformazione a freddo. L'azienda si struttura su tre stabilimenti oltre che possedere un ulteriore sede sita nella regione Veneto.

Il ciclo produttivo dell'azienda dove è stata effettuata la campagna di campionamento è differenziato in base al tipo di bombola che deve essere prodotta, le bombole offerte dal catalogo sono definite in Tipo 1, Tipo 2, Tipo 3, Tipo 4.

Normativa di riferimento

Il microclima viene definito nel D.Lgs 81/2008 Titolo VIII "Agenti fisici" all'articolo 180. All'interno del Titolo VIII non è presente un capo specifico riferito al microclima, pertanto, si applicano le Disposizioni Generali presenti negli articoli 181-186. In conformità con le disposizioni del Testo Unico Sicurezza sul Lavoro è necessario considerare il rischio associato al microclima riportato all'articolo 181, il Datore di lavoro deve pertanto provvedere con la valutazione e l'identificazione delle misure di prevenzione e protezione per minimizzare il rischio associato. Sempre in riferimento al D.Lgs in esame all'articolo 184 viene disposto l'obbligo del Datore di Lavoro di informare e formare i lavoratori ed i loro rappresentanti in funzione dell'esito della valutazione dei rischi.

In supplemento alle disposizioni contenute nel D.Lgs 81/2008 interviene anche l'allegato IV "ambienti di lavoro" che richiede determinati parametri per la conformità dei luoghi di lavoro. L'agente fisico esaminato viene citato ai punti 1.9.2 e 1.9.3, rispettivamente trattano di Temperatura dei locali e umidità.

Il microclima, oltre che con il Testo Unico Sicurezza sul Lavoro, viene regolato dalle norme ISO "International Organization for Standardization". Per quanto riguarda al nostro territorio il microclima viene normato dalle UNI EN ISO, nello specifico le norme che la presente tesi prende in oggetto di studio sono le seguenti:

- UNI EN ISO 7726:2002 "Ergonomia degli ambienti termici – strumenti per la misurazione delle grandezze fisiche"
- UNI EN ISO 9886:2004 "Ergonomia – Valutazione degli effetti termici mediante misurazioni fisiologiche"
- UNI EN ISO 8996:2021 "Ergonomia dell'ambiente termico – valutazione dell'isolamento termico e della resistenza evaporativa dell'abbigliamento"
- UNI EN ISO 7730:2006 "Ergonomia degli ambienti termici – determinazione analitica e interpretazione del benessere termico mediante il calcolo degli indici PMV (voto medio previsto) e il PPD (percentuale di soggetti insoddisfatti prevista) e dei criteri di benessere termico locale"

- UNI EN ISO 11079:2008 “Ergonomia degli ambienti termici – determinazione e interpretazione dello stress termico da freddo con l’utilizzo di isolamento termico dell’abbigliamento richiesto (IREQ) e degli effetti del raffreddamento locale”
- UNI EN ISO 9920:2009 “Ergonomia dell’ambiente termico – valutazione dell’isolamento termico e della resistenza evaporativa dell’abbigliamento ($I_{cr,l}$)”

Nelle linee guida INAIL “La valutazione del rischio Microclima – 2018” viene definito microclima come “il complesso dei parametri climatici ambientali nel quale l’individuo vive o lavora. L’interazione dell’individuo con l’ambiente termico che lo circonda può dar luogo ad una serie di effetti vari che spaziano da effetti 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).

Per l’esecuzione corretta della valutazione del rischio associato al microclima è opportuno distinguere gli ambienti moderati da quelli severi. Negli ambienti moderati gli scambi termici fra soggetto e ambiente permettono di raggiungere condizioni di equilibrio termico. Negli ambienti severi, al contrario, il soggetto esposto presenta uno squilibrio termico che potrebbe descrivere un fattore di rischio per la salute. Grazie a questa distinzione è possibile separare e distinguere una fonte di discomfort da una fonte di rischio effettiva.

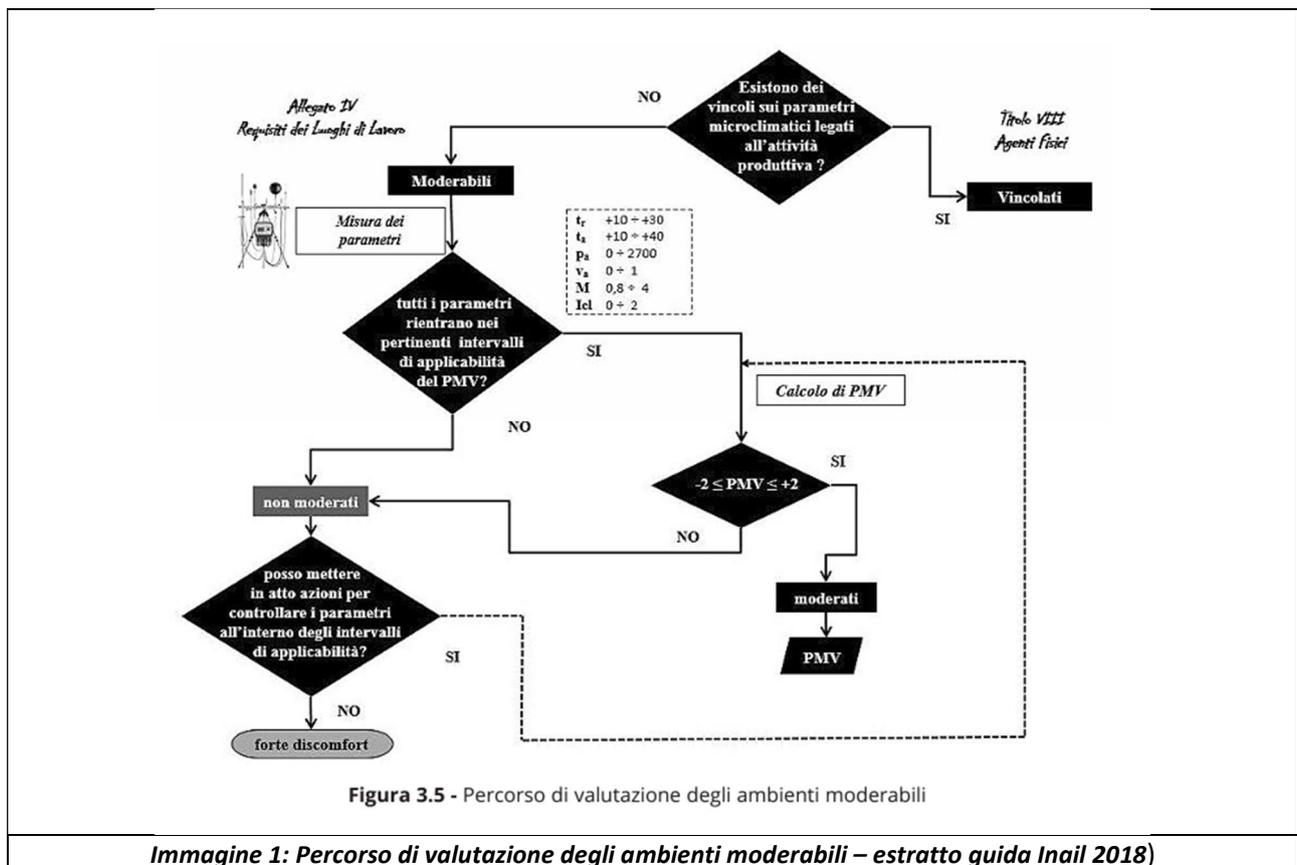
Unicamente nel caso del microclima vengono fornite disposizioni in due parti contraddistinte. Come citato prima nell’Allegato IV punto 1.9 il microclima è un requisito di salute e sicurezza, nel Titolo VIII è un agente fisico che può portare a rischi per la salute e la sicurezza dei lavoratori. È importante però non concludere che gli ambienti moderati coincidono con l’Allegato IV e gli ambienti severi con il Titolo VIII. Vengono quindi fornite ulteriori definizioni per la distinzione degli ambienti termici: “ambienti termicamente moderabili” corrispondono ad ambienti nei quali non sono presenti vincoli in grado di pregiudicare il raggiungimento del comfort termico; “ambienti termicamente vincolati” sono ambienti in cui esistono vincoli sia sui parametri fisici che su quelli individuali come attività metabolica e vestiario che rendono difficoltoso il comfort. [Linee guida INAIL, 2018].

La temperatura dell’aria, la temperatura media radiante, l’umidità relativa e la velocità relativa dell’aria vengono monitorate per valutare il comfort microclimatico. Ciò può essere fatto utilizzando una centralina microclimatica o altri strumenti specifici.

Sviluppare una campagna di misurazioni per valutare il microclima utilizzando la strumentazione precedentemente citata è molto difficile. Per questo motivo, si è cercato di sviluppare un metodo innovativo che renda queste valutazioni più semplici per gli ambienti

moderati. Il modello sfruttato per eseguire una valutazione microclimatica è attualmente una versione migliorata del modello matematico sviluppato dallo studio di PO Fanger.

Tale studio si è approfondito analizzando i dati raccolti durante esperimenti realizzati con il coinvolgimento di studenti, i quali sono stati sottoposti a condizioni microclimatiche controllate. Date queste condizioni si è reso essenziale eseguire degli adattamenti posteriori per realizzare un modello che potesse trovare applicazione anche in altri contesti. Nello specifico il diagramma di riferimento per la determinazione dell'indice PPD rappresenta l'esito di una campagna di analisi condotta su un campione di 1300 soggetti [Thermal comfort, P.O. Fanger].



Effetti fisiologici sulla salute

L'essere umano vive in condizioni di omeotermia, significa che la temperatura corporea si aggira sempre intorno ai 37°C. La termoregolazione è efficiente quando la temperatura centrale è tra i 35° e i 40°C. La percezione della temperatura avviene tramite sensori termici locati in tutto l'organismo e integrati a livello centrale dall'ipotalamo.

La temperatura corporea rimane pressoché invariata quando il calore prodotto dal corpo può essere ceduto all'ambiente circostante. Questo significa che nel momento in cui ci si trova in situazioni di comfort avviene una perdita di calore. Quando la perdita di calore

se la produzione di calore viene attivata una risposta fisiologica di compensazione per mantenere la temperatura corporea in un range accettabile.

Tra le risposte all'esposizione al freddo (**risposte termo effettori**) possiamo incontrare la vasocostrizione cutanea e i brividi, che diminuiscono la dispersione di calore e aumentano il calore metabolico. I segnali afferenti della pelle sono percepiti nell'area preottica dell'ipotalamo da cui vengono generati segnali efferenti che causano vasodilatazione cutanea e termogenesi tremante. La vasocostrizione permette una redistribuzione di volumi ematici verso gli organi interni in modo tale da proteggerli da un'eccessiva dissipazione di calore. Di conseguenza gli organi come l'apparato tegumentario verranno irrorati meno comportando una diminuzione della temperatura dell'area. Una conseguenza della vasocostrizione da non sottovalutare nell'ambito dei luoghi di lavoro è la sensazione di freddo e la mobilità limitata che ne deriva. Questo comporta dunque un rischio di infortuni più elevato relazionato alla riduzione di reattività e rendimento. Tramite la termogenesi i muscoli producono un forte tremore per cercare di aumentare la T° corporea di circa 3-4°C.

Naturalmente, la risposta fisiologica è unica per ogni soggetto, questo perché ci sono dei parametri che incidono su tale risposta: sesso, etnia di provenienza, livello di attività sportiva svolta.

Obiettivi

Questo studio nasce per valutare il comfort termico all'interno di uno stabilimento industriale in ambiente moderabile durante la stagione invernale con particolare riferimento al periodo gennaio-febbraio 2024. L'azienda oggetto di indagine è rappresentata da uno stabilimento metalmeccanico deputato alla produzione di bombole industriali.

Nello specifico sono stati presi in considerazione i reparti di ogivatura in quanto in tali aree la conformazione dello stabilimento è rappresentata da locali con soffitti di altezza superiore a 10 metri ove risulta difficoltoso installare sistemi di riscaldamento ambientali efficaci. In tali aree peraltro non vi è il contributo di sorgenti termiche quali i forni di ricottura che in altre parti dello stabilimento determinano un innalzamento delle temperature ambientali durante la stagione fredda.

Il primo obiettivo posto da questo studio è valutare il grado di discomfort termico derivato dall'interazione del lavoratore con l'ambiente che lo circonda.

Al fine di determinare il grado di comfort termico è stata effettuata una campagna di misurazioni mediante l'utilizzo di centralina microclimatica al fine di caratterizzare i parametri fisici ambientali (temperatura, velocità dell'aria, pressione, umidità relativa) e determinare gli indici PMV (Predicted mean vote) e PPD (Predicted percentage of dissatisfied) tenendo in considerazione anche i parametri soggettivi quali metabolismo e grado di isolamento degli interessati (riferimento UNI EN ISO 7730).

Sono inoltre state somministrate domande mediante questionario formulato sulla base dello standard ASHRAE 55 (American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers) per valutare il giudizio soggettivo dei lavoratori coinvolti relativamente al grado di comfort termico percepito.

Successivamente sono state effettuate misurazioni di parametri fisiologici (temperatura mani, avambracci, tempie) con lo scopo di verificare la correlazione con l'indice PMV corrispondente a tale misurazione.

Materiali e metodi

La valutazione del microclima si realizza mediante l'utilizzo di centralina microclimatica al fine di caratterizzare i seguenti parametri fisici:

Temperatura dell'aria

Temperatura bulbo secco dell'aria che circonda il soggetto esposto all'ambiente [UNI EN ISO 13731:2004]

Temperatura media radiante

Temperatura uniforme di una cavità nera fittizia nella quale un soggetto scambierebbe la stessa quantità di energia termica radiante che si scambia nell'ambiente reale non uniforme [UNI EN ISO 13731:2004]

Velocità relativa dell'aria

Velocità dell'aria (intensità media del vettore velocità in un intervallo di tempo) relativa al soggetto che si trova nell'ambiente, che tiene conto dei movimenti del corpo [UNI EN ISO 13731:2004]

Pressione parziale del valore acqueo

Pressione che il vapore d'acqua eserciterebbe se da solo occupasse il volume occupato dall'aria umida alla stessa temperatura [UNI EN ISO 13731:2004].

Al fine di determinare gli indici di comfort termico PMV e PPD e dell'IREQ risulta necessario acquisire anche i dati relativi all'attività metabolica e del vestiario del lavoratore.

Metabolismo energetico

Trasformazione nell'unità di tempo di energia chimica in energia termica e meccanica a seguito di attività metaboliche aerobiche ed anaerobiche all'interno di un organismo, generalmente riferita all'unità di area della superficie totale corporea [UNI EN ISO 13731:2004].

Isolamento termico dell'abbigliamento

Isolamento termico intrinseco dell'abbigliamento, ovvero resistenza termica di uno strato uniforme di isolante disposto su tutto il corpo che, in condizioni di riferimento (persona immobile, aria stagnante), ha lo stesso effetto sul flusso termico sensibile che ha l'abbigliamento reale [UNI EN ISO 13731:2004].

Gli indici sintetici per la caratterizzazione microclimatica degli ambienti freddi sono i seguenti:

IREQ - insulation required

La valutazione dello stress termico è innanzitutto supportata dalla misurazione di parametri fisici come temperatura dell'aria (T_a), temperatura media radiante (T_g), velocità dell'aria (V_a) e umidità (R_h) correlata alla stima dell'isolamento termico ($I_{cl,r}$) e dell'attività metabolica (MET) del soggetto analizzato.

IREQ indica l'isolamento termico necessario nelle circostanze termiche considerate, è determinato al fine di mantenere il corpo in uno stato di equilibrio termico garantendo livelli accettabili di temperatura interna e della pelle.

L'indice viene calcolato risolvendo l'equazione di bilancio termico relativa a tale parametro, in particolari condizioni di attivazione del sistema di termoregolazione, generando due valori distinti $IREQ_{min}$ e $IREQ_{neutral}$.

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

Tabella 1: Valore IREQ – estratto PAF

Isolamento termico risultante ($I_{cl,r}$)

La normativa stabilisce i metodi per valutare le caratteristiche termiche, come la resistenza al calore secco e al calore evaporativo, in condizioni stazionarie per l'abbigliamento. Questi metodi si basano sulle qualità dei tessuti, dei singoli capi d'abbigliamento e delle combinazioni di essi. Inoltre, la normativa tiene conto dell'impatto

del movimento del corpo e del flusso d'aria sull'isolamento termico e sulla resistenza evaporativa.

N°	Condizione	interpretazione	Azione	Necessario calcolare D_{lim} ?
1	$I_{cl,r} < IREQ_{min}$	Isolamento termico insufficiente	<ul style="list-style-type: none"> - Aumentare l'isolamento termico: l'abbigliamento non fornisce adeguato isolamento per prevenire il raffreddamento; - Dopo l'esposizione al freddo prevedere un periodo di recupero per riportare il corpo in condizioni di equilibrio 	Si. Bisogna calcolare anche la durata del periodo di ricovero D_{rec}
2	$IREQ_{min} < I_{cl,r} < IREQ_{neutral}$	Isolamento termico sufficiente	<ul style="list-style-type: none"> - Nessuna azione ai fini del raffreddamento globale; - Valutazioni degli effetti dei raffreddamenti locali 	No
3	$I_{cl,r} > IREQ_{neutral}$	Isolamento termico eccessivo, rischio di sudorazione	Ridurre abbigliamento	No

Tabella 2: Valore $I_{cl,r}$ - IREQ – estratto PAF

Per il caso 1 riportato dalla tabella soprastante è necessario calcolare la durata limite di esposizione (D_{lim}) al fine di prevenire il raffreddamento del corpo e determinare il periodo di recupero (D_{rec}) necessario per ripristinare l'equilibrio termico normale.

Indici PPD e PMV

La norma di riferimento è la UNI EN ISO 7730:2006 “ergonomia degli ambienti termici – determinazione analitica e interpretazione del benessere termico mediante il calcolo degli indici PMV e PPD e dei criteri di benessere locale”

Gli indici presenti all'interno della norma permettono di valutare le condizioni di comfort nelle quali si trova il soggetto oppure quanto è distante da tale condizione; se esistono delle condizioni termiche che possano dare luogo a discomfort in specifiche parti del corpo.

Il PMV (Predicted mean vote) deriva dagli studi condotti da Ole Fanger nella seconda metà degli anni '60. Venne creato un modello predittivo nella quale venivano confrontati i risultati ottenuti applicando l'equazione di bilancio termico al corpo umano con voti di sensazione termica ottenuti dal campione di alcuni studenti del college che espose in camera climatica per circa 3 ore nel mentre che venivano svolte attività standard. L'indice PMV rappresenta il giudizio medio previsto che viene espresso da soggetti esposti alle medesime condizioni microclimatiche in esame tramite una scala di sensazione termica a 7

punti. Questo indice viene ritenuto affidabile nel momento in cui assume valori compresi nell'intervallo tra -2 e +2. Questo indice fornisce un dato relativo al comfort globale, ovvero relativo all'interezza del corpo e non tiene conto di ipotetiche disomogeneità che potrebbero presentarsi nell'ambiente e che di conseguenza potrebbero determinare disagi locali per l'operatore.

+3	Molto caldo
+2	Caldo
+1	Leggermente caldo
0	Neutro
-1	Leggermente freddo
-2	Freddo
-3	Molto freddo

La norma tecnica raccomanda l'uso di tale indice quando tutti i parametri principali utili alla valutazione assumono valori compresi nei seguenti intervalli:

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

Tabella 3: descrizione parametri necessari per l'applicazione UNI EN ISO 7730:2006 [PAF]

Il PMV quantifica un moto medio, pertanto è necessario avere una percentuale di persone che non risultano essere soddisfatte rispetto alle condizioni termiche esaminate che voterebbero caldo, molto caldo, o freddo, molto freddo. Questa percentuale viene quantificata dall'indice PPD, ovvero Predicted Percentage of Dissatisfied (percentuale prevista di insoddisfatti).

L'indice PPD è calcolato tramite l'equazione sotto descritta dopo aver determinato il PMV:

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

Dall'equazione è possibile dedurre il valore minimo associato ad un PMV pari a 0, corrispondente ad una percentuale di insoddisfazione minima del 5%.

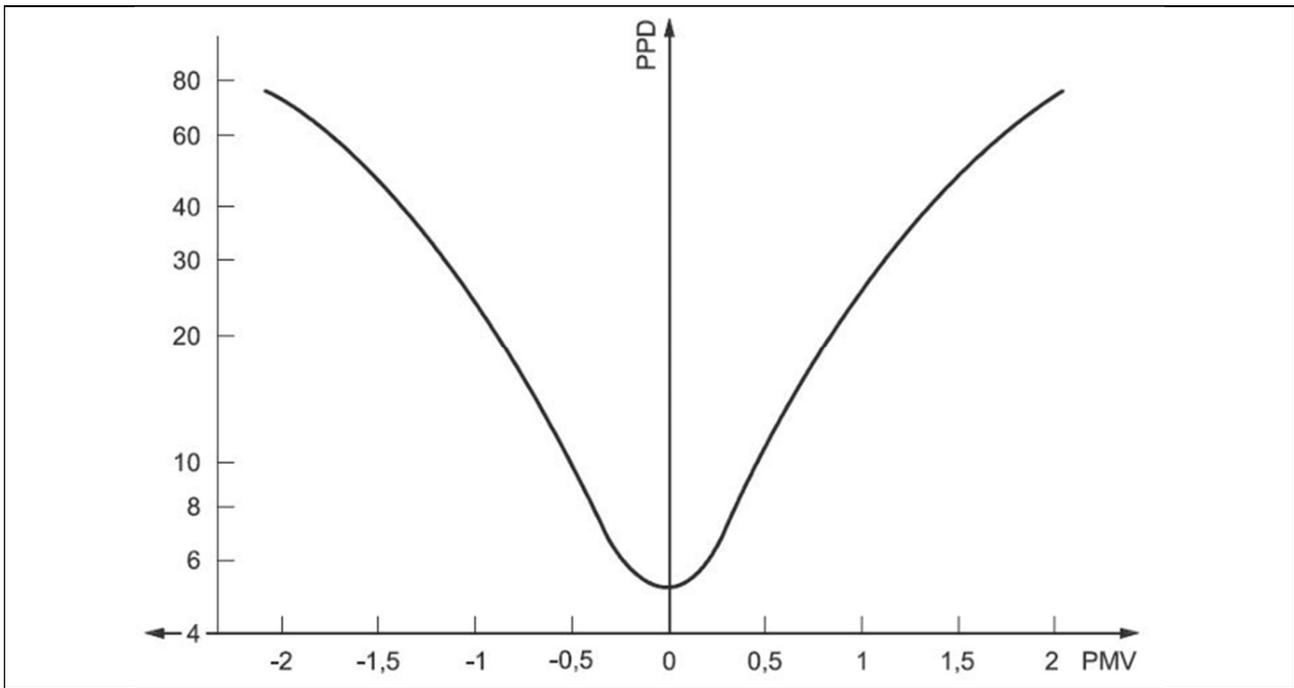


Immagine 2: Associazione tra parametri PMV e PPD – estratto UNI EN ISO 7730

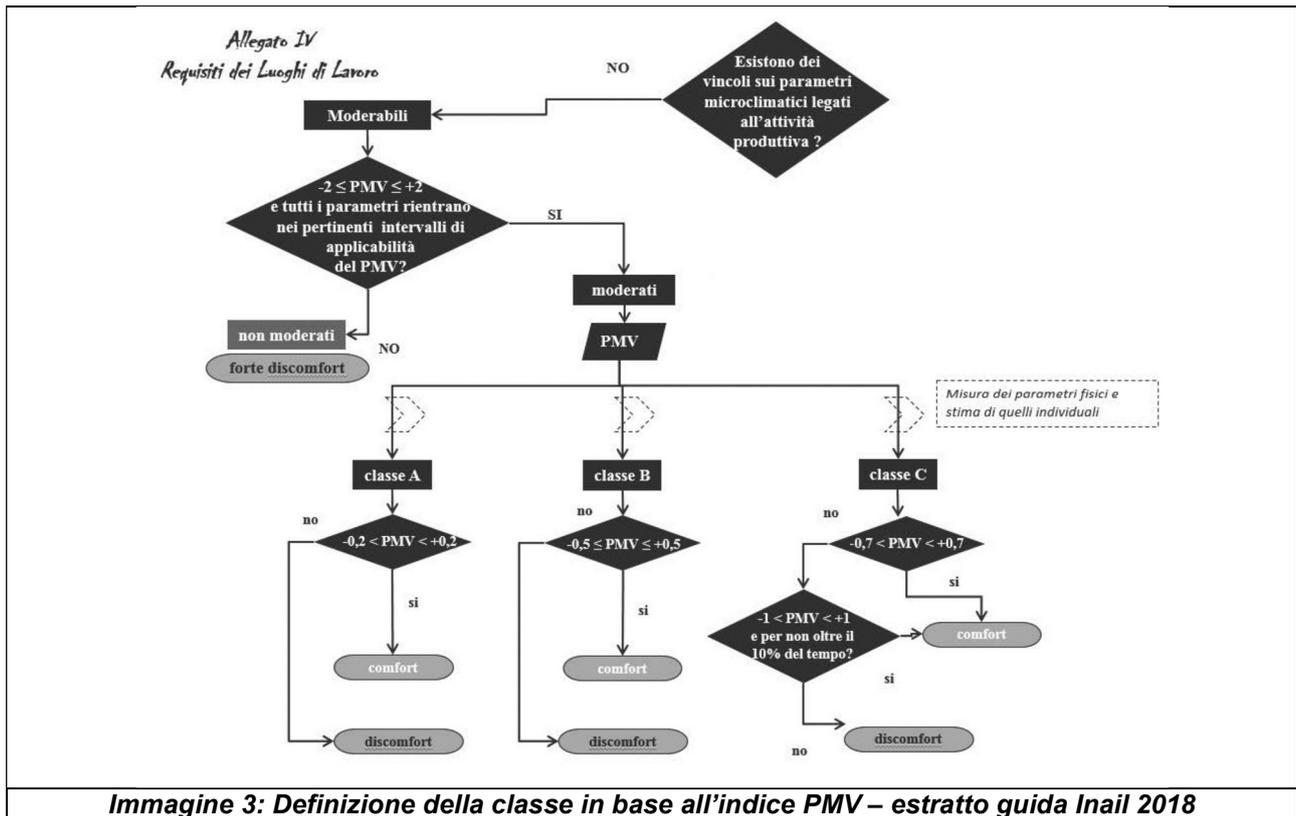
Dopo aver determinato entrambi gli indici sopracitati si può fare una comparazione dei risultati con i valori indicati dalla normativa e assegnarne la classe di appartenenza.

La normativa UNI EN ISO 7730 fornisce dei parametri di riferimento per l'accettabilità dell'ambiente termico in esame al soddisfacimento dei criteri globali, vengono distinte tre categorie di comfort riportate nella seguente tabella:

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

Tabella 4. Limiti di accettabilità – estratto UNI EN ISO 7730

L'applicazione e la lettura dei parametri limite sono le seguenti:



Per ogni ambiente è associata una classe di riferimento in base alla destinazione d'uso. Le classi corrispondono ai seguenti impieghi dell'ambiente:

- classe A – livello adottabile in presenza di soggetti termicamente vulnerabili (bambini, anziani, persone con disabilità);
- classe B – livello riferito per ambienti comuni
- classe C – livello inerente ai limiti di accettabilità ai fini del comfort introducendo la perdita di prestazione nell'espletamento delle attività

[PAF portale agenti fisici]

Centralina microclimatica

Le misurazioni dei parametri microclimatici sono state svolte con l'ausilio della centralina microclimatica Delta OHM HD 32.1.



Immagine 4: Interfaccia della centralina - estratto manuale d'uso Delta OHM HD 32.1



Immagine 4.1: Interfaccia I/O della centralina - estratto manuale d'uso Delta OHM HD 32.1

La centralina si utilizza tramite i comandi presenti sulle interfacce:

1. ON/OFF per accendere o spegnere lo strumento
2. TIME: visualizza data e ora
3. SHIFT FNC: finestra di scelta rapida
4. Display
5. F1, F2, F3 attivano la funzione indicata nell'ultima riga del Display
6. ENTER: all'interno dei menù conferma il dato inserito

7. ESC: tasto di uscita dal menù o dalla visualizzazione del livello corrente
8. Tasti navigazione ▲ ▼ ◀ ▶ : navigazione all'interno dei menù
9. PRINT: avvia o termina l'invio dei dati alla porta di comunicazione seriale/USB
10. MEM: avvio o arresto memorizzazione dei dati
11. SETUP: ingresso e uscita dal menù di impostazione dei parametri di funzionamento dello strumento
12. Ingressi SICRAM per sonde
13. Vano batterie
14. Porta seriale RS232
15. Porta USB
16. Ingresso per alimentatore

La centralina per poter svolgere le sue attività deve essere collegata a delle sonde, nello specifico sono:

TP3207	Sonda temperatura bulbo secco.
TP3275	Sonda globotermometro Ø 150mm (in alternativa TP3276).
TP3276	Sonda globotermometro Ø 50mm (in alternativa TP3275).
HP3217DM	Sonda a due sensori per la misura della temperatura a bulbo umido a ventilazione naturale e della temperatura a bulbo secco (in alternativa a: HP3201 e TP3207).
AP3203	Sonda a filo caldo omnidirezionale (0°C...+80°C).
AP3203-F	Sonde a filo caldo omnidirezionale (-30°C...+30°C).
HP3201	Sonda a bulbo umido a ventilazione naturale.
HP3217 R	Sonda combinata temperatura e umidità relativa.

Tabella 5. Specifica delle sonde - estratto manuale d'uso Delta OHM HD 32.1

Le sonde da utilizzare durante una campagna sono scelte in base alle misurazioni da effettuare. All'accensione dello strumento, le sonde vengono riconosciute in maniera automatica in ordine crescente dal primo ingresso fino all'ottavo (ed ultimo).

La centralina dispone di più tipologie di programmi preinstallati: A, B, C.

Software DeltaLog10	Programma Operativo	Principali Indici calcolati		Ambienti	Norma di riferimento
DeltaLog10 BASE	Prog.A	t_a : Temperatura dell'aria t_r : Temperatura media radiante PMV: Voto medio previsto PPD: Percentuale di insoddisfatti DR: Rischio da correnti d'aria t_o : Temperatura operativa	IS: Indice di Scharlau DI: Indice di Thom THI: Indice Termoisgrometrico RSI: Indice di Tensione Relativa SSI: New Summer Simmer Index HI: Indice di Calore H: Indice Humidex T_{eq} : Indice di Temperatura Equivalente Per il calcolo di questi indici è necessario rilevare UR e temperatura dell'aria e inserire i valori misurati nelle tabelle "Indice di Disagio"	Moderati	ISO 7730
DeltaLog10 Ambienti caldi	Prog.A	WBGT: temperatura a bulbo umido e del globotermometro SW_p : Sweat rate (tasso di sudorazione) E: Predicted evaporative heat flow (Flusso di calore evaporativo previsto) PHS: Predicted Heat Strain Model		Severi caldi	ISO 27243 ISO 7933
DeltaLog10 Ambienti freddi	Prog.A	IREQ: Isolamento richiesto DLE: Durata limite di esposizione RT: Tempo di recupero richiesto WCI: Wind chill index (Indice di raffreddamento da Vento)		Severi freddi	ISO 11079
DeltaLog10 Analisi di Discomfort	Prog.B	PD _v : Insoddisfatti da differenza di temperatura verticale (testa-caviglie) PD _p : Insoddisfatti da temperatura del pavimento PD _a : Insoddisfatti da asimmetria radiante		Moderati	ISO 7730
DeltaLog10 BASE	Prog.C	t_a : temperatura dell'aria RH-t: Umidità-temperatura V _a -t: Velocità dell'aria, temperatura e portata lux: Illuminanza cd/m ² : Luminanza $\mu W/m^2$: Irradianza W/m ² : Irradianza $\mu mol/m^2s$: PAR ppm: CO e CO ₂	FLD: Fattore medio di Luce Diurna Per il calcolo dell'indice FLD è necessaria la misura della luce (sonda luxmetro LP 471 Phot). Necessita del programma "HD32.1 prog. C".	Uso generale	

Tabella 6: Specifica dei programmi della centralina - estratto manuale d'uso Delta OHM HD 32.1

Per la campagna di misurazioni presente sono state sfruttate tre sonde in particolare:

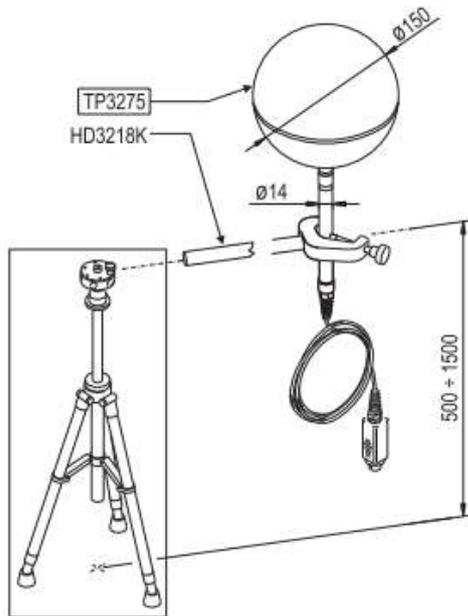
1. TP 3275 – sonda globotermometro (diametro 150 mm)
2. HP 3217 – sonda combinata temperatura e umidità relativa
3. AP 3203 – sonda a filo caldo (range 0-80°C)

Ciascuna riga indica la combinazione delle sonde da impiegare per il calcolo dei vari indici

	TP3207	TP3275	TP3276	AP3203 AP3203-F	HP3201 TP3204S	HP3217	HP3217DM
t_a : Temperatura dell'aria.	•						•
t_r : Temperatura media radiante.	•	•	•	•		•	•
PMV: Voto medio previsto. PPD: Percentuale di insoddisfatti	•	•	•	•		•	•
DR: Rischio da correnti d'aria.	•	•	•	•		•	•
t_o : Temperatura operativa.	•	•	•	•		•	•
t_{eq} : Temperatura equivalente.	•					•	•

Tabella 7: Specifiche delle sonde in base agli indici da rilevare – estratto manuale d'uso Delta OHM HD 32.1

Specifica delle sonde previste in base agli indici da rilevare - estratto manuale d'uso Delta OHM HD 32.1



TP3275

Sonda globotermometro Ø=150 mm secondo norme ISC 7243 - ISO 7726

Sensore tipo:

Pt100

(*) Incertezza di misura:

Classe 1/3 DIN

Campo di misura:

-10°C ... +100°C

Collegamento:

4 fili più modulo SICRAM

Connettore:

8 poli femmina DIN45326

Lunghezza cavo:

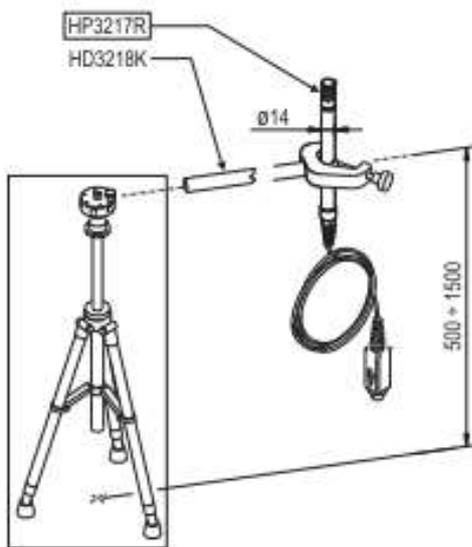
2 metri

(**) Tempo di risposta T₉₅

15 minuti



Immagine 5: Specifiche sonda TP 3275 - estratto manuale d'uso Delta OHM HD 32.1



HP3217R

Sonda combinata temperatura e umidità relativa. Impiegata nelle misure degli indici di comfort ambientali

Sensori tipo: - Pt100 a film sottile per temperatura
- Sensore capacitivo per umidità relativa.

(*) Incertezza di misura: temperatura: 1/3 DIN
umidità relativa: $\pm 2.5\%$

Campo di misura: temperatura: $-40^{\circ}\text{C} \dots +100^{\circ}\text{C}$
umidità relativa: $0 \dots 100\% \text{UR}$

Collegamento: 7 fili più modulo SICRAM

Connettore: 8 poli femmina DIN45326

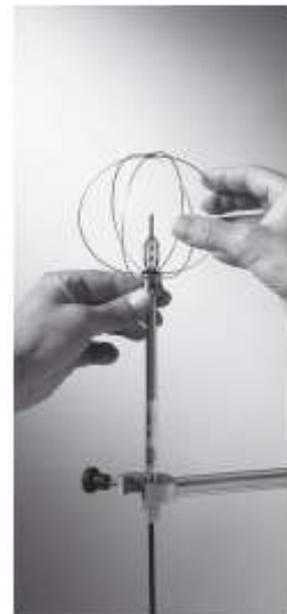
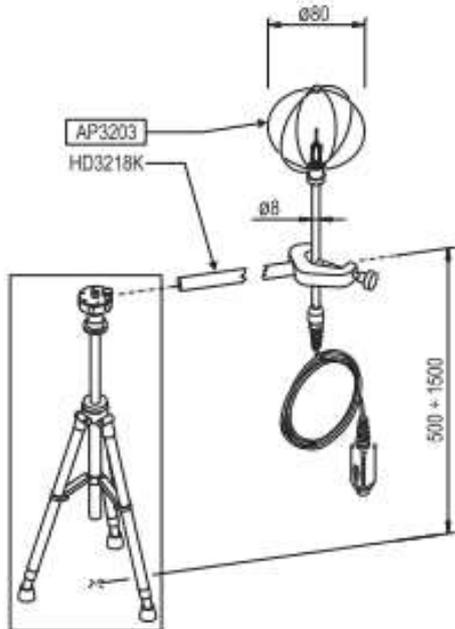
Lunghezza cavo: 2 metri

(**) $T_{95} \% \text{UR}$ 1 minuto

T_{95} Temperatura 15 minuti



Immagine 6: Specifiche sonda HP 3217 - estratto manuale d'uso Delta OHM HD 32.1



AP3203 / AP3203-F

Sonda a filo caldo omnidirezionale.

Sensore tipo: NTC 10kOhm

(*) Incertezza di misura: ± 0.2 m/s (0.1 ... 1 m/s)
 ± 0.3 m/s (1 ... 5 m/s)

Campo di misura: 0.1 ... 5m/s

0°C ... +80°C (per AP3203) / -30°C ... +30°C (per AP3203-F)

Collegamento: 7 fili più modulo SICRAM

Connettore: 8 poli femmina DIN45326

Lunghezza cavo: 2 metri

Immagine 7: Specifiche sonda TP 3275 - estratto manuale d'uso Delta OHM HD 32.1

Questionario Ashrae

Lo standard ASHRAE 55 definisce il comfort termico come "quella condizione mentale che esprime soddisfazione per l'ambiente termico" ed è utilizzato principalmente negli Stati Uniti ma è ben noto in tutto il mondo come standard per la progettazione, la messa in servizio e il collaudo degli spazi interni al fine di garantire il benessere microclimatico lavorativo.

Per lo svolgimento dello studio è stato somministrato un questionario il cui modello è affine a quello proposto dallo standard Ashrae 55. In particolare, i quesiti posti all'attenzione sono:

- Anagrafica dell'operatore
- Identificazione luogo di lavoro
- Dati fisici ambientali
- Dati soggettivi degli operatori
- Scala Ashrae 7 punti gradimento
- Sensazione termica

REPARTO
POSTAZIONE
CODICE MISURA L__
ETA'
MANSIONE
SISTEMI DI RISCALDAMENTO LOCALI
DATA
GIORNO SETTIMANA
FASCIA ORARIA
TEMPERATURA ESTERNA OSMER
UMIDITA' ESTERNA OSMER
VELOCITA' VENTO OSMER
Temperatura dita mano sx:
Temperatura dorso mano sx:
Temperatura volare polso mano sx:
Temperatura dorsale avambraccio sx:
Temperatura dita mano dx:
Temperatura dorso mano dx:
Temperatura volare polso mano dx:
Temperatura dorsale avambraccio dx:
Temperatura tempia sx
Temperatura tempia dx
Temperatura fronte
Vestiario indossato
Attività svolta
Qual è la tua sensazione termica in questo momento?
Quanto sei soddisfatto della temperatura del tuo spazio di lavoro in questo momento?
1 MOLTO INSODDISFATTO - 7 MOLTO SODDISFATTO
ISOLAMENTO TERMICO
ATTIVITA' METABOLICA

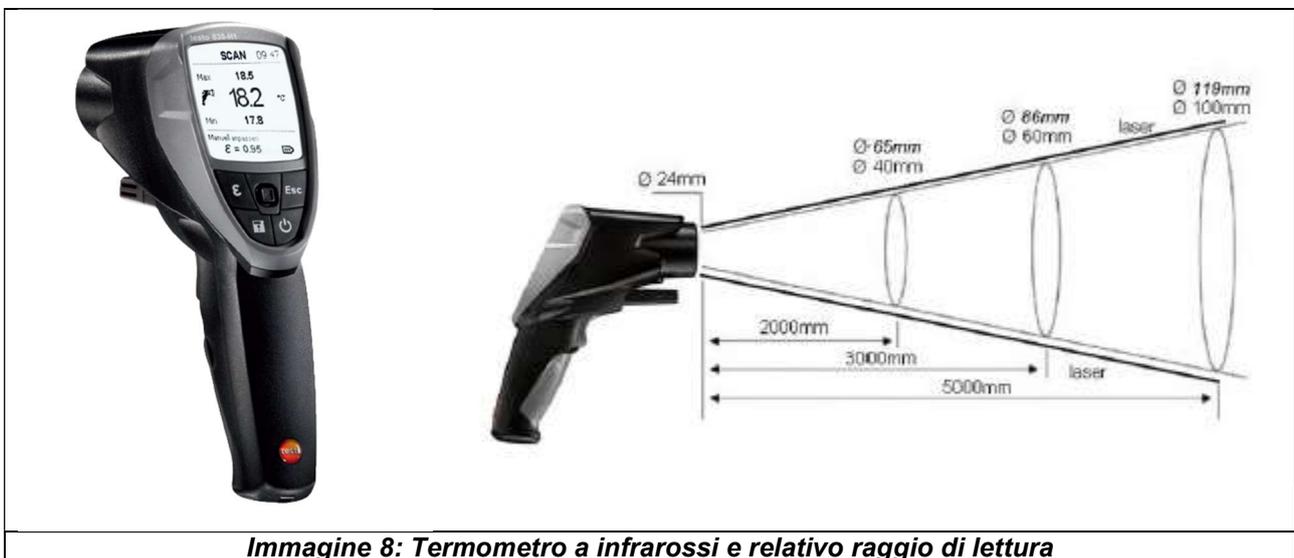
Tabella 7: Specifica dei programmi della centralina - estratto manuale d'uso Delta OHM HD 32.1

Misura temperatura mani, fronte e tempie

Parallelamente alle misure microclimatiche ambientali sono state eseguite delle misurazioni dei parametri fisiologici inerenti alla temperatura corporea delle seguenti aree:

- Dita della mano destra e sinistra
- Dorso della mano destra e sinistra
- Polso interno destra e sinistra
- Dorso dell'avambraccio destra e sinistra
- Tempie destra e sinistra
- Fronte

Le misurazioni sono state eseguite con l'ausilio di un termometro ad infrarossi "Testa 835" ad una distanza approssimativa di 20 cm.



Le misurazioni vengono svolte su entrambi gli arti superiori per poter confrontare la differenza di temperatura tra l'arto "dominante", quindi quello che viene utilizzato di più nelle lavorazioni, e l'arto che viene utilizzato di meno.

Ambito di svolgimento indagini

Lo stabilimento analizzato è stato acquisito nel momento della fondazione dell'azienda, la struttura non presenta notevoli caratteristiche termo-isolanti per l'assenza di coibentazione e/o cappotto isolante. In questa area dell'azienda vengono svolte le attività di: seghettatura dei tubi, ogivatura di tubi e bombole. Non sono previste né macchine né lavorazioni con dispersione termica, per tanto l'ambiente non risulta riscaldato. Va sottolineato che nella struttura i metodi di riscaldamento sono pressoché assenti tranne che per una piccola area circoscritta nella quale sono stati installati dei tubi radianti sul soffitto. Sono presenti due portoni paralleli che tendenzialmente nella stagione invernale vengono aperti solo al bisogno per evitare l'ingresso di correnti di aria dall'esterno.

La centralina, munita delle sonde, è stata posta ad un'altezza di 160 cm in modo tale da essere rappresentativa delle modalità di lavoro dell'operatore, quindi simulando la posizione eretta.

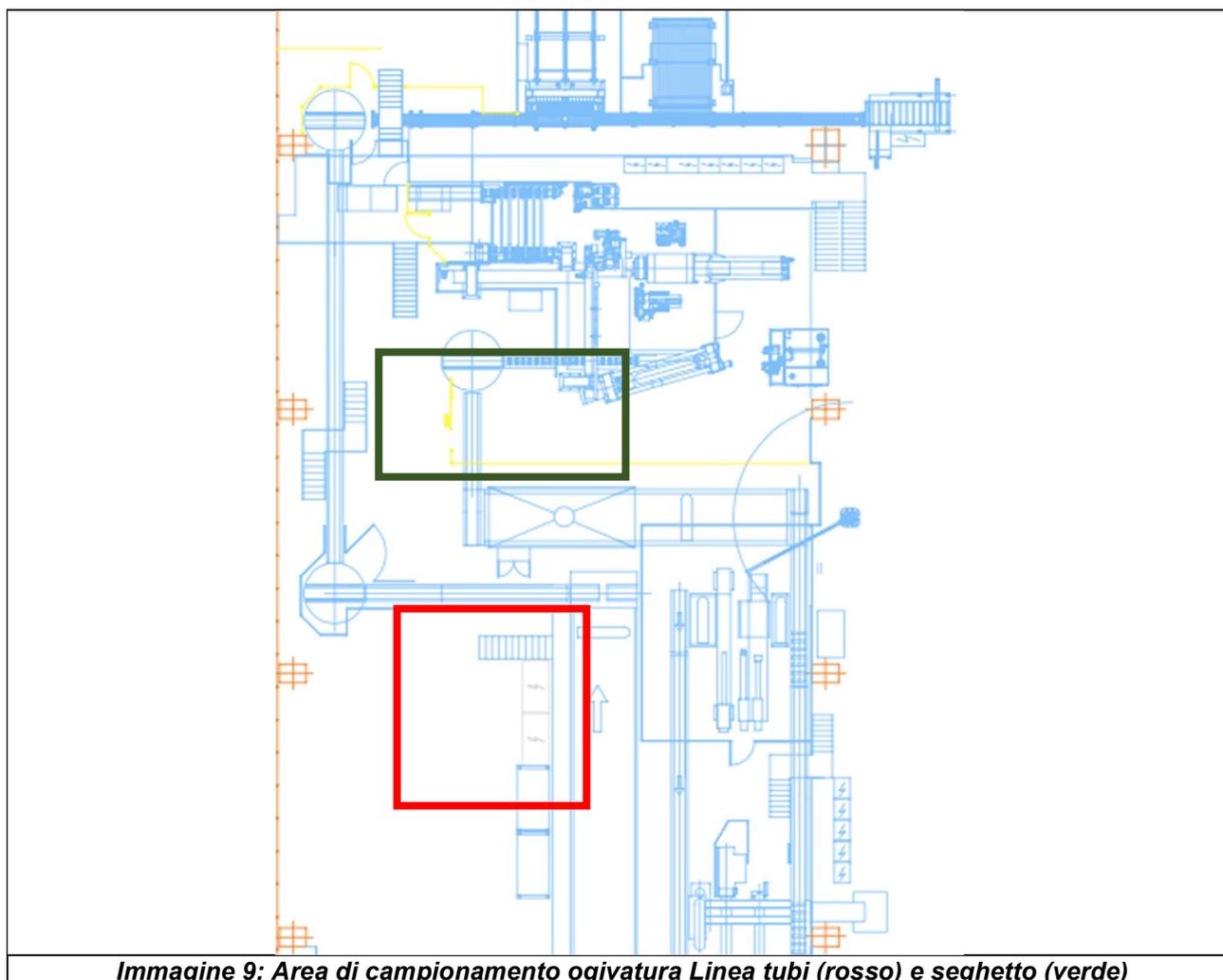


Immagine 9: Area di campionamento ogivatura Linea tubi (rosso) e seghetto (verde)

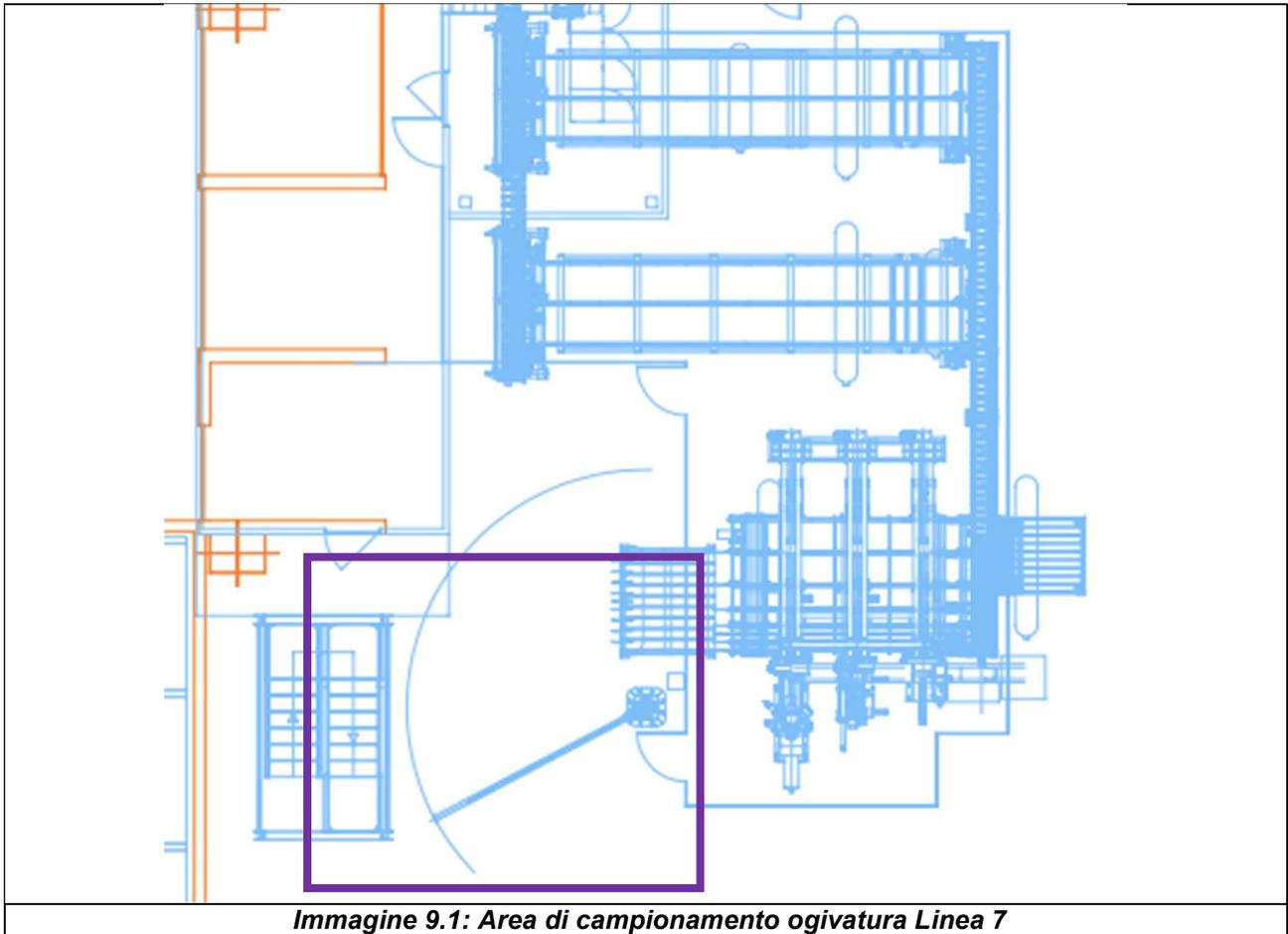


Immagine 9.1: Area di campionamento ogivatura Linea 7

Classificazione termica dello stabilimento

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).

Il calcolo della categoria termica si effettua in base alla formula:

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

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

- $3000 < F_C \leq 10000$ classe A

- $500 < F_c \leq 3000$ classe B
- $0 < F_c \leq 500$ classe C

Nello stabilimento oggetto di studio avendo i seguenti valori:

FS= 5 (lavoratore medio); FA= 8 (operaio specializzato); FT= 10 (stabilimento in cemento ed acciaio), si ottiene un FC=2339,2 che consente di collocare lo stabilimento nella categoria termica B.

Category	Thermal state of the body as a whole		Local discomfort			
	PPD %	PMV	DR %	PD %		
				vertical air temperature difference	caused by 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

Risultati

La rilevazione dei parametri fisici e individuali è stata svolta nelle giornate tra il 22 gennaio 2024 e il 22 febbraio 2024. Il campione globale è rappresentato da cinque operatori impiegati nelle lavorazioni di ogivatura di bombole e tubi. L'azienda nella quale ha avuto luogo la campagna microclimatica è impiegata nella produzione di bombole con deformazione a freddo. Nello specifico dell'area di lavoro di interesse allo studio non sono presenti macchine che emano calore. Gli operatori svolgono attività di supervisione del processo produttivo, di movimentazione di bombole per stocarle in pallet e manutenzione sulla macchina.

Dati del campione

Per la raccolta dei dati utili al campionamento sono stati intervistati cinque operatori per un totale di 11 misurazioni totali. Dall'intervista ai soggetti viene evidenziata un'età media di 58 anni.

	ETA'
<i>Mean</i>	50.8
<i>Standard deviation</i>	7.92
<i>Minimum</i>	37
<i>Maximum</i>	58
<i>25th percentile</i>	48.5
<i>50th percentile</i>	52.0
<i>75th percentile</i>	58.0

Parametri microclimatici esterni

Contemporaneamente sono stati registrati i dati inerenti alla T° esterna e velocità dell'aria esterna, forniti da ARPA FVG e messi a disposizione sul portale OSMER FVG.

La temperatura esterna più bassa rilevata è stata di 5.9°C, mentre la massima è di 15.9°C. Possiamo dunque calcolare che il valore medio è pari a 8.2°C.

Per quanto concerne la velocità dell'aria viene fornito un valore medio di 9 km/h.

Non è stato possibile ricavare dati inerenti all'umidità esterna in quanto nell'area geografica in cui si trova l'azienda non è presente una centralina che rileva questo parametro.

	TEMPERATURA ESTERNA OSMER
<i>Mean</i>	9.65
<i>Standard deviation</i>	4.22
<i>Minimum</i>	5.90
<i>Maximum</i>	15.9
<i>25th percentile</i>	5.90
<i>50th percentile</i>	8.20
<i>75th percentile</i>	12.6

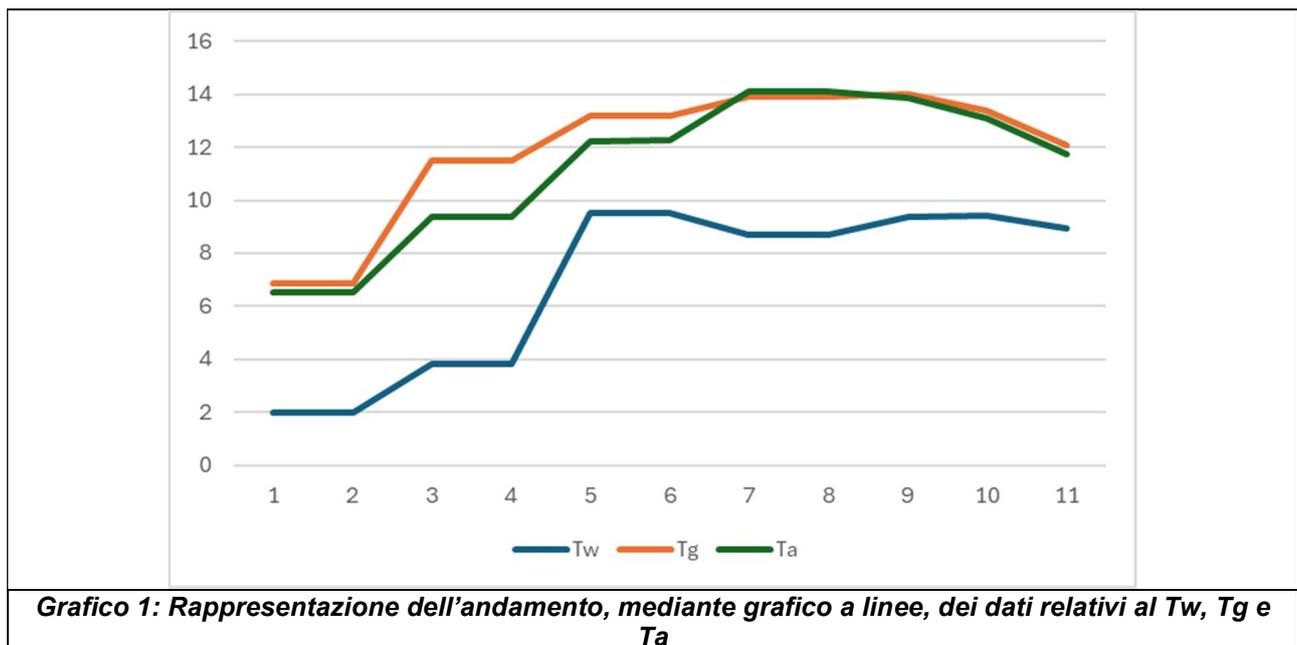
	VELOCITA' ARIA ESTERNA OSMER
<i>Mean</i>	8.36
<i>Standard deviation</i>	2.25
<i>Minimum</i>	4
<i>Maximum</i>	10
<i>25th percentile</i>	8.50
<i>50th percentile</i>	9.00
<i>75th percentile</i>	10.0

Parametri microclimatici interni

Con l'ausilio della centralina microclimatica e delle sonde scelte, previste per il tipo di misurazione, sono state elaborati i seguenti dati:

	<i>Tw (C) valore medio</i>	<i>Tg (C) valore medio</i>	<i>Ta (C) valore medio</i>	<i>Pr (hPa) valore medio</i>	<i>RH (%) valore medio</i>	<i>Va (m/s) valore medio</i>	<i>Tr (C) valore medio</i>
<i>Mean</i>	6.89	11.8	11.2	1007	52.8	0.200	12.4
<i>Standard deviation</i>	3.22	2.64	2.84	7.24	13.2	0.240	2.67
<i>Minimum</i>	2.00	6.84	6.53	998	36.7	0.0100	7.10
<i>Maximum</i>	9.54	14.0	14.1	1016	70.4	0.800	14.0
<i>25th percentile</i>	3.83	11.5	9.36	1002	43.4	0.0600	13.1
<i>50th percentile</i>	8.68	13.2	12.2	1005	46.9	0.130	13.6
<i>75th percentile</i>	9.38	13.6	13.5	1015	65.3	0.200	13.8

Il valore minimo di Tw registrato è pari a 2°C, questo dato è stato registrato quando la T° esterna era di 5,9°C ovvero la giornata più fredda incontrata durante la campagna microclimatica. Anche il parametro Ta sembra mostrare una correlazione con l'esterno, infatti il valore minimo registrato è 6,53°C derivato sempre dalla giornata con T° esterna di 5,9°C. Per quanto riguarda invece la velocità dell'aria non risulta esserci un paragone con la velocità dell'aria esterna, questo perché tutte le finestre e le porte presenti nello stabilimento tendono ad essere chiuse per tutta la giornata.



Isolamento termico e attività metabolica

Durante le interviste agli operatori è stato valutato il parametro di isolamento termico, ovvero la quantità di vestiario indossato in modo da poterne stimare e quantificare il "clo". I valori di riferimento per definire gli indici dei singoli capi di abbigliamento sono tabellati e reperibili all'interno della norma UNI EN ISO 7730. La somma degli indici che ogni operatore ha indossato determina il valore totale di clo e, di conseguenza, il grado di isolamento termico di ogni operatore. Per capire al meglio a cosa corrisponde il valore medio 1.40 clo di isolamento termico possiamo circa stimare il seguente abbigliamento: intimo, calze alte, t-shirt a maniche corte, una camicia, una felpa, pantaloni da lavoro invernali, giubbotto imbottito.

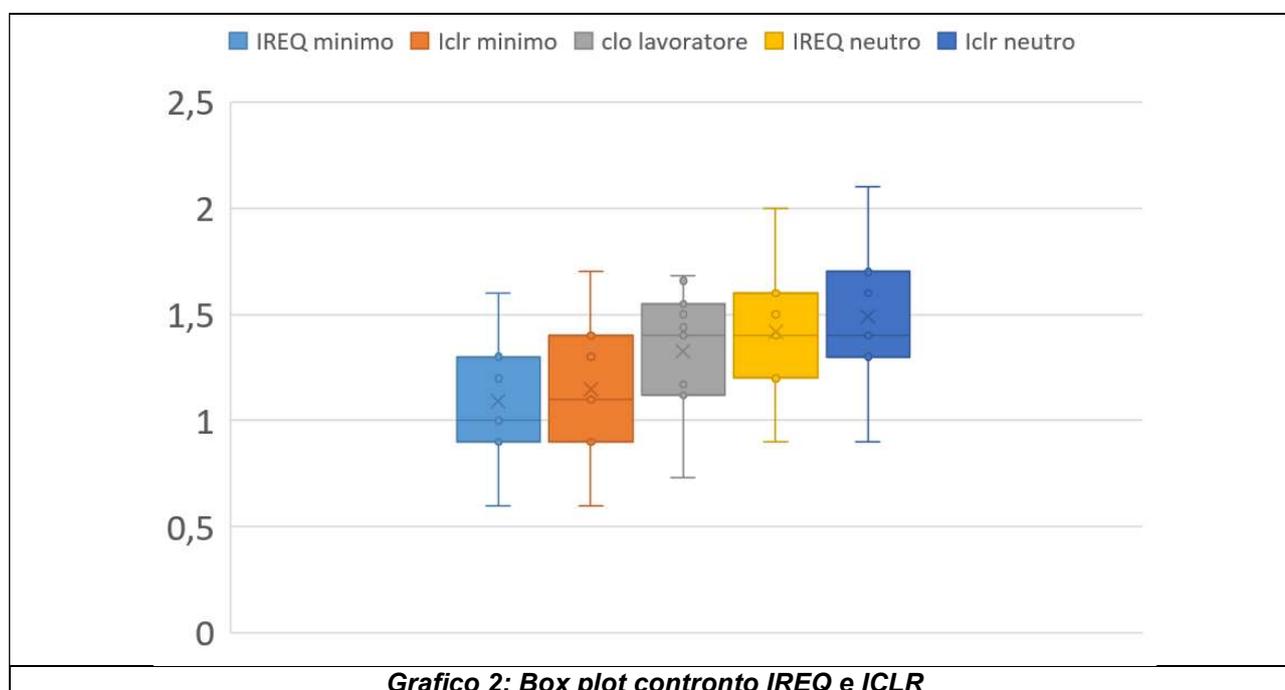
Per quanto riguarda l'attività metabolica agli operatori è stato assegnato un valore in base alle attività svolte, il valore più alto è stato assegnato per un'attività di manutenzione, ovvero 2.32 MET. Di contro il valore più basso, 1.55 MET, è stato assegnato per attività meno impegnative come la supervisione del processo di ogivatura o l'assistenza all'attrezzaggio delle macchine. Si ricava quindi il valore medio di 1.73 MET che corrisponde ad un'attività come la pallettizzazione delle bombole. Per dare un metro di misura corretto, 1 MET equivale a $58,2 \text{ W/m}^2$. È un'unità di misura volta a stimare la quantità di energia utilizzata del corpo durante delle attività rispetto ad una condizione di riposo. Viene espressa in termini di consumo di ossigeno, ovvero 1 MET equivale a $3,5 \text{ ml di O}_2/\text{kg}/\text{min}$, ma capita di trovare il valore espresso in kilocalorie, ovvero 1 MET corrisponde a $1 \text{ Kcal}/\text{kg}/\text{h}$ [UNI EN ISO 13731:2004].

	ISOLAMENTO TERMICO	ATTIVITA' METABOLICA
<i>Mean</i>	1.32	1.77
<i>Standard deviation</i>	0.286	0.233
<i>Minimum</i>	0.730	1.55
<i>Maximum</i>	1.68	2.32
<i>25th percentile</i>	1.15	1.55
<i>50th percentile</i>	1.40	1.73
<i>75th percentile</i>	1.52	1.89

IREQ e ICLR – temperatura neutra e minima

Dopo aver inserito i dati inerenti all'abbigliamento del lavoratore mediante software Delta Log 10 sono stati elaborati i seguenti dati:

	Iclr minimo	IREQ minimo	ISOLAMENTO TERMICO	Iclr neutro	IREQ neutro
Mean	1.15	1.09	1.32	1.49	1.42
Median	1.10	1.00	1.40	1.40	1.40
Standard deviation	0.311	0.277	0.286	0.314	0.293
Minimum	0.600	0.600	0.730	0.900	0.900
Maximum	1.70	1.60	1.68	2.10	2.00
25th percentile	0.900	0.900	1.15	1.30	1.20
50th percentile	1.10	1.00	1.40	1.40	1.40
75th percentile	1.35	1.30	1.52	1.70	1.60



Si osserva che mediamente il vestiario del lavoratore è compreso tra $IREQ_{min}$ e $IREQ_{neutro}$, questo significa che le condizioni di equilibrio termico vengono rispettate secondo la formula $IREQ_{min} < Iclr < IREQ_{neutro}$.

PMV e PPD

Successivamente alle misurazioni dei parametri sopracitati sono stati ricavati gli indici PMV e PPD, come descritto dalla normativa UNI EN ISO 7730. Osservando le sottostanti analisi descrittive è possibile osservare una percentuale di insoddisfatti.

Analizzando il valore medio PMV possiamo affermare che non è presente uno stress termico bensì un discomfort termico in quanto il dato è prossimo allo zero.

In particolare è stato riscontrato un PMV mediano pari a -0.590 corrispondente a un PPD di 12.5%. Tali valori si collocano in un range inferiore ai limiti di accettabilità previsti per la categoria termica B relativa allo stabilimento in esame che prevede un valore minimo di PMV pari a -0.5 e una percentuale PPD inferiore al 10%.

	PMV valore medio	PPD (%) valore medio
<i>Mean</i>	-0.508	13.7
<i>Standard deviation</i>	0.409	9.56
<i>Minimum</i>	-1.26	5.79
<i>Maximum</i>	0.190	38.2
<i>25th percentile</i>	-0.755	6.59
<i>50th percentile</i>	-0.590	12.5
<i>75th percentile</i>	-0.260	17.1

Sensazione termica individuale

Ai lavoratori intervistati è stato sottoposto un questionario di sensazione termica individuale nella quale dovevano esprimere un giudizio alla domanda “qual è la tua sensazione termica generale?” nel momento di somministrazione del questionario con i seguenti valori: molto caldo, caldo, abbastanza caldo, né caldo né freddo, abbastanza freddo, freddo, molto freddo. Per poter elaborare i giudizi numericamente è stato assegnato un valore negativo alla sensazione di freddo e un valore positivo alla sensazione di caldo (molto caldo=+3; caldo=+2; abbastanza caldo=+1; né caldo né freddo=0; abbastanza freddo=-1; freddo=-2; molto freddo=-3).

Mediamente la sensazione termica percepita nelle diverse giornate è prossima allo zero, per cui il dato è abbastanza confortante in quanto prossimo ad una sensazione di neutralità termica. Il giudizio “abbastanza freddo” è stato registrato nelle giornate in cui la T° esterna era pari a 5,9°C e la T° interna era in un range tra 2°C e 3,8°C.

Graficamente si può notare che il 36,36% ha dato giudizio di neutralità termica, il 36,36% ha espresso una sensazione di abbastanza freddo, il 18,18% ha votato una sensazione di caldo ed infine il 9,09% ha votato abbastanza caldo. Il 36.36% che ha formulato giudizio abbastanza freddo ha espresso tale valutazione nelle giornate in cui la

Qual è la tua sensazione termica in questo momento?
(2)

Mean	0.0909
Standard deviation	1.14
Minimum	-1
Maximum	2
25th percentile	-1.00
50th percentile	0.00
75th percentile	0.500

sensazione termica	voti	% del totale
caldo	2	18,18%
abbastanza caldo	1	9,09%
né caldo né freddo	4	36,36%
abbastanza freddo	4	36,36%

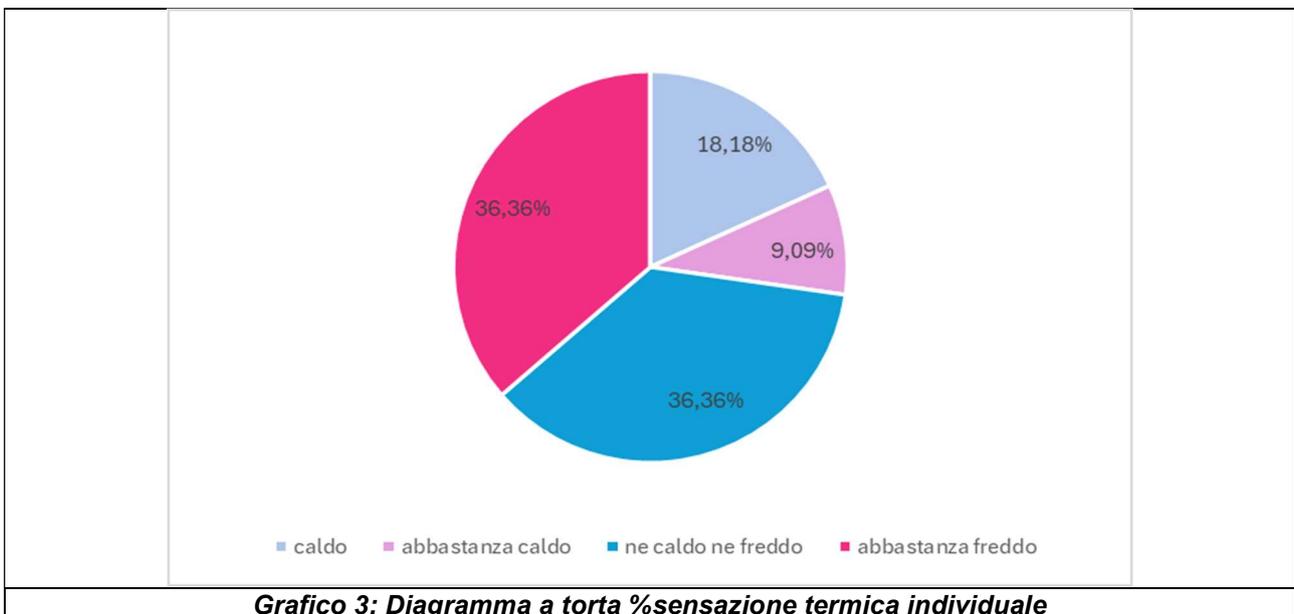


Grafico 3: Diagramma a torta %sensazione termica individuale

Confronto tra PMV e valutazione termica individuale

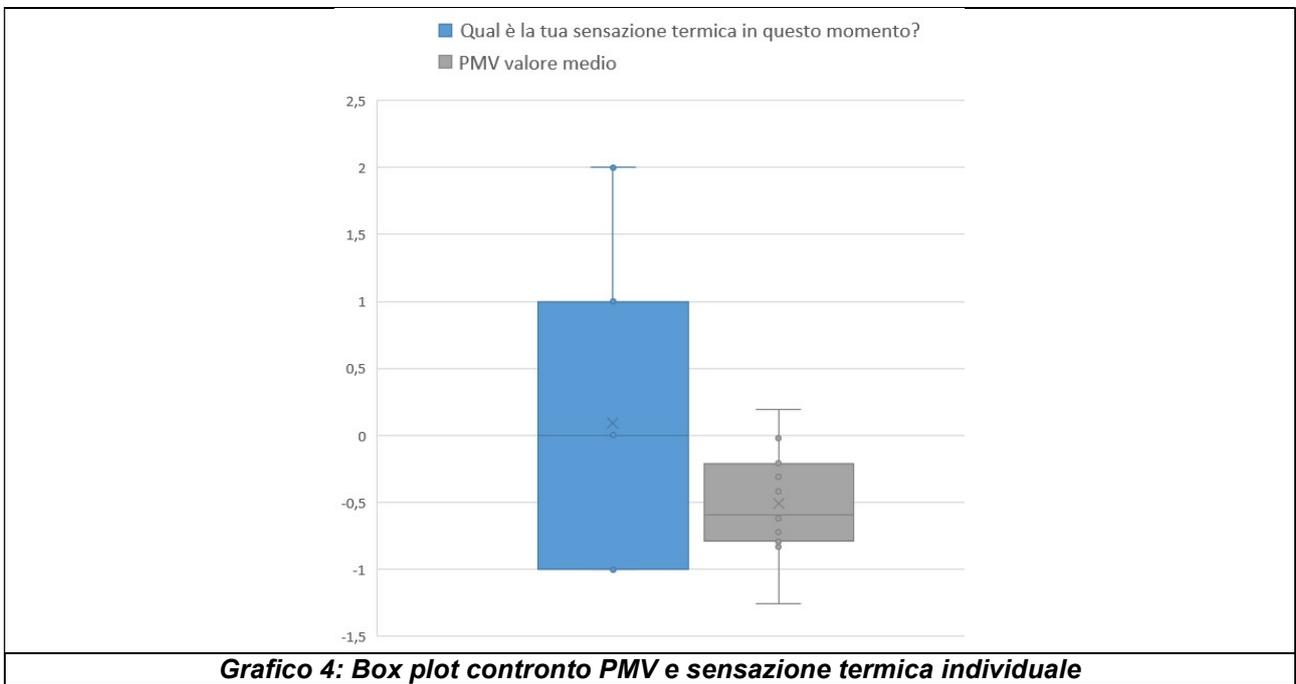
Tra il PMV fornito dal software della centralina e il giudizio soggettivo raccolto tramite intervista ai lavoratori si nota una discordanza tra i dati. Il valore di PMV medio (0.59), è inferiore al giudizio soggettivo espresso dai lavoratori che si è attestato mediamente su valori prossimi alla neutralità termica (0.09).

Paired Samples T-Test

Test wilcoxon-mann-whitney

		statistic	df	p
Qual è la tua sensazione termica in questo momento? (2)	PMV valore medio	54.0	10.0	0.07

	N	Mean	Median	SD	SE
Qual è la tua sensazione termica in questo momento? (2)	11	0.0909	0	1.136	0.343
PMV valore medio	11	-0.5075	-0.590	0.409	0.123



Grado di soddisfazione termica

Oltre al quesito di sensazione termica, agli operatori dell'azienda è stato posto il quesito di grado di soddisfazione dell'area di lavoro nell'arco del turno lavorativo.

La risposta degli intervistati poteva ricadere in uno tra sette valori proposti, dove 1 corrisponde il minimo valore attribuibile ovvero "molto insoddisfatto" e 7 rappresenta il massimo valore attribuibile corrispondente a "molto soddisfatto".

Analizzando i dati raccolti viene evidenziato che il grado di soddisfazione più espresso è quello di neutralità, il cui voto corrispondente è 4.

Valutazioni di insoddisfazione sono state espresse nelle giornate in cui la T° esterna era pari a 5,9°C e la T° interna era in un range tra 2°C e 3,8°C.

Quanto sei soddisfatto della temperatura del tuo spazio di lavoro in questo momento? 1 MOLTO INSODDISFATTO - 7 MOLTO SODDISFATTO

<i>Mean</i>	3.18
<i>Standard deviation</i>	1.89
<i>Minimum</i>	1
<i>Maximum</i>	6
<i>25th percentile</i>	1.50
<i>50th percentile</i>	4.00
<i>75th percentile</i>	4.00

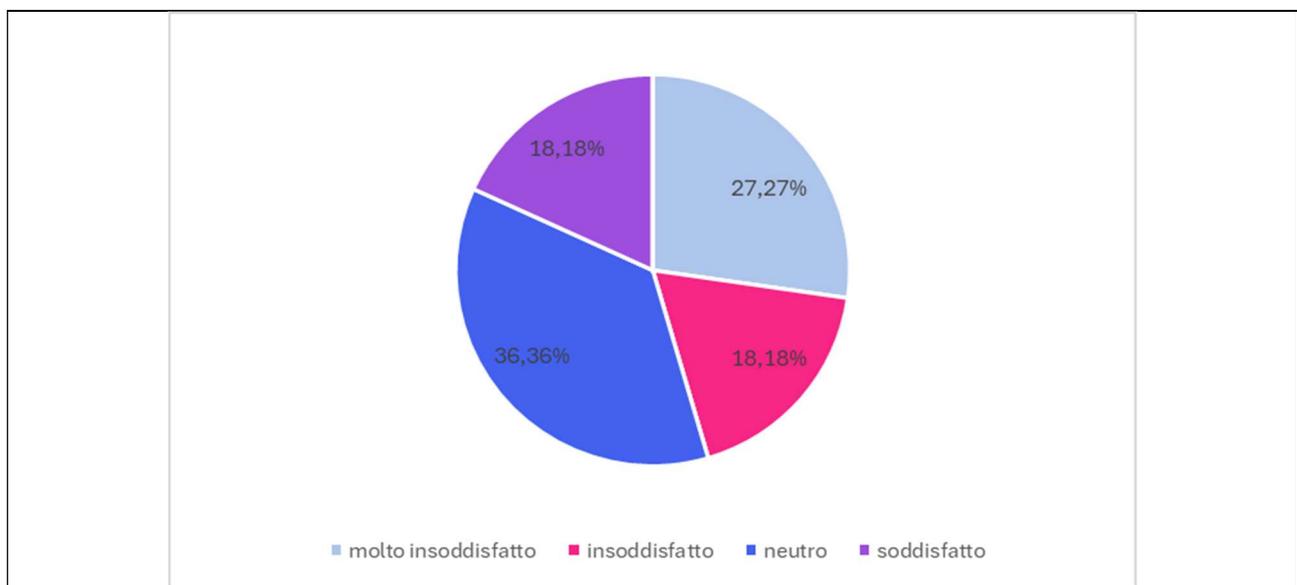


Grafico 5: Diagramma a torta % grado soddisfazione termica

Parametri fisiologici

Dall'elaborazione dei dati emergono due parametri fulcro per la valutazione: temperatura media pelle minimo e temperatura media pelle neutro. Osservando il boxpot si nota come la temperatura delle parti del corpo scoperte, ovvero T° dita mano (sinistra 22.8°; destra 23.3°C) e T° dorso mano (sinistra 27.8°C; destra 26.2°C), siano inferiori al valore di T° media pelle minima (29.8°C). A differenza, invece, le zone coperte da indumenti, ovvero gli avambracci, risultano avere T° mediana (32°C) superiore al valore di T° mediana pelle minima (29.8°C) e di poco inferiore al valore di T° media pelle neutra (32.9°C).

La rilevazione delle temperature fisiologiche di entrambi gli arti è stata svolta per verificare un'ipotetica correlazione di T° più alta nell'arto predominante. Osservando i dati però questa correlazione non risalta in quanto le temperature dell'arto sinistro e destro sono pressoché simili.

	Temperatura media pelle neutro	Temperatura media pelle minimo
Mean	32.8	29.7
Standard deviation	0.390	0.488
Minimum	31.9	28.6
Maximum	33.1	30.1
25th percentile	32.6	29.4
50th percentile	32.9	29.8
75th percentile	33.1	30.1

	Temperatura dita mano sx:	Temperatura dorso mano sx:	Temperatura volare polso mano sx:	Temperatura dorsale avambraccio sx:	Temperatura dita mano dx:	Temperatura dorso mano dx:	Temperatura volare polso mano dx:	Temperatura dorsale avambraccio dx:	Temperatura tempia sx	Temperatura tempia dx	Temperatura fronte
Mean	23.6	26.6	29.1	32.3	23.1	26.3	29.0	31.7	28.1	28.5	30.7
Standard deviation	4.85	2.99	2.53	1.43	5.96	3.81	2.36	2.00	2.85	2.79	1.09
Minimum	17.0	22.7	25.6	29.8	16.0	21.0	25.1	27.2	22.7	23.7	29.2
Maximum	30.2	30.0	33.3	34.3	32.1	32.4	32.1	34.1	31.5	32.1	32.7
25th percentile	19.4	23.7	27.0	31.1	17.7	23.8	27.1	31.5	27.4	26.8	30.0
50th percentile	22.8	27.8	29.0	32.3	23.2	26.2	28.8	32.1	28.0	29.2	30.5
75th percentile	28.0	29.3	31.4	33.5	28.6	29.4	31.0	32.6	30.4	30.2	31.3

- Temperatura dita mano sx:
- Temperatura dorso mano sx:
- Temperatura volare polso mano sx:
- Temperatura dorsale avambraccio sx:
- Temperatura tempia sx
- Temperatura media pelle neutro
- Temperatura media pelle minimo

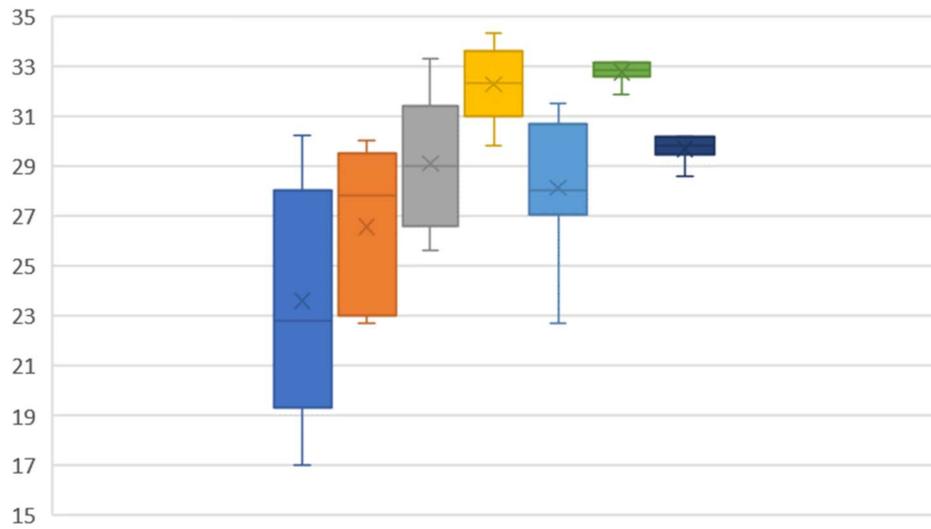


Grafico 6: Box plot confronto temperatura arto sinistro

- Temperatura dita mano dx:
- Temperatura dorso mano dx:
- Temperatura volare polso mano dx:
- Temperatura dorsale avambraccio dx:
- Temperatura tempia dx
- Temperatura media pelle neutro
- Temperatura media pelle minimo

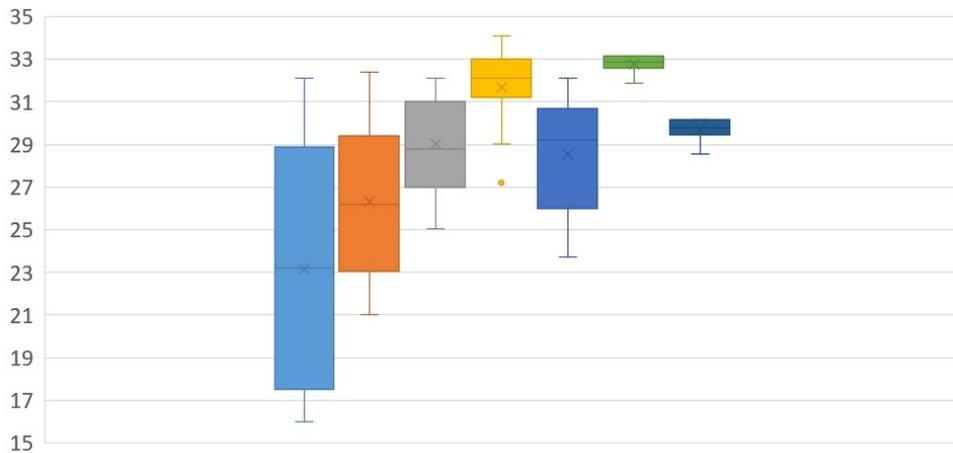


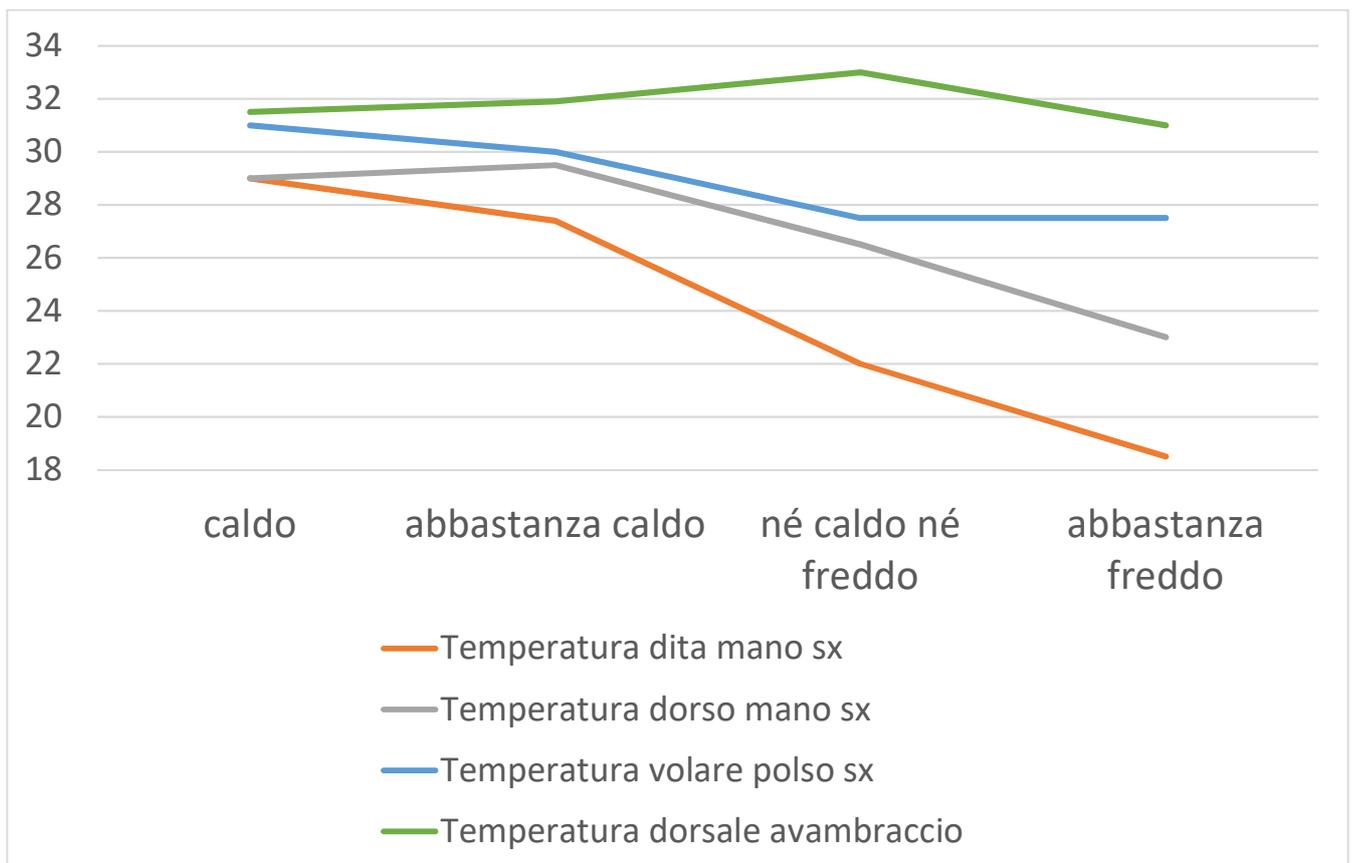
Grafico 6.1: Box plot confronto temperatura arto destro

Relazione tra parametri fisiologici e comfort del lavoratore

Facendo un confronto della temperatura cutanea acquisita in relazione alla sensazione termica percepita dal soggetto, si osserva che a temperature superiori di dita, dorso e superficie volare del polso corrispondono giudizi di sensazione termica calda o neutra. Per quanto riguarda la “temperatura dorsale avambraccio”, i valori riscontrati in tutte le categorie di giudizio termico soggettivo sono risultati superiori a 30°C.

In seguito, i dati divisi per distribuzione della sensazione termica in confronto con la media della temperatura rilevata in uno specifico distretto dell’arto.

<i>sensazione termica</i>	<i>voti</i>	<i>Temperatura dita mano sx</i>	<i>Temperatura dorso mano sx</i>	<i>Temperatura volare polso sx</i>	<i>Temperatura dorsale avambraccio</i>
caldo	2	29	29	31	31.5
abbastanza caldo	1	27.4	29.5	30	31.9
né caldo né freddo	4	22	26.5	27.5	33
abbastanza freddo	4	18.5	23	27.5	31



Discussione

Questo studio ha preso in esame cinque lavoratori maschi per un totale di 11 misurazioni, con un'età compresa tra 37 e 58 anni.

La campagna di misurazioni si è svolta tra fine gennaio 2024 e febbraio 2024, con valori di temperature esterne registrate in un range che spazia tra i 5.9°C e i 15.9°C. Tramite le misure effettuate con la centralina microclimatica è possibile attestare una correlazione tra temperatura esterna e quella interna allo stabilimento; infatti, minore è la temperatura esterna minore è la temperatura interna. Il valore medio rilevato per la Ta (temperatura aria) è pari a 12.2°C.

È stato valutato l'isolamento termico e l'attività metabolica degli operatori intervistati. I dati elaborati portano l'attenzione un valore di isolamento termico medio di 1.40 clo che corrisponde ad un vestiario di intimo, calzini alti, t-shirt maniche corte, camicia, felpa, giubbotto imbottito e pantaloni invernali. Le attività metaboliche sono state valutate in base alle mansioni svolte dai soggetti intervistati e spaziano da attività di supervisione del ciclo produttivo ad attività più pesanti come manutenzione sulle macchine, il valore medio è 1.73 MET che corrisponde ad un'attività di pallettizzazione delle bombole.

Relativamente all'abbigliamento dell'operatore il software della centralina microclimatica Delta Log 10 ha elaborato due indici sulla base delle misure effettuate: IREQ e ICLR. Dei due indici sono stati forniti dei valori minimi e neutri. Confrontando l'isolamento termico riscontrato sul lavoratore (valore mediano 1.40 clo) con i due indici è emerso che il vestiario indossato durante le interviste si trova compreso tra il valore minimo (valore mediano IREQ 1.00 clo, Iclr 1.10 clo) e neutro dei suddetti indici (valore mediano IREQ 1.40 clo e Iclr 1.40 clo). Questo indica che il vestiario adottato è tale da garantire una sufficiente protezione in relazione all'esposizione a clima freddo.

Per quanto riguarda i valori PMV, è stato trovato un PMV mediano di -0,590, che corrisponde a un PPD del 12,5 percento. Tali risultati si situano in una fascia inferiore ai limiti di accettabilità previsti per la categoria termica B per lo stabilimento in questione, che prevedono un valore minimo di PMV di -0.5 e una percentuale di PPD inferiore al 10%.

Il questionario ASHRAE ha evidenziato giudizi lievemente superiori rispetto a quanto evidenziato dall'indice PMV; il giudizio più negativo è stato riscontrato nelle giornate in cui la temperatura interna si aggirava tra i 2°C e i 3,8°C. I giudizi era pressoché coerenti con il variare delle temperature, delle ore e delle attività svolte nel turno lavorativo. Mediamente però si può affermare che il giudizio più espresso è quello di neutralità termica e "abbastanza freddo" nei giorni più freddi registrati.

Relativamente ai parametri fisiologici il valore della temperatura riscontrata sugli avambracci (parte della cute coperta) risultava tale da garantire il valore di temperatura neutra raccomandata dal software corrispondente a 32.9°C. Con l'analisi dei dati raccolti si può cogliere una lieve correlazione tra sensazione termica espressa e temperatura delle estremità degli altri. Non è stata riscontrata una differenza di temperatura nei due arti superiori sulla base dell'arto più utilizzato.

Conclusioni

Successivamente all'analisi dei risultati emerge uno discomfort termico, con maggiore insoddisfazione nei giorni freddi. Per ovviare a tali disagi evidenziati nelle giornate fredde considerando anche che gli inverni che si presentano man mano sono più miti potrebbe essere implementate le seguenti misure migliorative.

Tubi radianti

Attualmente esistono diversi sistemi di riscaldamento per capannoni industriali in grado di saldare grandi ambienti andando incontro al sostenimento dei costi di gestione. I tubi radianti sfruttano l'irraggiamento a gas o elettrico, generano un calore uniforme che tende a non disperdersi. L'energia prodotta è di tipo infrarossa e diventa calore solo quando entra a contatto con le superfici, questo significa che non è l'aria ad essere scaldata. Il vantaggio è quindi di non aver variazioni nella temperatura dell'aria in quanto non interagisce con il calore. Sono efficienti in quanto possono essere installati nelle aree in cui si necessita avere calore senza ricoprire una planimetria intera.

Abbigliamento

Al fine di garantire una sensazione di comfort al lavoratore è importante scegliere un abbigliamento idoneo. Per creare un microambiente confortevole attorno al corpo, gli indumenti progettati per il freddo devono avere caratteristiche specifiche come isolamento termico, traspirabilità e resistenza al vento e umidità. L'uso di strati e materiali isolanti performanti consente una regolazione efficiente della temperatura corporea e una riduzione delle perdite di calore. Inoltre, indossare accessori come guanti, cappelli e calze termiche protegge ulteriormente le estremità del corpo dove il calore tende a dissiparsi più in fretta.



Immagine 10: pantalone invernale e maglia termica (Dress&Safe)

Gilet per riscaldamento

Non sempre però sono applicabili metodi di protezione collettiva, si rende necessario applicare strategie correttive sul singolo individuo. Secondo uno studio svolto dall'Università di Pechino,(inserire citazione) tramite il riscaldamento del busto con gilet riscaldanti elettricamente gli effetti negativi dell'esposizione al freddo vengono attenuati riducendo la sensazione di freddo delle mani, dei piedi e del volto oltre che una diminuzione di termogenesi. Grazie al riscaldamento del busto anche la temperatura cutanea delle zone non riscaldate giova di un maggiore sensazione termica.



Immagine 11: Gilet riscaldato elettricamente modello dal sito Stileo.it

Ringraziamenti

Quest'ultima parte la voglio dedicare per ringraziare tutte le persone che in questi tre anni mi hanno accompagnato in questo percorso.

I primi a cui vorrei porre i ringraziamenti sono i miei tutor: dott. Bordignon Michele nonché mio relatore, dott. Missana Giovanni, dott. Rizzo Marco nonché co-relatore di questa tesi. Questo percorso non sarebbe stato lo stesso senza di voi, mi avete sostenuto dal primo giorno fino all'ultimo. Devo a voi la persona che sono in ambito lavorativo, custodirò tutti i vostri insegnamenti con grande ammirazione. Mi auguro, un giorno, di essere competente almeno la metà di quanto siete voi. Siete la mia fonte di ispirazione.

Grazie alla mia famiglia, nonostante è da tutta la vita che vi faccio pensare so che non mi abbandonerete mai. Grazie per aver reso questo percorso possibile, per non avermi mai fatto sentire inadatta quando fallivo e per far festeggiato ogni traguardo raggiunto.

Valentino, il tuo sostegno e la tua comprensione hanno reso possibile affrontare le sfide e superare gli ostacoli del mio ultimo anno accademico. Grazie per avermi incoraggiato quando ero stanca e incerta dei passi successivi da fare. Ora ti cedo il testimone, nella speranza che tu possa trovare la strada giusta nei "professionisti del rischio".

Desiro altresì ringraziare la famiglia Fedele, non possono che esprimere la mia gratitudine per il vostro costante sostegno, per la vostra fiducia e per l'incoraggiamento durante i momenti più duri del mio percorso. L'amore e la stima che mi avete dato giorno dopo giorno sono inestimabili.

Ringrazio Elisa e Lucrezia, l'incontro più inaspettato della mia vita. Siete state pace e tranquillità per la mia anima, di cui ormai fate parte. Vi voglio bene.

Un sentito ringraziamento i miei compagni di corso. Siamo stati la classe più atipica mai vista, amici dal primo giorno e sempre uniti in qualsiasi situazione. La complicità e il sostegno che mi avete dato non ha prezzo e per la prima volta mi avete fatto capire cosa significa stare bene con degli amici. Siete parte di me e della professionista che sarò un giorno.

Ringrazio di cuore il Dott. Mattia Golop, amico e collega, negli ultimi mesi del mio percorso (nonché quelli decisivi) mi hai dato una carica unica facendo di tutto pur di non farmi mollare. Il periodo lavorativo che abbiamo condiviso mi ha fatto capire che persona voglio essere. Avrai sempre e per sempre la mia gratitudine.

Vorrei dedicare queste righe per gruppo di amici di Bottenicco & Co. che mi ha accompagnato per tutto il percorso. Grazie di cuore per essere stati al mio fianco, per aver condiviso gioie e dolori. Spero con tutto il cuore che possiate raggiungere tutti i vostri sogni, puntate sempre più in alto del cielo.

Ringrazio l'azienda che mi ha permesso di poter elaborare questa tesi sul campo. Mi avete accolto partendo dal mio ultimo tirocinio universitario per poi prendermi in maniera integrale nella vostra squadra. Le quantità di cose che ho appreso durante questo percorso al vostro fianco è inestimabile. Vi sarò eternamente grata.

Ultimi, ma non per importanza, ringrazio i miei nonni Leo e Marcella. Ci siamo separati prima di quanto mi aspettassi, tutto quello che ho fatto è per voi. Anche se non siete qui fisicamente spero siate fieri di me. Siete le mie stelle polari, mi indicate la direzione.

Con immensa gratitudine e freddo,

Elli.

Bibliografia

Del Gaudio M., Freda D., Lenzuni P., Nataletti P., & Sabatino R. (2018). La valutazione del microclima, Linee guida INAIL.

Manuale d'uso Delta OHM HD 32.1

Portale Agenti Fisici

Piazzetta Cuccia, Alberto Nagel. Premio Mediobanca alle imprese dinamiche – terza edizione

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”

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

P.O. Fanger, Thermal comfort Analysis and applications in environmental engineering, 1970

Sishi Li, Xinyu Jia, Bin Cao, Yingxin Zhu (2023) Improvement of thermal perceptions and physiological responses using torso heating under short-term cold exposure.

Tanaya Chaudhuri, Deqing Zhai, Yeng Chai Soh, Hua Li, Lihua Xie, Thermal comfort prediction using normalized skin temperature in a uniform built environment, Energy and Buildings, Volume 159, 2018, Pages 426-440, ISSN 0378-7788.

ASHRAE. Thermal environmental conditions for human occupancy. BSR/ASHRAE Standard 55P. Fourth Public Review. Atlanta: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc, 2003.

Wu Z, Li N, Cui H, Peng J, Chen H, Liu P. Using Upper Extremity Skin Temperatures to Assess Thermal Comfort in Office Buildings in Changsha, China. *Int J Environ Res Public Health*. 2017;14(10):1092. Published 2017 Sep 21. doi: 10.3390/ijerph14101092

Virgilio A., Oliveira M., Adelio R. Gaspar, Antonio M. Raimundo, Divo A. Quintela Evaluation of Occupational Cold Environments: field Measurements and Subjective analysis

John W. Castellani, Andrew J. Yaoung Human physiological responses to cold exposure: acute responses and acclimatization to prolonged exposure

Norma de Melo Pinto, Antonio Augusto de Paula Xavfier, Kazuo Hatakeyama Thermal comfort in industrial environment: conditions and parametres

Alicja Bortkiewicz, Elzbieta Gadzicka, Wieslaw Szymczak, Agata Szyjkowska, Wieslawa Koszada-Wlodarczyk, Teresa Makowiec-Dabrowska Physiological reaction to work in cold microclimate.

Irene Kunz Lavoro a basse temperature: al chiuso/all'aperto al freddo

airacon.it tubi radianti