



ALMA MATER STUDIORUM
UNIVERSITÀ DI BOLOGNA



Bologna, 6 Dicembre 2022

ANALISI SPERIMENTALE IN CAMERA CLIMATICA DELL'INFLUENZA DELL'ETÀ SUL COMFORT TERMICO

In collaborazione con «International Centre for Indoor Environment and Energy», Università tecnica della Danimarca, Copenaghen



Alice Caporale

Dottoranda di Ricerca presso DIMSAI

Dipartimento di Ingegneria Industriale, Università di Bologna

Agenda

- Introduzione al tema di Ricerca
- Microclima e comfort termico
- Periodo di **Ricerca in Danimarca**
- Il progetto **AGETHERM**

Protocollo

Aspettative

Risultati preliminari

- Sviluppi futuri



Introduzione

Argomento di ricerca: **valutazione multifattoriale dei rischi sul luogo di lavoro**

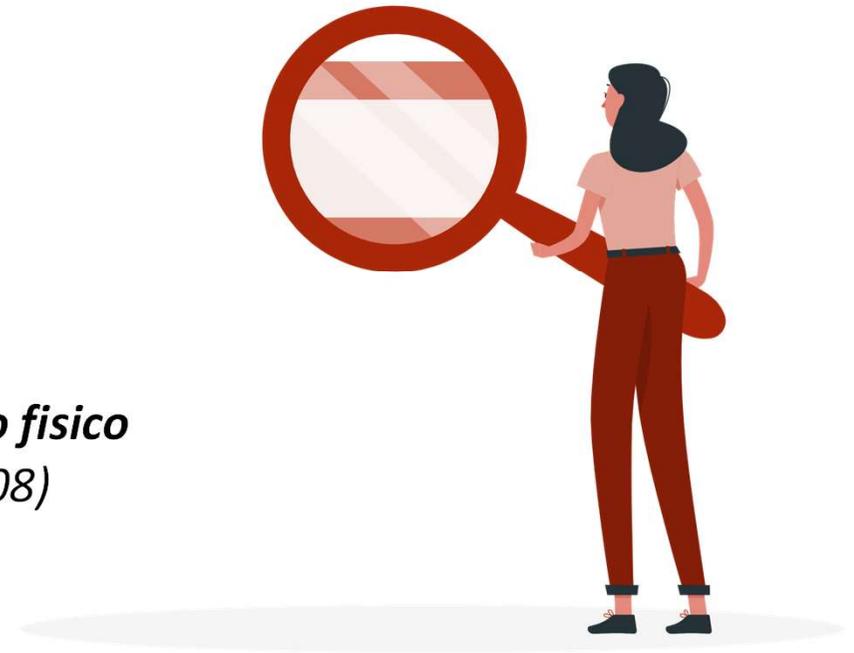
Percorso di ricerca finanziato **dall'Ausl Emilia Romagna.**

2014:

- **Ergonomia**
- **Ambienti confinati**

2020:

- **Microclima** (*riconosciuto come agente di rischio fisico ai sensi dell'art. 180, Titolo VIII del D.Lgs. 81/2008*)



Microclima

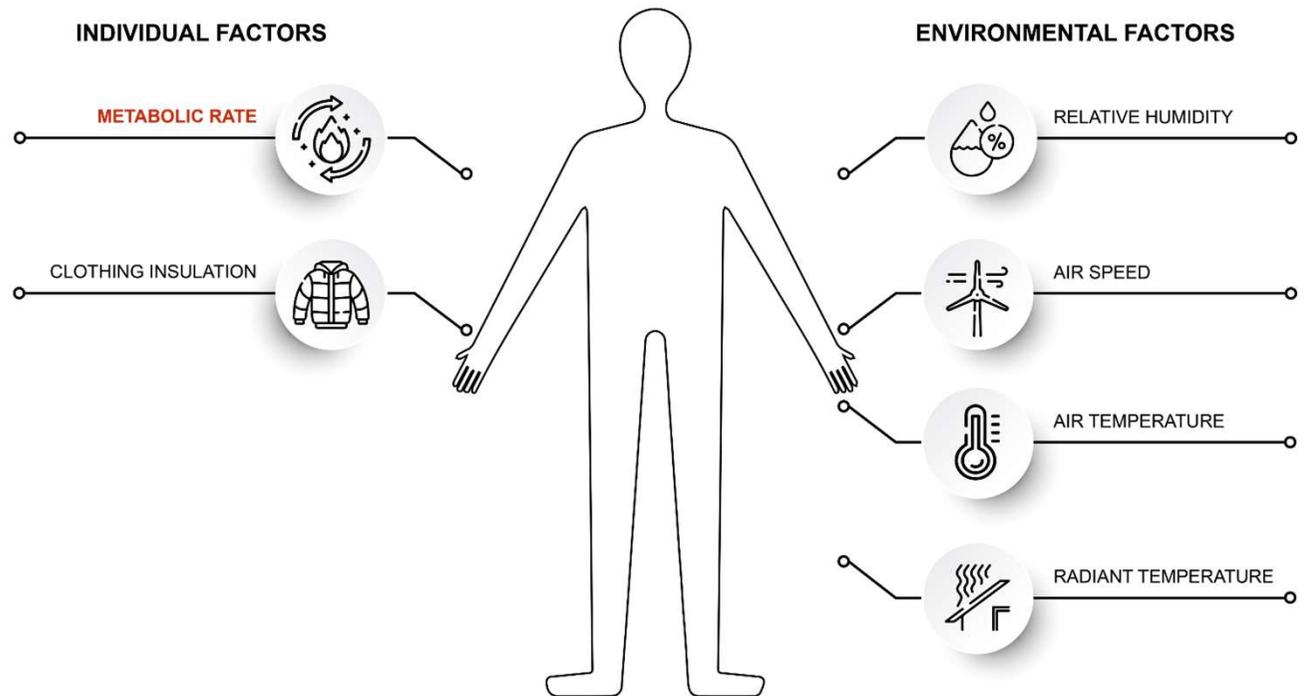
Per **Microclima** si intende il **complesso dei parametri climatici dell'ambiente**:

- **Umidità relativa**
- **Velocità dell'aria**
- **Temperatura dell'aria**
- **Temperatura radiante**

Che insieme a **parametri individuali**

- **Attività metabolica**
- **Isolamento del vestiario**

influenzano lo **scambio termico tra l'essere umano e l'ambiente** circostante.



La valutazione del comfort

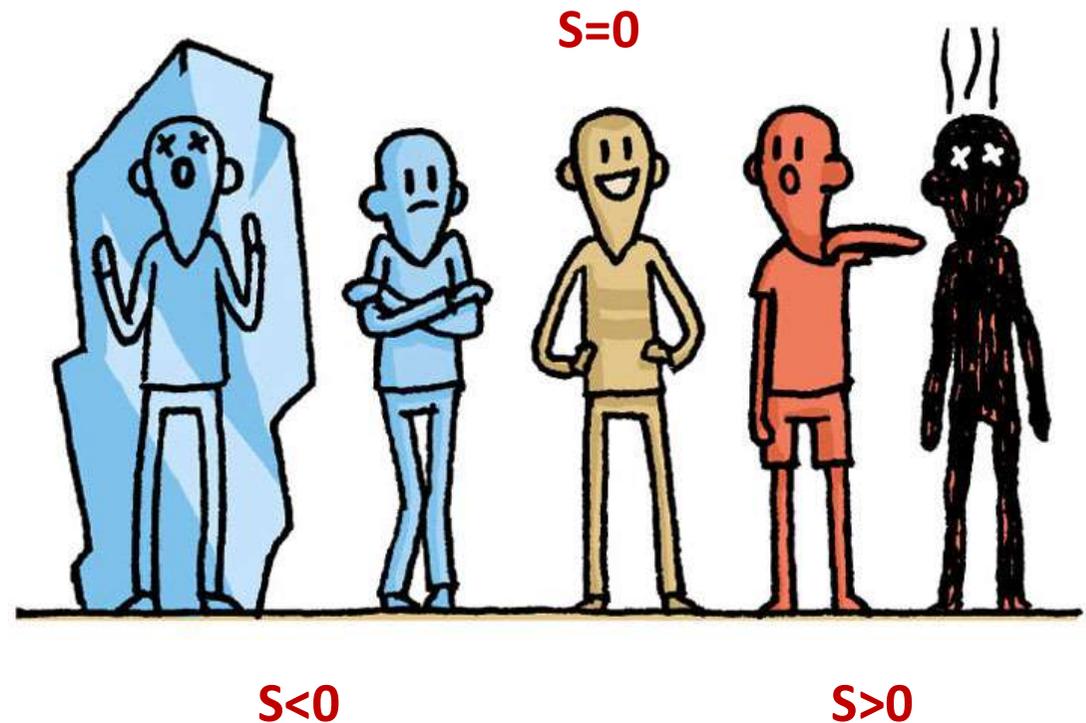
Per determinare gli indici microclimatici e avere informazioni sul rischio da **Microclima** ci si riferisce **all'equazione di bilancio energetico** applicata al corpo umano:

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

S=0 non c'è variazione di energia all'interno del corpo, la sensazione è di **neutralità termica**

S<0 decremento della temperatura centrale con conseguente **sensazione di freddo**

S>0 aumento della temperatura centrale con conseguente **sensazione di caldo**



Il modello di comfort termico

Il Benessere/Comfort termico viene definito come
“la condizione mentale di soddisfazione nei confronti dell'ambiente termico”

ANSI/ASHRAE Standard 55

Nel 1960 **Ole Fanger** propose la metodologia del **Voto Medio Previsto (PMV)** per prevedere la sensazione termica media di grandi popolazioni su una scala di sensazione termica a sette punti.

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

Thermal state of the body as a whole		
Category	Predicted percentage of dissatisfied PPD [%]	Predicted mean vote PMV
I	<6	- 0.2 < PMV < + 0.2
II	<10	- 0.5 < PMV < + 0.5
III	<15	- 0.7 < PMV < + 0.7
IV	<25	- 1.0 < PMV < + 1.0

Tabella 1 (a sinistra): Scala della sensazione termica a sette punti

Tabella 2 (a destra): Categorie predefinite per la progettazione di un edificio riscaldato e raffrescato meccanicamente
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

Il modello di comfort termico

Studi di letteratura hanno riportato la presenza di **sostanziali disparità nel confronto tra i valori del PMV e la reale sensazione termica** riferita dagli occupanti.

Il **modello PMV non** è attualmente in grado di **incorporare** alcune **caratteristiche individuali**, tra cui la **diversa risposta termoregolatoria**.

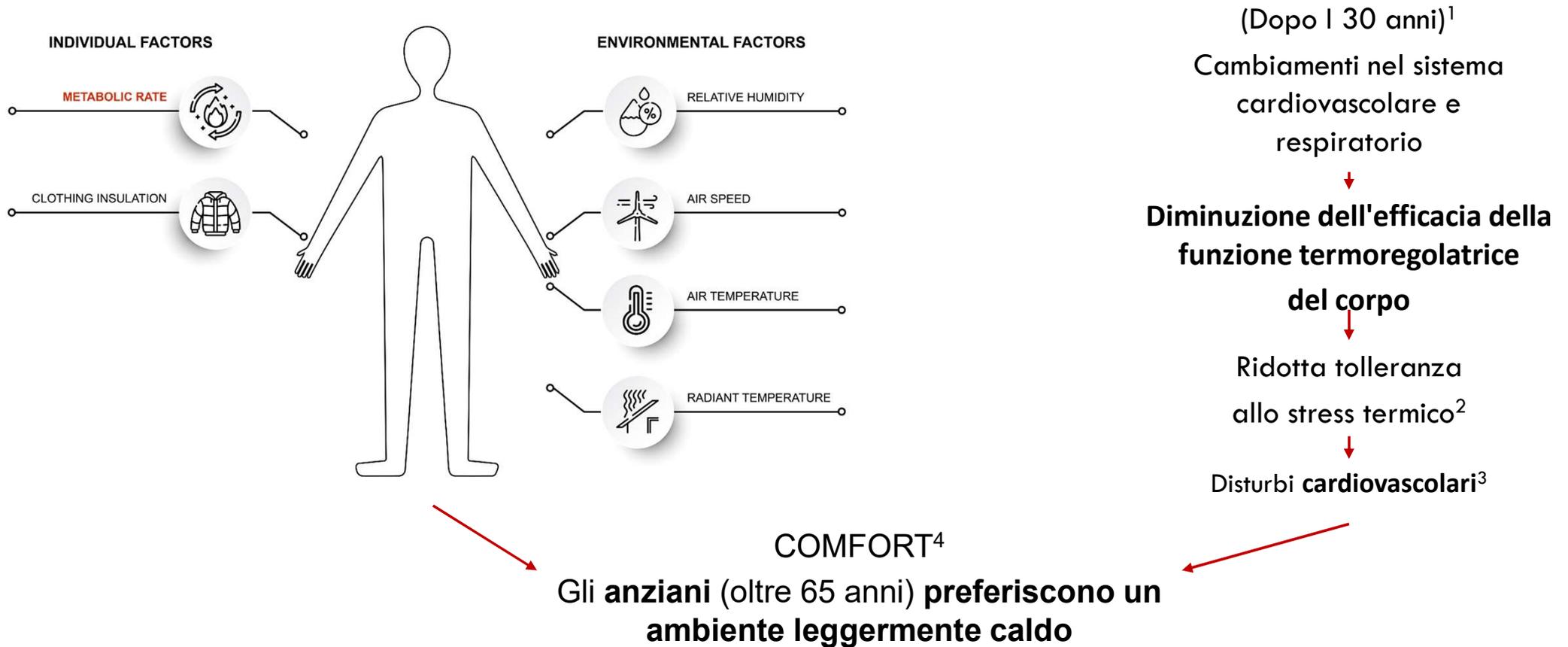
Fattori che **influenzano la risposta termoregolatoria**:

- **Età**
- **Genere**
- **Stato di salute**
- **Provenienza geografica**

Autori	anno	Limitazione del PMV in scenari reali
Arakawa Martins et al.	2022	Incapacità di incorporare nuove variabili di input rilevanti (ad es. età , stato di salute, indice di massa corporea e caratteristiche contestuali)
Broday et al.	2019	Incorrect determination of the users' metabolic value
Gilani et al.	2016	Difficile stimare il valore preciso dei parametri personali
Broday et al.	2014	Il modello PMV può sottostimare o sovrastimare la risposta delle persone.
Van Hoof	2008	Le critiche riguardano vari aspetti, ad esempio il modello nel suo complesso, il suo campo di applicazione geografico, l'applicazione a vari tipi di edifici e i parametri di input del modello .

Tabella 3: Studi di letteratura sulle **disparità tra PMV e sensazione termica riportata**.

Età e comfort termico



¹ Digital Human Modelling and the Ageing Workforce. Case et al., 2015.

² A longitudinal investigation of work environment stressors on the performance and well-being of office workers. Lamb and Kwok, 2016.

³ Working environment: How important is it to make your employees happy. Isa and Atim, 2019.

⁴ Differences between young adults and elderly in thermal comfort, productivity, and thermal physiology in response to a moderate temperature drift and a steady-state condition. Schellen et al., 2010.

Ricerca in Danimarca

Obiettivo:

Valutare il comfort termico dei lavoratori anziani (45-65 anni) e quantificarne il calo delle performance in condizioni di discomfort termico.

Perché in Danimarca?

ICIEE è il centro di ricerca in cui è nato il modello di comfort termico (PMV) di Fanger.



Ricerca in Danimarca: gruppo di ricerca



Pawel Wargocki

Professore Associato del Dipartimento di Ingegneria dell'Ambiente e delle Risorse



Luca Zaniboni

Postdoc dell'Università di Bolzano, attualmente all'ICIEE con la borsa di ricerca Marie Skłodowska-Curie



ALMA MATER STUDIORUM
UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

Progetto AGETHERM

Studio preliminare per indagare se l'età influisce sulla risposta fisiologica e psicologica in condizioni ambientali di discomfort termico (freddo/caldo).

- **Studio in camera climatica con parametri ambientali controllati**
- **2 fasce d'età a confronto**
 - **7 studenti universitari** dai 20 ai 27 anni
 - **6 lavoratori anziani** over 45
- **2 condizioni di discomfort**
 - **Rampa fredda 22-16°C** ad una velocità di 3.5K/h
 - **Rampa calda 22-28°C** ad una velocità di 3.5K/h
- **Valutazione combinata del discomfort**
 - Risposta **fisiologica (vasocostrizione)**
 - Risposta **psicologica (questionari sul comfort termico)**



AGETHERM: camera termica

Caratteristiche:

- **Sviluppata per controllare accuratamente l'ambiente termico**
- Dimensioni: larga 5m, lunga 6m e alta 2,5m
- **Lo spazio tra le pareti interne ed esterne (1,6cm) permette alla temperatura dell'aria e alla temperatura media radiante di essere identiche**, anche durante le transizioni termiche.



AGETHERM: controllo parametri ambientali

Globotermometri e datalogger montati su uno stand a 3 altezze:

0.1m

0.6m

1.1m

**Per monitorare:
temperatura operativa
Umidità dell'aria**

Secondo le indicazioni della norma **UNI EN ISO 7726:2002** Ergonomia dell'ambiente termico -
Strumenti per la misurazione di grandezze fisiche



AGETHERM: partecipanti

Caratteristiche:

- Studenti (20-27 anni) o lavoratori (over 45)
- **Sesso maschile**
- **In buona salute**
- Che vivono in **Danimarca da almeno 6 mesi**
- Disponibili a **partecipare a tutte e 4 le sessioni**

Job available

We are looking for **male** participants to our upcoming chamber experiment.

Criteria for participating

- You are overall healthy
- You are a **student** (20-27 years old) or a **worker** (45-65) years old
- You have lived in Denmark for the past 6 months or more

Date and time

- 26 September - 7 October
- 8.45 hours in total, four sessions in two weeks
- Only morning sessions (8.30-12.00)

Salary

- 1277,85 DKK (146,04 DKK/h, **before tax**)
- You must participate in all four sessions

Find more information and sign up at:
<https://ie.byg.dtu.dk/alicererecruit/?t=s>

For any information, contact us at:
chamberexperiment.DTU22@gmail.com
Location: **Building 412, DTU Lyngby Campus**



AGETHERM: condizioni analizzate

Condizioni iniziali per essere neutrali a 22°C.

Parametri ambientali

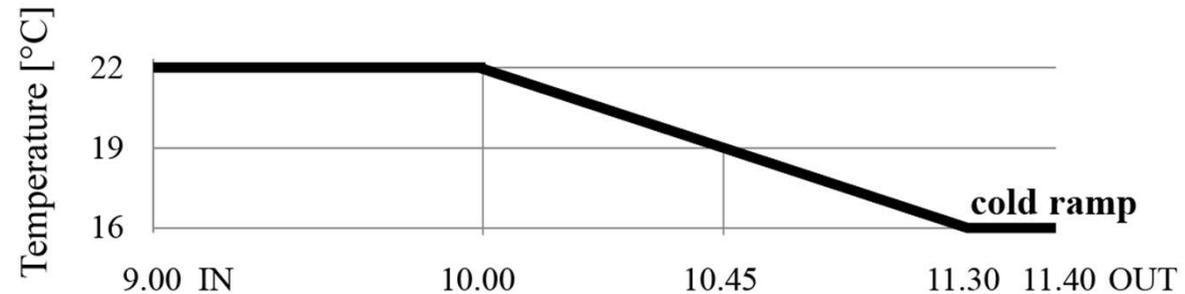
- Temperatura operativa: **22°C**
- Umidità relativa: **40%**
- Velocità dell'aria: **<0.1 m/s**

Parametri individuali

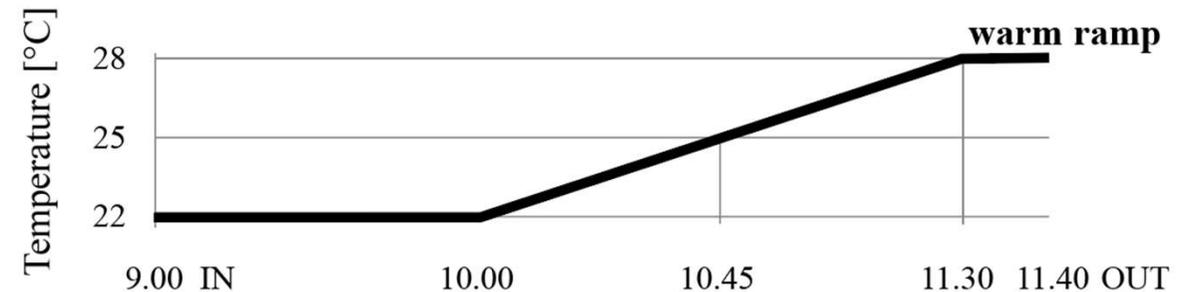
- Isolamento vestiario: **0.9clo**
(pantaloni tuta, maglietta a maniche lunghe)
- Attività metabolica: **1.2met**
(attività lavorativa al computer)

In sessione 1, dopo 1 ora a 22°C, possibilità di aggiustare vestiario per neutralità termica.

Sessione 1: Rampa fredda 22-16°C



Sessione 2: Rampa calda 22-28°C



AGETHERM: analisi discomfort

Risposta psicologica attraverso un questionario:

- **Comfort termico**

Come percepisci l'ambiente termico in questo momento?

- **Preferenza termica**

Come vorresti che fosse l'ambiente termico in questo momento?

- **Sensazione termica**

Come trovi l'ambiente termico in questo momento?

- **Accettabilità termica**

Come giudichi l'ambiente termico in questo momento sulla base di un giudizio personale?

- **Presenza di brividi o sudorazione**

Com'è la tua sensazione di brividi/sudorazione in questo momento?

- **Preferenza di vestiario**

Se potessi cambiare abbigliamento, che vestiti sceglieresti in questo momento?

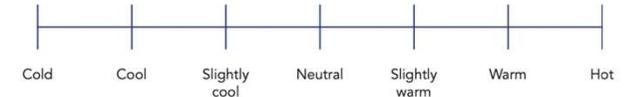
- **Produttività stimata**

Rispetto a quello che consideri essere il tuo livello di performance ottimale, stima se la tua produttività risulta aumentata o diminuita

QUESTIONNAIRE

Date (dd/mm/yyyy) : _____ Time (hh:mm) : 8:35

1. How do you feel the thermal environment **at this moment**?



2. **Right now**, you would like the thermal environment to be:



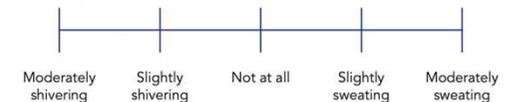
3. **Right now**, do you find the thermal environment to be:



4. **Right now**, how do you judge this thermal environment on a personal level?



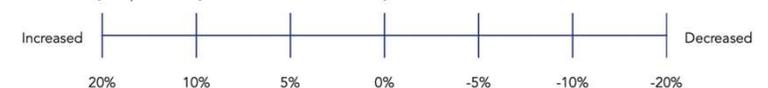
5. **Right now**, how is your shivering/sweating sensation?



6. If you could change clothes, what clothes would you choose, **right now**?

- | | | | | |
|----------------------------------|--|---|---|--|
| <input type="checkbox"/> T-shirt | <input type="checkbox"/> Long-sleeve T-shirt | <input type="checkbox"/> Sweatshirt | <input type="checkbox"/> Sweater (thin) | <input type="checkbox"/> Sweater (thick) |
| <input type="checkbox"/> Shorts | <input type="checkbox"/> Trousers (thin) | <input type="checkbox"/> Trousers (thick) | <input type="checkbox"/> Sweatpants | <input type="checkbox"/> Jacket |

7. **Compare** to what you consider **to be your optimal performance**, estimate how your productivity is increased or decreased by the thermal conditions:



AGETHERM: analisi discomfort

Correlati fisiologici
(meccanismo termoregolatorio)

Misurazione della temperatura cutanea in 2 punti:

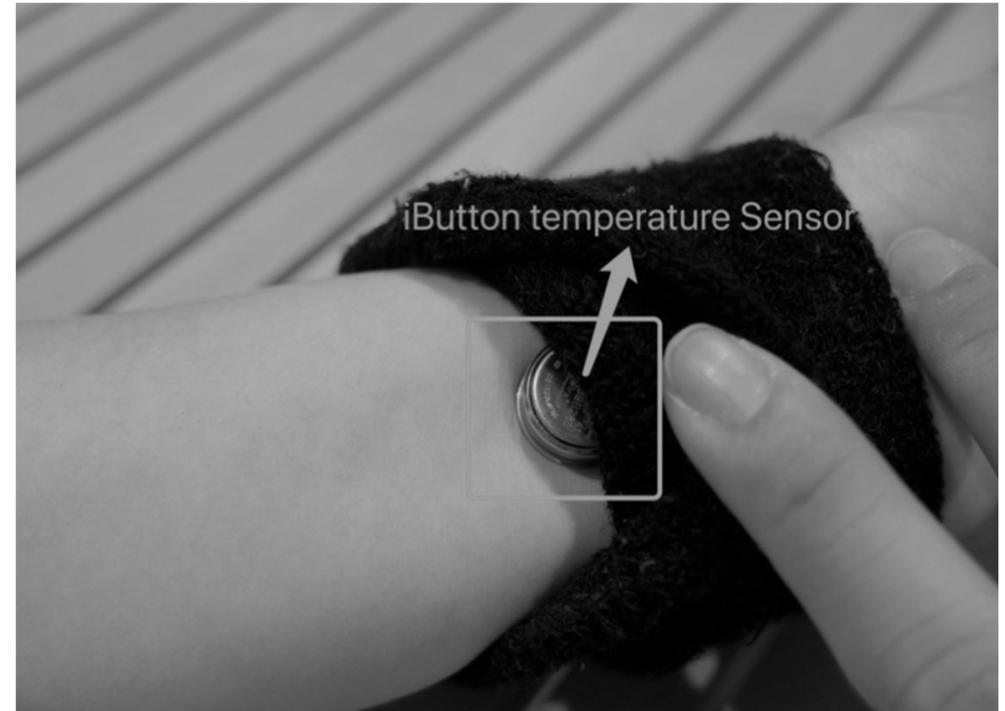
- **avambraccio** $T_{sk \text{ forearm}}$
- **dito indice** $T_{sk \text{ finger}}$

Con sensori di temperatura Ibutton

La differenza di temperature di avambraccio e dito indice:

$$T_{sk-diff} = T_{sk \text{ forearm}} - T_{sk \text{ finger}}$$

Permette di verificare l'andamento della vasocostrizione.



AGETHERM: experimental protocol

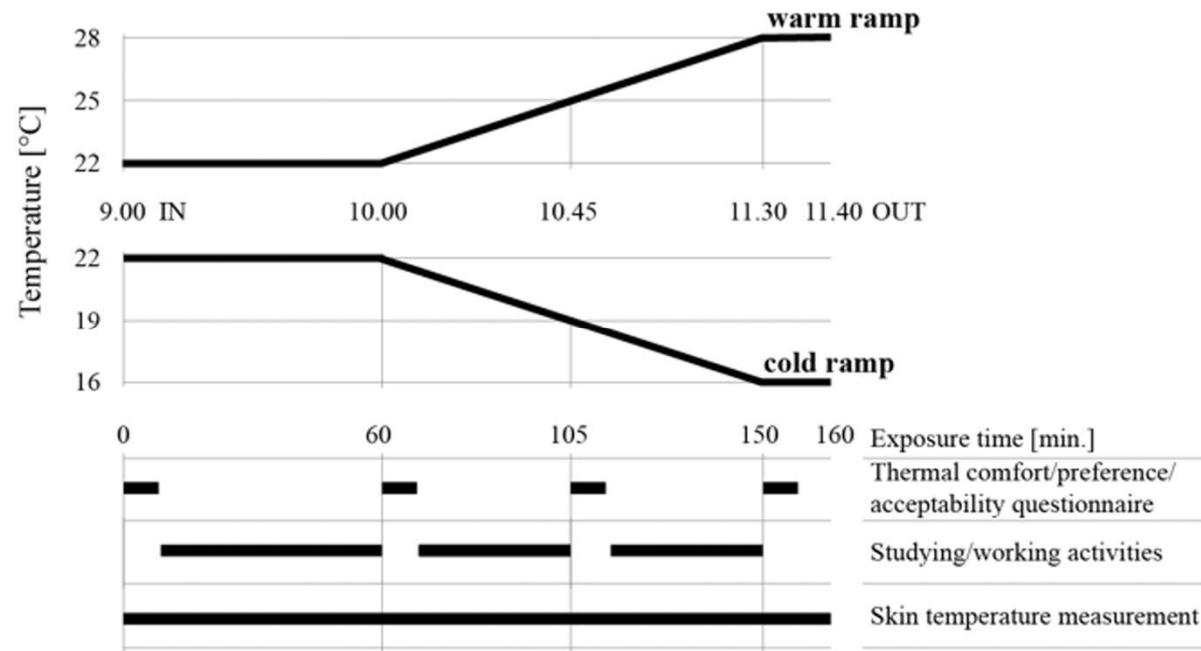
Pre esperimento:

- **Consenso al trattamento dei dati**
- **Indossano i sensori di temperatura della pelle**

Ingresso nella camera climatica a **22°C, 40% umidità relativa, <0.1m/s velocità aria**

Durante l'esperimento:

- Dopo 1 ora (solo 1^a sessione) viene data la possibilità di **aggiustare vestiario**:
 - **maglietta a maniche lunghe**
 - **Maglione leggero**
 - **maglione pesante**
- **Compilano il questionario 4 volte**
- **In tutti gli altri momenti lavoro e/o studio al computer**



AGETHERM: Aspettative

1. Risposta psicologica rispetto agli studenti:

I lavoratori più anziani preferirebbero temperature più calde, esprimendo un discomfort maggiore durante la rampa fredda e, in particolare a 19-16°C.

2. Correlati fisiologici rispetto agli studenti:

I lavoratori più anziani mostrerebbero una vasocostrizione maggiore durante la rampa fredda.

3. Valutazione delle prestazioni rispetto agli studenti:

I lavoratori più anziani dimostrerebbero prestazioni migliori durante la rampa calda e peggiori durante la rampa fredda.



Risultati rampa fredda: vasocostrizione

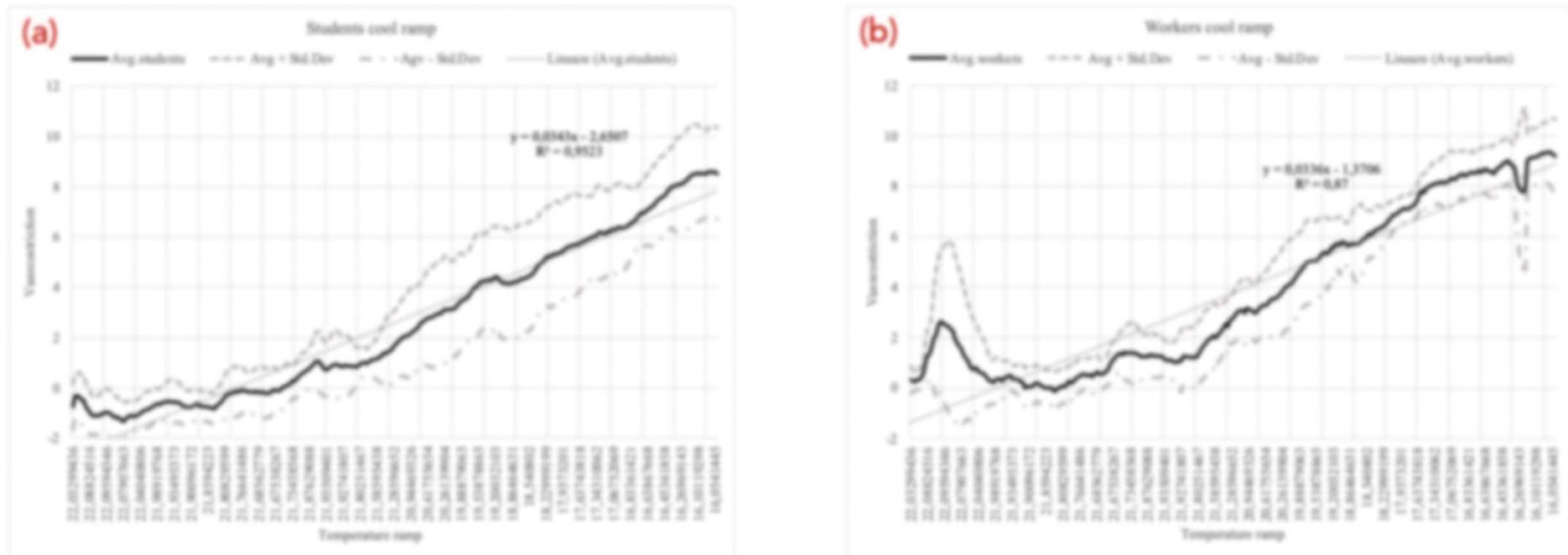


Fig. 1. Andamento della vasocostrizione per studenti (a) e lavoratori anziani (b) durante la rampa fredda

Valori **vasocostrizione più elevati** nel campione dei **lavoratori**

Picchi nei valori di vasocostrizione **appena entrati nella camera climatica**

I picchi denotano una **maggiore deviazione standard** e, di conseguenza una **maggiore soggettività**

Risultati rampa fredda: voto di comfort termico

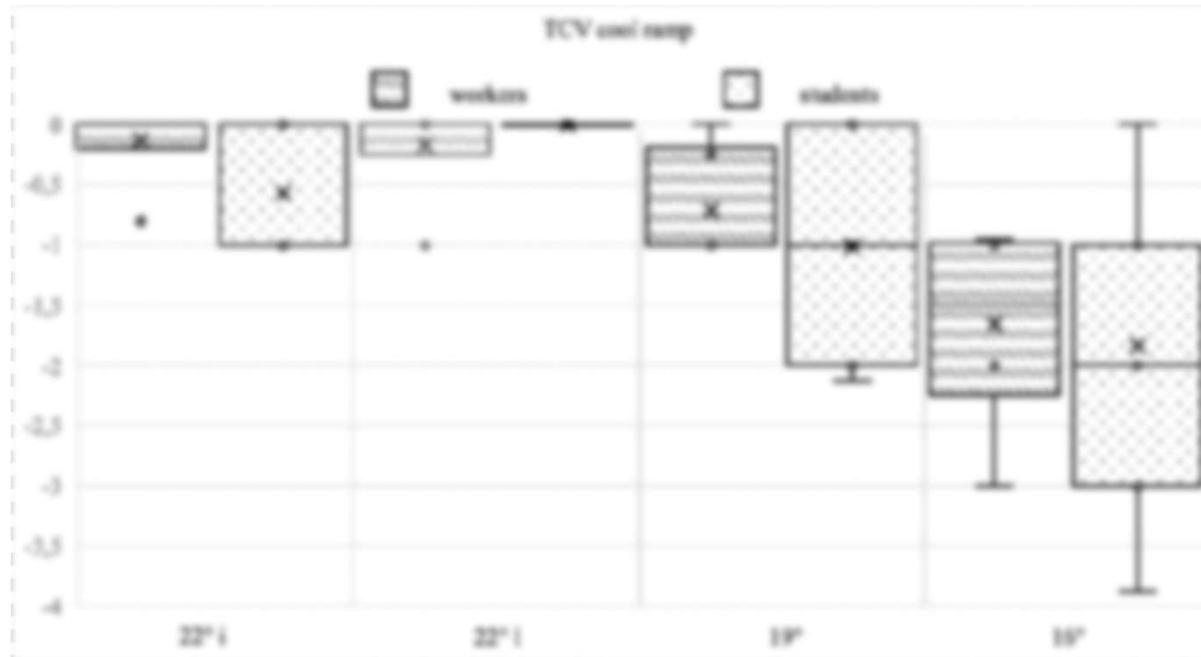


Fig. 1. Confronto tra i voti di comfort termico (TCV) di studenti e lavoratori durante la rampa fredda

Risultati contrastanti rispetto alla risposta fisiologica osservata analizzando la vasocostrizione:
I lavoratori esprimono voti di **comfort leggermente maggiori** degli studenti a 19°C e a 16°C
Minore consapevolezza delle condizioni di discomfort termico in ambiente freddo

Risultati rampa fredda: preferenza e accettabilità termica

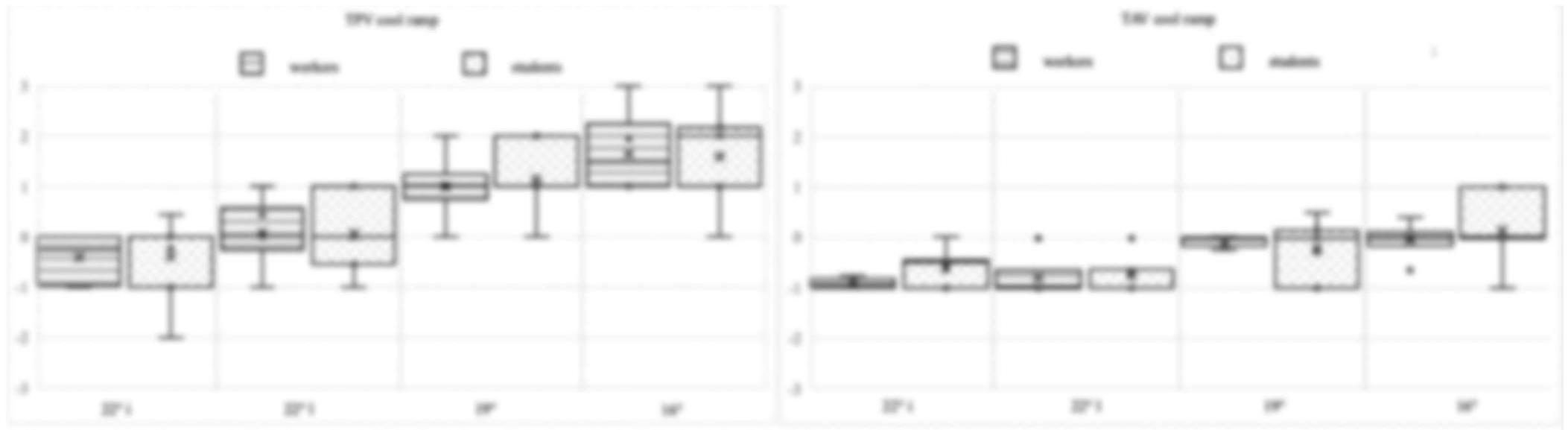


Fig. 1. Confronto tra i voti di preferenza termica (TPV) di studenti e lavoratori durante la rampa fredda

Fig. 1. Confronto tra i voti di accettabilità termica (TAV) di studenti e lavoratori durante la rampa fredda

Risultati contrastanti rispetto alla risposta fisiologica ma **in linea con i voti di comfort termico.**

Media dei voti simile sia nella preferenza che nell'accettabilità

I lavoratori minore variabilità nell'accettabilità alle basse temperature

Risultati rampa calda: vasocostrizione

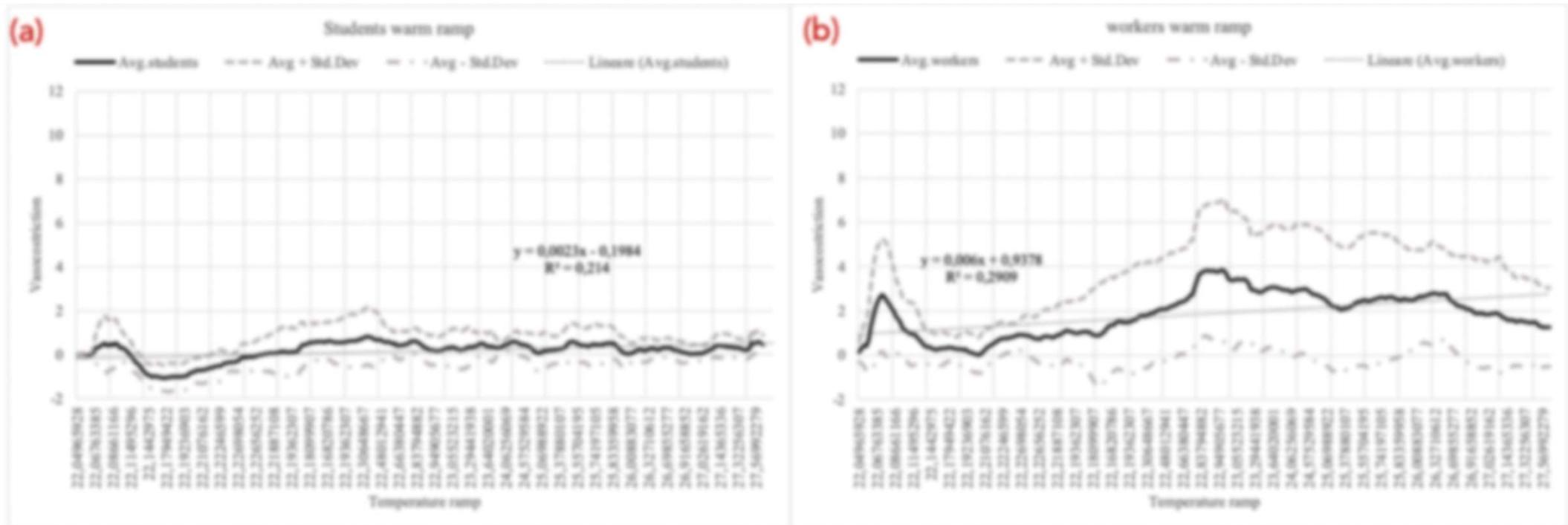


Fig. 2. Andamento della vasocostrizione per studenti (a) e lavoratori anziani (b) durante la rampa calda

Il campione dei **lavoratori** presenta valori di **vasocostrizione** mentre il campione di **studenti no Picchi** nei valori di vasocostrizione **appena entrati nella camera climatica** Maggiore **deviazione standard** e, di conseguenza una **maggiore soggettività nel campione dei lavoratori**

Risultati rampa calda: voto di comfort termico

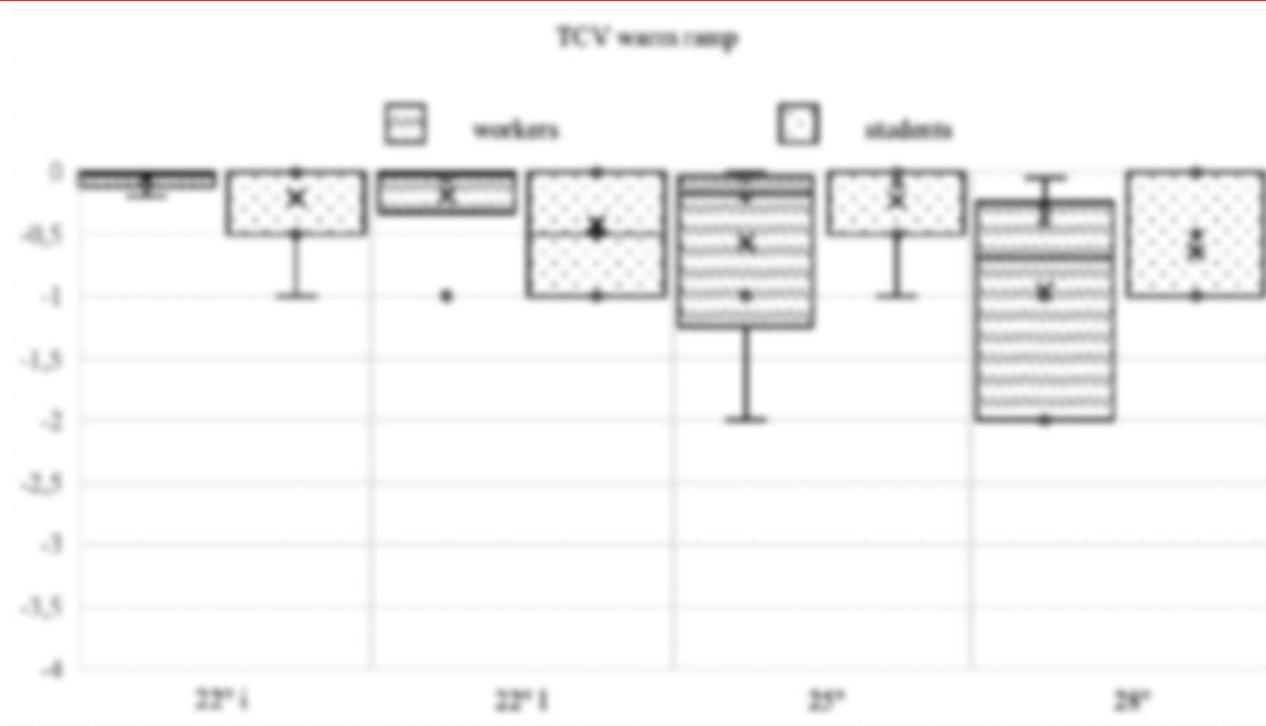


Fig. 1. Confronto tra i voti di comfort termico (TCV) di studenti e lavoratori durante la rampa calda

I lavoratori esprimono **maggiore discomfort** degli studenti **ad alte temperature pur presentando valori di vasocostrizione** anche durante la rampa calda.

La **maggiore variabilità** nella risposta in termini di comfort a **25°C e a 28°C conferma la deviazione standard** elevata nel grafico dei lavoratori.

Risultati rampa calda: preferenza e accettabilità termica

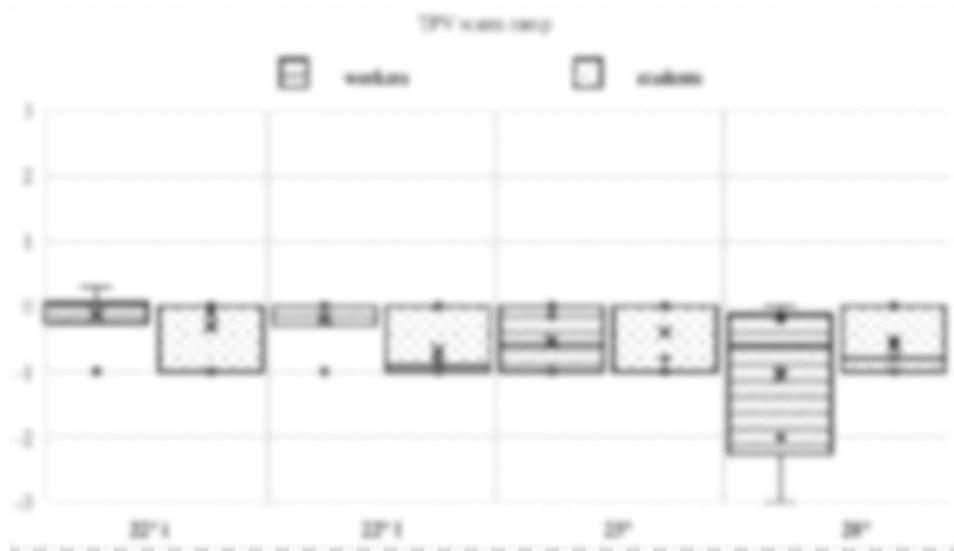


Fig. 1. Confronto tra i voti di preferenza termica (TPV) di studenti e lavoratori durante la rampa calda

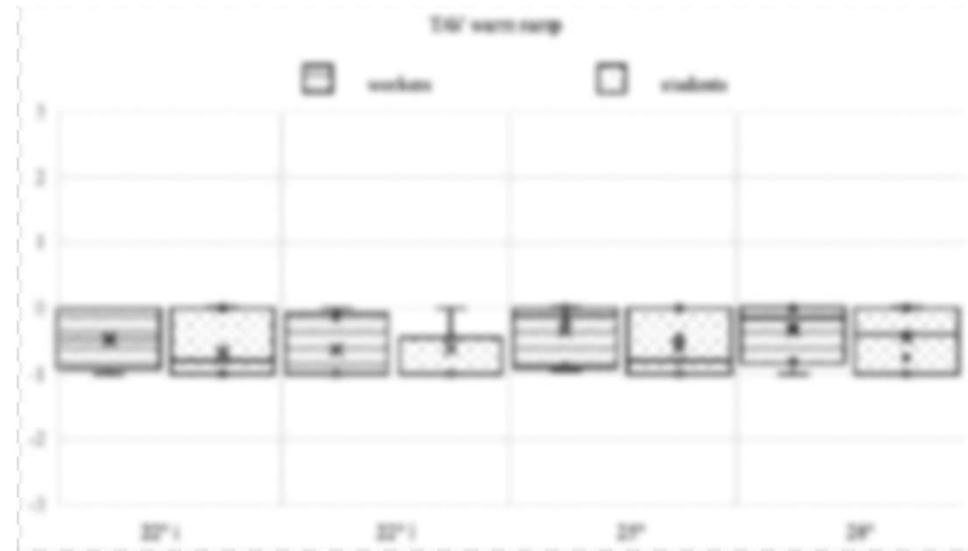


Fig. 1. Confronto tra i voti di accettabilità termica (TAV) di studenti e lavoratori durante la rampa calda

A 25°C e 28°C, la preferenza dei lavoratori evidenzia un punteggio inferiore in contrasto con le aspettative. L'accettabilità termica è paragonabile nei due campioni in esame sottolineando la minore consapevolezza dei lavoratori in condizioni di discomfort

AGETHERM: conclusioni

1. Correlati fisiologici rispetto agli studenti:

I lavoratori mostrano valori di vasocostrizione più elevati sia nella rampa fredda che in quella calda, a causa di un raffreddamento più rapido e significativo delle estremità.

2. Risposta psicologica rispetto agli studenti:

I grafici del comfort, della preferenza e dell'accettabilità termica, mostrano una maggiore tolleranza delle condizioni di disagio termico (cioè gli estremi delle due rampe) da parte dei lavoratori più anziani

Le condizioni di disagio provocano una **risposta fisiologica più puntuale (i lavoratori soffrono maggiormente dal punto di vista fisiologico) **ma una minore consapevolezza** in termini di comfort, accettabilità e preferenza termica.**



AGETHERM: sviluppi futuri

1. Analizzare i dati della produttività percepita e dei test cognitivi:

I dati ad oggi analizzati e presentati rappresentano solo una parte dei dati ottenuti durante l'esperimento. I risultati dei test cognitivi per l'analisi della produttività in condizioni di discomfort verranno presentati nei prossimi mesi.

2. Estendere il campione di studio (lavoratori)

I risultati ottenuti evidenziano l'importanza di estendere il campione in esame con esperimenti comparabili per definire un modello di comfort termico che tenga in considerazione il calo della risposta termoregolatoria dovuto all'invecchiamento

3. Estendere il campione di studio coinvolgendo altre fasce d'età

La crisi energetica comporta la necessità di ridurre il dispendio energetico degli edifici ma è fondamentale tutelare la salute e le performance degli occupanti.



Esperimento con nuove fasce d'età

Il ministro del Clima e dell'Energia danese ha dichiarato l'**abbassamento delle temperature negli edifici pubblici a 19°C.**

Richiesta di fondi per:

Valutare il benessere a diverse temperature dei bambini in età scolare, attraverso studi in camera climatica e misurazioni nelle classi

Benefici:

- **Determinare le condizioni ottimali nelle scuole per il benessere e le performance cognitive** (informazione assente in letteratura)
- **Garantire un basso consumo energetico**





ALMA MATER STUDIORUM
UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

GRAZIE PER L'ATTENZIONE!

Alice Caporale

Alice.caporale2@unibo.it

Dipartimento di Ingegneria Industriale (DIN)
Viale del Risorgimento 2, Bologna