

POLITECNICO DI TORINO

Collegio di Ingegneria Chimica e dei Materiali

**Corso di Laurea Magistrale
in Ingegneria dei Materiali**

Tesi di Laurea Magistrale

**Valutazione del comfort termico
dell'abbigliamento sportivo: confronto di
sensori di temperatura e umidità commerciali e
sistemi prototipali**



Relatori

Prof. Ada Ferri

Ing. Francesca Dotti

Candidato

Davide Prina

Luglio 2019

Sommario

1. Introduzione	4
2. Bilancio termico nel corpo umano	5
2.1 Area superficiale del corpo	5
2.2 Equazione pratica di bilancio di calore	6
2.3 Produzione di calore all'interno del corpo ($M - W$).....	7
2.3.1 Calorimetria	7
2.3.2 Calorimetria indiretta	8
2.3.3 Lavoro esterno (W)	9
2.3.4 Uso di tabelle e banche dati	10
2.3.5 Modelli empirici per la stima di M	11
2.4 Scambio di calore sensibile ($R + C$).....	12
2.5 Scambio di calore per evaporazione (E_{sk}).....	13
2.6 Perdita di calore dalla respirazione ($C_{res} + E_{res}$).....	14
2.7 La ventilazione attraverso l'abbigliamento	14
2.8 Bilancio termico e radiazione solare.....	14
3. Parametri per valutare le proprietà termiche di un capo di abbigliamento	16
3.1 Clo e Tog	17
3.2 Indice di permeabilità.....	17
3.3 Trasmissibilità evaporativa	18
3.4 Fattore di efficienza della permeazione (f_{pcl})	18
4. Determinazione delle proprietà termiche di un capo di abbigliamento	20
4.1 Analisi biofisiche dei tessuti	21
4.1.1 Togmetro.....	21
4.1.2 Guarded hot plate	22
4.1.3 Skin model (sweating guarded hot plate).....	24
4.1.4 Alambeta	25
4.1.5 Moisture management tester	27
4.2 Manichini termici	32
4.2.1 Perché utilizzare i manichini.....	34
4.2.2 Calcolo di isolamento di un capo d'abbigliamento con manichini	35
4.2.3 Metodi di calcolo	36
4.2.4 Isolamento omogeneo	38
4.2.5 Esempio di test: manichino con sudorazione.....	39

4.3 Resistenza termica dei tessuti e isolamento termico dei capi di abbigliamento	41
5. Test in camera climatica	46
5.1 Apparecchiature utilizzate	46
5.1.1 Descrizione dei sensori	47
5.2 Risultati delle prove in camera climatica	56
5.2.1 Prove a 25 gradi	56
5.2.2 Prove a 35 gradi	60
5.2.3 Prove a 25 gradi con t-shirt	64
5.2.4 Prove a 35 gradi con t-shirt	67
5.2.5 Prove a 15 gradi con t-shirt	71
5.3 Prova contenitori con acqua	75
5.4 Termografie	78
5.5 Frequenza cardiaca a diverse temperature	80
5.6 Questionari per la valutazione del comfort termico	81
5.7 Taratura	84
5.8 Confronto Ibutton - MSR147WD - prototipo	86
6. Conclusioni	91
Bibliografia e riferimenti	93

1. Introduzione

Il seguente lavoro di tesi è stato svolto con l'obiettivo principale di confrontare due diversi sistemi commerciali per la misura e la memorizzazione dei parametri fisiologici di temperatura e umidità relativa della pelle. La conoscenza di questi parametri, oltre a quelli che caratterizzano l'ambiente in cui avvengono i test, è fondamentale per gli studi sul comfort termico dell'abbigliamento sportivo che si possono svolgere a diverse condizioni ambientali. L'analisi di questi dati viene svolta sia per conoscere le risposte del corpo alle diverse condizioni climatiche, sia per poter confrontare le caratteristiche di diversi capi di abbigliamento.

I data loggers utilizzati sono l'Ibutton DS1923, sviluppato dalla Maxim Integrated Products, e il MSR147WD, sviluppato dalla MSR Electronics GmbH.

Nel primo caso il sistema è costituito da un singolo disco di acciaio con un foro per il vapore d'acqua e permetterà la misura della temperatura e dell'umidità relativa al variare del tempo. Il secondo invece è costituito da un data logger miniaturizzato dal quale partono cinque fili con alle estremità i sensori. È stato effettuato inoltre un confronto tra questi sistemi commerciali e un sistema prototipale sviluppato presso il Dipartimento di Elettronica e Telecomunicazioni del Politecnico di Torino.

La maggior parte del lavoro di tesi è stato svolto presso Città Studi a Biella. Sono stati eseguiti una serie di test in una camera climatica, all'interno della quale è stato possibile variare le condizioni ambientali e ottenere un clima controllato. All'interno della camera è stato utilizzato un tapis roulant per lo svolgimento delle prove e per la modulazione delle varie fasi di sforzo. Inoltre, è stata impiegata una ventola per simulare delle condizioni di ventilazione e infine una termocamera per avere un ulteriore confronto rispetto ai dati ottenuti.

Il contenuto della tesi è organizzato in questo modo:

- Nella prima parte vengono presentate le principali variabili che vanno a definire il bilancio termico per il corpo umano.
- Nel secondo capitolo vengono mostrati alcuni dei parametri fondamentali per la valutazione delle proprietà termiche di un capo d'abbigliamento
- Viene descritto il processo di valutazione delle proprietà termiche di un capo, che dipendono sia dalle caratteristiche del tessuto in sé, che dalla struttura e realizzazione del capo d'abbigliamento finale. Si ha dunque uno studio piramidale che parte dalle proprietà termiche della fibra, passa per l'utilizzo di manichini termici e finisce con i test con soggetti sul campo.
- Nell'ultima parte sperimentale vengono presentati i risultati ottenuti durante le prove svolte con l'utilizzo dei sensori.

2. Bilancio termico nel corpo umano

La temperatura interna del corpo umano deve essere mantenuta intorno ai 37 °C, per questo è necessario che si verifichi un equilibrio di flussi di calore tra il corpo e l'ambiente esterno. Dunque, il calore prodotto all'interno del corpo e quello proveniente da sorgenti esterne devono essere bilanciati da un output verso l'ambiente. Quello che si presenta non è però una condizione stazionaria, che implicherebbe temperature costanti, ma in questo caso le temperature all'interno del corpo e quelle dell'ambiente variano nel tempo, così come i meccanismi di scambio con l'ambiente. Per mantenere una temperatura interna del corpo costante si deve creare quindi uno stato di equilibrio dinamico.

Se la generazione e gli inputs di calore sono più grandi degli outputs, la temperatura del corpo salirà, e se gli outputs sono maggiori, scenderà. Gli inputs e outputs di calore possono essere calcolati attraverso le equazioni per i trasferimenti di calore, e inserendoli in una singola equazione, nella quale non si prevede né un accumulo né una perdita netta finale dal corpo, si ottiene quella che viene definita l'equazione di bilancio termico per il corpo umano [1].

L'equazione di bilancio termico per il corpo umano può essere rappresentata in varie forme. Tuttavia, ogni possibile equazione deve presentare le stesse tre categorie di termini: quelli per la generazione di calore nel corpo, quelli per il trasferimento di calore e quelli per l'accumulo di calore. Il metabolismo (M) fornisce energia che permette al corpo di svolgere lavoro meccanico (W), e l'eccesso di energia viene rilasciato sotto forma di calore (M-W).

Il trasferimento di calore può avvenire per conduzione (K), convezione (C), radiazione (R) e evaporazione (E). Infine, nell'equazione inseriamo il termine per l'immagazzinamento di calore (S), che deve essere uguale a zero nel caso di equilibrio termico.

$$M - W = E + R + C + K + S \quad (2.1)$$

Nel caso di equilibrio ($S = 0$):

$$M - W - E - R - C - K = 0 \quad (2.2)$$

Tutti questi termini possono essere espressi come velocità di produzione o dissipazione di calore, con unità di misura di Joule per secondo, o Watt.

2.1 Area superficiale del corpo

Per standardizzare gli scambi energetici tra corpo ed ambiente per persone di diversa stazza, le quantità di cui alle 2.1 e 2.2 vengono divise per l'area superficiale totale del corpo ($W m^{-2}$). Quest' area viene generalmente stimata attraverso l'equazione semplificata di Du Bois (1916):

$$A_D = 0,202 \times W^{0,425} \times H^{0,725} \quad (2.3)$$

dove:

A_D = area superficiale di Du bois (m^2);

W = peso del corpo (kg);

H = altezza del corpo (m).

Viene utilizzato spesso un valore standard di $1,8 m^2$ per un uomo di 70 kg, alto 1,73 metri.

2.2 Equazione pratica di bilancio di calore

Per poter condurre un'analisi sullo scambio di calore tra corpo e ambiente, e quindi per poter quantificare i vari termini delle equazioni 2.1 e 2.2, rendendo le equazioni utili nella pratica, bisogna soddisfare due requisiti:

1. I meccanismi specifici di produzione e scambio di calore devono essere identificati.
2. Devono essere definite le equazioni per il calcolo o la stima dei termini del bilancio.

In condizioni "normali", lo scambio di calore per conduzione viene spesso considerato trascurabile. ASHRAE (1989) fornisce la seguente equazione di bilancio:

$$\dot{M} - \dot{W} = \dot{Q}_{sk} + \dot{Q}_{res} = (\dot{C} + \dot{R} + \dot{E}_{sk}) + (\dot{C}_{res} + \dot{E}_{res}) \quad (2.4)$$

dove tutti i termini hanno Watts su metro quadro come unità di misura e:

\dot{M} = produzione di energia metabolica per unità di tempo;

\dot{Q}_{sk} = scambio di calore attraverso la pelle;

\dot{Q}_{res} = scambio di calore attraverso la respirazione;

\dot{C} = scambio di calore per convezione dalla pelle;

\dot{R} = scambio di calore per radiazione dalla pelle;

\dot{E}_{sk} = scambio di calore per evaporazione dalla pelle;

\dot{C}_{res} = scambio di calore per convezione attraverso la respirazione;

\dot{E}_{res} = scambio di calore per evaporazione attraverso la respirazione.

Inoltre:

$$\dot{E}_{sk} = \dot{E}_{rsw} + \dot{E}_{dif} \quad (2.5)$$

dove:

\dot{E}_{rsw} = scambio di calore per evaporazione dalla pelle attraverso il sudore;

\dot{E}_{dif} = scambio di calore per evaporazione dalla pelle attraverso la diffusione dell'umidità attraverso la pelle.

Un approccio pratico è quello di considerare separatamente la produzione di calore nel corpo ($M - W$), la perdita di calore alla pelle ($C + R + E_{sk}$) e la perdita di calore dovuta alla respirazione ($C_{res} + E_{res}$). L'obiettivo successivo è quello di quantificare i componenti dell'equazione di bilancio termico in termini di parametri che possono essere misurati o stimati.

2.3 Produzione di calore all'interno del corpo ($M - W$)

La produzione di calore nel corpo è correlata all'attività della persona. Semplificando il processo, l'ossigeno che respiriamo viene trasportato dal sangue alle cellule del corpo dove viene usato per le reazioni chimiche che bruciano il cibo e producono energia metabolica. La maggior parte dell'energia viene rilasciata sotto forma di calore. La quantità di energia spesa invece per svolgere lavoro meccanico varia da 0 a non oltre il 25% di quella prodotta.

Metodi di stima del calore prodotto con il metabolismo

2.3.1 Calorimetria

Un metodo per determinare il calore prodotto da una persona è quello di misurarlo direttamente con un calorimetro a corpo intero. Esistono per questo un grande numero di strumenti che vanno dalle camere controllate a tute controllate ad acqua. A causa delle variazioni nella temperatura del corpo, i tempi di osservazione devono essere lunghi, ma se si riescono a svolgere attente misure, considerando tutte le forme di scambio di calore, la produzione media di calore dal corpo può essere determinata. Se il potere calorifico del cibo consumato viene infine comparato con il calore prodotto, si potrà constatare che i valori in media risultano equivalenti.

Murgatroyd et al. (1993) stabiliscono che la calorimetria diretta misura la spesa energetica attraverso la portata di calore dissipata dal corpo verso l'ambiente. La tecnica più utilizzata per la calorimetria diretta consiste nel porre l'individuo all'interno di una camera isolata (fig.

2.1), e andare a misurare direttamente l'aumento di temperatura di una quantità nota di fluido refrigerante (normalmente acqua) necessario per mantenere la camera a temperatura costante.

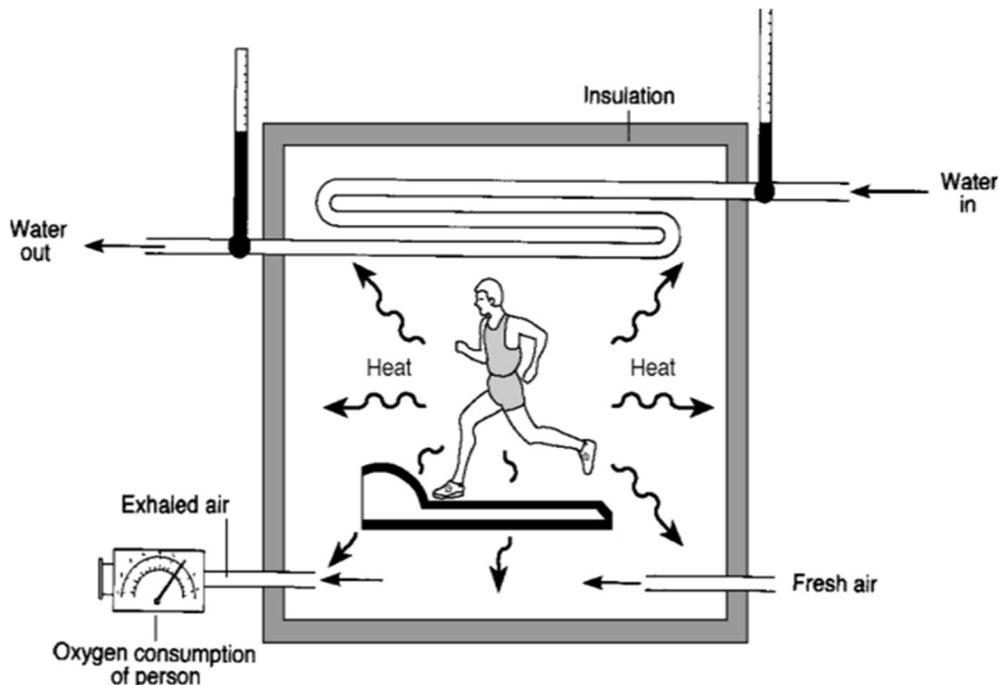


Fig. 2.1: camera per calorimetria diretta

Anche se i moderni calorimetri possono fornire stime precise per la determinazione del calore prodotto, rimangono comunque inutili al di fuori del laboratorio. Per questo sono necessari metodi più pratici.

2.3.2 Calorimetria indiretta

Si può fare una stima del tasso metabolico, M , misurando la quantità di ossigeno che viene utilizzata per “bruciare” il cibo. Per fare questo si può misurare la portata di aria espirata dal soggetto e la sua concentrazione di ossigeno. Il potere calorifico del cibo (e dell'ossigeno utilizzato) fornirà quindi una stima della quantità di energia prodotta. Questo potere dipende dalla proporzione tra carboidrati, grassi e proteine che vengono bruciati dal corpo, e un'indicazione viene fornita dal rapporto tra i volumi di anidride carbonica prodotta e di ossigeno consumato, rappresentato dal quoziente respiratorio (RQ), dove:

$$RQ = \frac{\text{volume di CO}_2 \text{ espulso}}{\text{volume di O}_2 \text{ consumato}} \quad (2.6)$$

RQ varia da circa 1.0 per puri carboidrati a 0,71 per i grassi. Per una normale dieta varia, un tipico valore di RQ è intorno a 0,85, il quale restituisce un valore di energia equivalente, EE, in W h per litro di O₂, pari a 5,68. Se RQ è noto, si può calcolare EE dalla ISO 8996 (2004) [17]:

$$EE = (0,23RQ + 0,77) \times 5,88 \quad (2.7)$$

Il tasso metabolico M , in Watts per metro quadro, è quindi:

$$M = EE \times V_{O_2} \times \frac{1}{A_D} \quad (2.8)$$

dove V_{O_2} è l'ossigeno consumato in litri per ora a temperatura e pressione standard, a secco (STPD). Queste equazioni sono relativamente semplici, ma i calcoli in condizioni pratiche non lo sono altrettanto poiché i valori si riferiscono a quelli del STPD, mentre le prove si svolgono in condizioni differenti. McIntyre (1980) presenta una semplice equazione per il calcolo di M ($W m^{-2}$), basata sulla quantità di ossigeno consumato (frazione di ossigeno nell'aria inspirata [0,2093] meno la frazione di ossigeno nell'aria espirata, O_e) e il grado di ventilazione (V in litri al secondo):

$$M = \frac{20600 V (0,2093 - O_e)}{A_D} \quad (2.9)$$

Esistono molti metodi per misurare la portata di aria espirata: di solito viene utilizzato uno spirometro, ma anche altri dispositivi portatili come il respirometro portatile di Kofranyi-Michaelis o sistemi di registrazione Oxylog. Questi strumenti possono includere boccagli, valvole, tubi corrugati, clips per il naso oppure si utilizzano maschere a viso intero. Lo scopo principale è quello di non interferire con il dato che deve essere misurato e evitare problemi con fuoriuscite, variabilità e calibrazione dello strumento.

2.3.3 Lavoro esterno (W)

Quando una persona svolge un'attività, una certa quantità di energia verrà utilizzata per compiere del lavoro esterno. Per attività ben definite, come camminata o ciclismo, W può essere stimato attraverso equazioni proposte in letteratura. Il lavoro svolto viene calcolato moltiplicando la forza per la distanza percorsa in direzione della forza. L'efficienza meccanica del corpo che svolge lavoro (η) è data da:

$$\eta = W / M \quad (2.10)$$

I valori massimi di η sono intorno al 20%-25%, e vicini a zero per molte attività. Quando una persona compie un lavoro "sul" mondo esterno, questo viene considerato lavoro positivo, ma se "il mondo compie lavoro sulla persona" (per esempio camminando in discesa), il corpo svolge sempre un lavoro ma di diversa natura, e questo viene chiamato lavoro negativo. Nell'ultimo caso tuttavia, la produzione di calore è data dal calore prodotto dal metabolismo

meno il lavoro svolto nel compimento dell'attività (e non il lavoro svolto sul corpo). Per esempio, il lavoro speso per scendere uno scalino è approssimativamente un terzo di quello necessario per la salita. Il lavoro esterno, W , rappresenta quindi la frazione di energia totale prodotta dal corpo che non viene rilasciata come calore. La produzione di calore viene quindi calcolata sottraendo W dal tasso metabolico M , calcolato generalmente con la calorimetria indiretta.

2.3.4 Uso di tabelle e banche dati

Risulta spesso poco pratica la misura del calore prodotto con il metabolismo attraverso la calorimetria diretta o indiretta. Per questo spesso si cerca di ottenere una stima da dati precedentemente ricavati da attività che si avvicinino il più possibile nella descrizione a quella in esame.

- Descrizione generale del lavoro: un semplice metodo per stimare il calore prodotto dal metabolismo, dividendo le attività possibili in categorie approssimative (tab. 2.1);

DESCRIZIONE GENERALE	TASSO METABOLICO (Wm^{-2})
Riposo	65
Intensità bassa	100
Intensità moderata	165
Intensità alta	230
Intensità molto alta	290

Tab. 2.1: tasso metabolico stimato a diverse intensità di sforzo fisico

- Stima del tasso metabolico per attività comuni (Tab. 2.2).

ATTIVITÀ	TASSO METABOLICO (Wm^{-2})
Persona sdraiata	45
Persona seduta	58
Persona in piedi	65
Camminata a 2 km/h	110
Camminata a 5 km/h	290
Salita su scalini (0,172 m/scalino), 80 scalini al minuto	440
Trasporto di un carico di 10 kg a 4 km/h	185

Tab. 2.2: tasso metabolico stimato per diverse attività.

2.3.5 Modelli empirici per la stima di M

Sono stati effettuati molti studi nei quali sono stati misurati i tassi metabolici con la calorimetria indiretta e che successivamente, attraverso l'analisi della regressione, hanno fornito equazioni per il calcolo di M che legassero le variabili coinvolte nelle prove. Questi modelli però sono validi solo sotto specifiche condizioni di prova. Un esempio è il modello fornito da Randle et al. (1989), dove il consumo di ossigeno (relativo al tasso metabolico) per il trasporto intermittente di un peso con il braccio può essere stimato con la seguente equazione:

$$V_{O_2} = 36,3 - 1,74W - 1,76D - 7,17F + 0,027W^2 + 0,041WD + 0,0196WF + 0,783DF \quad (2.11)$$

dove:

V_{O_2} = consumo di ossigeno ($\text{ml kg}^{-1} \text{min}^{-1}$);

W = peso del carico (10-30 kg);

D = spostamento;

F = frequenza di sollevamento del carico (2,5-3,5 per minuto).

Un altro metodo che viene proposto è quello del battito cardiaco. Per valori compresi tra 120 e 160 bpm, può esistere una relazione lineare tra tasso metabolico e aumento nel battito cardiaco rispetto ad un valore a riposo, espressa come:

$$HR = HR_0 + RM (M - BM) \quad (2.12)$$

dove:

HR = frequenza cardiaca;

HR_0 = frequenza cardiaca a riposo;

M = tasso metabolico;

BM = metabolismo basale;

RM = crescita della frequenza cardiaca per unità di tasso metabolico.

Questi valori possono essere ricavati sperimentalmente, e poi utilizzati nell'equazione per ricavare il tasso metabolico dal battito cardiaco. Anche se si possono usare dei valori generali per le variabili, è richiesta comunque una misura dell'RM per ogni soggetto. Questo può

essere ottenuto sottoponendo il soggetto a una serie di carichi di lavoro in laboratorio e misurando la frequenza cardiaca e la produzione di energia con una tecnica di calorimetria indiretta.

2.4 Scambio di calore sensibile ($R + C$)

ASHRAE fornisce le seguenti equazioni per il calcolo della perdita di calore dalla pelle per convezione (C) e per radiazione (R):

$$C = f_{cl} h_c (t_{cl} - t_a) \quad (2.13)$$

$$R = f_{cl} h_r (t_{cl} - t_r) \quad (2.14)$$

$$C + R = f_{cl} h (t_{cl} - t_0) \quad (2.15)$$

$$t_0 = \frac{(h_r t_r + h_c t_a)}{h_r + h_c} \quad \text{dove} \quad h = h_r + h_c \quad (2.16)$$

f_{cl} = rapporto tra area superficiale coperta da abbigliamento e pelle nuda;

h_c = coefficiente di trasferimento di calore per convezione ($\text{W m}^{-2} \text{K}^{-1}$);

h_r = coefficiente di trasferimento di calore per irraggiamento lineare ($\text{W m}^{-2} \text{K}^{-1}$);

t_0 = temperatura operativa ($^{\circ}\text{C}$);

t_r = temperatura media radiante ($^{\circ}\text{C}$);

t_a = temperatura dell'aria ($^{\circ}\text{C}$);

t_{cl} = temperatura media sopra il corpo coperto dall'abbigliamento.

Il trasferimento effettivo di calore attraverso l'abbigliamento (conduzione, convezione, radiazione), viene unito attraverso un singolo valore di resistenza termica, R_{cl} . Quindi:

$$C + R = \frac{(t_{sk} - t_{cl})}{R_{cl}} \quad (2.17)$$

Combinando le equazioni 1.15 e 1.17 per eliminare t_{cl} , si ottiene:

$$C + R = \frac{(t_{sk} - t_0)}{R_{cl} + \frac{1}{f_{cl}h}} \quad (2.18)$$

dove:

t_{sk} = temperatura media sulla pelle ($^{\circ}\text{C}$);

R_{cl} = resistenza termica dell'abbigliamento ($\text{m}^2 \text{K W}^{-1}$)

La temperatura dell'aria (t_a), la temperatura media radiante (t_r) e la resistenza termica dell'abbigliamento (R_{cl}) sono tutte variabili che devono essere misurate per definire il contesto ambientale. La temperatura media della pelle può essere definita come una costante (intorno ai 33°C in condizioni di comfort e 36°C sotto stress). Per una persona seduta, Mitchell (1974) dà i seguenti valori:

$$h_c = 8,3v^{0,6} \quad \text{per } 0,2 < v < 4,0 \quad (2.19)$$

$$h_c = 3,1 \quad \text{per } 0 < v < 0,2 \quad (2.20)$$

dove v è la velocità dell'aria in metri per secondo.

Inoltre ASHRAE indica che un valore di $h_t = 4,7 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$ è una ragionevole approssimazione per delle tipiche condizioni ambientali al chiuso.

2.5 Scambio di calore per evaporazione (E_{sk})

ASHRAE fornisce la seguente equazione:

$$E_{sk} = \frac{w(P_{sk,s} - P_a)}{R_{e,cl} + \frac{1}{f_{cl}h_e}} \quad (2.21)$$

dove:

P_a = pressione del vapore acqueo nell'ambiente (kPa);

$P_{sk,s}$ = pressione del vapore acqueo alla pelle, normalmente si considera la pressione di saturazione alla temperatura della pelle, t_{sk} (kPa);

$R_{e,cl}$ = resistenza al trasferimento di calore per evaporazione dello strato di abbigliamento (m^2 kPa W^{-1});

h_e = coefficiente di trasferimento di calore per evaporazione ($W m^{-2} kPa^{-1}$);

w = frazione di pelle bagnata.

2.6 Perdita di calore dalla respirazione ($C_{res} + E_{res}$)

Lo scambio di calore attraverso la respirazione avviene per convezione ed evaporazione. L'aria fredda viene inspirata, riscaldata alla temperatura interna del corpo nei polmoni, e il calore viene trasferito all'aria espirata verso l'ambiente (C_{res}). In più l'aria inalata viene umidificata fino alla saturazione nei polmoni. Dunque, quando viene espulsa nell'ambiente avviene un trasferimento di massa (E_{res}). ASHRAE fornisce la seguente equazione:

$$C_{res} + E_{res} = 0,0014 M (34 - t_a) + 0,0173 M (5,87 - P_a) \quad (2.22)$$

con P_a in kilopascals, M in watts per metro quadro e t_a in gradi celsius.

2.7 La ventilazione attraverso l'abbigliamento

Un altro aspetto che deve essere considerato è quello riguardante gli effetti del movimento della persona sulle proprietà termiche dell'abbigliamento. La ventilazione in un capo d'abbigliamento varia da 0 (completamente isolato) a $1 L min^{-1}$ per bassi livelli di scambio a $60 L min^{-1}$ in condizioni medie fino a $300 L min^{-1}$ per alti livelli di scambio. Se ignoriamo ogni interazione con le proprietà di trasferimento di calore intrinseche al materiale, possiamo includere questa perdita di calore nell'equazione di bilancio termico.

$$M - W = C + R + E_{sk} + C_{res} + E_{res} + \text{perdita di calore per ventilazione} \quad (2.23)$$

2.8 Bilancio termico e radiazione solare

Per un'attività svolta outdoor ci sarà un ulteriore apporto di calore alla persona dovuto alla radiazione solare. In un giorno con bel tempo, la radiazione diretta, diffusa e riflessa può

fornire un apporto di calore di circa 800 W m^{-2} . Questo valore si riduce a 200 W m^{-2} in una giornata nuvolosa. L'energia ricevuta dalla persona dipenderà anche dall'angolo d'incidenza. Burton e Edholm (1955), considerando che la radiazione media incidente su una persona fornisca un'equivalente di 4,6 Met ($1 \text{ Met} = 58 \text{ Wm}^{-2}$), forniscono la seguente equazione per stimare l'apporto della radiazione:

$$R = 4,6 (1 - 0,9\chi) \times a \quad \text{Met} \quad (1.24)$$

dove:

R = apporto di calore dalla radiazione;

χ = nuvolosità (10/10 = cielo coperto, 0/10 = assenza di nuvole);

a = potere assorbente dei vestiti (0,88 per capo nero, 0,20 per bianco)

L'equazione di bilancio termico diventa quindi:

$$M - W = C + R + E_{sk} + C_{res} + E_{res} + \text{perdita di calore per ventilazione} + \text{apporto di calore dalla radiazione} \quad (1.25)$$

3. Parametri per valutare le proprietà termiche di un capo di abbigliamento

Le proprietà termiche di un capo d'abbigliamento sono responsabili del comfort termico della persona e riguardano il trasferimento di calore e di vapore/sudore tra il corpo e l'ambiente. La resistenza termica di uno o più strati d'abbigliamento sovrapposti rappresenta una stima quantitativa di quanto il capo sia efficiente nel fornire una barriera termica a chi lo indossa. La permeabilità al vapore acqueo è un'altra proprietà critica, per mantenere il corpo in comfort termico. Materiali con alta permeabilità al vapore acqueo permettono al corpo di raffreddarsi attraverso l'evaporazione. Per questo, specialmente per attività intense o in ambienti caldi, il solo valore di isolamento termico è insufficiente per caratterizzare e comparare le proprietà termiche di diversi capi d'abbigliamento. L'evaporazione del sudore è un'importante forma di scambio di calore, quindi sia la resistenza termica che la resistenza all'evaporazione sono richieste per definire gli scambi termici tra corpo e ambiente. La resistenza termica totale di uno strato d'abbigliamento più lo strato d'aria superficiale viene misurato attraverso un manichino riscaldato [2]:

$$R_t = \frac{A(T_s - T_a)}{H} \quad (3.1)$$

dove:

R_t = resistenza termica totale dello strato d'abbigliamento più lo strato d'aria superficiale ($m^2 \text{ } ^\circ\text{C/W}$)

A = area superficiale del manichino;

T_s = temperatura sulla superficie del manichino;

T_a = temperatura nello strato d'aria sopra il capo d'abbigliamento;

H = potenza richiesta per riscaldare a temperatura costante il manichino.

In modo simile viene determinata la resistenza totale all'evaporazione con un manichino termico con sudorazione:

$$R_{et} = \frac{A \times (P_s - P_a)}{\lambda \times \frac{dm}{dt}} \quad (3.2)$$

dove:

R_{et} = resistenza totale all'evaporazione del capo d'abbigliamento più lo strato d'aria circostante ($m^2 \text{ kPa/W}$);

P_s = pressione del vapore acqueo sulla superficie del manichino (kPa);

P_a = pressione del vapore acqueo nell'aria sopra lo strato d'abbigliamento;

λ = calore latente di vaporizzazione dell'acqua alla temperatura superficiale misurata (J/g);
 dm/dt = portata di vapore dalla superficie del manichino (g/s).

3.1 Clo e Tog

Gli scambi di calore tra corpo umano e ambiente possono essere quantificati in termini di Met e Clo (Gagge et al., 1941; Goldman, 1977). 1 Met viene usato per quantificare il metabolismo di una persona seduta in condizioni di comfort termico, ed equivale a $50 \text{ kcal/m}^2 \text{ h}$ ($58,2 \text{ W/m}^2$). Gagge ha definito invece 1 Clo come l'isolamento termico che deve essere fornito da un capo d'abbigliamento, per mantenere in condizioni di comfort termico una persona seduta in una stanza con normale ventilazione ($0,1 \text{ m/s}$), ad una temperatura dell'aria di $21 \text{ }^\circ\text{C}$ e umidità relativa del 50%. Gagge ha stabilito che il 24% del calore prodotto con il metabolismo venga perso per evaporazione dalla pelle (perspiratio insensibilis). Dunque rimangono $38 \text{ kcal/m}^2 \text{ h}$ che devono essere smaltite attraverso l'abbigliamento per radiazione, conduzione, convezione. La temperatura media della pelle per una persona in comfort termico è di circa $33 \text{ }^\circ\text{C}$, l'isolamento totale che deve essere fornito dall'abbigliamento più lo strato d'aria risulta quindi essere:

$$I_t = \frac{33-2}{38} = 0,32 \text{ m}^2 \text{ }^\circ\text{C h/kcal} \quad (3.3)$$

Dato che l'isolamento dello strato di aria alle condizioni specificate sopra è di $0,14 \text{ m}^2 \text{ }^\circ\text{C h/kcal}$, l'isolamento dell'abbigliamento che si ricava è di $0,18 \text{ m}^2 \text{ }^\circ\text{C h/kcal}$ ($0,32 - 0,14$). Pertanto, 1 Clo assume il valore di $0,18 \text{ m}^2 \text{ }^\circ\text{C h/kcal}$, che equivale a $0,155 \text{ m}^2 \text{ }^\circ\text{C/W}$. Per fornire un esempio pratico, 1 Clo è il valore di isolamento che fornisce un tipico completo elegante caldo da uomo (ASHRAE, 1992).

Il Tog invece, unità di resistenza termica, viene definito da Pierce e Rees (1946) [1] come la resistenza termica in grado di mantenere un gradiente di temperatura di $0,1 \text{ }^\circ\text{C}$ con un flusso di calore di 1 W/m^2 . Un completo leggero estivo offre una resistenza pari a 1 Tog. Conoscendo il gradiente di temperatura, si può determinare il flusso di calore dividendo il gradiente per un decimo del valore di Tog.

3.2 Indice di permeabilità

Il secondo parametro fondamentale per definire le proprietà di un capo d'abbigliamento, l'indice di permeabilità all'umidità i_m , è stato sviluppato da Woodcock (1962). L'indice di permeabilità rappresenta un indicatore del comportamento del capo d'abbigliamento per quanto riguarda l'evaporazione. Viene definito come:

$$i_m = \frac{R_t}{LR \times R_{et}} \quad (3.4)$$

L'indice varia da 0 (totalmente impermeabile al vapore acqueo) a 1 (completamente permeabile al vapore). Il numero di Lewis, LR, è il rapporto tra il coefficiente di trasferimento di massa per evaporazione e il coefficiente di trasferimento di calore per convezione. Questo valore varia poco con la temperatura dell'aria, pressione e umidità, e per la maggior parte delle applicazioni può essere considerato una costante, equivalente a 16,65 °C/kPa (McCullough, 1993).

3.3 Trasmissibilità evaporativa

La permeabilità al vapore d'acqua di diversi indumenti può essere comparata in termini di valori di i_m , ma con la condizione che le resistenze termiche dei capi abbiano lo stesso valore. Goldman ha definito la trasmissibilità evaporativa come il rapporto tra l'indice di permeabilità e l'isolamento totale (i_m/clo). Questo rappresenta un indicatore del massimo raffreddamento per evaporazione del sudore che si riesce ad ottenere in un ambiente senza la presenza di correnti d'aria. McCullough e Rohles (1983) hanno dimostrato che la trasmissibilità evaporativa è utile per confrontare capi d'abbigliamento con differenti valori di isolamento termico. Due giacche con diverso isolamento, ma con la stessa trasmissibilità evaporativa, permetteranno lo scambio della stessa quantità di calore tra il corpo e l'ambiente allo stesso livello di intensità di attività fisica. È facile per materiali con alto coefficiente di trasmissibilità evaporativa che si verifichi il trasporto di calore sia per convezione che per raffreddamento per evaporazione. Invece in ambienti con umidità elevata e con bassa velocità dell'aria, il raffreddamento da evaporazione è meno importante e la resistenza termica diventa il parametro più importante.

3.4 Fattore di efficienza della permeazione (f_{pcl})

Il fattore di efficienza alla permeazione f_{pcl} è stato introdotto da Nishi e Gagge (1970) per descrivere l'efficienza del raffreddamento dovuto al sudore sulla superficie della pelle per un corpo umano vestito. È stato calcolato in termini di coefficiente di trasferimento di calore per convezione tra la superficie del corpo e l'ambiente (h_c), e l'isolamento intrinseco del capo d'abbigliamento (I_{cl}).

$$f_{pcl} = \frac{1}{1+0,143 \times h_c \times I_{cl}} \quad (3.5)$$

Questo fattore va da zero (indumento completamente impermeabile) all'unità (soggetto nudo).
La relazione tra f_{pcl} e i_m è data da:

$$f_{pcl} = \frac{i_m}{h_c \times (I_a + I_{cl})} \quad (3.6)$$

4. Determinazione delle proprietà termiche di un capo di abbigliamento

Esistono molti modi per determinare le proprietà specifiche di un capo d'abbigliamento. Un programma completo per la valutazione di un capo d'abbigliamento include un certo numero di test e prove. I laboratori specializzati in questo studio hanno sviluppato dei metodi il più possibile completi per valutare le proprietà degli indumenti.

Molti autori propongono “la piramide del comfort” [1], un metodo da seguire per sviluppare e valutare un capo d'abbigliamento.

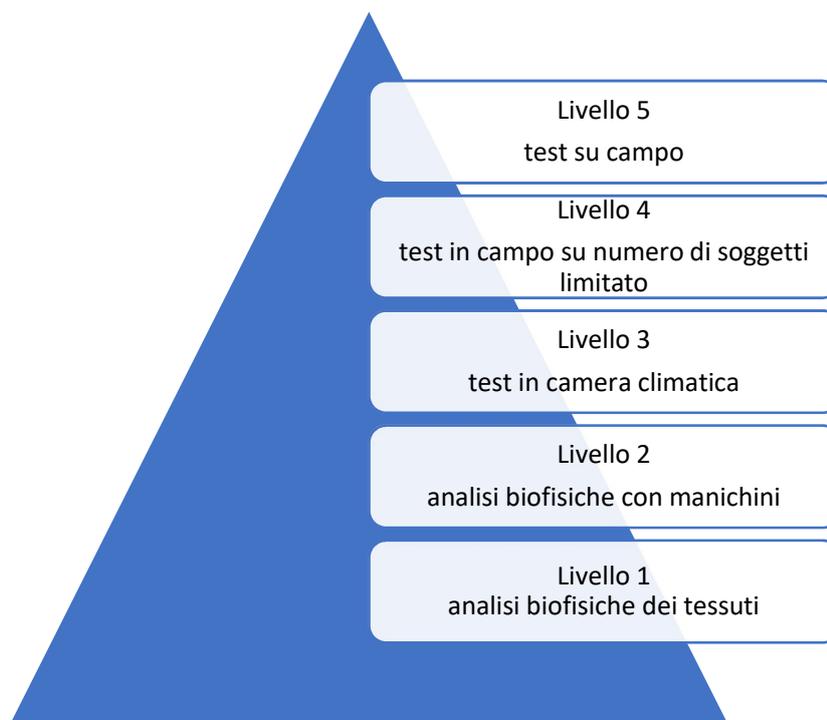


Fig. 4. 1: sistema a 5 livelli per l'analisi delle proprietà di tessuti e capi d'abbigliamento.

Goldman e Kampmann (2007) definiscono cinque livelli per la valutazione dell'abbigliamento. La base della piramide rappresenta tutti i test che possono essere effettuati sui tessuti utilizzando semplici strumenti di trasferimento di calore. Sono quindi semplici da svolgere e ripetibili ma non realistici in quanto non coinvolgono soggetti umani. Il picco invece rappresenta i test su campo con persone che indossano il capo d'abbigliamento. Questi metodi richiedono grandi risorse e sono difficili da controllare, ma sono realistici. Aumentando di livello il costo del test aumenta, quindi, per evitare lo svolgimento di prove non necessarie, è importante usare le informazioni provenienti dai livelli inferiori per pianificare un test di livello superiore.

4.1 Analisi biofisiche dei tessuti

Il livello 1 comprende la misura della resistenza termica, della resistenza all'evaporazione e di altre proprietà di permeabilità direttamente sul materiale che costituisce l'indumento. Sono state sviluppate negli anni molte apparecchiature per la valutazione di queste proprietà sui tessuti.

4.1.1 Togmetro

Questo strumento viene utilizzato per determinare la resistenza termica di un tessuto o di un aggregato di fibre alla trasmissione del calore [3]. Il principio dell'apparato risiede nel fatto che, per conduttori posti in serie in direzione del flusso di calore, i cali di temperatura attraverso i conduttori sono proporzionali alle loro resistenze termiche. Quindi, se il calo di temperatura attraverso un materiale di cui è nota la resistenza termica e attraverso un campione di materiale posto in serie con esso viene misurato, la resistenza termica del campione può essere valutata.

Il togmetro consiste in un piatto metallico, piatto standard, controllato termostaticamente, coperto con uno strato di materiale di resistenza termica nota. Viene misurata la temperatura su entrambe le facce del piatto. Il riscaldatore viene regolato in modo che la temperatura della faccia superiore sia alla temperatura della pelle del corpo umano (31 – 35 °C). Viene inoltre mantenuto un lieve flusso d'aria sopra l'apparato. Esistono due tipologie differenti per lo svolgimento del test con il togmetro: metodo a due piatti o a singolo piatto.

Nel metodo a due piatti (fig. 4.2) il campione viene posizionato tra un piatto inferiore riscaldato e un piatto superiore isolante. Il piatto superiore ha una massa ridotta per non andare a comprimere il tessuto campione. Si misura la temperatura (T_1) al riscaldatore (heater), tra il piatto standard e il campione (T_2), e tra il campione e il piatto superiore (T_3). Nel metodo a singolo piatto (fig. 4.3) invece, il campione viene posizionato sul piatto riscaldato, ma viene lasciato scoperto e il piatto superiore (top plate), viene utilizzato per misurare la temperatura dell'aria (T_3).

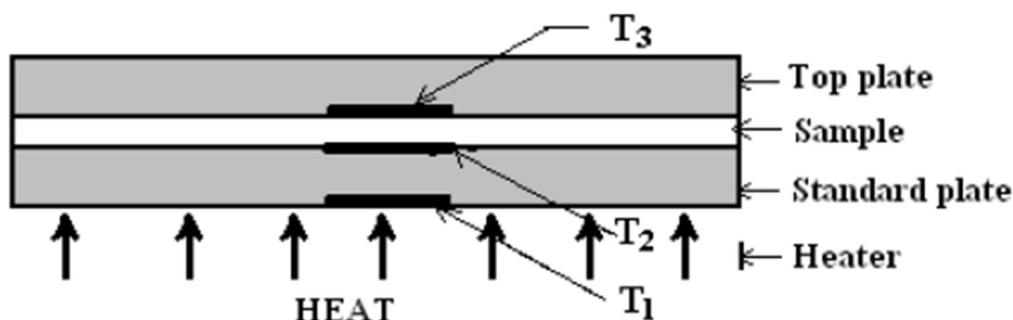


Fig. 4.2: togmetro a due piatti

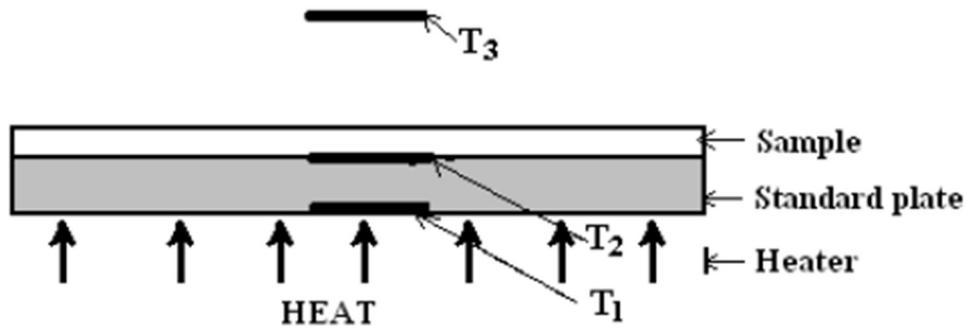


Fig. 4.3: togmetro a singolo piatto

L'aria al di sopra del campione ha una resistenza termica non trascurabile dunque il metodo consiste in sostanza nella misura della somma della resistenza termica del campione e dello strato d'aria. Viene dunque effettuato separatamente un altro esperimento senza la presenza del campione, per misurare la resistenza dell'aria (R_{air}). Per fare questo il riscaldatore e la ventola vengono azionati e si attende che lo strumento raggiunga l'equilibrio termico senza il campione presente. Il piatto superiore viene qui posto al di sotto dell'apparato e schermato da radiazioni con un piatto coperto da un foglio di alluminio, per misurare la temperatura dell'aria. La temperatura a questo punto dovrebbe rimanere costante ad ogni termocoppia per almeno 30 minuti. In seguito la resistenza termica dell'aria può essere calcolata dalla seguente equazione:

$$R_{air} = R_{std} \times \frac{T_2 - T_3}{T_1 - T_2} \quad (4.1)$$

Per determinare poi la resistenza del campione, l'esperimento viene ripetuto con il campione posizionato sul piatto inferiore. Dopo che lo strumento ha di nuovo raggiunto l'equilibrio, la resistenza del campione viene calcolata:

$$R_{campione} = R_{std} \times \frac{T_2 - T_3}{T_1 - T_2} - R_{air} \quad (4.2)$$

4.1.2 Guarded hot plate

Le vista dall'alto e laterale dello strumento vengono mostrate nella figura 4.4. Viene utilizzato per misurare la trasmittanza termica, che è il reciproco della resistenza termica. L'apparecchiatura consiste in un piatto metallico riscaldato circondato da un anello di guardia e un altro piatto al di sotto. Tutti e tre sono elementi riscaldanti schiacciati tra fogli di alluminio. Tutti i piatti sono mantenuti alla stessa temperatura costante, nel range di quella della pelle umana (33 – 36 °C).

Con il materiale da testare posto sul piatto al centro, si attende che lo strumento raggiunga l'equilibrio prima dell'inizio della misurazione. Viene registrata poi la quantità di calore che passa attraverso il campione, in Watts per metro quadro, dalla potenza che viene fornita al riscaldatore del piatto metallico. Viene misurata la temperatura del piatto di test e dell'aria 500 mm sopra il piatto. La trasmittanza termica misurata consiste nella somma della trasmittanza termica del tessuto più la trasmittanza dello strato di aria sovrastante che non è trascurabile. Il test è ripetuto senza la presenza del campione per ricavare la trasmittanza del solo strato d'aria.

Un metodo standard per la misura della trasmittanza termica di un materiale tessile viene descritto nella norma ASTM D 1518-85 [18]. Questa tipologia di test riguarda la determinazione dei coefficienti totali per la trasmissione del calore, dovuta all'azione combinata di conduzione, convezione e irraggiamento per campioni secchi di tessuto e altri materiali aventi una trasmittanza termica (U_2) compresa tra 0,7 e 14 W/m²K e uno spessore di non oltre 50 mm.

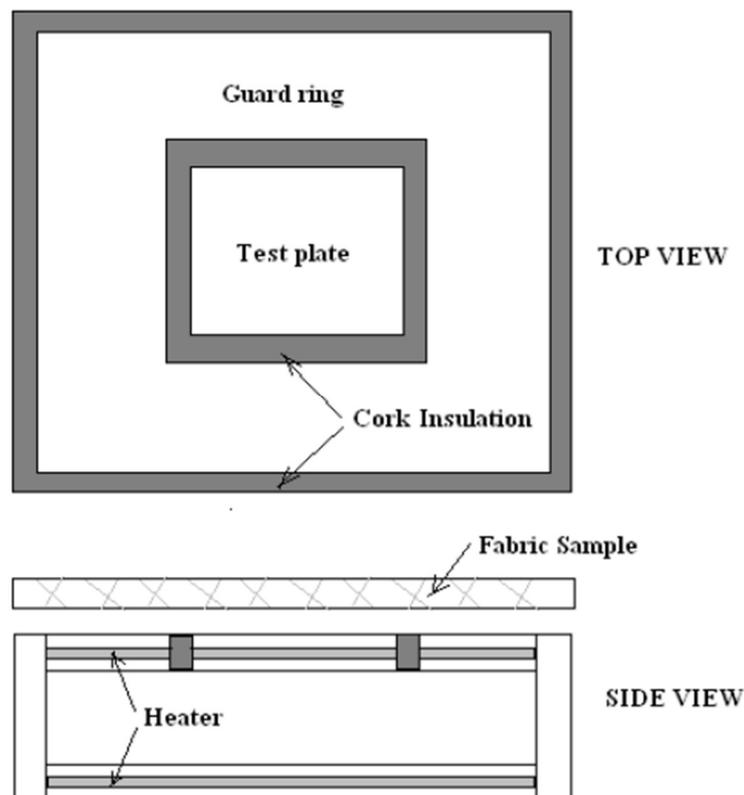


Fig. 4. 4: guarded hot plate.

La conducibilità termica e la resistenza termica si possono quindi calcolare con la seguente procedura:

1. Calcolare la trasmittanza combinata del campione più lo strato d'aria:

$$U_1 = \frac{P}{[A \times (T_p - T_a)]} \quad (4.3)$$

dove:

P = potenza fornita al piatto di test;

A = area del piatto di test;

T_p = temperatura del piatto di test (°C);

T_a = temperatura dell'aria (°C).

2. Calcolare la trasmittanza senza la presenza del campione, U_{bp};
3. Calcolare la trasmittanza intrinseca del tessuto utilizzando la seguente equazione:

$$\frac{1}{U_2} = \frac{1}{U_1} - \frac{1}{U_{bp}} \quad (4.4)$$

4. Calcolare la conducibilità termica intrinseca del tessuto, k, con la seguente equazione:

$$k = U_2 \times \frac{t_i}{1000} \quad (4.5)$$

con t_i = spessore del campione in mm, alla pressione di 0,07 kPa;

5. Calcolare la resistenza intrinseca del tessuto, R, con la seguente equazione:

$$R = \frac{1}{U_2} \quad (4.6)$$

4.1.3 Skin model (sweating guarded hot plate)

Lo skin model è uno strumento per la misura della resistenza termica e della resistenza al vapore acqueo di un materiale. È quindi un metodo particolarmente rilevante per valutare l'abilità di capi d'abbigliamento di trasmettere calore e umidità, principalmente in condizioni ambientali stazionarie. Le norme UNI EN ISO 11092:2014 e ASTM F1868-02 [15] [16] specificano due tipi di test per misurare differenti parametri. Uno viene utilizzato per misurare la resistenza al passaggio di vapore acqueo, calcolando la differenza di pressione di vapore d'acqua tra le due facce del campione, e dividendola per il flusso di calore per evaporazione per unità di area nella direzione del gradiente di pressione. L'altro metodo misura la resistenza termica, definita come la differenza di temperatura tra le due facce del campione, divisa per il flusso di calore su unità di superficie.

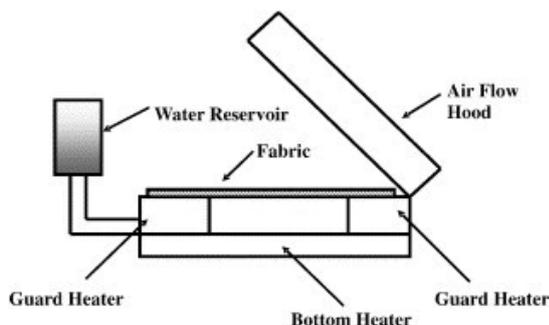


Fig. 4. 5: schema dello skin model



Fig. 4.6: sweating guarded hot plate

L'apparecchiatura consiste di un piatto metallico poroso riscaldato e mantenuto a temperatura costante, con sensori di temperatura e equipaggiato con una riserva di acqua. I campioni di tessuto vengono adagiati sopra il piatto poroso e posizionati in una camera controllata, dove la temperatura esterna, l'umidità relativa e la velocità dell'aria possono essere regolate per simulare diverse condizioni ambientali.

Quando viene determinata la resistenza termica, non viene usata acqua e il flusso di calore attraverso il provino viene misurato dopo il raggiungimento delle condizioni stazionarie.

Se si vuole misurare invece la resistenza al passaggio di vapore acqueo, viene posta una sottile membrana permeabile al vapore sopra la superficie metallica, con il campione posto ancora sopra. L'acqua fornita dalla riserva al piatto riscaldato evapora e passa attraverso la membrana in forma di vapore. In questo modo il campione non si trova in diretto contatto con l'acqua liquida. Il flusso di calore necessario per mantenere il piatto a temperatura costante rappresenta la misura del calore latente di evaporazione dell'acqua, da questo si può determinare la resistenza al vapore [4].

L'apparecchiatura ha lo scopo di simulare i meccanismi di riscaldamento/raffreddamento e di sudorazione che avvengono sulla superficie della pelle umana. Grazie a questo si può valutare la performance di tessuti e membrane traspiranti in condizioni molto più realistiche rispetto ai tradizionali test di permeabilità al vapore acqueo.

La temperatura del piatto viene mantenuta ad una temperatura di $35\text{ °C} \pm 0,1\text{ °C}$ per simulare la temperatura della pelle del corpo umano. Quando si vuole misurare la resistenza al vapore acqueo, la temperatura ambientale della camera viene fissata a 35 °C e l'umidità relativa al 40%. Quando si misura la resistenza termica, la temperatura della camera viene fissata a 20 °C e l'umidità relativa al 65%.

La sequenza di operazioni per lo svolgimento del test è semplice in linea di principio. Viene misurata la temperatura del piatto metallico e si regola la camera climatica ai valori voluti di temperatura e umidità relativa. Inizialmente, si calibra lo strumento a vuoto. In seguito, con il materiale da testare in posizione, si attende che lo strumento raggiunga lo stato stazionario per cui la perdita di calore dalla faccia superiore del campione sia uguale al valore di calore fornito come input. Una volta raggiunto lo stato stazionario, la potenza (Watts) richiesta per il riscaldamento viene registrata in un certo periodo di tempo. Il risultato per uno specifico materiale sarà il valore ottenuto con il campione in loco meno il valore ottenuto con il solo piatto metallico. Il valore è quindi basato sulla potenza richiesta per mantenere le condizioni di stato stazionario.

4.1.4 Alambeta

Nella pratica la misura del flusso termico in una specifica direzione è difficile da effettuare in quanto un riscaldatore, anche se è alimentato con un valore di potenza noto, andrà a dissipare calore in tutte le direzioni. Gli strumenti descritti in precedenza presentano molti svantaggi tra i quali il tempo richiesto per la prova, la dimensione ridotta dei campioni, e un inserimento del materiale nello strumento non sempre agevole. Negli ultimi anni sta diventando più

importante conoscere inoltre le proprietà di stato transitorio. L'apparato Alambeta è in grado di determinare queste proprietà.

Alambeta è uno strumento a controllo computerizzato per la misura rapida e non distruttiva delle proprietà transitorie e di stato stazionario di ogni materiale comprimibile, specialmente di tessuti lisci [7]. Questo strumento può misurare i seguenti parametri del tessuto:

- resistenza termica: da 0,005 a 1,0 m²K/W (0,05 a 10 TOG, 0,03 a 6 CLO);
- conducibilità termica λ : da 0,010 a 2,0 W/m K;
- spessore del campione: da 0,15 a 25 mm, oltre con minore precisione fino a 35 mm;
- picco di flusso di calore q_{\max} (W/m²);
- rapporto tra q_{\max} e il flusso termico di stato stazionario;
- diffusività termica (m²/s);

Lo strumento consiste di due teste di misura, tra le quali viene posto il campione. Entrambe le teste di misura sono equipaggiate con termocoppie e sensori di flusso di calore. La testa inferiore viene regolata alla temperatura ambiente, quella superiore viene riscaldata e mantenuta ad una temperatura costante. I sensori di flusso di calore agiscono sulle aree di contatto fra le due teste. Quando la testa superiore viene abbassata sul campione, grazie ai sensori viene misurato il flusso di calore attraverso le facce superiore ed inferiore del campione.

Lo schema di funzionamento di questo strumento viene presentato nella figura 4.7. Un sensore di flusso termico (4) è solidale ad una piastra metallica (2), ed è ad una temperatura più alta di quella del campione. Quando inizia la misura, la testa di misura (1) si sposta verso il basso e tocca il campione (5), posizionato sulla base metallica (6). In questo momento la temperatura superficiale del campione cambia istantaneamente e quindi lo strumento registra l'andamento del flusso di calore [8].

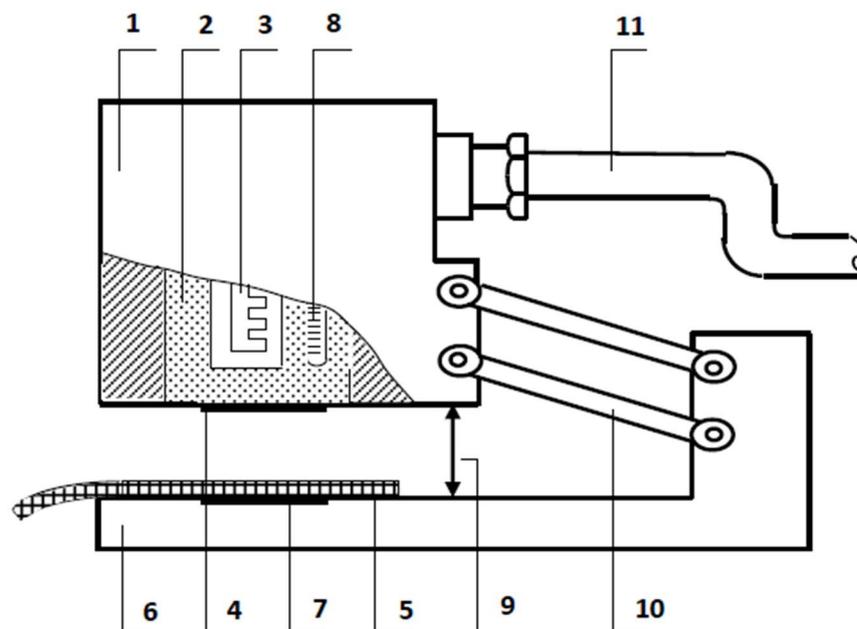


Fig. 4.7: parti dell' Alambeta

1. Testa di misura;
2. Blocco di rame;
3. Riscaldatore elettrico;
4. Sensore di flusso di calore inferiore;
5. Campione;
6. Base dello strumento;
7. Sensore di flusso di calore superiore;
8. Termometro a resistenza;
9. Distanza tra le teste;
10. Meccanismo di sollevamento e abbassamento;
11. Cavo di connessione tra testa di misura e computer.

MISURA DELLE PROPRIETÀ DI PERMEABILITÀ DEI TESSUTI

La capacità di gestione dell'umidità di un capo d'abbigliamento rappresenta uno dei più importanti parametri da considerare per valutarne il grado di comfort. Le proprietà di permeabilità di un materiale poroso dipendono dalla resistenza al passaggio dell'acqua, dalla repulsione all'acqua, dall'assorbimento e dalla traspirazione delle fibre e dei fili, oltre che dalla geometria e struttura interna del tessuto [9].

4.1.5 Moisture management tester

Per migliorare il comfort dei capi d'abbigliamento, è importante conoscere le proprietà di gestione dell'umidità da parte dei tessuti. Anche se esistono molti test per valutare l'assorbimento o la traspirazione, questi metodi non sono in grado di considerare il trasferimento del liquido nel materiale in modo dinamico nelle tre dimensioni.

Per caratterizzare obiettivamente le proprietà di diffusione e di trasferimento dell'umidità sulla superficie di tessuti e tra superfici diverse, è stato sviluppato uno strumento chiamato moisture management tester (MMT).

Il principio che segue il MMT è basato sul fatto che, quando avviene il trasporto di umidità attraverso un tessuto, la resistenza elettrica del tessuto varia, resistenza che dipende da due fattori: composizione della soluzione e contenuto di acqua nel tessuto. Dopo che è stata stabilita la composizione della soluzione, si può quindi misurare la resistenza elettrica in relazione al contenuto di acqua nel tessuto.

La resistenza elettrica di materiali polimerici porosi è generalmente molto alta quando il materiale viene posto in un circuito chiuso, e di conseguenza non si può rilevare corrente elettrica e il voltaggio sul resistore di riferimento è quasi zero. Tuttavia, quando il materiale è bagnato o contiene una certa quantità di umidità, la resistenza del materiale è ridotta, e si rileva un cambiamento nel voltaggio. Questo metodo viene utilizzato per misurare i cambiamenti nel contenuto di acqua e umidità alle due superfici del tessuto.

Il MMT è progettato per misurare e registrare il trasporto di umidità in più direzioni. È equipaggiato con due sensori concentrici di umidità, uno superiore e uno inferiore, e il tessuto viene inserito in mezzo. Una quantità predefinita di soluzione (sudore sintetico) viene introdotta sulla faccia superiore del tessuto, e la soluzione andrà poi a diffondersi nel materiale in tre direzioni:

- spandimento sulla superficie superiore (interna) del tessuto;
- trasferimento dalla superficie superiore a quella inferiore (esterna);
- spandimento sulla superficie inferiore del tessuto.

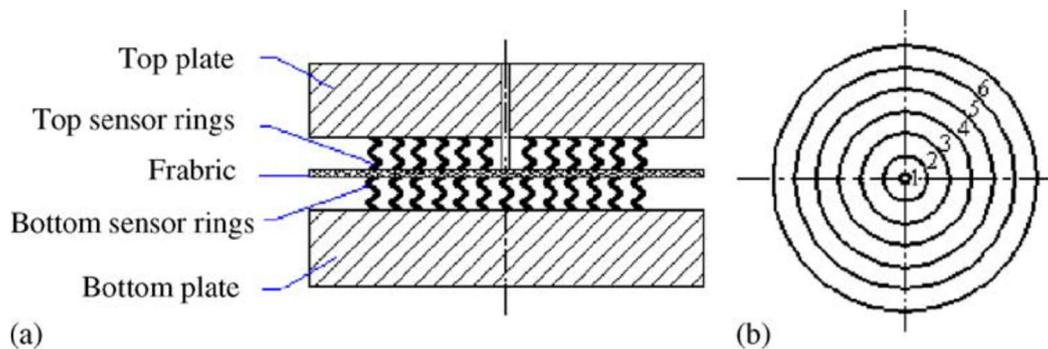


Fig. 4. 8: moisture management tester.

Nella figura 4.8 è possibile vedere la struttura ad anello dei sensori (sensor rings). Vengono applicati sensori ad anello per migliorare il contatto tra il tessuto e i sensori. Usando una testa di misura con sei anelli, è possibile determinare il contenuto d'acqua e il trasferimento di umidità nel tessuto su entrambe le superfici e tra le due.

Per prima cosa si può determinare il contenuto d'acqua (%), cioè la percentuale di contenuto di acqua relativa al peso a secco del materiale. Supponendo che all'anello i ($i = 1-6$), la tensione rilevata sia V_i , il contenuto di acqua all'anello i (U_i) sarà:

$$U_i = \frac{A_i}{R_i} = \frac{A_i \times (V_{DD} - V_i)}{R_{ref} \times V_i} \quad (4.7)$$

dove:

A_i = fattore di calibrazione per convertire dalla resistenza al contenuto d'acqua;

R_i = resistenza dell'anello i ;

R_{ref} = resistenza del resistore di riferimento;

V_{DD} = voltaggio applicato.

Il contenuto totale di acqua (%) ad ogni superficie può essere calcolato come:

$$UT = \sum_{i=1}^6 UT_i \quad e \quad UB = \sum_{i=1}^6 UB_i \quad (4.8)$$

dove UT rappresenta il contenuto d'acqua rispetto al tempo sulla superficie superiore del tessuto (normalmente quella in contatto con la pelle) e UB rappresenta il contenuto d'acqua rispetto al tempo sulla superficie inferiore (normalmente la superficie esposta all'atmosfera).

Il risultato di questo test mostra il contenuto di acqua sulle due facce esterne, ma in teoria non mostra quanta acqua è contenuta all'interno del tessuto. Durante il test la forza di gravità ha sicuramente un'influenza sul trasferimento di umidità dalla faccia superiore a quella inferiore, ma dato che viene posta la stessa quantità di sudore sulla superficie del tessuto e tutti i test per un certo studio comparativo devono essere fatti nelle medesime condizioni, questa forza non andrà a modificare le differenze nella permeabilità dei diversi tessuti.

CRITERI DI VALUTAZIONE E INDICI

In base ai dati ricavati dai test e alle curve di misurazione, possono essere definiti una serie di indici per caratterizzare le proprietà di permeabilità del campione.

- (1) **Velocità di assorbimento:** AR_T e AR_B (%/s) sono le velocità medie di assorbimento dell'umidità del campione rispettivamente sulla faccia superiore ed inferiore. Sono definite come la pendenza media della curva durante l'aumento del contenuto d'acqua.

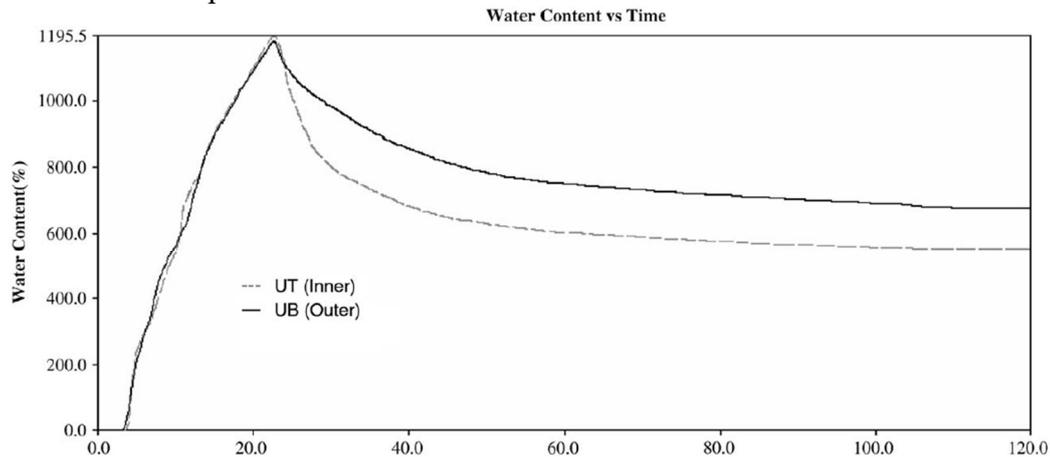


Fig. 4.9: contenuto di acqua sulle due superfici di un campione nel tempo

- (2) **Velocità di spandimento:** SS_T e SS_B (mm/s) sono definite come le velocità di spandimento dal centro fino al massimo raggio di bagnatura. Supponendo che l'anello i sia bagnato al tempo t_i , la velocità di spandimento dell'umidità dall'anello $i-1$ all'anello i è:

$$S_i = \frac{\Delta r_i}{\Delta t_i} = \frac{\Delta r_i}{t_i - t_{i-1}} \quad (4.9)$$

dove Δr_i è la distanza tra l'anello i e l'anello $i-1$. Dunque le velocità di spandimento totali sono:

$$SS_T = \sum_{i=1}^{N_T} S_i = \sum_{i=1}^{N_T} \frac{\Delta r_i}{t_i - t_{i-1}} \quad (4.10)$$

$$SS_B = \sum_{i=1}^{N_B} S_i = \sum_{i=1}^{N_B} \frac{\Delta r_i}{t_i - t_{i-1}} \quad (4.11)$$

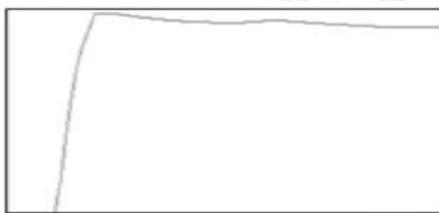
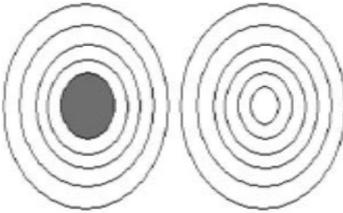
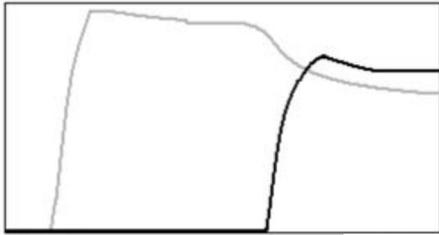
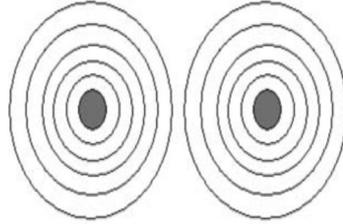
N_T e N_B sono i numeri dell'ultimo anello bagnato sulle superfici superiore e inferiore.

(3) Capacità di trasporto in una direzione: R è la differenza nel contenuto di umidità tra la faccia superiore e quella inferiore del tessuto.

$$R = \frac{Area(UB) - Area(UT)}{tempo\ totale\ di\ test} \quad (4.12)$$

L'utilizzo degli indici sopra descritti può essere a volte complicato a causa di problemi di interpretazione. Per ovviare a questo problema, gli indici possono essere convertiti in modo da creare una più semplice classificazione in cinque categorie, dalla prima (scarso) all'ultima (eccellente). La classificazione è stata ricavata grazie a test su 150 tessuti con differenti strutture e realizzati con materiali differenti o con tecniche diverse di finitura.

In figura 4.10 vengono mostrati i risultati ricavabili con il MMT su sette tipi diversi di materiale tessile:

Tipo di materiale	Contenuto di acqua sulle 2 superfici (UT superiore, UB inferiore)	Area bagnata sulle 2 superfici
<p>Materiale impermeabile: assorbimento molto lento; lento spandimento; assenza di trasporto.</p>	<p>Contenuto di acqua (%) — UT — UB</p>  <p>Tempo</p>	 <p>Top Bottom</p>
<p>Materiale repellente: assenza di bagnatura; assenza di assorbimento; assenza di spandimento; scarso trasporto in una direzione.</p>	<p>Contenuto di acqua (%) — UT — UB</p>  <p>Tempo</p>	 <p>Top Bottom</p>

Tipo di materiale	Contenuto di acqua sulle 2 superfici (UT superiore, UB inferiore)	Area bagnata sulle 2 superfici
<p>Materiale a lento assorbimento e a lenta asciugatura: lento spandimento, scarso trasporto in una direzione.</p>	<p>Contenuto di acqua (%) — UT — UB</p> <p>Tempo</p>	<p>Top Bottom</p>
<p>Materiale con veloce assorbimento e a lenta asciugatura: media-veloce bagnatura; piccola area di spandimento; lento spandimento; scarso trasporto in una direzione.</p>	<p>Contenuto di acqua (%) — UT — UB</p> <p>Tempo</p>	<p>Top Bottom</p>
<p>Materiale con veloce assorbimento e veloce asciugatura: media-veloce bagnatura; medio-veloce assorbimento; ampia area di spandimento; veloce spandimento; scarso trasporto in una direzione.</p>	<p>Contenuto di acqua (%) — UT — UB</p> <p>Tempo</p>	<p>Top Bottom</p>
<p>Materiale permeabile all'acqua: piccola area di spandimento; elevato trasporto in una direzione.</p>	<p>Contenuto di acqua (%) — UT — UB</p> <p>Tempo</p>	<p>Top Bottom</p>

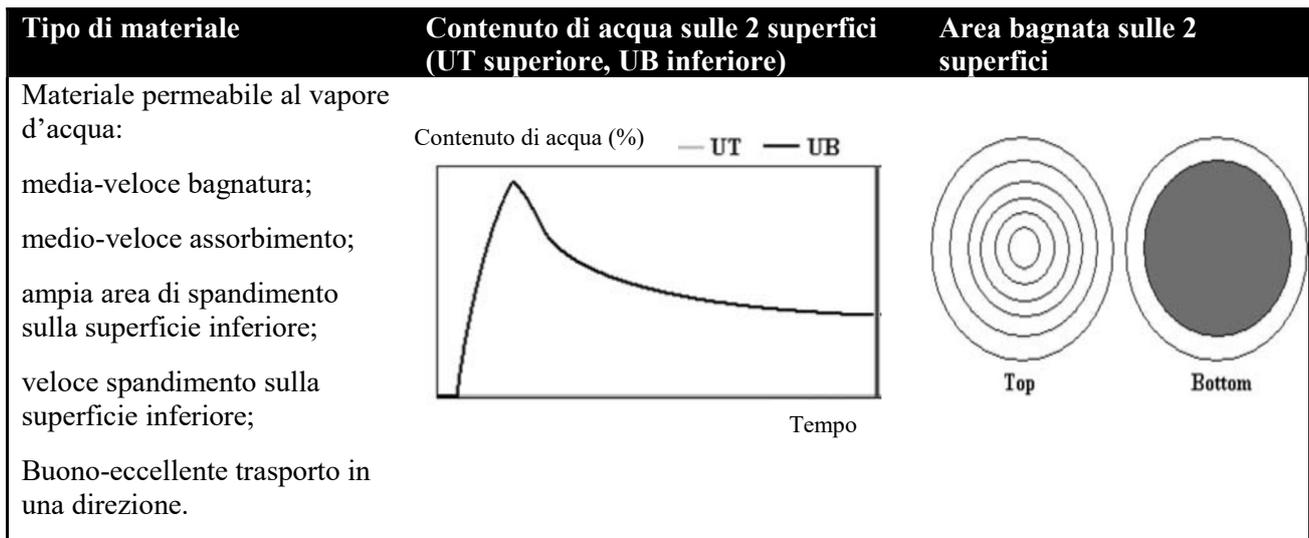


Fig. 4.10: MMT applicato a diversi tipi di materiale.

4.2 Manichini termici

I manichini termici vengono utilizzati per la ricerca scientifica da oltre 70 anni. Sono largamente impiegati per analisi termiche all'interfaccia tra il corpo e l'ambiente, e trovano specifiche applicazioni nel determinare le proprietà termiche di capi d'abbigliamento anche in ambienti complessi. Inoltre, recenti sviluppi dei manichini con sudorazione e respirazione permettono simulazioni ancora più realistiche delle interazioni termiche del corpo umano con l'ambiente circostante.

Esistono oltre 100 tipi di manichini termici nel mondo (tab. 4.1). Il primo fu un manichino a segmento singolo sviluppato per l'esercito degli stati uniti nei primi anni '40. Il bisogno però di ricavare informazioni più dettagliate ha fatto evolvere la costruzione dei manichini, fino ad avere numerosi segmenti su tutta la superficie del corpo, controllati singolarmente. Quasi tutti i manichini termici oggi presentano 15 segmenti o di più. Un significativo passo in avanti è stato fatto con l'introduzione di tecniche di regolazione digitale. Questo ha permesso l'utilizzo di protocolli più flessibili e misure più accurate [10].

L'utilizzo di manichini termici statici fornisce valori che hanno una rilevanza limitata rispetto al reale utilizzo di una persona. Per questo sono stati sviluppati manichini con giunzioni che consentissero loro di stare seduti o di eseguire un movimento costante, come camminare o pedalare.

Molti manichini inoltre possono simulare la sudorazione umana e fornire informazioni sullo scambio termico che avviene per evaporazione.

Tipo	Materiale	Controllo	Movimento	Paese/anno
Singolo segmento	Rame	Analogico	-	US 1945
Multi-segmento	Alluminio	Analogico	-	UK 1964
Per irraggiamento	Alluminio	Analogico	-	Francia 1972
Multi-segmento	Plastica	Analogico	Mobile	Danimarca 1973
Multi-segmento	Plastica	Analogico	Mobile	Germania 1978
Multi-segmento	Plastica	Digitale	Mobile	Svezia 1980
Multi-segmento	Plastica	Digitale	Mobile	Svezia 1984
Per il fuoco	Alluminio	Digitale	-	US
Per immersione	Alluminio	Digitale	Mobile	Canada 1988
Con sudorazione	Alluminio	Digitale	-	Giappone 1988
Donna	Plastica	Digitale	Mobile	Finlandia 1988
Con respirazione	Alluminio	Digitale	Mobile	USA 1996
Con sudorazione	Plastica	Digitale, regolazione del comfort	Mobile	Danimarca 1989
	Plastica	Digitale, regolazione del comfort	Mobile	Danimarca 1996
	Plastica	Digitale, 30 zone secche e 125 zone con sudorazione	Movimenti realistici	Svizzera 2001
Con sudorazione	Metallo	Digitale, 126 zone	Articolato	USA 2003
Virtuale	Modello geometrico	Simulazioni di trasferimento di massa e di calore	Articolato	Cina 2000
Singolo segmento con sudorazione	Materiale traspirante	Digitale, riscaldato ad acqua	Mobile	Cina 2001
Singolo segmento	Materiale antivento	Digitale, riscaldato con aria	Mobile	USA 2003

Tab. 4.1: manichini termici prodotti nel corso degli anni

Negli ultimi anni ci sono principalmente due trend per quanto riguarda lo sviluppo di manichini per test. Il primo va verso manichini termici complessi, multifunzione per ricerca e test avanzati. Un esempio è il manichino svizzero SAM che suda e può effettuare movimenti realistici di una camminata. Un altro esempio è il manichino americano ADAM, concepito primariamente per test climatici in veicoli. Quest'ultimo è completamente autosufficiente,

infatti il corpo del manichino include riserve d'acqua per le ghiandole sudoripare, batterie per i segmenti riscaldati e tutti i circuiti necessari per la regolazione e l'acquisizione dei dati.

La seconda direzione di sviluppo invece va verso manichini semplici e non eccessivamente costosi, ma nonostante ciò comunque accurati e affidabili, che possano essere utilizzati, per esempio, da igienisti del lavoro o anche da piccole compagnie produttrici di vestiti. Questo tipo di manichini è limitato però dall'ottenimento finale di un solo parametro per tutto il corpo, sia per l'isolamento termico che per la resistenza all'evaporazione.

4.2.1 Perché utilizzare i manichini

I manichini sono strumenti complessi, delicati e molto costosi. Queste caratteristiche sono bilanciate, tuttavia, da numerose funzionalità molto utili (tab. 4.2). Un manichino termico a forma di corpo umano può misurare le perdite di calore per convezione, radiazione e conduzione in tutte le direzioni sulla superficie totale, oppure su un'area locale definita. Con l'aumento del numero di segmenti sulla superficie del manichino, aumenta anche la risoluzione spaziale della misura. Alcuni manichini arrivano ad avere più di 30 segmenti regolabili singolarmente. Sommando infine i valori ottenuti riportati sulle rispettive aree di misura, si può determinare un valore per la perdita totale di calore dal corpo.

IMPORTANTI FUNZIONALITÀ DEI MANICHINI TERMICI	CARATTERISTICHE DEI CAPI D'ABBIGLIAMENTO RICAVABILI DAI TEST CON MANICHINI
<ul style="list-style-type: none"> - Simulazione degli scambi termici tra corpo e ambiente - Misurazione dei flussi di calore in modo tridimensionale - Metodo oggettivo per la misura dell'isolamento termico di un capo d'abbigliamento - Metodo veloce, accurato e ripetibile - Metodo economicamente vantaggioso per misure comparative e per lo sviluppo di prodotti - Misurazione delle perdite di calore per evaporazione 	<ul style="list-style-type: none"> - Frazione di area superficiale del corpo coperta da tessuto e frazione di pelle esposta - Distribuzione degli strati di tessuto e di aria sulla superficie del corpo (uniforme-non uniforme, ...) - Aumento dell'area superficiale del corpo a causa del capo indossato - Effetti del design del prodotto - Modifiche all'indumento nelle diverse condizioni di test - Variazioni di temperatura (e di flusso di calore) tra le diverse parti del corpo - Effetto della posizione del corpo (seduto, piedi, disteso, ...) - Effetto del movimento del corpo (camminata, pedalata, ...)

Tab. 4.2: funzionalità dei manichini termici

Sono due le principali aree di applicazione per i manichini termici:

1. Determinazione delle caratteristiche di trasferimento di calore dei capi d'abbigliamento;
2. Valutazione dell'impatto ambientale sul corpo umano.

È stato riconosciuto velocemente dopo la loro invenzione, che i manichini potevano essere utilizzati efficacemente per stimare anche le condizioni microclimatiche causate da diversi sistemi di riscaldamento, ventilazione e raffreddamento. In particolare, possono essere valutati ambienti termici disomogenei e complessi, come quelli in autovetture, utilizzando manichini termici a più segmenti.

I manichini possono variare per grandezza, forma, numero di segmenti e modo di regolazione. La ripetibilità di una misura di isolamento termico all'interno di un singolo laboratorio, per uno specifico campione, è di norma nell'intervallo del 2-4 %, mentre tra laboratori arriva al 5-10 % (Anttonen 1999; Anttonen et al. 2003; McCullough 2001). Queste variazioni sono ragionevolmente piccole, considerando le differenze che possono esistere tra manichini e laboratori.

4.2.2 Calcolo di isolamento di un capo d'abbigliamento con manichini

Il fondamento per la misura dell'isolamento termico di un capo d'abbigliamento con l'utilizzo di manichini termici è ancora una volta il principio di bilancio termico. Quando il sistema raggiunge l'equilibrio, la perdita di calore è uguale alla potenza fornita al manichino. L'isolamento termico dell'indumento viene determinato basandosi sulla relazione tra la potenza fornita e il gradiente di temperatura tra la superficie del manichino e l'ambiente.

Il valore ottenuto di isolamento può essere però compreso correttamente solo se si conosce anche il protocollo di svolgimento del test, in particolare deve essere ben definito il modo di controllo del manichino. Anche il corretto metodo di calcolo quindi dell'isolamento termico dipenderà dal modo di regolazione del manichino. Un manichino può operare in tre diversi modi:

1. A temperatura costante, il più utilizzato;
2. A flusso costante di calore verso il corpo del manichino;
3. In modalità di comfort termico, basata sull'equazione di comfort.

Esistono tre diverse vie anche per calcolare l'isolamento termico:

1. Il metodo globale, il più utilizzato;
2. Il metodo seriale;
3. Il metodo in parallelo.

Nilsson (1997) ha misurato l'isolamento termico totale di otto differenti sistemi di abbigliamento, e ha trovato che i valori di isolamento ricavati con il metodo seriale erano sempre più alti di quelli ricavati con il metodo globale. Studi successivi hanno poi evidenziato delle differenze tra il metodo seriale e quello globale del 25,7% per indumenti comuni, e del 45,2% per indumenti per protezione dal freddo. Dagli stessi studi si ricava una differenza tra il metodo parallelo e il globale del 8,7% per indumenti comuni, e del 15,8% per indumenti per protezione dal freddo.

4.2.3 Metodi di calcolo

Il metodo più comunemente usato, chiamato metodo globale o di somma totale, prevede la somma, per tutti i segmenti, delle perdite di calore, delle temperature superficiali ponderate sulle aree di misura e delle aree dei segmenti del corpo, prima di calcolare il valore d'isolamento totale dato dalla (ISO 9920, 2007):

$$I_{tg} = \frac{\sum_i \alpha_i \times T_{si} - T_a}{\sum_i \alpha_i \times Q} \quad (4.13)$$

$$= \frac{[(\sum_i \frac{A_i}{A} \times T_{si}) - T_a] \times A}{\sum_i H_i} \quad (4.14)$$

dove:

I_{tg} = isolamento termico totale del capo d'abbigliamento più lo strato superficiale d'aria ($m^2 \text{ } ^\circ\text{C W}^{-1}$);

α_i = rapporto tra l'area superficiale del segmento i e la superficie totale del manichino (A_i/A);

A_i = area superficiale del segmento i del manichino (m^2);

A = area superficiale totale del manichino (m^2);

T_{si} = temperatura superficiale locale del segmento i del manichino ($^\circ\text{C}$);

T_a = temperatura nel flusso d'aria sopra l'indumento ($^\circ\text{C}$);

Q_i = flusso di calore locale dal segmento i del manichino (H_i/A_i , W m^{-2});

H_i = flusso di calore totale dal segmento i del manichino (W).

Il metodo seriale invece, detto anche di somma locale, calcola prima i valori di isolamento termico locale, che vengono poi pesati sulle aree superficiali dei segmenti. Il valore di isolamento totale viene infine formulato in questo modo (ISO 9920,2007):

$$I_{ts} = \sum_i \frac{A_i}{A} \times \left[\frac{(T_{si} - T_a) \times A_i}{H_i} \right] \quad (4.15)$$

dove:

I_{ts} = isolamento termico totale del capo d'abbigliamento più lo strato superficiale d'aria ($m^2 \text{ } ^\circ\text{C W}^{-1}$).

Il metodo in parallelo infine consiste nel calcolo iniziale del coefficiente di trasferimento di calore locale. Il coefficiente di trasferimento di calore totale viene ottenuto pesando i vari coefficienti locali sulle rispettive aree dei segmenti. Il valore di isolamento termico totale è poi ottenuto prendendo l'inverso del coefficiente di trasferimento di calore totale (Holmer,2006; ISO 9920,2007):

$$\frac{1}{I_{tp}} = \sum_i \frac{A_i}{A} \times \left[\frac{H_i}{(T_{si} - T_a) \times A_i} \right] \quad (4.16)$$

L'isolamento termico intrinseco dell'indumento viene determinato sottraendo al valore di isolamento totale il rapporto tra l'isolamento dello strato di area superficiale I_a e f_{pcl} , rapporto tra area superficiale coperta da abbigliamento e pelle nuda.

$$I_{cl} = I_t - \frac{I_a}{f_{cl}} \quad (4.17)$$

Il valore di I_a viene ottenuto azionando il manichino senza abbigliamento. Il fattore f_{cl} è un indicatore dell'aumento di area superficiale per la perdita di calore dal corpo vestito verso l'ambiente. Questo valore viene solitamente misurato effettuando delle fotografie al manichino, prima nudo e poi vestito.

Per un manichino termico, l'area superficiale di ogni segmento è predefinita. Inoltre, per uno specifico test con un manichino termico, in ogni modo di controllo, la temperatura superficiale locale di ogni segmento e la temperatura dell'ambiente sono mantenute costanti quando il sistema raggiunge l'equilibrio. Esistono due casi per quanto riguarda la distribuzione dell'isolamento dell'abbigliamento: isolamento omogeneo o isolamento disomogeneo. Il valore di isolamento totale ricavato dal metodo globale però rimane invariato per entrambi i casi. Questo implica che la perdita di calore dal manichino sia una costante (H):

$$H = \sum_i H_i \quad (4.18)$$

Il confronto tra il metodo globale e il seriale porta ad alcune conclusioni:

- I metodi globale e seriale forniscono lo stesso valore di isolamento se l'isolamento del capo d'abbigliamento è uniformemente distribuito lungo tutto il manichino.
- Il metodo seriale dà valori più alti di isolamento se si raggiunge una temperatura uniforme lungo tutta la superficie del manichino.
- Il metodo seriale può fornire valori più bassi di isolamento se la distribuzione di perdita di calore locale soddisfa le seguenti equazioni:

$$\frac{\sqrt{m_1}}{H_1} = \frac{\sqrt{m_2}}{H_2} = \frac{\sqrt{m_3}}{H_3} = \dots = \frac{\sqrt{m_n}}{H_n} \quad (4.19)$$

$$m_i = \frac{A_i^2 \times (T_{si} - T_a)}{A} \quad (4.20)$$

4.2.4 Isolamento omogeneo

Se si ha una distribuzione omogenea dell'isolamento sul manichino, i metodi globale e seriali forniranno lo stesso valore di isolamento che presenta ogni singolo segmento del manichino. Definendo 'I' questo valore, si calcola l'isolamento con il metodo in parallelo:

$$\frac{1}{I_{tp}} = \sum_i \frac{A_i}{A} \times \frac{1}{I} = \frac{1}{AI} \sum_i A_i \quad (4.21)$$

$$I_{tp} = \frac{AI}{\sum_i A_i} = I \quad (4.22)$$

Dunque tutti e tre i metodi forniscono lo stesso valore se l'isolamento è uniformemente distribuito sulla superficie del corpo. Come è visibile nella figura 4.11, in cui i valori di isolamento totale sono riportati in rapporto alla perdita locale di calore (H_{cl}), I_{tg} è rappresentato da una linea retta, dato che il metodo globale fornisce un valore costante quando la perdita totale di calore rimane invariata. Quando la distribuzione locale di perdita di calore soddisfa l'omogeneità di isolamento del capo d'abbigliamento, I_{tg} , I_{ts} e I_{tp} sono uguali al punto B.

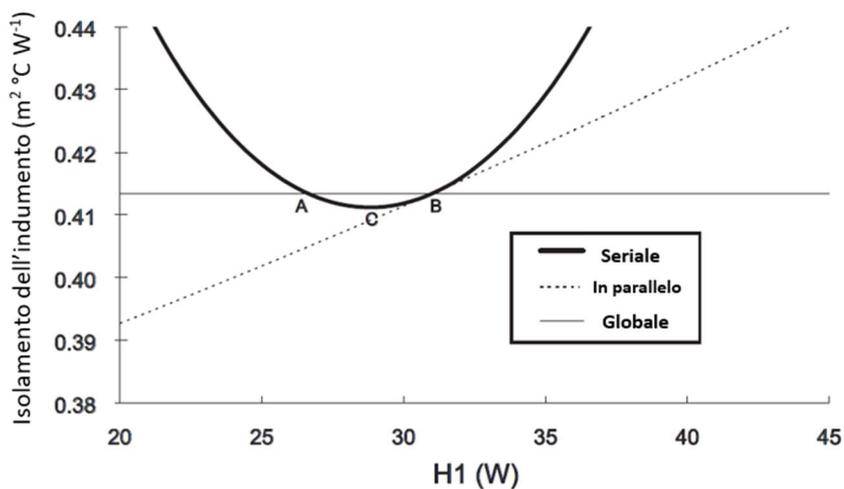


Fig. 4. 11: isolamento totale in funzione della perdita locale di calore.

4.2.5 Esempio di test: manichino con sudorazione

Viene qui di seguito presentato un test effettuato con un manichino termico con la funzione aggiuntiva della sudorazione, per illustrare il metodo di calcolo delle perdite di calore e dell'isolamento del capo d'abbigliamento [11].

Per questo test è stato utilizzato un manichino termico di tipo Coppelius, costruito con l'obiettivo di misurare contemporaneamente la trasmissione di calore e di vapore d'acqua attraverso il sistema di abbigliamento. Utilizzando un manichino termico con sudorazione, è possibile valutare esaustivamente le proprietà termiche di una capo d'abbigliamento. Il manichino consiste di 18 zone controllate singolarmente, riscaldate elettricamente. Una continua sudorazione dalla superficie del corpo (eccetto la testa, le mani e i piedi), è possibile grazie a 187 ghiandole sudoripare controllabili individualmente. Queste ghiandole forniscono una quantità controllata di acqua alla superficie del manichino. L'acqua in forma liquida viene fornita attraverso un tubo al materiale che forma la pelle del manichino, che consiste di due strati. Lo strato interno è altamente permeabile e permette all'acqua di spandersi su una grande superficie. Lo strato esterno consiste di una membrana microporosa, che lascia passare il vapore ma non l'acqua in forma liquida. Il riscaldamento al di sotto della pelle fa evaporare l'acqua e mantiene la temperatura superficiale ad un valore costante impostato. Il calore e il vapore d'acqua vengono quindi prodotti alla superficie del manichino. La forma del manichino con dimensioni del corpo anatomiche (taglia 52), e giunzioni prostetiche nelle spalle, gomiti, fianchi e ginocchia vanno a simulare la figura reale del corpo umano.

Il manichino è posto in una camera climatica e viene tenuto sospeso a una bilancia in alto (fig. 4.12), che registra le variazioni di peso durante il test, in questo modo l'evaporazione del sudore può essere misurata come la differenza tra l'acqua fornita e l'aumento di peso del manichino con l'abbigliamento. L'acqua è contenuta in un contenitore che viene posizionato su un'altra bilancia nella camera climatica. Anche ogni capo d'abbigliamento viene pesato prima e immediatamente dopo il test per determinare in quale strato d'abbigliamento condensa l'umidità. Viene scritto un programma al computer per il controllo e la misura dei seguenti parametri: fornitura d'acqua, condensazione, evaporazione (cambi di peso), temperature superficiali di tutte le sezioni del corpo del manichino, temperature a specifici punti, apporto di calore alle sezioni, isolamento termico delle sezioni, e condizioni climatiche (temperatura e umidità relativa).

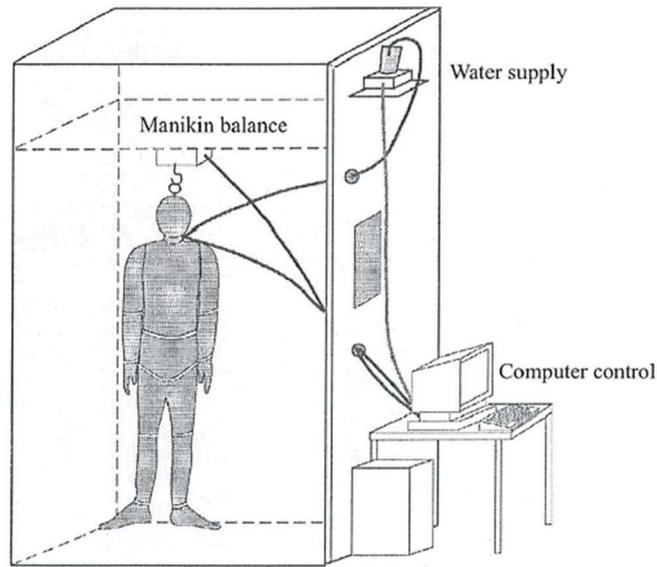


Fig. 4. 12: esempio di test con manichino termico.

Considerando i valori medi, non inserendo quindi la funzione di sommatoria nell'equazione, viene determinato in questo modo l'isolamento termico tra la superficie del manichino e l'ambiente:

$$I_t = \frac{t_s - t_a}{H_{dry}} \times A \quad (4.23)$$

dove H_{dry} è il calore secco medio fornito al manichino, t_s è la temperatura superficiale media del manichino, t_a è la temperatura media dell'ambiente e A è l'area superficiale del manichino ($1,376 \text{ m}^2$).

Tenendo in considerazione che il calore fornito è parzialmente utilizzato per far evaporare l'acqua, il valore corretto di isolamento termico ($I_{t,corr}$) viene calcolato come:

$$I_{t,corr} = \frac{t_s - t_a}{H_{sw} - H_e} \times A \quad (4.24)$$

dove H_{sw} è l'input totale di calore nel test con sudorazione e H_e è la perdita di calore per evaporazione, calcolata come:

$$H_e = (m_s - m_c) \times \varphi = m_e \times \varphi \quad (4.25)$$

Dove m_s è l'acqua fornita al manichino, m_c è l'acqua condensata nell'abbigliamento, m_e è l'acqua evaporata e ϕ è il calore specifico di evaporazione dell'acqua ($0,675 \text{ Wg}^{-1}$ a 25°C).

PROTOCOLLO SEGUITO PER IL TEST

Il manichino viene utilizzato per misurare le proprietà di trasmissione di calore e umidità attraverso differenti tipi di completi da lavoro per uomo. Diverse combinazioni di abbigliamento sono state testate, con tre differenti condizioni ambientali e a due livelli di sudorazione, per valutare i valori di isolamento termico e di evaporazione del sudore. Nella prima serie di test, sono stati testati cinque sistemi di abbigliamento composti da tre strati a 10°C e 50% di umidità relativa e a 25°C e 50% di umidità relativa. Nella seconda serie di test, eseguiti per simulare un ambiente freddo, sono stati testati cinque sistemi di abbigliamento composti da quattro strati al 50% di umidità relativa prima a 10°C e poi a -5°C . Tutti sono stati effettuati a livelli di sudorazione di 0 e $50 \text{ g/m}^2\text{h}$. Sono stati eseguiti due test per ogni combinazione. Se i risultati dei test differivano di più del 5%, veniva svolto un terzo test. La procedura seguita è la seguente:

1. Pesatura dei singoli indumenti e del manichino a secco;
2. Vestizione del manichino e posizionamento di sei sensori di temperatura su ogni superficie dell'abbigliamento. I sensori misurano la temperatura del materiale dell'indumento testato. Un sensore misura la temperatura dell'aria nella camera climatica.
3. Accensione del riscaldamento;
4. Test a secco, durata di 1,5 ore;
5. Test con sudorazione. Durata di 3 ore.
6. Spegnimento del riscaldamento e della sudorazione;
7. Svestizione del manichino e immediata pesatura dei singoli indumenti.

4.3 Resistenza termica dei tessuti e isolamento termico dei capi di abbigliamento

La capacità di un capo d'abbigliamento di creare una barriera di protezione contro l'ambiente esterno dipende soprattutto dalle proprietà dei materiali tessili che sono stati utilizzati. Anche la progettazione, l'aderenza al corpo e il numero di strati giocano un ruolo importante nel fenomeno di scambio termico tra corpo umano e ambiente. Tra le altre proprietà che influenzano le proprietà termiche di un indumento possiamo considerare anche lo spessore, la massa per metro quadrato, e la rigidità.

Una classificazione dei capi d'abbigliamento in base alla loro abilità di assicurare comfort termico all'utilizzatore è spesso complicata da ottenere. La misura strumentale dell'isolamento termico si può ottenere solamente con l'uso di manichini termici. Con il manichino termico si andrà a misurare quindi l'isolamento totale dell'indumento. La preparazione e il test però richiedono tempi molto lunghi e sono costosi, inoltre sono

necessari due tipi di manichini per l'analisi di molti tipi di indumenti, uno maschile e uno femminile.

È quindi più semplice e meno costoso andare a valutare la resistenza termica del singolo materiale utilizzato nell'abbigliamento. Si va quindi ad analizzare una porzione piatta di tessuto attraverso diverse apparecchiature come lo skin model o l'Alambeta.

Il problema è però stabilire come i risultati derivati dalle misurazioni sui tessuti possano essere utilizzati per predire la proprietà di isolamento termico dei vestiti realizzati con questi materiali.

CORRELAZIONE ALAMBETA – MANICHINO TERMICO

Qui di seguito viene presentato uno studio effettuato da Matusiak e Sybilska (2015), con lo scopo di paragonare i risultati ottenuti con l'Alambeta testando dei tessuti con i risultati ricavati da manichini termici con indumenti realizzati con gli stessi materiali [12].

Per il test sono stati analizzati nove tipi diversi di materiali tessili, tra i quali materiali tessuti, non tessuti, lavorati a maglia e anche strutture multistrato, per poter alla fine ricavare una relazione che fosse indipendente dalla struttura del materiale. I materiali scelti vanno dal tessuto in cotone con basso isolamento termico a sistemi multistrato con alto isolamento utilizzati nell'abbigliamento invernale. Per evitare l'influenza della struttura dell'indumento sui risultati ricavati dal manichino termico, i materiali utilizzati sono stati impiegati nella creazione di giubbotti della medesima taglia (fig. 4.13), senza la presenza di tasche o altri elementi strutturali che potessero ostacolare lo scambio di calore.

Tutti i materiali da testare sono stati analizzati con l'Alambeta nel loro intervallo di resistenza termica. Per ogni materiale sono stati misurati dieci campioni differenti e in seguito è stata calcolata la media aritmetica dei valori ottenuti.

Il manichino utilizzato è di tipo femminile, modello Pemile (PT TEKNIK) (fig. 4.14), Danimarca. È un modello di 168 cm di altezza e 20 kg di peso, costituito da 24 segmenti riscaldati. La misura si è svolta in una camera climatica a 22 °C, prima senza abbigliamento e poi di nuovo con il giubbotto, sempre con il manichino in piedi e con una temperatura della pelle a 34 °C.



Fig. 4. 13: abbigliamento utilizzato per il test



Fig. 4. 14: manichino utilizzato per il test

Dopo una fase di stabilizzazione in camera, sono state effettuate dieci registrazioni dei valori e in seguito si è calcolata la media aritmetica. Per ogni materiale si è ripetuto il test tre volte e anche qui si è calcolata poi la media aritmetica.

RISULTATI DELLE PROVE

Bisogna innanzitutto considerare, per la misura con il manichino, che il giubbotto copre solamente una parte del corpo del manichino. Per questo l'analisi ha dovuto tenere conto dei dati esclusivamente dei segmenti coperti, cioè il petto sinistro e destro e i due segmenti a destra e sinistra sulla schiena. Dunque, sulla base dei valori di flusso termico di questi segmenti, sono stati calcolati l'isolamento termico totale e l'isolamento termico dello strato d'aria.

Assumendo la temperatura della pelle costante su tutto il corpo, l'isolamento termico può essere calcolato con la seguente formula:

$$I_t = \frac{T_{sk} - T_a}{\sum_i \alpha_i \times H_i} \quad (4.26)$$

dove T_{sk} è la temperatura della pelle ($^{\circ}\text{C}$), T_a la temperatura dell'ambiente ($^{\circ}\text{C}$), α_i è la frazione in area del segmento i in relazione all'area totale del corpo (nel nostro caso l'area totale è costituita dai quattro segmenti citati precedentemente) e H_i è il flusso locale di calore

al segmento i . Si va a calcolare infine il valore di isolamento termico effettivo I_{clo} sottraendo al valore di isolamento totale ricavato in precedenza quello dello strato d'aria misurato con il manichino nudo. Nella tab. 4.3 vengono presentati i risultati delle misurazioni.

Numero materiale	Resistenza termica ricavata dall'Alambeta ($W^{-1}Km^2$)	Isolamento termico ricavato dal manichino ($W^{-1}Km^2$)	
		I_t	I_{clo}
(1)	0,010	0,176	0,065
(2)	0,012	0,191	0,080
(3)	0,014	0,204	0,094
(4)	0,014	0,219	0,114
(5)	0,019	0,208	0,106
(6)	0,046	0,249	0,146
(7)	0,091	0,240	0,140
(8)	0,108	0,280	0,178
(9)	0,091	0,258	0,155

Tab. 4. 3: risultati ottenuti con Alambeta e manichino termico

Sulla base dei risultati ottenuti, è possibile stabilire che esiste una forte correlazione tra la resistenza termica dei tessuti misurata con l'Alambeta e l'isolamento termico degli indumenti ricavato con i manichini termici. Tuttavia, i valori assoluti dei risultati ricavati con le due tipologie di test differiscono tra di loro in modo significativo. La resistenza termica del tessuto misurata con l'Alambeta è molto più bassa dell'isolamento termico fornito dal giubbotto al manichino. Questo gap viene giustificato semplicemente considerando le differenze tecniche che hanno luogo nei due test. Lo strumento Alambeta appartiene ai cosiddetti "metodi a doppio piatto", nei quali il materiale viene posizionato tra due piatti a diversa temperatura ed è strettamente aderente a questi ultimi. Quando viene misurato invece l'isolamento con il manichino termico, il campo d'abbigliamento cade in modo non aderente al corpo del manichino. In questa configurazione si creano due strati di aria: uno tra la pelle del manichino e la superficie interna dell'indumento e un altro tra la superficie esterna del manichino e l'ambiente esterno. Entrambi gli strati di aria danno un isolamento termico molto più grande di quello fornito dal materiale di cui è costituito l'abbigliamento.

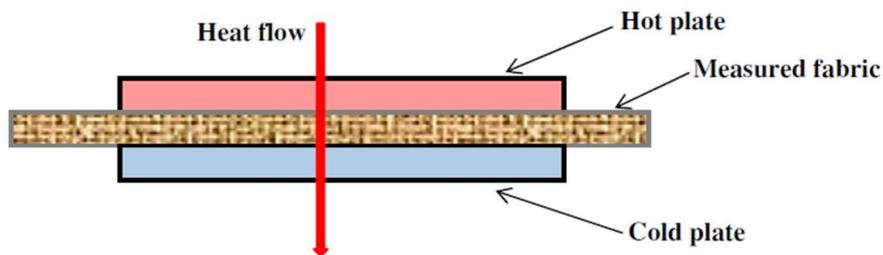


Fig. 4. 15: schema di misura nel caso dell'Alambeta.

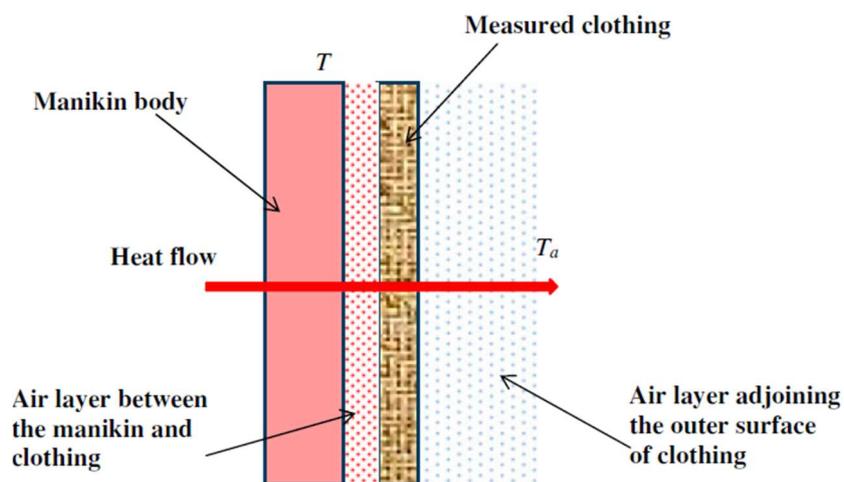


Fig. 4. 16: schema di misura nel caso del manichino termico.

Dal punto di vista del comfort termico, il parametro più importante risulterebbe essere l'isolamento termico totale I_T . Questo parametro mostra come l'indumento sotto analisi fornisca isolamento termico all'utilizzatore insieme agli strati d'aria. Lo strato d'aria tra la superficie del manichino e la superficie interna dell'indumento è creato dal capo d'abbigliamento stesso e il suo spessore dipende dalle caratteristiche del capo: taglia, forma, rigidità, etc. Per questo motivo è giustificato dire che l'isolamento termico dello strato d'aria tra il manichino e l'indumento è un effetto dell'azione protettiva del capo d'abbigliamento, e dunque l'isolamento totale è il parametro che meglio rappresenta la funzione di protezione termica verso l'ambiente esterno.

Tuttavia, i risultati ottenuti vanno a confermare che, specialmente in situazioni dove sia complicata la misura per mezzo di manichini termici, i valori ricavati con l'Alambeta possono essere applicati efficacemente per comparare differenti materiali tessili dal punto di vista dell'isolamento termico specifico del materiale, per poter scegliere il tessuto più appropriato per la realizzazione di abbigliamento per la protezione dal freddo.

5. Test in camera climatica

Nel seguente lavoro di tesi si vanno a confrontare due differenti data loggers per la misura e registrazione di temperatura e umidità. I due sistemi sono stati testati durante prove fisiche all'interno della camera climatica del Laboratorio di Alta Tecnologia Tessile dell'Università di Biella.

Sono state effettuate prove con lo svolgimento dello stesso tipo di attività fisica ma a diverse temperature e livelli di ventilazione, per poter analizzare le diverse risposte dei sensori applicati.

5.1 Apparecchiature utilizzate

I test si sono svolti all'interno di una **camera climatica** per simulazioni di condizioni ambientali costruita dalla bi-freezer, modello ETC/C 700. La camera permette il controllo della temperatura e umidità relativa attraverso un pannello esterno (fig.5.1). Per ogni test la camera è stata azionata ai parametri desiderati il giorno precedente, affinché raggiungesse delle condizioni stazionarie. Per la camera la misura delle variabili ambientali è ottenuta tramite sensore PT100 per la temperatura e a microprocessore compensato in temperatura per l'umidità. Questo tipo di camere sono progettate per un uso continuo, 24 ore su 24 e presentano una circolazione dell'aria con velocità parallela al terreno compresa tra 0,1 e 0,2 m/s, movimento che deve avvenire tra due pareti tecniche poste ai lati opposti della camera ed in modo estremamente uniforme ed omogeneo su tutta la superficie. Per ottenere questo risultato Bi freezer ha adottato un sistema particolare basato sulle proprietà caratteristiche di uno speciale tessuto, in grado di garantire un flusso costante di aria attraverso di esso [14]. Per le prove con ventilazione viene azionata una **ventola** (fig.5.2), posizionata frontalmente rispetto al tester.



Fig. 5. 1: pannello di controllo della camera climatica



Fig. 5. 2: ventola interna alla camera

L'attività fisica di camminata lenta e veloce si è svolta su di un **tapis roulant**. Dietro il tapis roulant è stata posizionata una **termocamera** per poter scattare delle termografie durante lo svolgimento dei test. Sono state utilizzate inoltre una **bilancia** per il peso del tester e una **bilancia di precisione** per l'indumento utilizzato.



Fig. 5. 3: tapis roulant.



Fig. 5. 4: termocamera.

Infine si è utilizzato anche un **cardiofrequenzimetro** Garmin durante tutte le prove per monitorare la frequenza cardiaca e vedere soprattutto le variazioni durante i cambiamenti di intensità.

5.1.1 Descrizione dei sensori

Ibutton

Il data logger Ibutton DS1923 è un sistema robusto e autosufficiente, sviluppato dalla Maxim Integrated Products, in grado di misurare temperatura e umidità e salvare i dati in una memoria da 8 Kbytes. È costituito da un chip racchiuso in un contenitore di acciaio inossidabile di 16 mm di diametro e altamente resistente a sporco, umidità e urti.

Questo strumento utilizza il suo contenitore d'acciaio come un'interfaccia di comunicazione elettronica. Ogni contenitore ha un contatto per i dati e un contatto a terra, la base. Entrambi i contatti sono connessi al chip di silicene all'interno, e sono separati tra di loro da un anello di polipropilene. La base forma i lati e il fondo del contenitore.

È possibile montarlo su ogni superficie poiché è sufficientemente robusto da resistere anche a condizioni ambientali estreme. Può operare da $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $85\text{ }^{\circ}\text{C}$ e da 0% a 100% di umidità relativa, con risoluzioni massime di $0,0625\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $0,04\%$ di umidità relativa e una frequenza di acquisizione programmabile da 1 secondo a 273 ore. Un foro di diametro $1,27\text{ mm}$ sul coperchio del device permette all'aria di raggiungere il sensore di umidità. Vi è una membrana che permette il passaggio del vapor d'acqua ma respinge l'acqua in fase liquida. Il resto dei componenti elettronici all'interno del data logger è sigillato così da non essere esposto all'umidità ambientale [6].



Fig. 5. 5: data loggers Ibutton



Fig. 5. 6: struttura degli Ibutton

La registrazione dei dati può essere programmata per iniziare immediatamente, dopo un tempo definito dall'utilizzatore oppure dopo un certo valore di temperatura. Il logger viene configurato e comunica con un computer attraverso il protocollo seriale 1-Wire. Viene spesso utilizzato nella raccolta di dati di temperatura e umidità nelle fasi di preparazione e processo degli alimenti, nel trasporto di materiali sensibili a temperatura e umidità e in misurazioni ambientali. Per la misura dell'umidità possiede un sensore polimerico di umidità integrato.

MSR 147

Il data logger MSR147WD è un dispositivo che permette di registrare e monitorare in modo wireless i parametri fisiologici come la temperatura della pelle e il livello di umidità durante lunghi periodi di tempo. Questo strumento consente la misura e il salvataggio dei valori di umidità e temperatura grazie a cinque sensori collegati alla custodia centrale da un filo di 1 metro di lunghezza, di diametro di $2,2\text{ mm}$. I sensori possono lavorare da -40 a $125\text{ }^{\circ}\text{C}$, con accuratezza di $0,2\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($-10\dots+50\text{ }^{\circ}\text{C}$) e di $\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($-40\dots+125\text{ }^{\circ}\text{C}$), e da 0 a 100% di umidità relativa, con accuratezza di $\pm 1,8\%$ ($10\dots85\%$, $0\dots+40\text{ }^{\circ}\text{C}$) e di $\pm 4\%$ ($85\dots95\%$, $0\dots+40\text{ }^{\circ}\text{C}$). Possono inoltre essere impostati con una frequenza di acquisizione da 1 secondo a 12 ore, e acquisire fino ad un milione di valori.

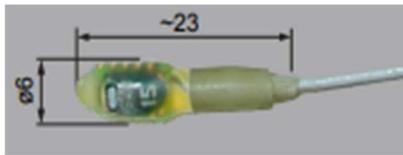


Fig. 5. 7: sensori del data logger MSR147WD



Fig. 5. 8: data logger MSR147WD

L'unità di registrazione dei dati lavora grazie ad una batteria da 260 mAh racchiusa nella custodia centrale di tipo IP67, impermeabile. Quest'ultima contiene anche un accelerometro e un sensore che misura la pressione dell'aria, presenta un display oled dove vengono visualizzati i valori in tempo reale e grazie alla tecnologia bluetooth è possibile il monitoraggio istantaneo dai valori anche da smartphone.

Il software integrato include le funzioni di configurazione, lettura, visualizzatore online, per registrare e analizzare i dati. Tutti i parametri di misura possono essere trasferiti rapidamente ad un PC attraverso la connessione USB sia durante le operazioni di misura che al termine delle prove. Ogni unità include un orologio integrato, per far sì che più unità di MSR 147WD possano essere sincronizzate e fornire una singola serie di dati [5].

DIFFERENZE PRATICHE FRA I SENSORI

Tra i due data loggers esistono molte differenze nelle funzionalità e nella forma, che vanno anche ad influenzare i tipi di misurazione che si possono effettuare ed anche i valori che si ricavano.

- **Display:** l' MSR possiede uno schermo oled dove è possibile leggere in tempo reale i valori di temperatura, umidità relativa e i dati dell'accelerometro. Con l'ibutton invece è possibile leggere i valori solamente al termine della prova.
- **Ricarica:** l'MSR consente la ricarica della batteria interna tramite collegamento USB, mentre i data logger Ibutton non hanno una batteria ricaricabile o sostituibile e avranno una certa durata nel tempo.
- **Zone raggiungibili:** il sensore Ibutton risulta molto comodo per essere applicato e misurare i parametri su ogni zona del corpo. Per l'MSR bisogna considerare un possibile impedimento dato dai fili e dalla loro lunghezza, specialmente se si vogliono misurare i parametri di zone molto distanti tra di loro e durante prove in cui il test è chiamato a svolgere un'attività fisica intensa.

- **Dimensione sensore:** le teste dei sensori dell'MSR sono però più sottili rispetto agli Ibutton, e questo può risultare utile in alcuni casi di misurazione come ad esempio inserendoli in guanti o scarpe.
- **Connettività:** grazie alla connessione Bluetooth, i valori registrati dall' MSR possono essere visualizzati in tempo reale su PC o smartphone.

PROVE SVOLTE

Sono state effettuate una serie di prove sempre allo stesso orario della giornata, circa le 10.30 della mattina, per limitare il più possibile le variazioni nei parametri misurati a causa del ciclo circadiano. Per ogni test si è andati a variare la temperatura, la ventilazione oppure il tipo di abbigliamento. Qui di seguito viene riportata la sequenza di test svolti alle diverse temperature. La regolazione della ventola a 1,5 corrisponde all'incirca ad una velocità di 8 km/h.

Prove a 25 gradi:

-Pelle nuda:

- Senza vento;
- Con vento (1,5)

-Con T-shirt:

- Senza vento;
- Con vento (1,5).

Prove a 35 gradi:

-Pelle nuda:

- Senza vento;
- Con vento (1,5)

-Con T-shirt:

- Senza vento;
- Con vento (1,5)

Prove a 15 gradi:

Con T-shirt:

- Senza vento;
- Con vento (1,5)

PUNTI DI MISURAZIONE NORMA EN ISO 9886 2004

Sono stati proposti in passato molti schemi di ponderazione per la determinazione della temperatura media della pelle dai valori di temperatura misurati localmente su diverse zone del corpo, che prevedevano l'utilizzo di un numero di punti di misurazione che andava da 1 a 14. Nella norma EN ISO 9886 [13], affinché le misurazioni vengano fatte in modo sistematico e per rendere i risultati più confrontabili, vengono proposti tre schemi di ponderazione, con 4, 8 o 14 punti di misurazione. Nella fig. 5.9 si possono vedere le posizioni sul corpo dei vari punti.

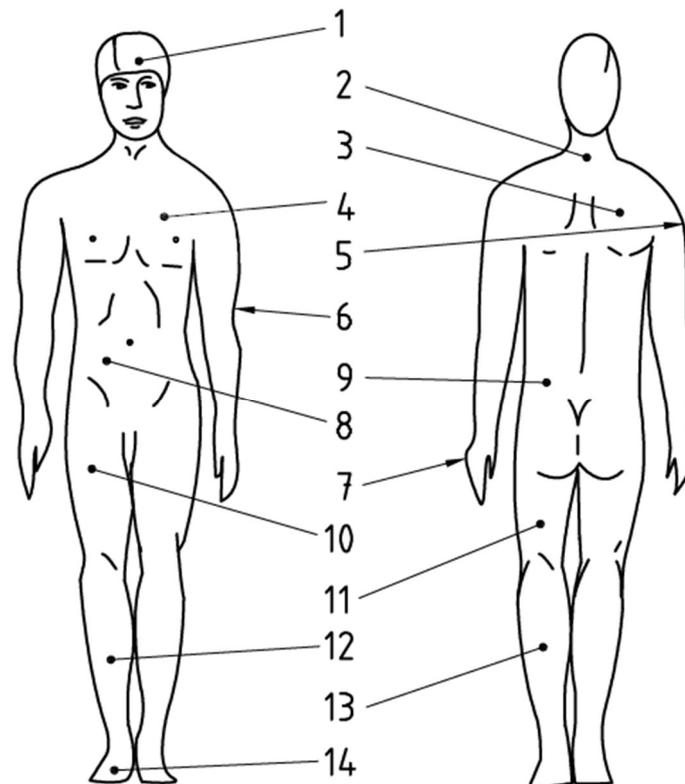


Fig. 5. 9: norma EN ISO 9886 2004

La temperatura media della pelle t_{sk} è calcolata moltiplicando ogni temperatura locale misurata con il coefficiente corrispondente alla relativa area superficiale del corpo.

In ambiente freddo, è raccomandato l'utilizzo di schemi con 8 o 14 punti, con l'aggiunta eventuale di altri punti (dita delle mani, dei piedi).

In ambienti neutri o caldi, può essere utilizzato lo schema a 4 punti, ad eccezione dei casi con alta asimmetria di irraggiamento. Nella tab. 5.1 vengono elencati i vari coefficienti di ponderazione per le diverse aree di misura sul corpo.

	Zona	4 punti	8 punti	14 punti
1	Fronte		0,07	1/14
2	Collo	0,28		
3	Scapola destra	0,28	0,175	1/14
4	Pettorale sinistro		0,175	1/14
5	Braccio destro in alto		0,07	1/14
6	Braccio sinistro in basso		0,07	1/14
7	Mano sinistra	0,16	0,05	1/14
8	Addome destro			1/14
9	Paravertebrali a sinistra			1/14
10	Coscia anteriore destra		0,19	1/14
11	Coscia posteriore sinistra			1/14
12	Stinco destro	0,28		1/14
13	Polpaccio sinistro		0,2	1/14
14	Collo del piede destro			1/14

Tab. 5.1: punti di misurazione norma EN ISO 9886 2004

La temperatura media della pelle viene ottenuta dalla seguente formula:

$$t_{sk} = \sum_i k_i t_{ski} \quad (5.1)$$

dove k_i è il coefficiente relativo alla zona i del corpo.

PUNTI DI MISURAZIONE NEI TEST

Nei test svolti in camera è stata seguita la norma EN ISO 9886 2004 a 4 punti per quanto riguarda le zone di misurazione. Si è utilizzata la tipologia a 4 punti in quanto il data logger MSR 147WD dispone solo di cinque sensori plug-in. Quattro sensori sono stati posizionati nei punti indicati dalla norma, e si è aggiunto un quinto punto di misurazione sul pettorale sinistro insieme ad un ulteriore Ibutton.

Nei test con l'utilizzo di una t-shirt è stato posizionato anche un Ibutton attaccato alla maglietta dal lato interno, per monitorare il microclima tra corpo e indumento. I punti di misurazione dei sensori Ibutton e MSR sono i seguenti:

- Collo;
- Scapola destra ;
- Mano sinistra ;
- Stinco destro;
- Torace sinistro.

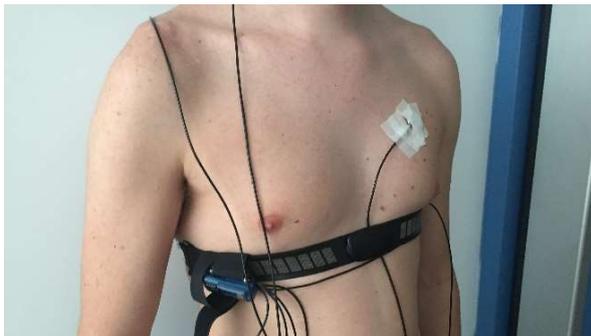


Fig. 5. 10: punto di misurazione sul torace sinistro



Fig. 5. 11: punti di misurazione su collo e scapola destra



Fig. 5. 12: punto di misurazione sulla mano sinistra



Fig. 5. 13: punto di misurazione sullo stinco destro

ROUTINE PRE-TEST

Innanzitutto, la camera climatica viene accesa e regolata ai valori desiderati di temperatura e umidità per il test almeno con un giorno di anticipo, per avere la sicurezza che vengano raggiunte condizioni stabili all'interno. Il test viene svolto sempre intorno alle 10.30 di mattina per evitare le differenze che sarebbero portate dall'effettuarlo a diversi orari della giornata, soprattutto dopo un pasto ad esempio.

La routine precedente all'inizio della prova prevede l'attivazione dei sensori. Questi vengono impostati tutti con frequenze di acquisizione ogni 10 secondi, eccetto quello posizionato nell'ambiente della camera che ha una frequenza di acquisizione di 1 minuto. In seguito il tester viene pesato su una bilancia, e si pesa anche la maglietta nei test in cui è prevista. Si effettuano queste misure per poterle confrontare con i dati al termine della prova e avere così un'indicazione sulla quantità di sudore perso nel test.

A questo punto vengono posizionati i sensori sulle varie zone del corpo. Ogni sensore viene tenuto in posizione utilizzando due cerotti medicali traspiranti. Viene anche indossata la fascia pettorale collegata al cardiofrequenzimetro garmin.

PROTOCOLLO SEGUITO PER IL TEST

Dopo il posizionamento dei sensori il tester può entrare nella camera per iniziare un periodo di acclimatamento di 15 minuti, seduto. Durante le prove viene inoltre annotata la sensazione termica soggettiva della persona attraverso l'utilizzo di un questionario di valutazione che comprende: comfort generale, percezione della temperatura e della sudorazione.

Tempo (min)	Comfort		Sensazione di temperatura							Sensazione di umidità				
	sì	no	molto freddo	freddo	leggermente freddo	neutro	leggermente caldo	caldo	molto caldo	asciutto	leggermente umido	umido	bagnato	sudore che sgocciola
0														
5														
10														
15														
20														
25														
30														
35														
40														
45														
50														
55														
60														Voto

Fig. 5. 14: questionario per il comfort termico

Dopo l'acclimatamento il tester si posiziona sul tapis roulant, e viene scattata una termografia iniziale con la termocamera posta alle spalle della persona. Verranno scattate le termografie e

si chiederanno informazioni per la compilazione del questionario ogni 5 minuti fino al termine della prova.

Nelle prove con ventilazione si accende la ventola, frontale rispetto al tester, prima dell'inizio del test, regolata ad una potenza di 1,5 (circa 8 km/h).

A questo punto ha inizio il test sul tapis roulant che rispetta il seguente protocollo:

- 10 minuti a velocità di 4 km/h;
- 10 minuti a velocità di 6 km/h;
- 10 minuti a velocità di 4 km/h;
- 10 minuti a velocità di 6 km/h con inclinazione del 12%;
- 20 minuti di riposo in piedi.

ROUTINE DOPO IL TEST

Dopo i 60 minuti di test il soggetto può uscire dalla camera climatica. Vengono prima tolti i sensori dal corpo e si può quindi effettuare la pesatura del tester e della maglietta.

A questo punto si possono scaricare i dati su pc dai corrispondenti data loggers attraverso i rispettivi collegamenti usb. Dopo questa operazione i sensori devono essere disattivati per evitare che continuino a registrare dati.

5.2 Risultati delle prove in camera climatica

Vengono di seguito presentati i risultati dei test svolti in camera climatica con l'applicazione di entrambi i sensori sul corpo. Si è scelto di mostrare le differenze tra le prove senza vento e con vento alla stessa temperatura e di presentare i grafici delle zone del corpo dove fossero più visibili le differenze di misurazione tra i due tipi di sensori.

5.2.1 Prove a 25 gradi

- TEMPERATURE MEDIE DEI 4 PUNTI SUL CORPO E ZONE RILEVANTI

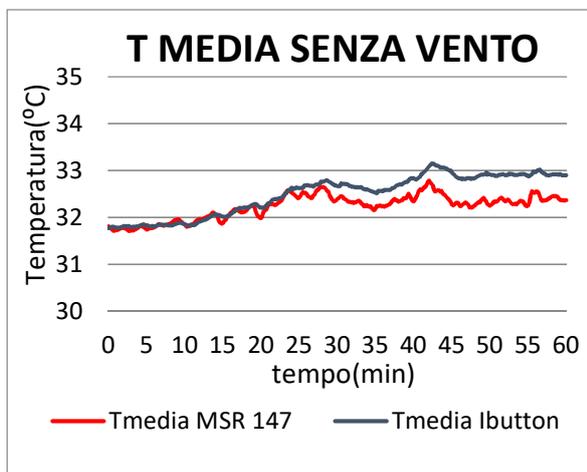


Fig. 5. 15: temperatura media senza vento

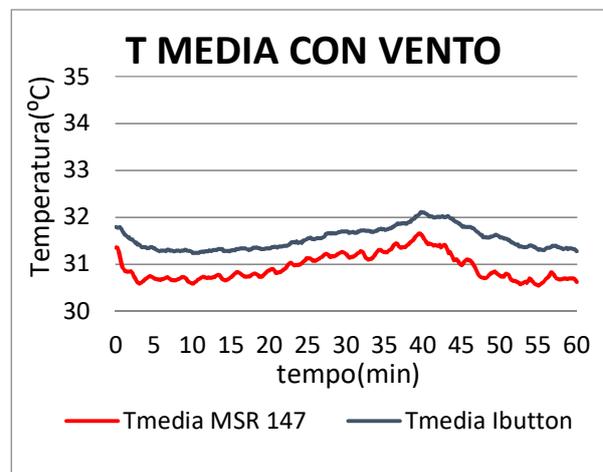


Fig. 5. 16: temperatura media con vento

Per quanto riguarda la temperatura si può vedere che il gap fra i dati rilevati dai due sensori è di bassa entità, e al massimo può raggiungere un grado. Le due curve presentano lo stesso andamento durante la prova ma è l' Ibutton a fornire sempre valori lievemente più alti.

È facilmente visibile l'effetto della ventilazione sui dati di temperatura rilevati. Le curve nelle due prove presentano gli stessi valori di partenza ma se nella prova senza vento ho un aumento della temperatura dall'inizio, in quella con ventilazione ho prima un abbassamento della temperatura superficiale della pelle. L'aumento in quest'ultimo caso si avrà con la fase di massimo sforzo, con il picco finale al 40° minuto. Si può notare la differenza di andamento anche negli ultimi 10 minuti, quelli che corrispondono alla fase di riposo. Nella prima prova i dati rimangono costanti, mentre nella seconda la ventilazione causa un abbassamento della temperatura, complice la sudorazione che si è prodotta nell'ultima fase del test a più alta intensità.

Una zona di misurazione in cui è visibile un gap tra i dati rilevati pressoché costante è la scapola. L'andamento delle curve rimane comunque simile e il divario raggiunge al massimo il grado e mezzo.

Anche qui è facilmente visibile l'effetto della ventilazione con il calo dei valori durante la prova, non presente nella prova senza vento. In questo caso non è presente il picco al massimo sforzo, che risulta però più evidente in altre zone (fig. 5.20), dove si ha un netto aumento dei valori con l'avanzare della prova.

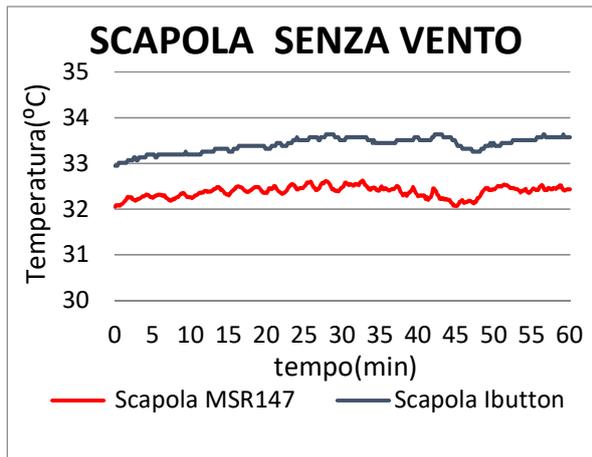


Fig. 5.17: temperatura scapola senza vento

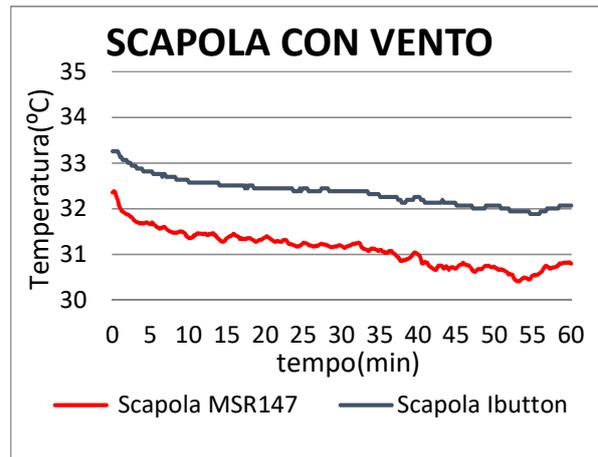


Fig. 5.18: temperatura scapola con vento

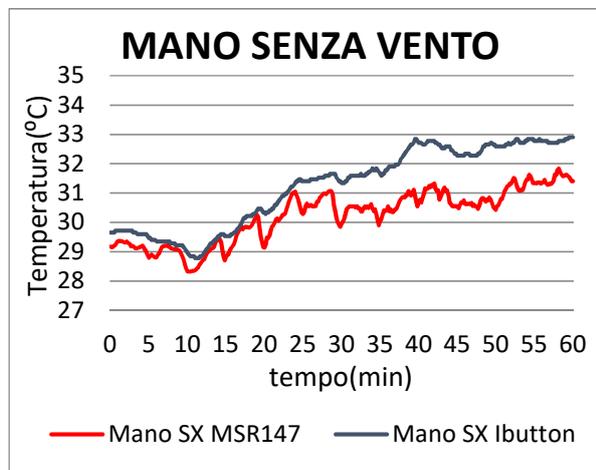


Fig. 5.19: temperatura mano senza vento

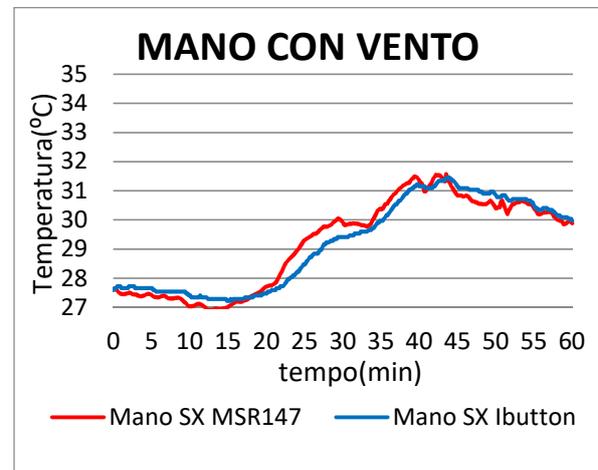


Fig. 5.20: temperatura mano con vento

Si vede nel caso della mano che con la ventilazione si riduce il gap tra i sensori che era più evidente nel caso senza vento.

CONCLUSIONI RICAVALIBILI DALLA PROVE EFFETTUATE

- I valori dell' Ibutton sono maggiori dell' MSR in 5 delle 10 prove effettuate, combaciano in 4 e si ha l'unica eccezione del collo in cui l' MSR da valori più elevati.
- Con la ventilazione si passa da un andamento crescente delle curve a un andamento decrescente, eccetto per la mano e lo stinco in cui l'andamento nelle due prove rimane simile. Questo cambiamento si ha per entrambi i sensori.
- Il gap tra i due sensori risulta poco ampio in tutte le prove. Raggiunge al massimo il grado, e il grado e mezzo solo in pochi istanti.

- UMIDITÀ RELATIVE MEDIE DEI 4 PUNTI SUL CORPO E ZONE RILEVANTI

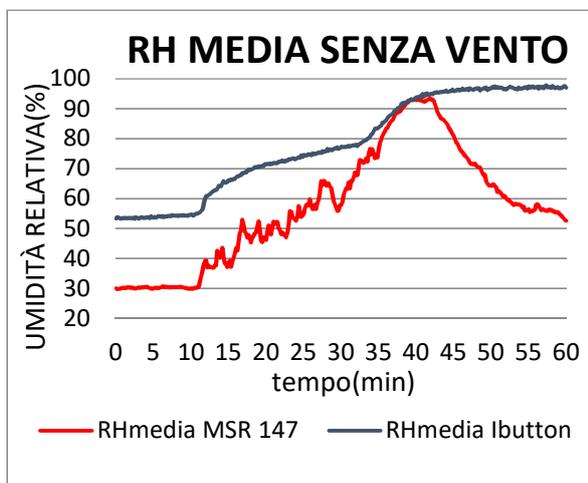


Fig. 5. 21: umidità relativa media senza vento

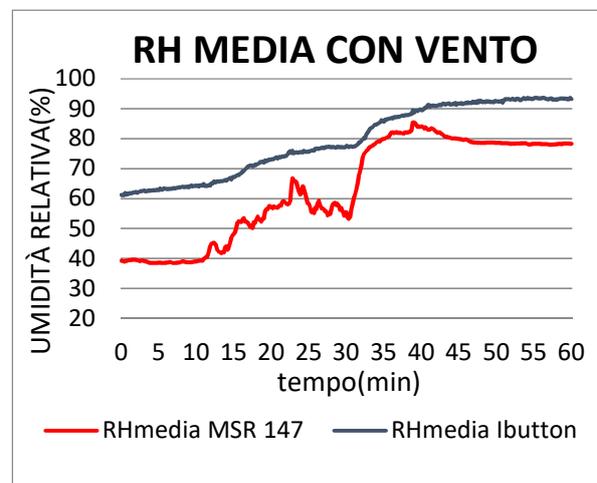


Fig. 5. 22: umidità relativa media con vento

Per le curve relative all'umidità relativa si nota la presenza di un divario tra i dati rilevati dai due tipi di sensori molto più ampio rispetto a quanto accadeva per le temperature. I valori dell'Ibutton sono nettamente maggiori, all'inizio della prova di 20 unità percentuali. Il gap va poi ad annullarsi intorno al 40° minuto dove si ha il picco di sudorazione alla fine del massimo sforzo, e si raggiungono valori prossimi alla saturazione.

Un'altra importante differenza risiede nel fatto che la curva dell'Ibutton risulti sempre in aumento e non presenti mai cali, invece la curva dell'MSR presenta una discesa dopo il picco di attività, più netta nel caso senza vento.

Dalle curve realizzate con i dati ricavati dalle zone del torace sinistro sono ancora più visibili le differenze tra i due sensori e tra le due prove con e senza ventilazione.

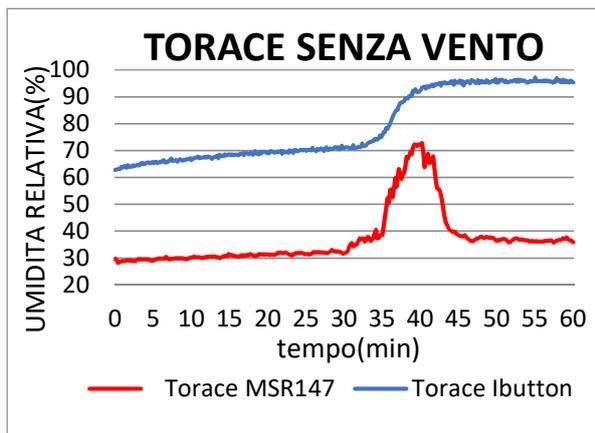


Fig. 5. 23: umidità relativa torace senza vento

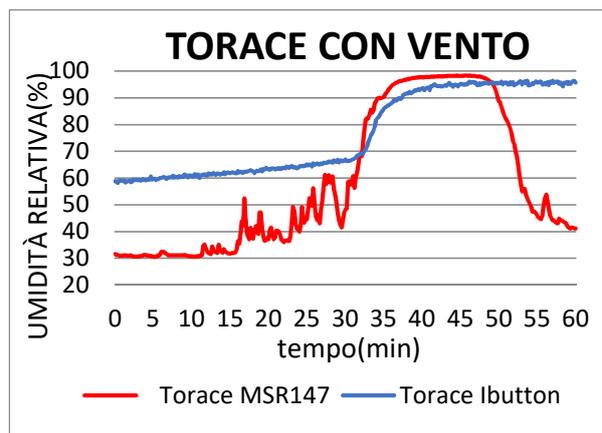


Fig. 5. 24: umidità relativa media con vento

Nella prova senza vento si raggiunge prima del picco un gap tra i valori addirittura del 40%. Il picco dell' MSR è però di entità inferiore rispetto alla prova con vento, cioè dovrebbe esserci una minore produzione di sudore a causa della ventilazione che abbassa la temperatura superficiale della pelle. Dopo il picco, la curva rossa presenta una discesa ripida e un ritorno ai valori iniziali, andamento spiegabile con l'evaporazione del sudore dalla pelle durante la fase di riposo, e il cessare della sua produzione, che raggiungeva i valori più alti nella fase di maggior sforzo fisico dal 30° al 40° minuto. Tutti questi ragionamenti che permettono di evidenziare le differenze nelle prove con vento e senza vento non possono essere svolti per il sensore Ibutton. La curva blu non presenta un picco con una discesa successiva fino ai valori iniziali, ma una volta raggiunti valori prossimi alla saturazione nella fase di maggiore sforzo, permane alla saturazione fino al termine della prova.

Le differenze fra i sensori risultano minori in zone dove si ha una più alta produzione di sudore durante la prova, come lo stinco.

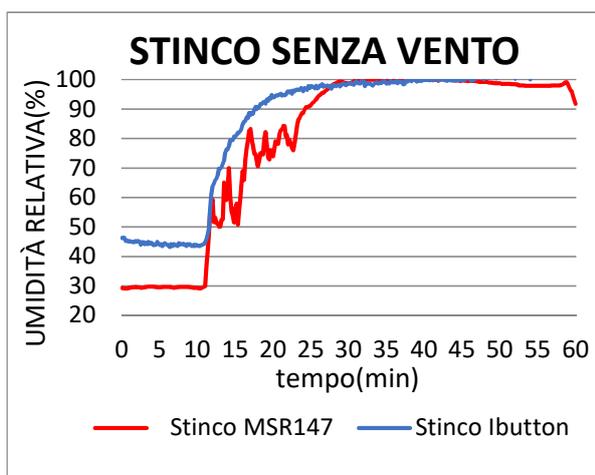


Fig. 5. 25: umidità relativa stinco senza vento

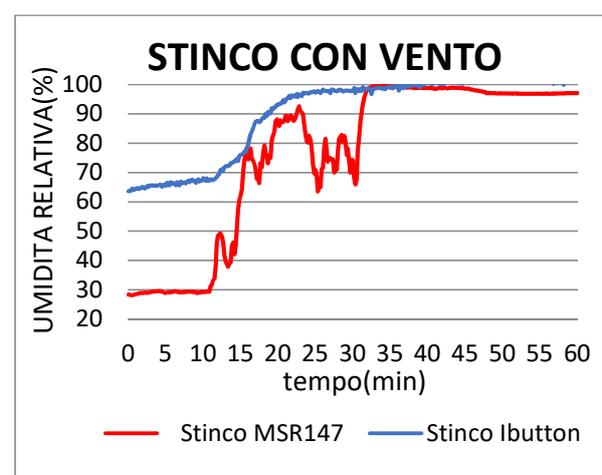


Fig. 5. 26: umidità relativa stinco con vento

In questa zona i valori dei sensori sono molto più vicini, perché si ha molto presto una rapida produzione di sudore, e si raggiunge molto prima la saturazione. L'Ibutton comunque continua a fornire valori più alti nella fase iniziale, e mostra una crescita più ripida dei valori.

CONCLUSIONI RICAVABILI DALLA PROVE EFFETTUATE

- Il sensore Ibutton dà sempre valori più elevati di umidità tranne alcuni picchi forniti dall'MSR raggiunti al massimo sforzo.
- Le curve dell'MSR dopo il picco di umidità ritornano ai valori iniziali. Per l'ibutton, dopo un aumento, i valori di umidità non tornano ai livelli iniziali.
- Le curve dell' Ibutton, oltre a fornire valori iniziali sempre maggiori, presentano anche una crescita più ripida e anticipata rispetto alle curve dell' MSR.
- Ho eccezioni per l'MSR per scapola e mano nei test con ventilazione e per lo stinco in entrambi i test. In questi casi la curva dell'MSR, dopo aver raggiunto valori prossimi alla saturazione, non mostra un ritorno ai valori iniziali. Per scapola e mano, dato che nelle prove senza ventilazione le curve mostrano un andamento discendente dopo il picco, questa differenza può essere dovuta a un posizionamento differente del foro per il sensore di umidità a contatto con la pelle. Per lo stinco, visti i valori prossimi alla saturazione raggiunti quasi subito in entrambe le prove, la grande quantità di sudore non riesce ad evaporare dopo il picco, dunque i valori di umidità relativa rimangono elevati.

5.2.2 Prove a 35 gradi

- TEMPERATURE MEDIE DEI 4 PUNTI SUL CORPO E ZONE RILEVANTI

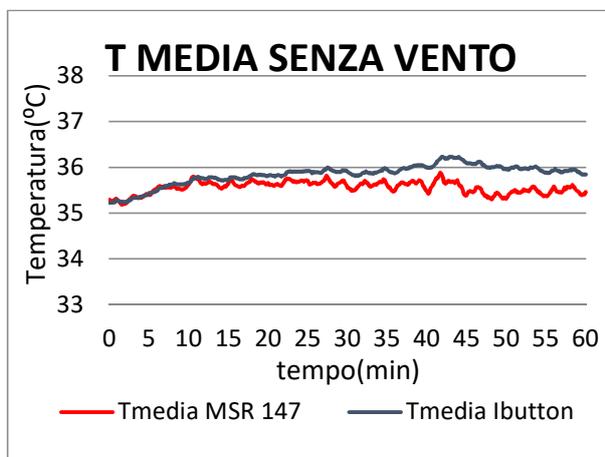


Fig. 5. 27: temperatura media senza vento

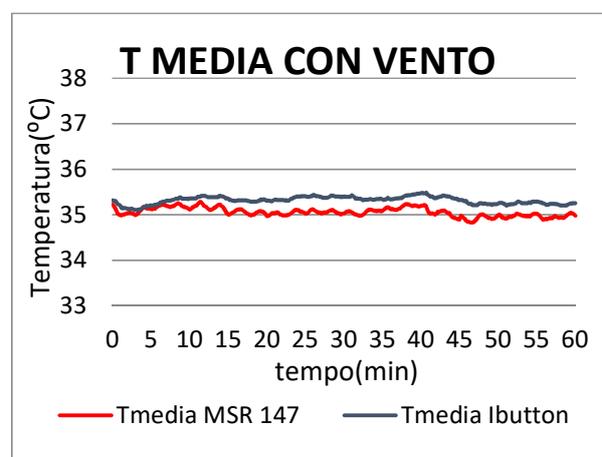


Fig. 5. 28: temperatura media con vento

Dai grafici delle temperature medie della prova a più alta temperatura si ricava subito che il distacco tra i valori forniti dalle due apparecchiature si riduce ulteriormente rispetto alla prova a 25 gradi. Ho inoltre un andamento pressoché costante dei valori durante i 60 minuti, specialmente nella prova senza vento. Questo vuol dire che la temperatura superficiale del corpo non viene influenzata dalle diverse fasi di attività fisica del test, neanche da quella a più alta intensità, per il fatto che la pelle si trova già ad una temperatura alta dopo la sola fase di acclimatamento. L'Ibutton comunque continua a fornire valori più alti dell' MSR, anche se il divario si è ridotto.

L'effetto della ventilazione nell'abbassamento dei valori è ancora visibile anche se di più lieve entità rispetto alla prova a 25 gradi.

Una delle zone dove vi è maggiore distacco tra le curve è il torace, con gap massimi di 1 grado, mentre per la zona del collo si può vedere una corrispondenza di valori quasi perfetta.

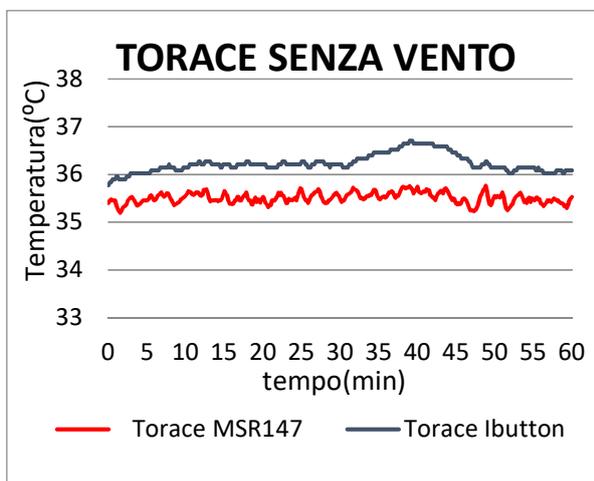


Fig. 5. 29: temperatura torace senza vento

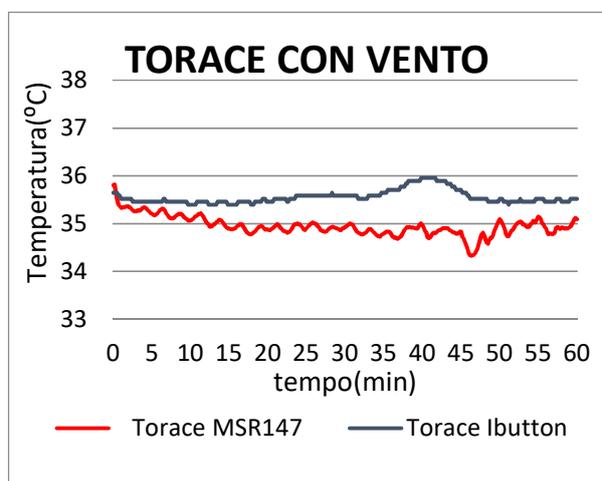


Fig. 5. 30: temperatura torace con vento

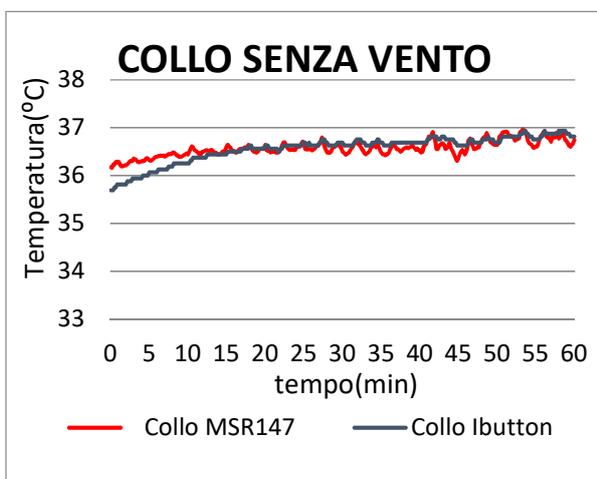


Fig. 5. 31: temperatura collo senza vento

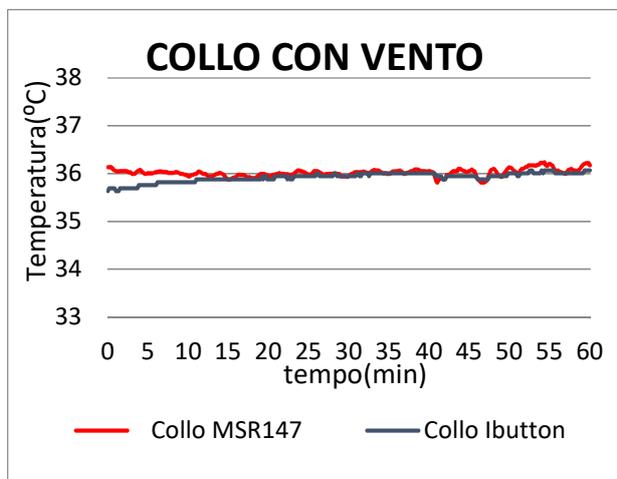


Fig. 5. 32: temperatura collo con vento

CONCLUSIONI RICAVALIBILI DALLA PROVE EFFETTUATE

- Ho valori maggiori per l'Ibutton in 7 delle 10 prove effettuate a 35 gradi, per le altre prove le curve si sovrappongono in modo quasi perfetto.
- Ho gap tra i valori misurati dai sensori inferiori ad una temperatura più alta della pelle.
- Ho ridotte variazioni di temperatura superficiale durante il test effettuato ad una temperatura ambientale più elevata.
- Non ho andamenti decrescenti durante le prove senza vento, come accadeva nelle prove a 25 gradi per torace, scapola e collo.

- UMIDITÀ RELATIVE MEDIE DEI 4 PUNTI SUL CORPO E ZONE RILEVANTI

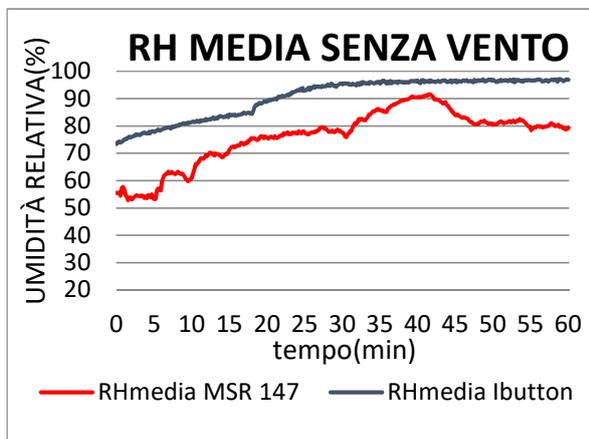


Fig. 5. 33: umidità relativa media senza vento

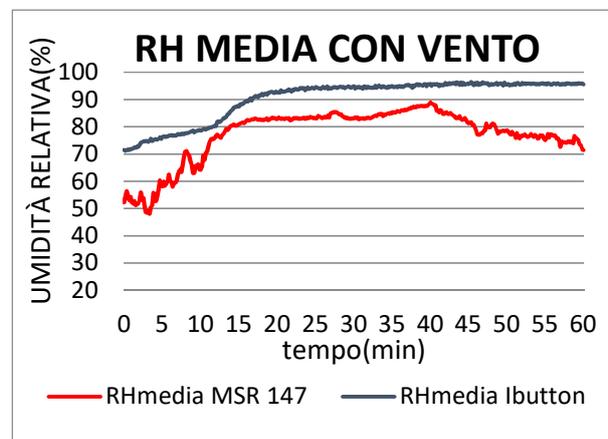


Fig. 5. 34: umidità relativa media con vento

Come era prevedibile, si ha una traslazione verso l'alto dei valori di umidità relativa rispetto alla prova a minore temperatura, con uno spostamento maggiore però dei valori per l'MSR. In questo caso, avendo maggiore produzione di sudore a queste alte temperature, il gap tra i sensori si è ridotto. È ancora visibile per l' MSR il picco al 40° minuto, e la seguente riduzione dei valori, che però non ritornano ai valori iniziali, ma rimangono più elevati. Come nelle prove precedenti l'Ibutton ha invece un andamento sempre crescente, anche dopo il termine dell'attività fisica.

Il picco dell' MSR raggiunge lo stesso valore sia con ventilazione che senza ventilazione, mentre nella prova a 25 gradi si aveva una diminuzione di circa dieci unità percentuali nella prova con vento.

Una zona dove si riscontrano grandi differenze tra i valori delle curve è quella del collo.

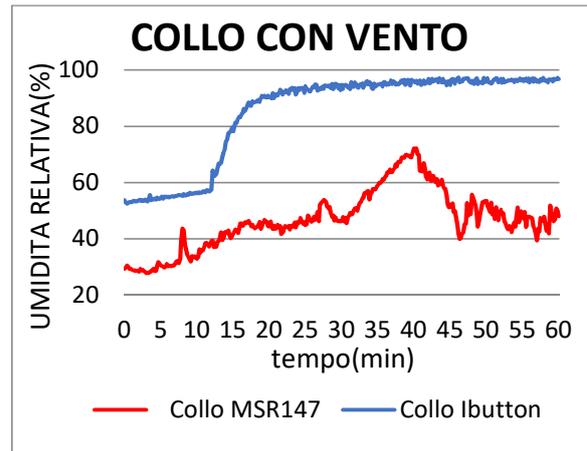
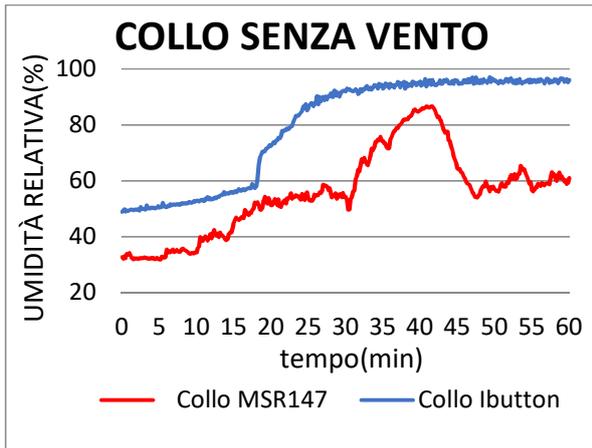


Fig. 5. 35: umidità relativa collo senza vento **Fig. 5. 36: umidità relativa collo con vento**

Si può notare in questa zona la salita anticipata e quasi verticale dei valori per l' MSR. L' Ibutton raggiunge la saturazione molto in fretta e dunque si arrivano ad avere dei gap fra le curve anche di 50 unità percentuali. Tra le due prove si vede la diminuzione del picco massimo dell' MSR.

Una zona di misurazione invece con sudorazione molto alta già dall' inizio dei test, che fornisce valori dei due sensori molto vicini, è quella della mano.

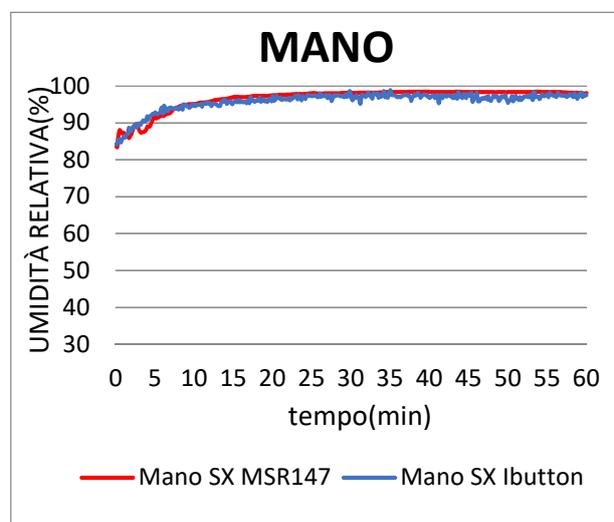
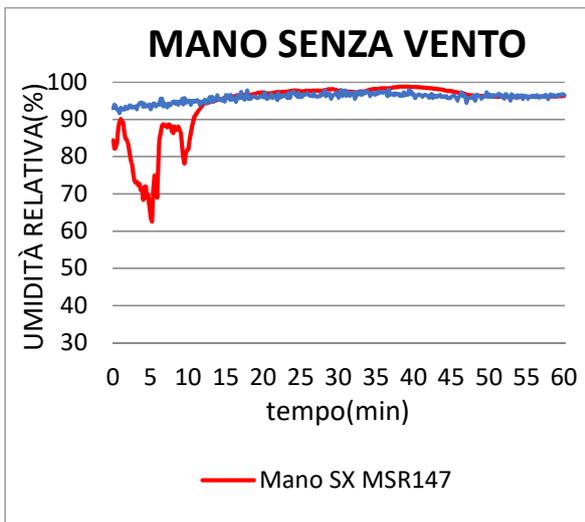


Fig. 5. 37: umidità relativa mano senza vento **Fig. 5. 38: umidità relativa mano con vento**

I valori sono alti fin da subito e dopo 10 minuti si stabilizzano al 95% per entrambe le prove.

CONCLUSIONI RICAVABILI DALLA PROVE EFFETTUATE

- Come accadeva per le temperature, anche per l'umidità relativa le differenze fra i valori dei due sensori risultano ridotte rispetto alle prove precedenti. In questo caso però il gap rimane comunque elevato, molto ampio in zone come il collo e il torace.
- I sensori forniscono pressoché gli stessi valori nelle zone a più alta sudorazione, come la mano e lo stinco. Entrambe le curve raggiungono la saturazione e mantengono valori costanti fino al termine della prova.
- Per l' MSR si continuano ad avere valori alti anche dopo il picco al 40° minuto.

5.2.3 Prove a 25 gradi con t-shirt

- TEMPERATURE MEDIE DEI 4 PUNTI SUL CORPO E ZONE RILEVANTI

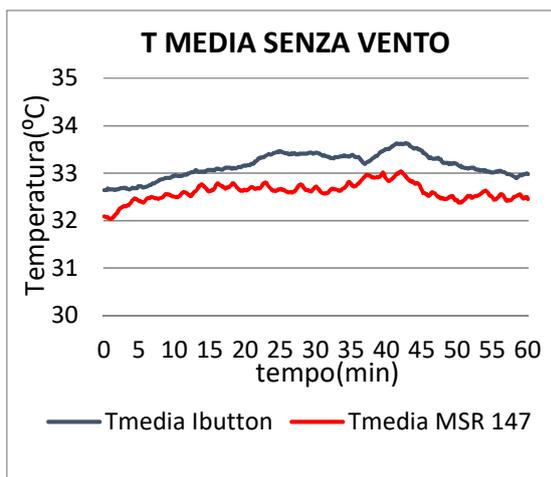


Fig. 5. 39: temperatura media senza vento a 25 gradi

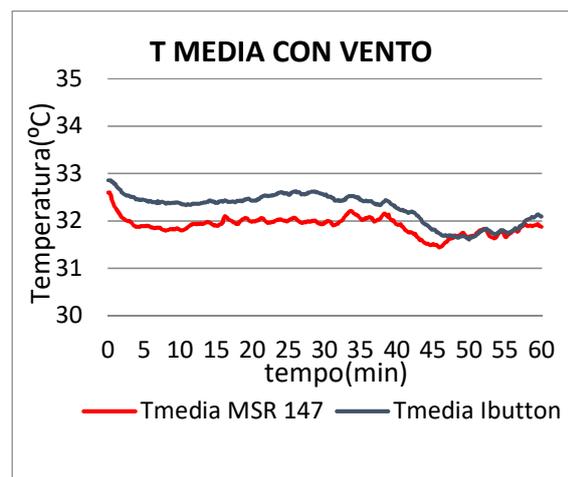


Fig. 5. 40: temperatura media con vento a 25 gradi

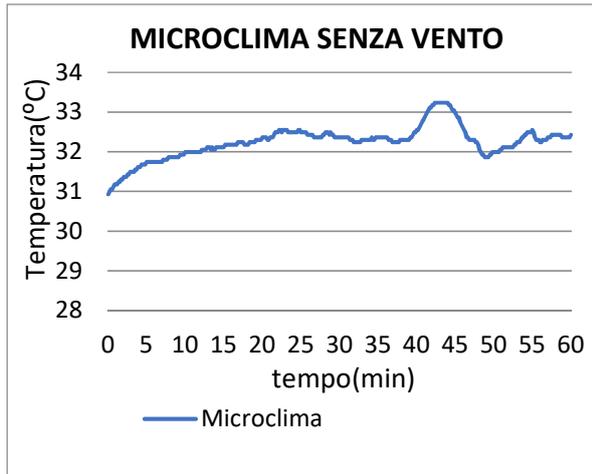


Fig. 5. 41: microclima senza vento a 25 gradi

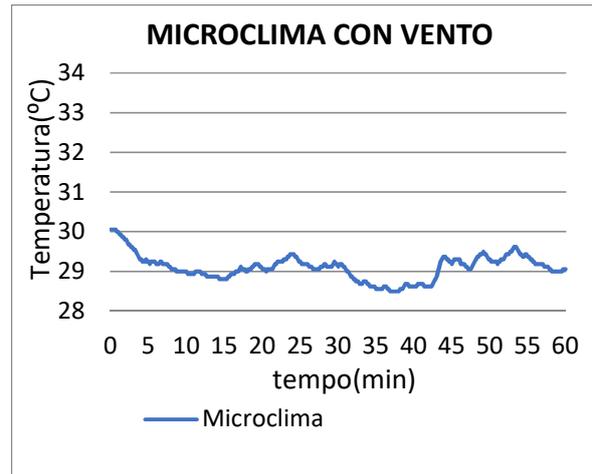


Fig. 5. 42: microclima con vento a 25 gradi

Per quanto riguarda la zona del microclima, dove si utilizza un sensore Ibutton attaccato sulla parte interna della maglietta, la misura si differenzia dalle altre in quanto il sensore risulta qui esposto all'aria e non a diretto contatto con la pelle. Chiaramente la temperatura risulterà inferiore rispetto a quella misurata con il sensore più vicino che è quello del torace, ma grazie a questa misura si rende molto evidente l'effetto della ventilazione frontale. Il vento infatti fa abbassare i valori della prova già dall'inizio di un grado, con un gap massimo di 3 gradi al 40° minuto, dove ci sarebbe il picco nella prova senza vento per il massimo sforzo, il quale viene a mancare totalmente nella seconda prova. La prova con ventilazione si differenzia anche perché non vi è la continua salita dei valori come accade nella prova senza vento, si ha invece un abbassamento della temperatura iniziale che si mantiene poi a valori pressoché costanti.

CONCLUSIONI RICAVABILI DALLA PROVE EFFETTUATE

Si può notare un lieve innalzamento della temperatura rispetto al caso dei test a pelle nuda. Il gap tra i sensori rimane comunque di bassa entità e si conferma la diminuzione di circa mezzo grado passando dalla prova con ventilazione a quella senza ventilazione. In questa prova è stato possibile notare il grande effetto della ventilazione sui valori di temperatura del microclima, con una diminuzione che arriva fino a 3 gradi al massimo sforzo.

- UMIDITÀ RELATIVE MEDIE DEI 4 PUNTI SUL CORPO E ZONE RILEVANTI

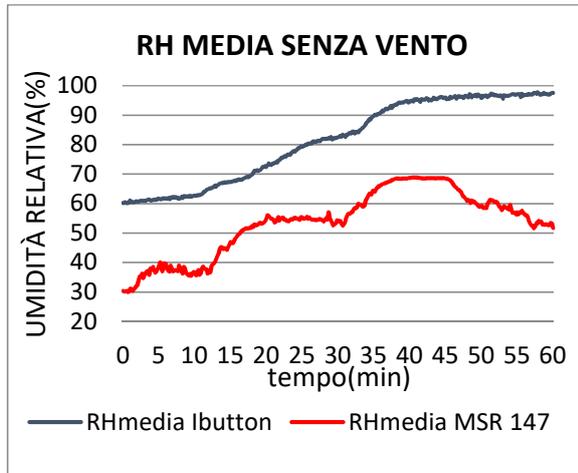


Fig. 5. 43: umidità relativa media senza vento a 25 gradi

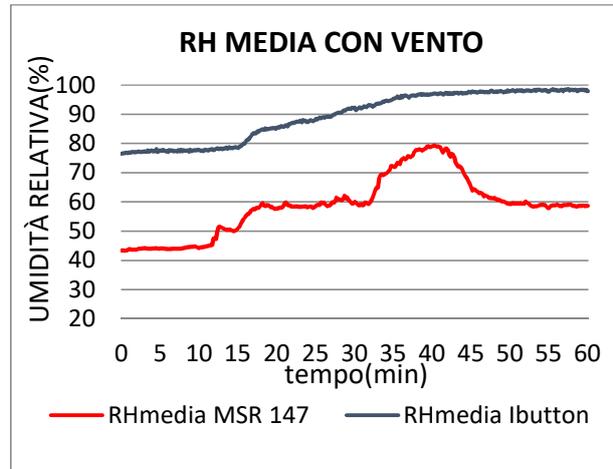


Fig. 5. 44: umidità relativa media con vento a 25 gradi

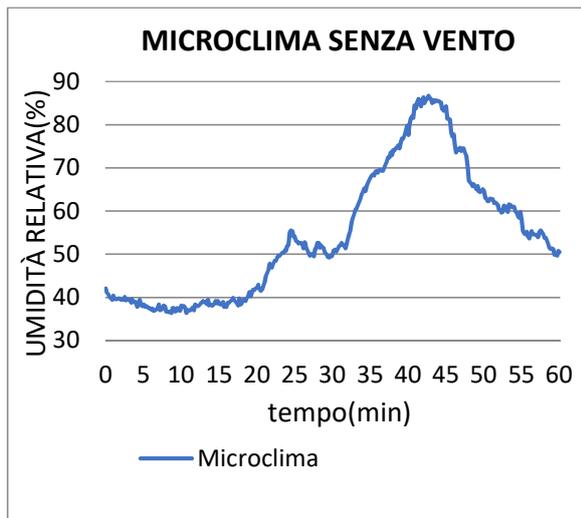


Fig. 5. 45: microclima senza vento a 25 gradi

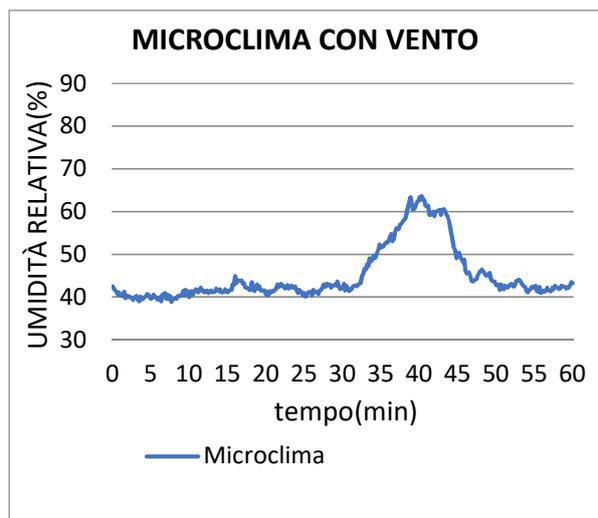


Fig. 5. 46: microclima con vento a 25 gradi

Come accadeva già per le temperature, vediamo una grande differenza tra i valori del microclima delle due prove. All'inizio per entrambi ho valori che non si discostano molto da quelli ambientali impostati all'interno della camera. Però nel caso senza vento si evidenzia una salita più rapida e soprattutto si raggiunge un valore molto più alto per quanto riguarda il picco al 40° minuto. Anche per la sudorazione è dunque facilmente visibile l'effetto della ventilazione frontale, qui ancora più evidente in quanto l'apertura del sensore che deve rilevare il grado di umidità non si trova chiusa a contatto con la pelle. Per questo è possibile vedere anche la rapida discesa dei valori dopo il picco massimo.

CONCLUSIONI RICAVABILI DALLA PROVE EFFETTUATE

Il gap tra i sensori risulta più evidente in queste prove rispetto al test a pelle nuda. In questa situazione l' MSR non raggiunge i valori di umidità relativa dell' Ibutton neanche in corrispondenza del picco al massimo sforzo. La ventilazione ha poco effetto sui valori medi mentre ha una grande influenza sui valori relativi al microclima, evidenti soprattutto per l'abbassamento del picco di sudorazione di circa 25 unità percentuali.

5.2.4 Prove a 35 gradi con t-shirt

- TEMPERATURE MEDIE DEI 4 PUNTI SUL CORPO E ZONE RILEVANTI

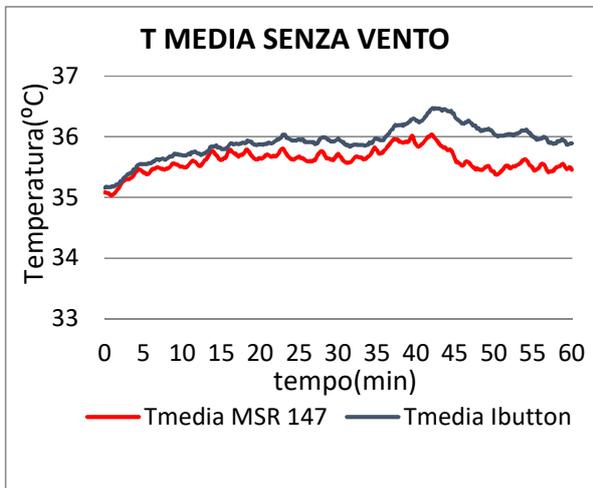


Fig. 5. 48: temperatura media senza vento a 35 gradi

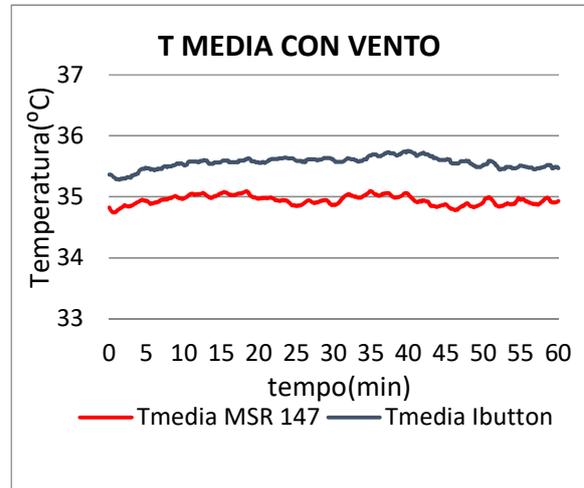


Fig. 5. 48: temperatura media con vento a 35 gradi

Si conferma ad alta temperatura la lieve differenza fra i valori dei due sensori, anche con la presenza dell' abbigliamento. I valori medi risultano poco influenzati dalla presenza della t-shirt e l'ibutton continua a prevalere come accadeva nel caso a pelle nuda.

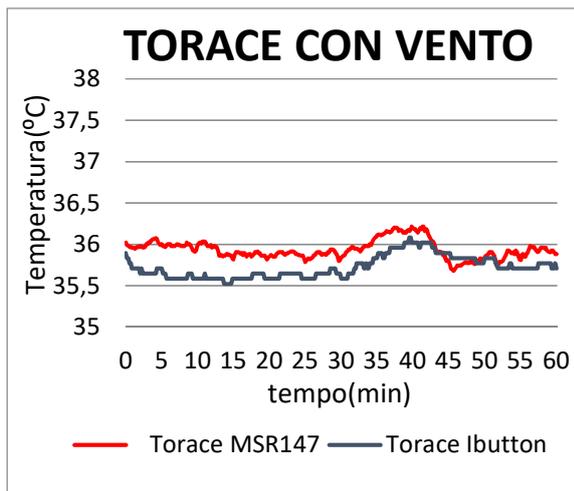
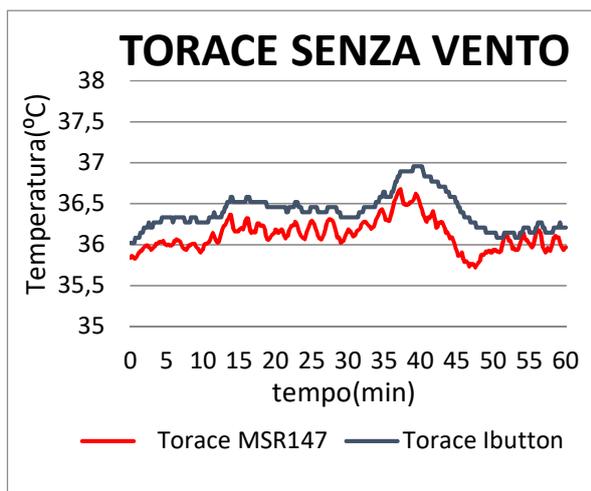


Fig. 5. 49: torace senza vento a 35 gradi

Fig. 5. 50: torace con vento a 35 gradi

Una delle zone che poteva essere più influenzata dalla presenza dello strato di abbigliamento è quella del torace. Vediamo invece un andamento pressoché identico al test a pelle nuda nella prova senza vento, si ha invece un leggero cambiamento nei valori del test con la ventilazione, che rappresenta uno dei pochi casi in cui l'Ibutton offre valori leggermente inferiori rispetto all' MSR.

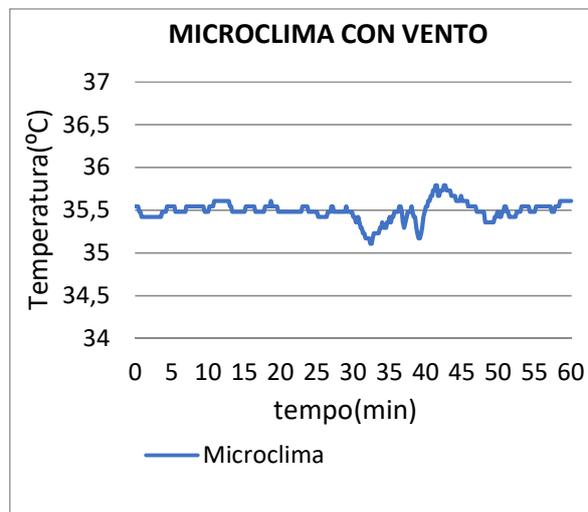
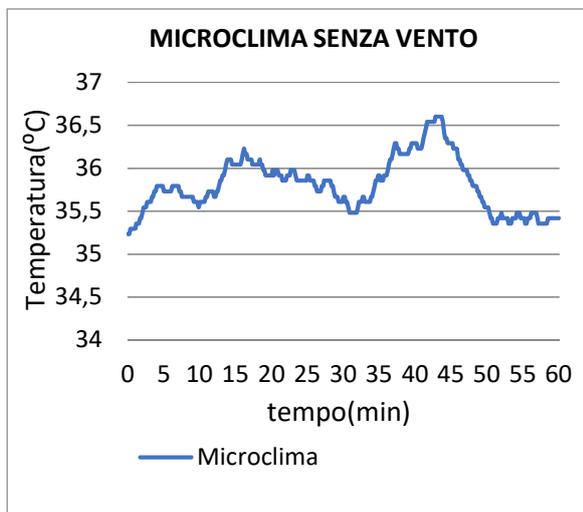


Fig. 5. 51: microclima senza vento a 35 gradi

Fig. 5. 52: microclima con vento a 35 gradi

Ad alta temperatura si hanno meno variazioni per quanto riguarda le temperature registrate nel microclima. I valori si discostano di poco dai 36 gradi durante il test, ma la grande differenza rispetto alle prove a più bassa temperatura è l'assenza dell'effetto di abbassamento causato dalla ventilazione che era molto rilevante a 25 e gradi.

CONCLUSIONI RICAIVABILI DALLA PROVE EFFETTUATE

Si può concludere dai dati ottenuti che a più alte temperature ambientali si registrano i minori gap tra le curve dei due sensori, sia nelle singole zone di misura sulla pelle che nella zona del microclima. Ad alta temperatura si avranno anche le minori variazioni delle curve durante il corso della prova, in quanto, partendo già da alti valori, le temperature saranno meno influenzate dalle fasi della prova.

- UMIDITÀ RELATIVE MEDIE DEI 4 PUNTI SUL CORPO E ZONE RILEVANTI

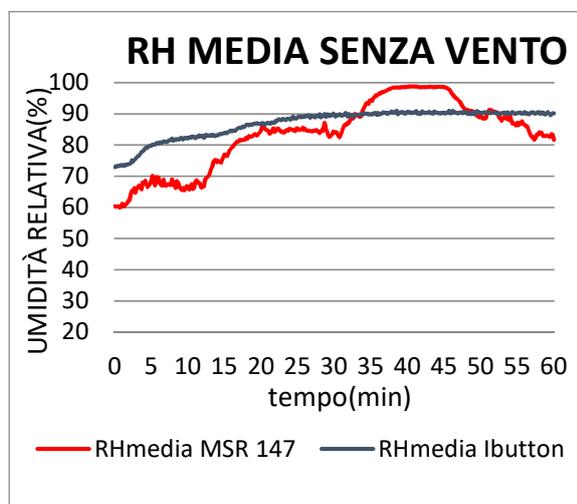


Fig. 5. 53: umidità relativa senza vento a 35 gradi

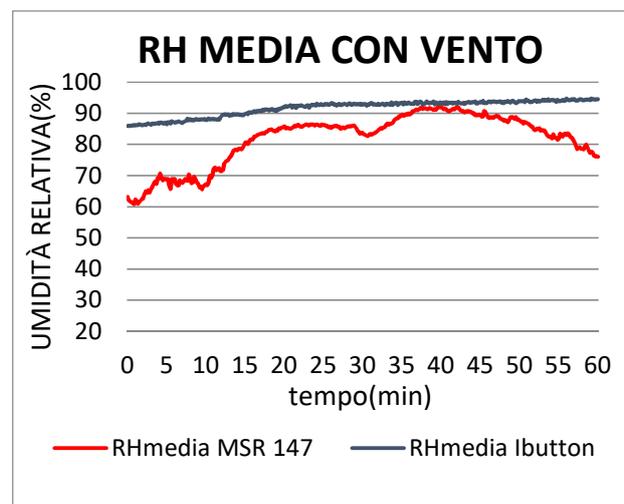


Fig. 5. 54: umidità relativa con vento a 35 gradi

Come già è stato rilevato per le temperature, anche per le umidità relative si ricavano i più piccoli valori di gap tra le curve, anche in presenza di abbigliamento. Dopo i primi 15 minuti si vede un andamento costante dell' Ibutton, mentre si ha un picco con successiva discesa nell' MSR, con la saturazione però solo nel caso senza vento. La zona dove si riscontrano ancora valori elevati di gap è quella del torace.

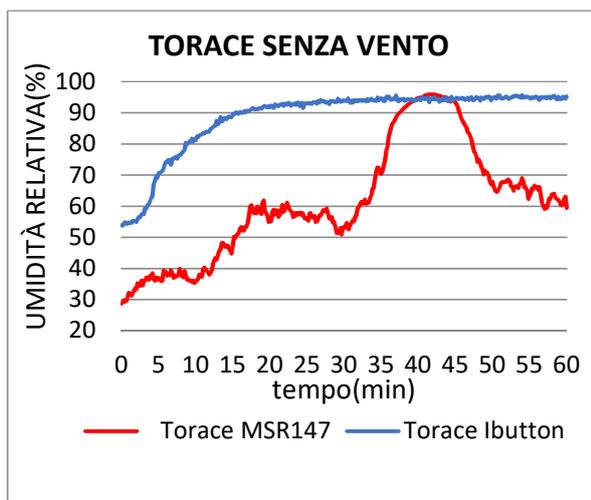


Fig. 5.55: umidità relativa torace senza vento a 35 gradi

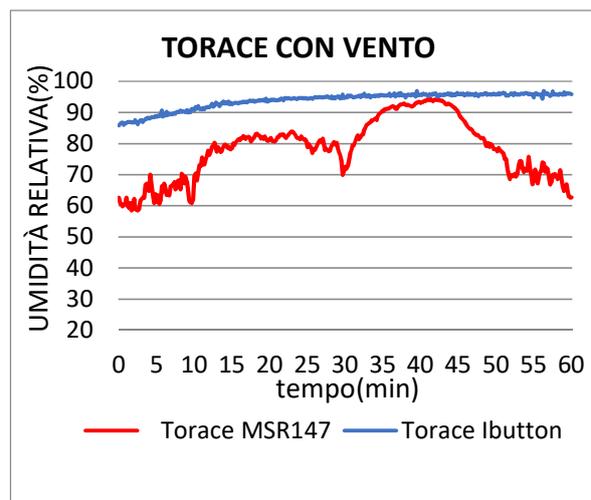


Fig. 5.56: umidità relativa torace con vento a 35 gradi

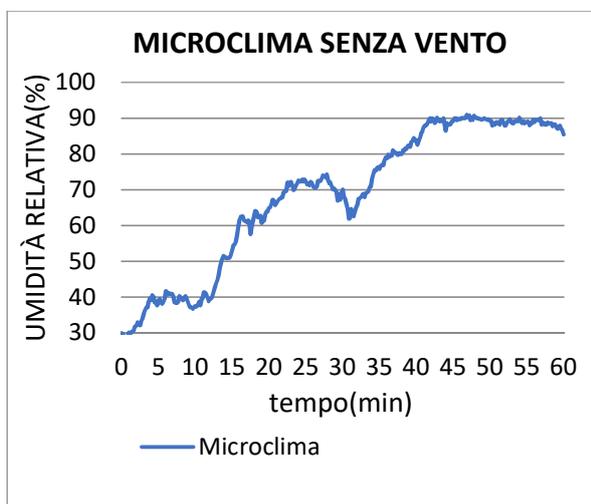


Fig. 5.57: microclima senza vento a 35 gradi

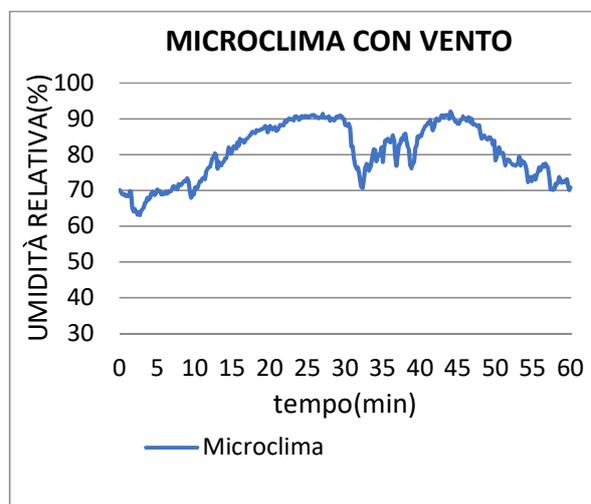


Fig. 5.58: microclima con vento a 35 gradi

Per il microclima in questi due test abbiamo andamenti molto diversi, anche in relazione alle prove alle altre temperatura. Manca infatti un picco evidente al 40° minuto e una successiva discesa dei valori nella prova senza ventilazione.

CONCLUSIONI RICAVABILI DALLA PROVE EFFETTUATE

Come nelle prove a pelle nuda, i dati confermano che le minori differenze fra i valori dei sensori si vanno a registrare a più alte temperature. I valori dell' Ibutton si stabilizzano prossimi ai livelli di saturazione già dopo pochi minuti ma sono raggiunti in molte zone da quelli dell' MSR.

5.2.5 Prove a 15 gradi con t-shirt

- TEMPERATURE MEDIE DEI 4 PUNTI SUL CORPO E ZONE RILEVANTI

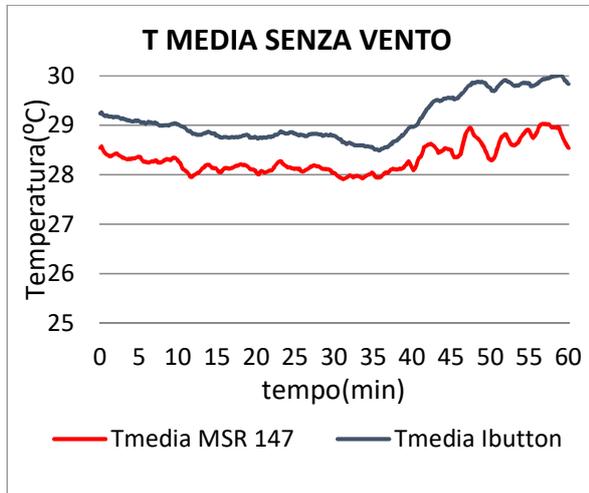


Fig. 5. 59: temperatura media senza vento a 15 gradi

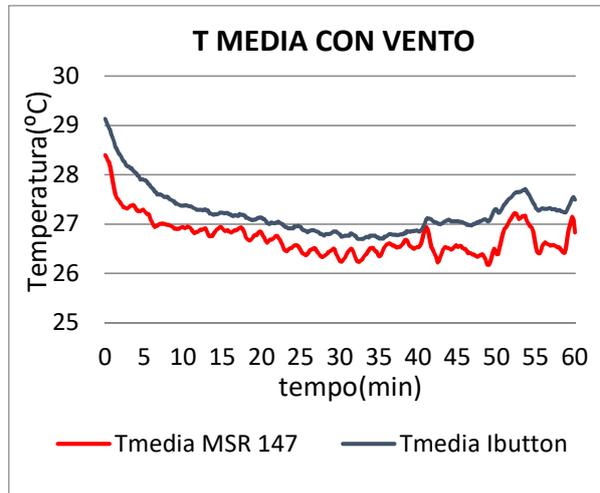


Fig. 5. 60: temperatura media con vento a 15 gradi

In queste che sono state le prove effettuate a più bassa temperatura si può vedere un grande abbassamento dei valori rispetto alle prove precedenti. Un importante cambiamento da evidenziare è però l'effetto che ha la ventilazione sui valori misurati sulla pelle. Si ha a questa temperatura la più grande riduzione nei valori medi di temperatura con la prova con vento rispetto a quella senza vento, con un abbassamento che raggiunge in certi punti anche i 4 gradi.

Anche a questa temperatura l'Ibutton continua a fornire valori lievemente maggiori.

Per quasi tutte le zone di misura i valori di temperatura non sono influenzati dalle fasi della prova, e presentano un andamento leggermente decrescente, con valori finali identici o di poco inferiori rispetto a quelli iniziali, come si può notare dalle curve per la scapola

L'unica eccezione è rappresentata dalla mano. La temperatura di questa zona è l'unica influenzata dalle diverse fasi del test, e va a crescere dopo il periodo di massimo sforzo.

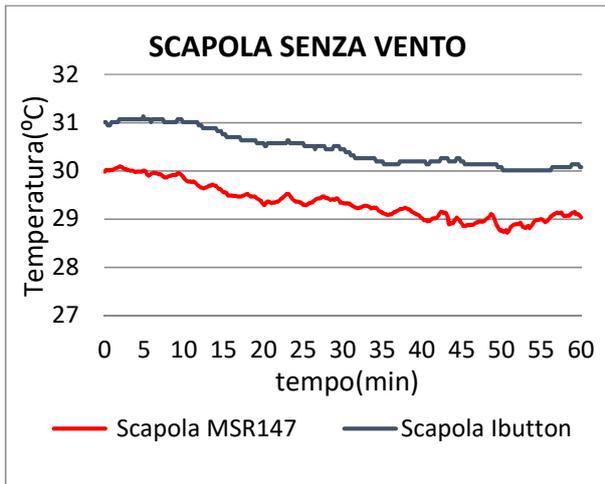


Fig. 5. 61: temperatura scapola senza vento a 15 gradi

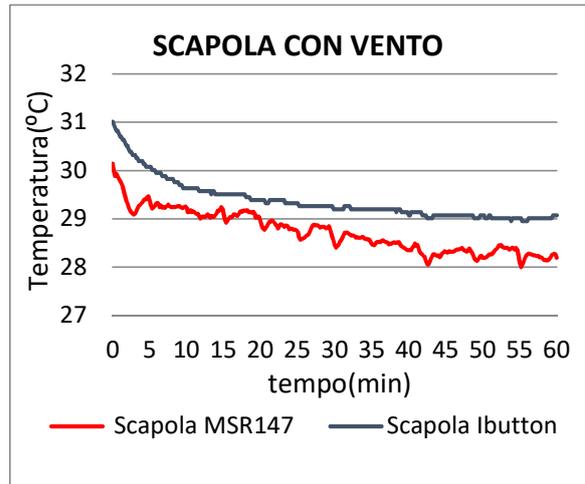


Fig. 5. 62: temperatura scapola con vento a 15 gradi

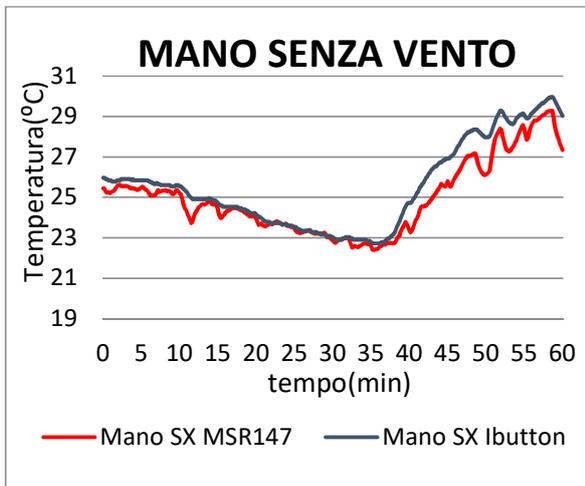


Fig. 5. 64: temperatura mano senza vento a 15 gradi

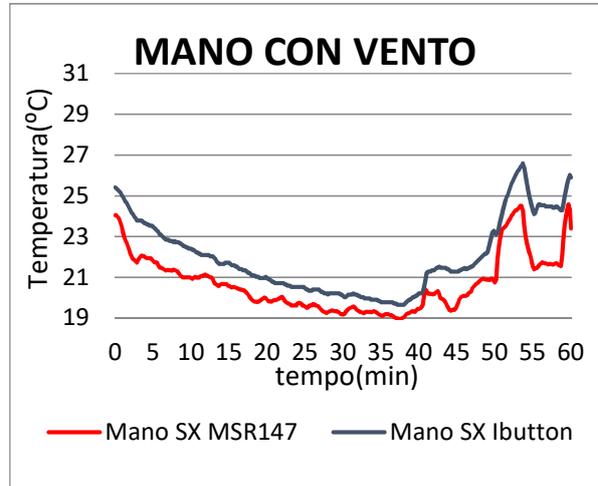


Fig. 5. 64: temperatura mano con vento a 15 gradi

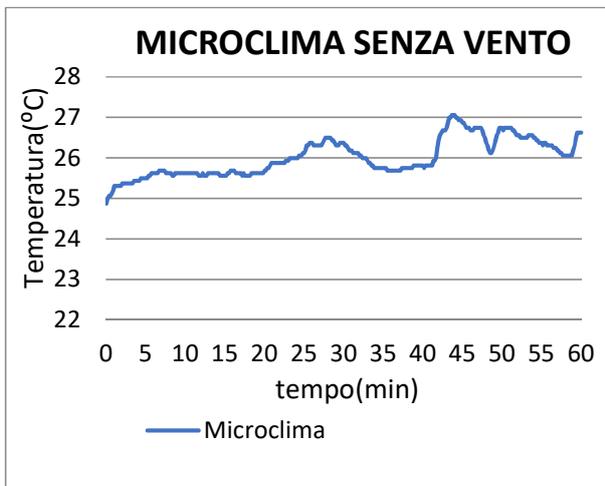


Fig. 5. 65: microclima senza vento a 15 gradi

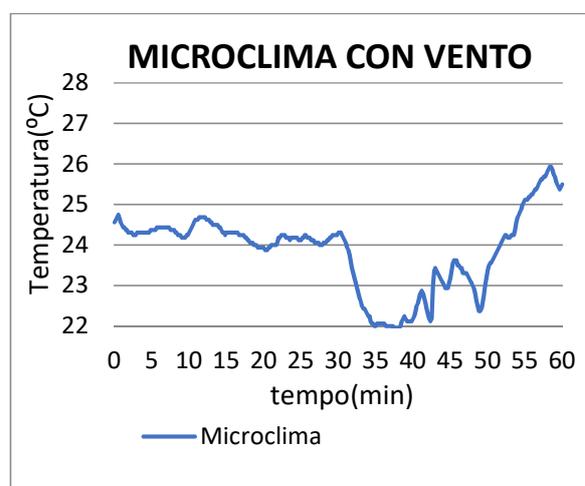


Fig. 5. 66: microclima con vento a 15 gradi

Ho una grande differenza fra gli andamenti per il microclima a questa temperatura. Una caratteristica non rilevabile in nessun' altra prova è la discesa a picco dei valori al 35° minuto nella prova con ventilazione, in cui raggiungo una differenza di valori rispetto alla prova senza ventilazione di addirittura 4 gradi.

CONCLUSIONI RICAVABILI DALLA PROVE EFFETTUATE

Possedendo a questo punto i dati delle misurazioni di temperatura a tre diverse temperatura dal caldo al freddo, si può affermare che tra i due tipi di sensori, nel caso di un'applicazione sulla pelle come è stata descritta precedentemente, sarà l'Ibutton a fornire sempre valori di temperatura maggiori, con gap massimo di 1 grado.

- UMIDITÀ RELATIVE MEDIE DEI 4 PUNTI SUL CORPO E ZONE RILEVANTI

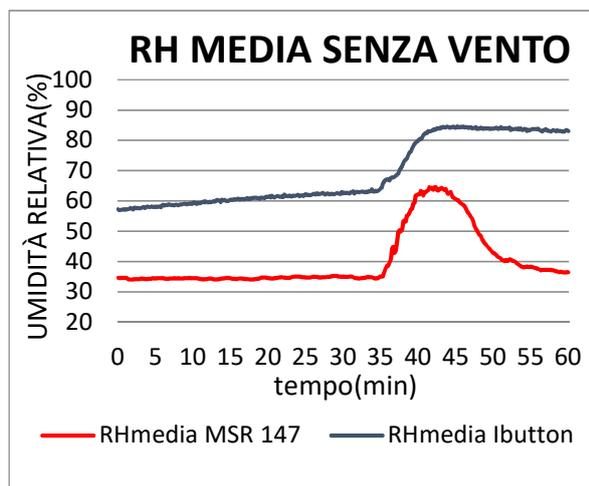


Fig. 5. 67: umidità relativa media senza vento a 15 gradi

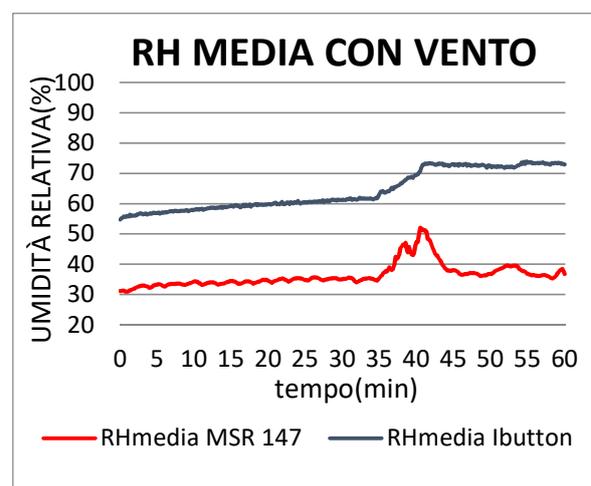


Fig. 5. 68: umidità relativa media con vento a 15 gradi

Come era prevedibile in questa prova a bassa temperatura si registrano i valori più bassi in media di umidità relativa. Si continua ad avere il prevalere dei valori dell'Ibutton, e inoltre in questo caso, dove non si raggiungono valori alti di umidità durante la prova, neanche con il picco al 40° minuto la curva dell' MSR riesce a raggiungere quella dell' Ibutton. Il vento in questi test ha influenza solo dalla fase di massimo sforzo della prova, e abbassa i valori di entrambi i sensori di circa 10 unità percentuali.

In zone come la scapola e il torace si verifica un evidente cambiamento negli andamenti delle curve tra le due prove.

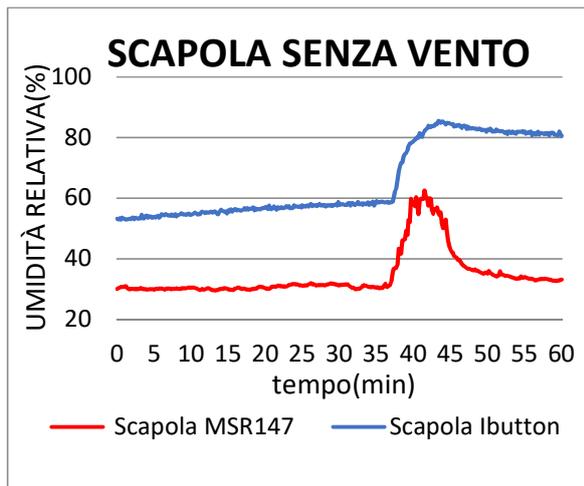


Fig. 5. 69: umidità relativa scapola senza vento a 15 gradi

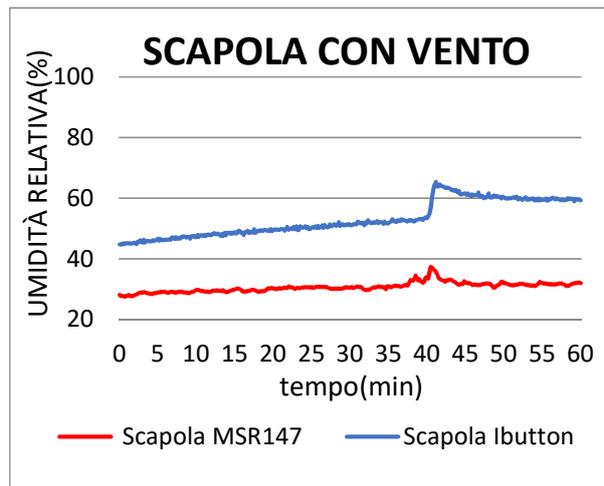


Fig. 5. 70: umidità relativa scapola con vento a 15 gradi

Si può vedere in questo caso il quasi annullamento del picco di sudorazione per l'MSR, e una grande riduzione per quanto riguarda l'Ibutton per i valori dopo la fase di massimo sforzo.

La zona dello stinco invece è meno influenzata direttamente dalla ventola posta di fronte al tester, e mostra valori elevati e andamenti simili a quelli delle prove precedenti, ma con aumenti delle curve che avvengono a tempi superiori.

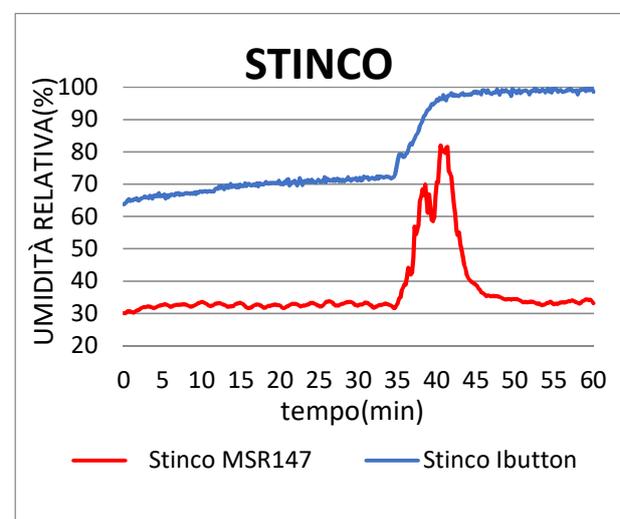
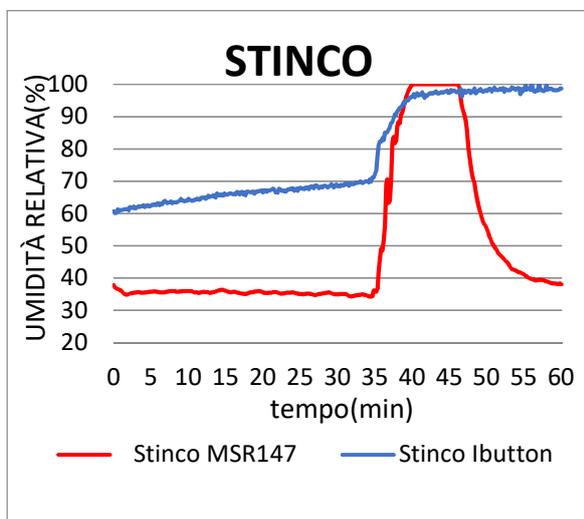


Fig. 5. 71: umidità relativa stinco a 15 gradi

Fig. 5. 71: umidità relativa stinco a 15 gradi

Si raggiungono per lo stinco valori prossimi alla saturazione solo durante la fase di massimo sforzo, mentre nelle altre prove si avevano valori molto elevati già dopo i primi 10 minuti.

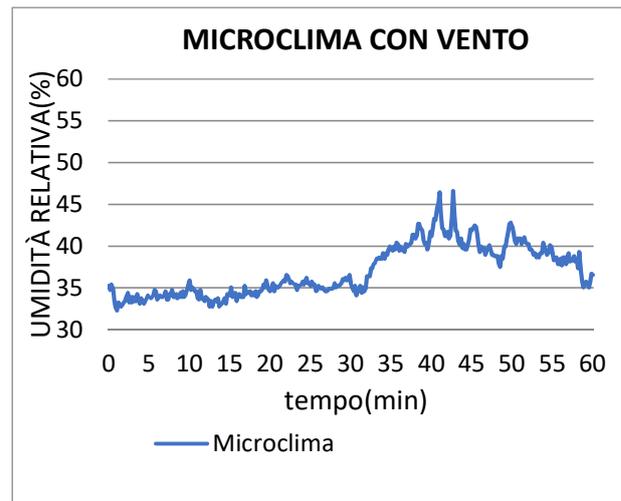
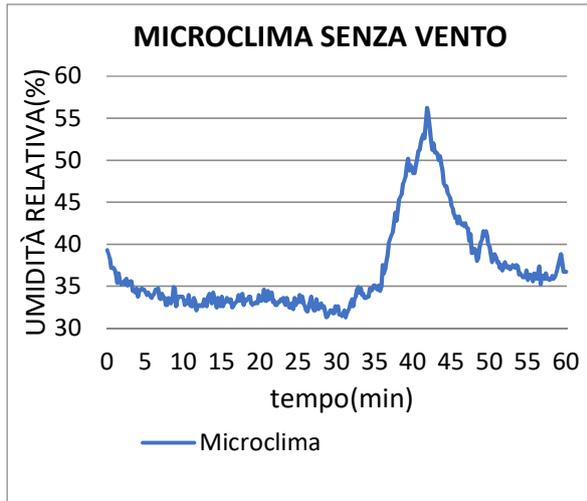


Fig. 5. 73: microclima senza vento a 15 gradi **Fig. 5. 74: microclima con vento a 15 gradi**

Il vento ha qui influenza sul picco, abbassando i valori di circa 10 unità percentuali, mentre nelle altre fasi del test i valori sono comparabili tra le prove.

CONCLUSIONI RICAVABILI DALLA PROVE EFFETTUATE

Anche con l'abbigliamento è a 15 gradi che si rilevano i maggiori valori di gap fra i due sensori tra le varie zone. Sono questi i test in cui è più evidente il picco al massimo sforzo, dunque dove c'è una maggiore influenza delle fasi del test sui dati. Solo in alcuni picchi i valori dell'MSR raggiungono quelli dell' Ibutton, che si mantengono sempre più elevati.

5.3 Prova contenitori con acqua

Per confrontare i valori forniti dai data loggers Ibutton e MSR147WD, senza che questi fossero influenzati dal modo di applicazione sulla pelle, che va a intaccare soprattutto i valori di umidità relativa, è stata effettuata una prova con i due tipi di sensori immersi in quattro barattoli con all'interno acqua distillata. I sensori sono stati posizionati all'interno dei contenitori poco sopra il livello dell'acqua, per andare a simulare il microclima sulla pelle. Per avere più casi da poter confrontare, i barattoli sono stati coperti verso l'esterno rispettivamente con una membrana di tipo Gore, con un tessuto traspirante, un barattolo è stato chiuso ermeticamente e l'ultimo è stato lasciato senza coperchio. È stata pesata prima della prova l'acqua introdotta in ogni barattolo, pari a 167 grammi. La prova ha avuto una durata di 67 ore, con dati rilevati dai sensori di temperatura e umidità con una frequenza di 10 minuti. I barattoli sono stati posizionati all'interno della camera climatica per tutta la durata

del test, con una temperatura dell'ambiente costante di 24,5 gradi rilevata con il quinto sensore plug-in del' MSR non inserito in un barattolo.

Vengono qui riportati i risultati per le 4 tipologie di misurazione:

- Barattolo con membrana gore. Quantità acqua finale: 150 grammi

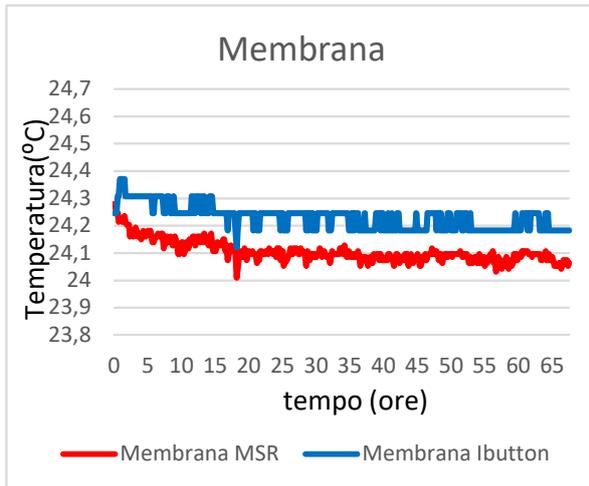


Fig. 5. 75: temperatura membrana

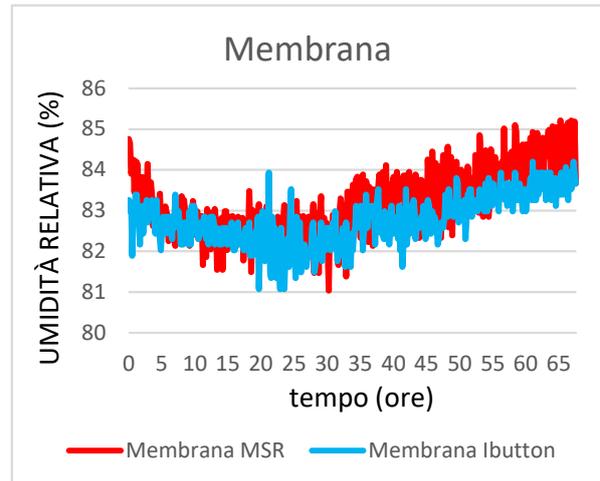


Fig. 5. 76: umidità relativa membrana

- Barattolo con tessuto. Quantità di acqua finale: 153 grammi.

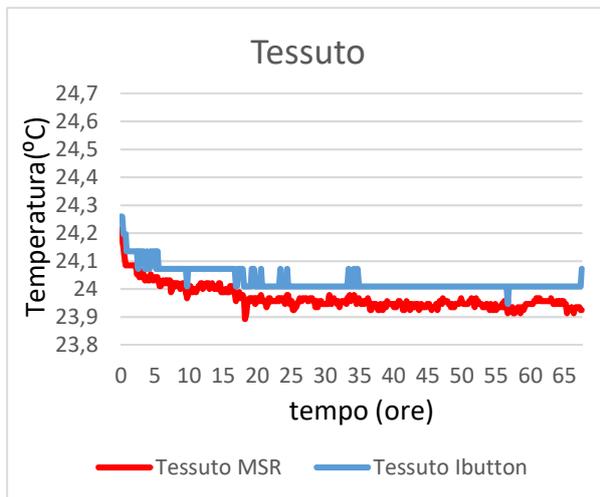


Fig. 5. 77: temperatura tessuto

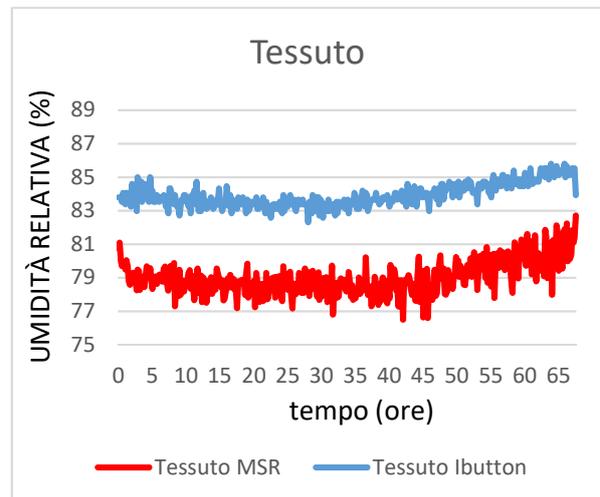


Fig. 5. 78: umidità relativa tessuto

- Barattolo chiuso. Quantità di acqua finale: 163 grammi.

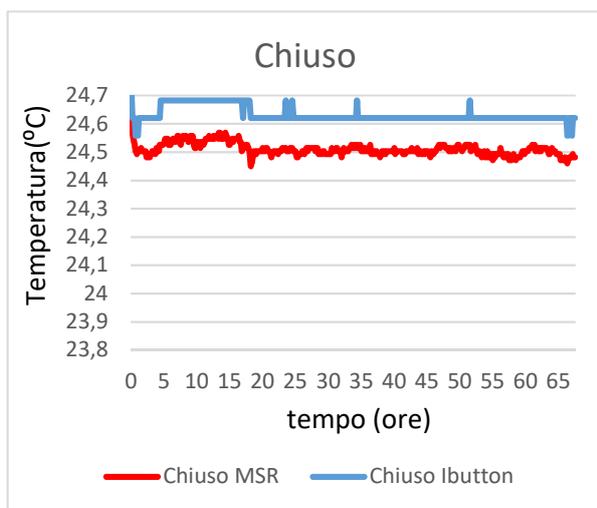


Fig. 5. 79: temperatura barattolo chiuso

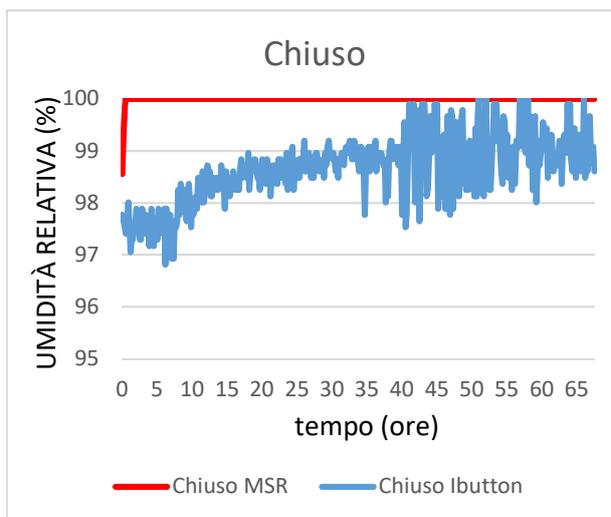


Fig. 5. 80: umidità relativa barattolo chiuso

- Barattolo aperto. Quantità di acqua finale: 126 grammi.

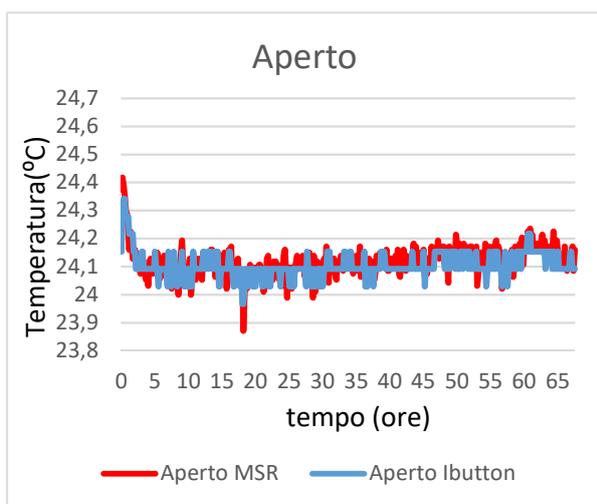


Fig. 5. 81: temperatura barattolo aperto

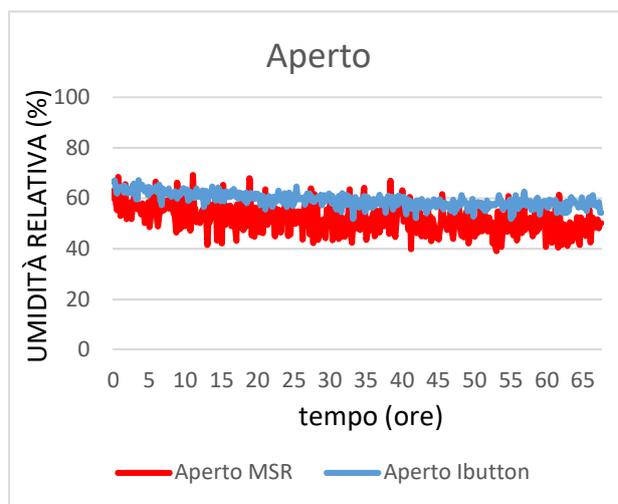


Fig. 5. 82: umidità relativa barattolo aperto

Considerazioni

Per quanto riguarda le temperature, è possibile vedere che il gap tra le due curve, che era già poco esteso nei casi di misurazione su pelle dove arrivava al massimo ad un grado, viene quasi a sparire in queste misurazioni. La differenza di valori maggiori che si può riscontrare è di 0,1 gradi per il barattolo con membrana e chiuso.

La grande differenza invece di andamento rispetto ai test fisici si ha per le misurazioni di umidità relativa. Si arriva ad avere al massimo un gap di 3 unità percentuali tra i valori dei due data loggers, un comportamento molto diverso rispetto alle misure su corpo, in cui poteva

presentarsi anche un gap di 40-50 unità percentuali in alcuni casi. Dunque il sensore dell'Ibutton non dà intrinsecamente valori di umidità più elevati, ma viene confermata la supposizione secondo cui è la differenza nel posizionamento del foro per l'umidità ad andare a influenzare la misura.

5.4 Termografie

In aggiunta all'utilizzo dei due diversi sensori sulla pelle, è stato impiegato un terzo metodo per la misura della temperatura, la termografia. Questo è stato possibile grazie ad una termocamera posta alle spalle del tester. Le termografie sono state scattate ogni 5 minuti per tutta la durata della prova. In seguito grazie al software InfRec Thermography Studio è stato possibile andare a selezionare determinate zone sull'immagine termica della schiena.

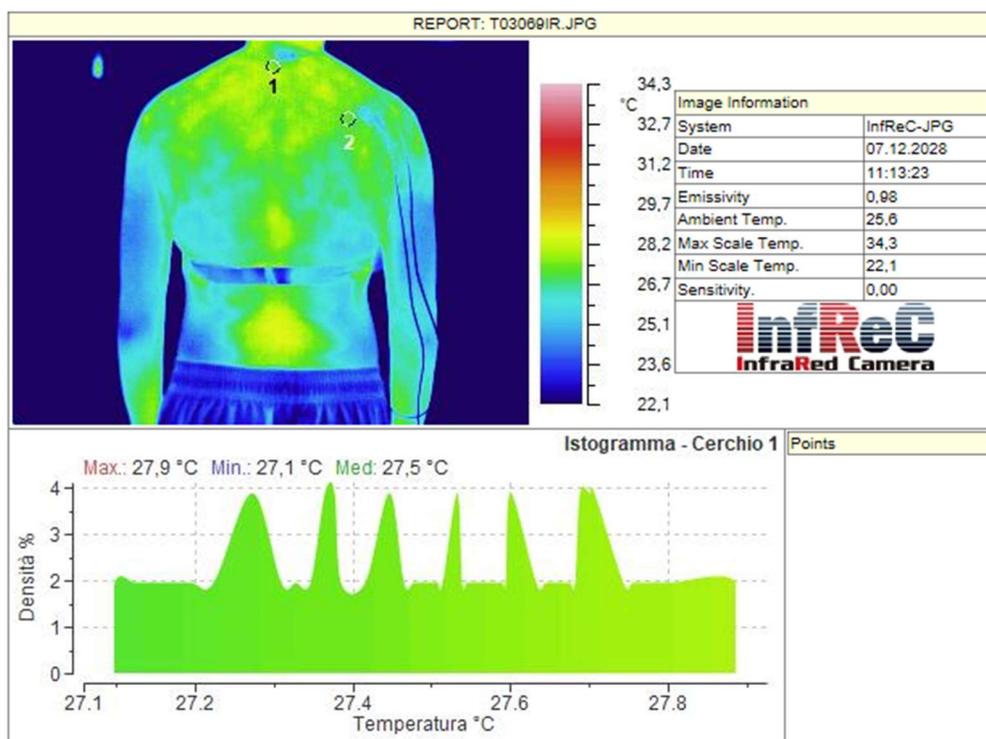


Fig. 5. 83: termografia al minuto 0 nella prova a 25 gradi a pelle nuda

Con il software di analisi delle immagini è stato possibile andare a individuare aree sulla schiena che fossero il più vicino possibile alle zone di misura dei sensori, e conoscere in queste il valore medio di temperatura. Le aree selezionate non potevano essere precisamente quelle dei sensori poiché il materiale con cui sono stati attaccati gli Ibutton e i plug MSR e i sensori stessi avrebbero rappresentato un ostacolo alla misura nascondendo alla camera quella zona di pelle. Di seguito vengono riportati i valori di collo e scapola nella prova a 25 gradi a pelle nuda, in relazione a quelli misurati con i due data loggers.

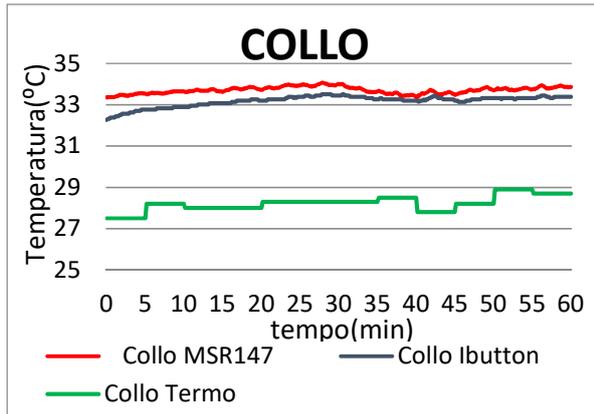


Fig. 5. 84: temperatura collo a 25 gradi

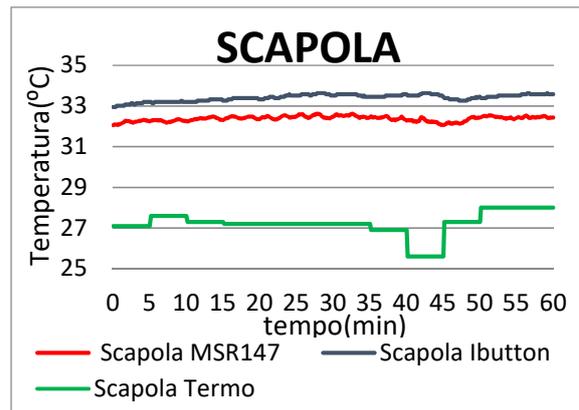


Fig. 5. 85: temperatura scapola a 25 gradi

I valori ottenuti dalla termocamera, che si osservano ad una distanza dal corpo di circa 1 metro a mezzo e non a diretto contatto con la pelle come i due data loggers, risultano molto inferiori rispetto ai dati dei due sensori. L'andamento però delle curve termografiche si mantiene simile a quello delle curve dei due sensori, inferiore costantemente di circa 5 gradi. Andando a visualizzare le differenze fra le curve si può notare una caratteristica peculiare dei dati della termocamera. Avremo infatti una discesa dei valori di temperatura al 40° minuto, più evidente nella zona della scapola. Questa diminuzione è causata dalla presenza della sudorazione sulla zona rilevata, che va ad abbassare i dati della misura. Si sono rilevati dalla termocamera valori molto meno costanti durante il test per la prova 35 gradi.

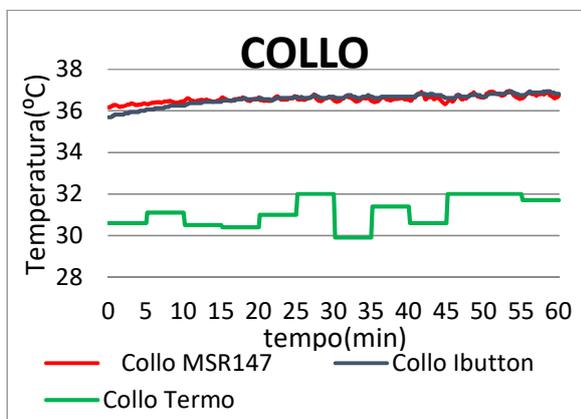


Fig. 5. 86: temperatura collo a 35 gradi

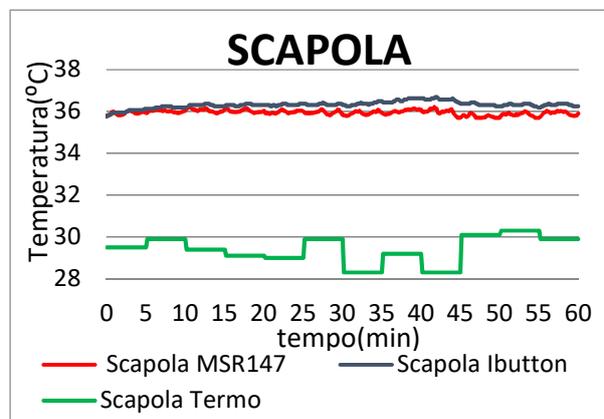


Fig. 5. 87: temperatura scapola a 35 gradi

A questa temperatura hanno più influenza le varie fasi di maggiore sforzo e quindi di maggior produzione di sudore sui dati delle termografie. Si ha subito una discesa dei valori dal 10° minuto quanto aumenta la velocità del tapis-roulant, poi una netta risalita nella successiva fase dove diminuisce la sudorazione. In seguito un raffreddamento di due gradi durante la fase a maggior sforzo fisico e infine la risalita dei valori quando termina l'attività fisica.

5.5 Frequenza cardiaca a diverse temperature

Senza ventilazione:

Prova 25 gradi

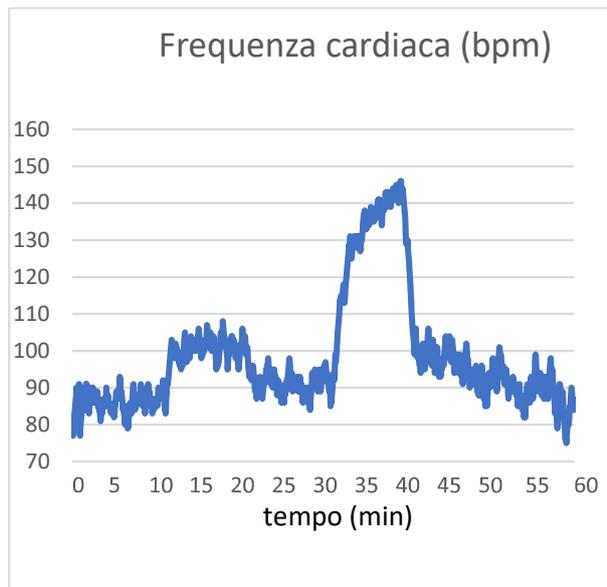


Fig. 5. 88: frequenza cardiaca nella prova a 25 gradi

Prova 35 gradi

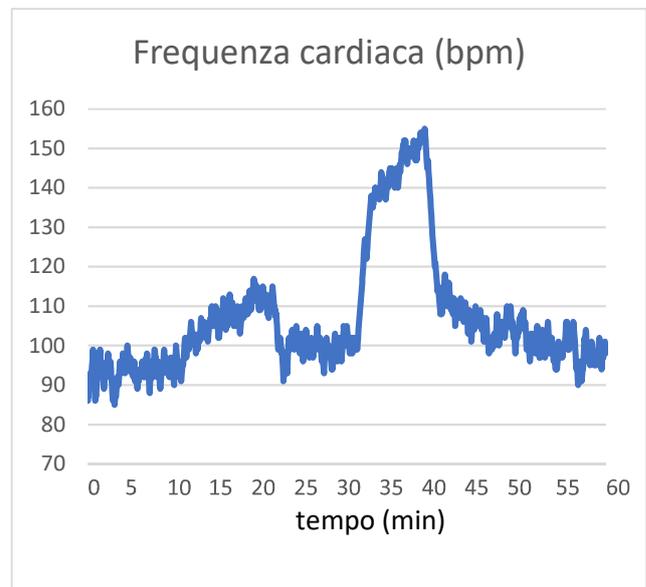


Fig. 5. 89: frequenza cardiaca nella prova a 35 gradi

Vengono qui riportati i valori della frequenza cardiaca rilevati con un cardiofrequenzimetro Garmin. Per entrambi i test è possibile notare un andamento preciso in linea con le differenti fasi della prova, con un primo aumento dei bpm dai 10 ai 20 minuti quando la velocità sul tapis-roulant passa dai 4km/h ai 6 km/h. Si può notare una differenza tra le due curve in questo secondo tratto, poiché nel primo caso ho un aumento istantaneo della frequenza che rimane poi costante durante questa fase del test, mentre a 35 gradi ho un aumento costante dei bpm lungo i 10 minuti. Al ritorno della velocità ai 4 km/h si ha immediatamente un calo della frequenza, che però rimane maggiore di 10 unità rispetto ai valori iniziali. Si ha poi la salita quasi verticale dei valori dal 30° minuto quando avviene lo sforzo massimo a 6 km/h e 12% di inclinazione del tapis-roulant. Per la prova a più alta temperatura si registra un aumento del valore di frequenza di circa 10 bpm in media, in cui si ha un picco massimo al 40° minuto di 155 bpm, contro i 145 bpm della prova a 25 gradi.

Con ventilazione:

Prova 25 gradi

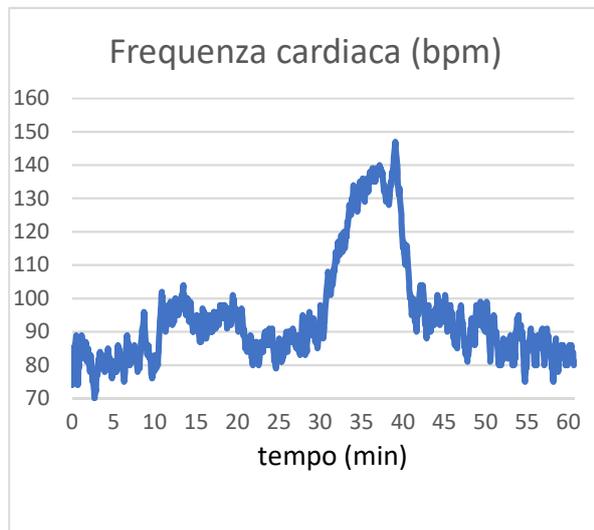


Fig. 5. 90: frequenza cardiaca nella prova a 25 gradi con ventilazione

Prova 35 gradi

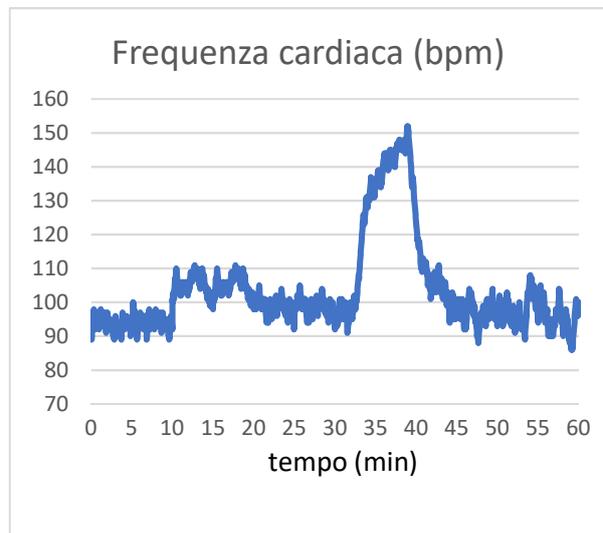


Fig. 5. 91: frequenza cardiaca nella prova a 35 gradi con ventilazione

Nel caso con ventilazione a 25 gradi si ha un andamento più variabile rispetto al test senza vento, con valore identico del picco dopo il massimo sforzo, ma valori precedenti inferiori da un minimo di 5 a un massimo di 10 bpm. Per la prova a 35 gradi ho invece un range di valori più ristretto nelle varie fasi, con valori più alti di circa 10 bpm, come accadeva nel confronto dei casi senza ventilazione. Ho però una variazione nel secondo tratto della curva, avendo qui valori costanti per tutta la sequenza, e non un aumento continuo come nel test senza vento; inoltre ho un lieve abbassamento del picco massimo.

5.6 Questionari per la valutazione del comfort termico

Durante lo svolgimento dei test in camera climatica, sono state registrate, ogni 5 minuti, le sensazioni soggettive del tester rispetto alle varie fasi della prova. Chiaramente questo è un tipo di informazione che troverebbe la sua vera utilità nel caso di test svolti con un grande numero di soggetti, però andando a confrontare alcune sensazioni soggettive con i dati oggettivi dei sensori si possono ricavare delle correlazioni.

Il questionario utilizzato prevede, oltre ad una definizione di comfort o non comfort generale, le seguenti opzioni per la temperatura percepita:

- molto freddo;
- freddo,
- leggermente freddo;
- neutro;

- leggermene caldo;
- caldo;
- molto caldo.

E le seguenti per la sensazione di umidità percepita:

- asciutto;
- leggermente umido;
- umido;
- bagnato;
- sudore che sgocciola

Infine un voto generale di valutazione della prova.

Una coppia di prove dove è facilmente visibile la correlazione tra dati e sensazioni oggettive, oltre all'influenza della ventilazione, è quella costituita dai test a 25 gradi a pelle nuda. Per la prova con ventilazione infatti si è registrata una sensazione di non comfort termico e di caldo al 40° minuto, corrispondente al momento finale del massimo sforzo fisico nella prova. Andando a vedere invece il questionario per la prova senza vento, vediamo che la sensazione risulta di comfort e di leggermente caldo. Prendendo ora i valori registrati dai sensori in quell'istante possiamo vedere che effettivamente esiste un gap che va a confermare le sensazioni soggettive, in quanto, dalla prova senza vento a quella con vento:

- la temperatura media registrata dall' Ibutton passa da 32,84 a 32,1 °C, quella dell' MSR da da 32,4 °C a 31,5 °C;
- l'umidità relativa media registrata dall' Ibutton va da 93,7 a 89,4, quella dell'MSR da 92,9 a 84,13.

È possibile inoltre andare a notare l'effetto della ventilazione prendendo i valori e le risposte date al 60° minuto. Infatti per la prova senza ventilazione si è registrata una sensazione neutra, mentre per la prova con ventilazione di leggermente freddo. Queste sensazioni soggettive sono state poi confermate dai dati scaricati dai data loggers, in quanto si è potuto evidenziare una diminuzione delle temperaturura misurate, con un passaggio per l' Ibutton da 32,37 a 30,62 °C e per l'MSR da 32,90 a 31,28 °C.

	Tempo (min)	Comfort		Sensazione di temperatura							Sensazione di umidità				
		sì	no	molto freddo	freddo	leggermente freddo	neutro	leggermente caldo	caldo	molto caldo	asciutto	leggermente umido	umido	bagnato	sudore che sgocciola
Pelle nuda senza ventilazione	0														
T = 25°C	5	x					x				x				
RH = 50%	10	x					x				x				
v = 0	15	x						x			x				
	20	x						x			x				
	25	x					x				x				
	30	x					x				x				
	35	x						x				x			
	40		x						x				x		
	45	x						x				x			
	50	x					x				x				
	55	x					x				x				
	60	x					x				x				

Tab. 5. 2: questionario per la prova a 25 °C senza ventilazione.

	Tempo (min)	Comfort		Sensazione di temperatura							Sensazione di umidità				
		sì	no	molto freddo	freddo	leggermente freddo	neutro	leggermente caldo	caldo	molto caldo	asciutto	leggermente umido	umido	bagnato	sudore che sgocciola
Pelle nuda CON ventilazione	0														
T = 25°C	5	x					x				x				
RH = 50%	10	x					x				x				
v = 6 km/h	15	x					x				x				
	20	x					x				x				
	25	x					x				x				
	30	x					x				x				
	35	x					x				x				
	40	x						x				x			
	45	x					x					x			
	50	x					x				x				
	55	x					x				x				
	60	x					x				x				

Tab. 5. 3: questionari per la prova a 25 °c con ventilazione

5.7 Taratura

Taratura dei sensori Ibutton

Per confrontare i dati di temperatura e umidità relativa misurati durante i test a Biella con un valore affidabile di riferimento, è stata eseguita una prova di taratura per alcuni sensori Ibutton in una camera per test climatici all'interno del Politecnico di Torino. I valori misurati dai sensori sono stati confrontati con quelli percepiti dall'indicatore di temperatura e umidità Hygromer A2, prodotto dalla Rotronic Instrument Corp. Questo igrometro misura i valori attraverso una sonda, la quale è stata inserita nella camera accanto al piatto metallico dove sono stati posizionati gli Ibutton.



Fig. 5. 92: camera per test climatici



Fig. 5. 93: indicatore di temperatura e umidità Hygromer A2

Si è deciso di analizzare prima una fase con umidità costante e con l'applicazione di una rampa di temperatura. In seguito è stata impostata una seconda fase, con la temperatura costante e una variazione dell'umidità relativa.

Per la prima fase si è partiti dunque da condizione di 50% di umidità relativa e 30°C, per poi salire prima a 35°C e infine a 40°C. Nella seconda parte la temperatura è stata mantenuta costante a 35°C, e si è passati dal 70 % al 90 % di umidità relativa.

Sono stati presi in considerazione i valori misurati nei 4 minuti prima dell'applicazione dei cambiamenti alle condizioni ambientali, per poter ottenere dei valori che fossero più stabili. Ogni cambiamento ha comportato circa un'ora di attesa per la stabilizzazione delle condizioni. Il riferimento è impostato con una frequenza di registrazione di 2 secondi, mentre l'Ibutton registra un valore ogni 10 secondi.

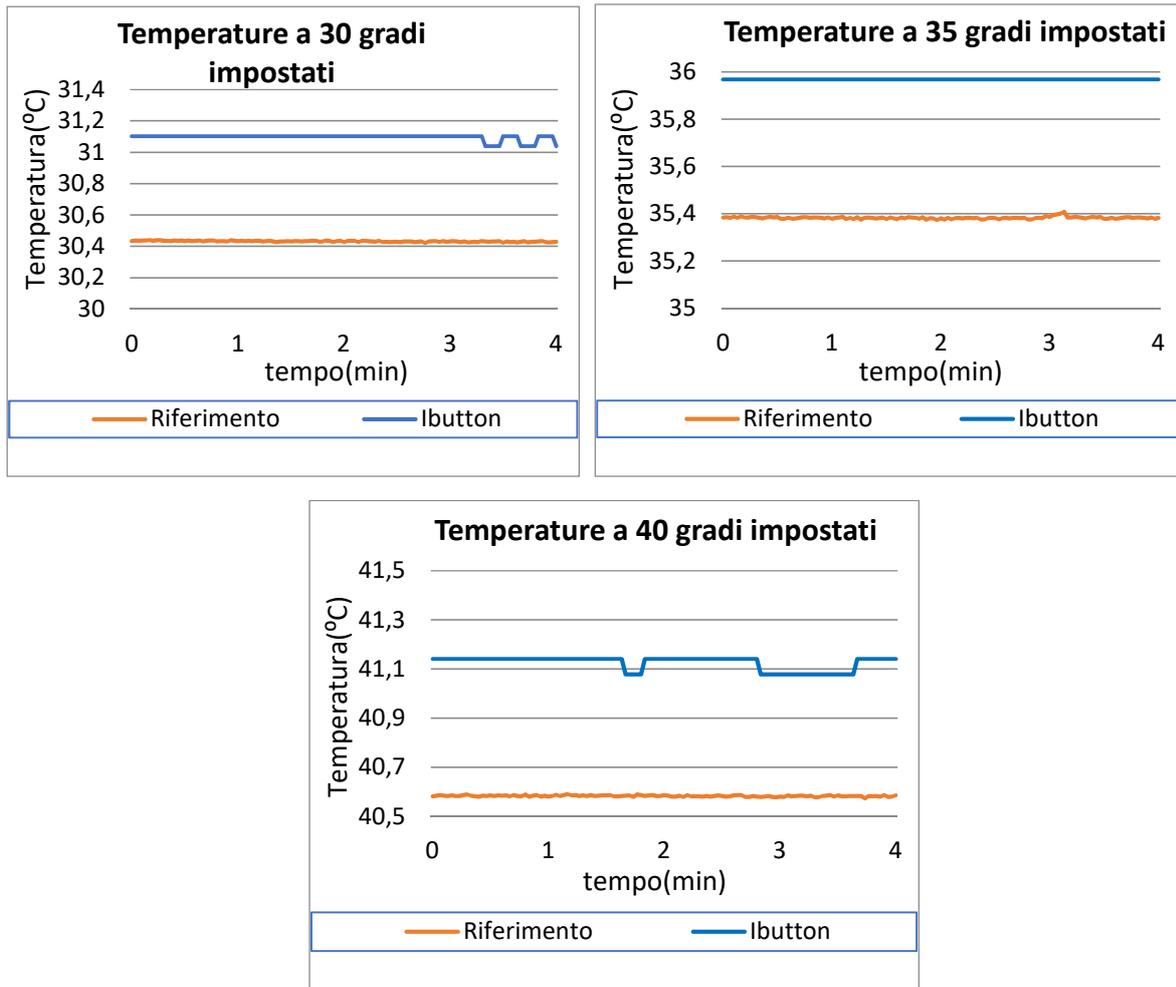


Fig. 5. 94, 95, 96: misura della temperatura di un Ibutton e valore di riferimento

Per quanto riguarda la prima fase delle prove, si può vedere che i valori dell' Ibutton sono costantemente posizionati ad un valore più alto di circa 0,6 - 0,7 gradi rispetto al valore del riferimento. In 2 dei 3 casi inoltre l' Ibutton presenta delle fluttuazioni, seppur minime, dei valori misurati, mentre l'igrometro di riferimento mostra un andamento perfettamente costante.

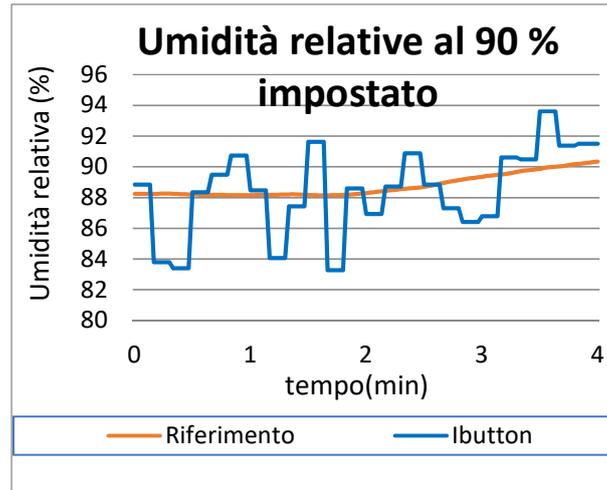


Fig. 5.97: umidità relativa al 90% impostato nella camera

Considerando invece la misura dell'umidità relativa, la regolazione della camera climatica non risulta altrettanto precisa come quella della temperatura. Infatti sia la camera climatica di Città studi di Biella che la camera per test del Politecnico di Torino presentano continue fluttuazioni dei valori di umidità rispetto ai valori impostati. È dunque più complicato ottenere condizioni stabili per poter ricavare dei valori di riferimento. I valori che si sono avvicinati di più alla stazionarietà sono stati ottenuti dopo circa un'ora dall'applicazione delle condizioni del 90 % di umidità relativa. In questo caso l'Ibutton presenta forti fluttuazioni dei valori, con un gap tra valore minimo e massimo di 8 unità percentuali, ma anche l'Hygromer non ha un andamento perfettamente costante come per le temperature. Si può vedere però che i valori dell'Ibutton variano nell'intorno di quelli di riferimento, che ne rappresenta all'incirca il valor medio. È anche possibile vedere alla fine una crescita dei valori del riferimento, che viene percepita nello stesso tempo anche dal sensore Ibutton.

5.8 Confronto Ibutton - MSR147WD - prototipo

È stata effettuata una prova per poter confrontare i risultati dei due data loggers commerciali Ibutton e MSR con il prototipo sviluppato da Michele Trotta nell'ambito della sua tesi di laurea in Ingegneria Biomedica al Politecnico di Torino, sotto la supervisione del Prof. Vallan. Tale sistema si compone di due microcontrollori dotati di modulo radio (uno configurato come trasmettitore e l'altro come ricevitore), una batteria ricaricabile, 10 termistori, 1 sensore di temperatura e umidità relativa SHT31D, 1 sensore di temperatura e umidità relativa BME280, 1 sensore di temperatura e umidità relativa DHT22 ed 1 accelerometro MMA8451. I 3 sensori che misurano l'umidità relativa sono stati inseriti all'interno di contenitori realizzati mediante stampa 3D, che devono consentire il passaggio dell'aria e del vapore acqueo per permettere le misure di temperatura e umidità. Per questo sono presenti una serie di fori di raggio 1mm lungo tutti i lati della scatola.

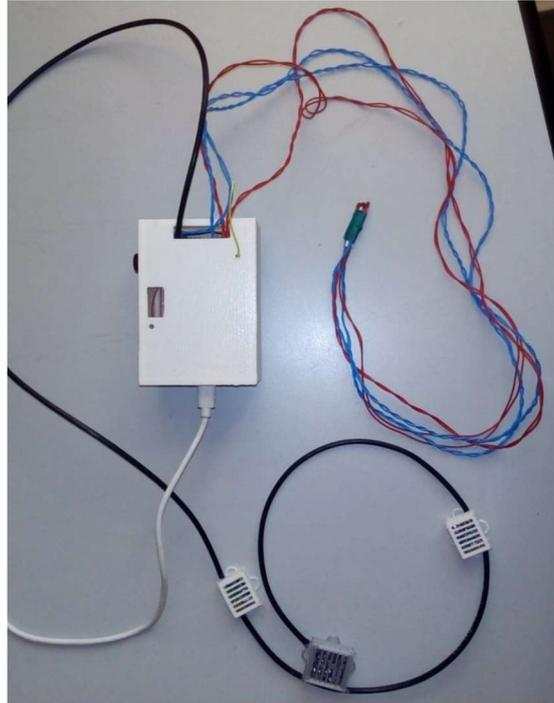


Fig. 5. 98: sistema prototipale

La prova fisica si è svolta al Politecnico di Torino, senza l'ausilio della camera climatica. I 3 sensori sono stati applicati sul corpo del tester prima dell'inizio dell'attività fisica. Per i punti di misurazione non si è potuta rispettare la norma poiché i fili dei sensori del prototipo non avevano una lunghezza tale da toccare tutti i punti necessari. Per le temperature si è potuto misurare:

- Sterno;
- Pettorale;
- Deltoide;
- Scapola solamente MSR147 e prototipo;
- Zona lombare;
- Fianco solamente Ibutton e prototipo.

Il prototipo ha potuto fornire questi valori di temperatura grazie a 3 termistori e ad altri 3 sensori digitali. I sensori digitali hanno potuto fornire anche i valori di umidità relativa dei seguenti punti:

- Sterno;
- Lombare;
- Fianco (solo Ibutton e prototipo).

Si è quindi iniziato il test all'interno del Politecnico di Torino seguendo il seguente protocollo:

- 5 minuti di riscaldamento con camminata lenta;

- 15 minuti di corsa su gradini;
- 5 minuti di riposo.

Temperature:

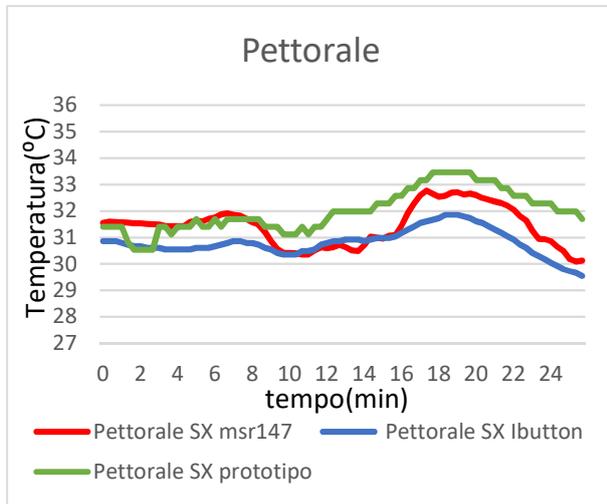


Fig. 5. 99: temperatura pettorale

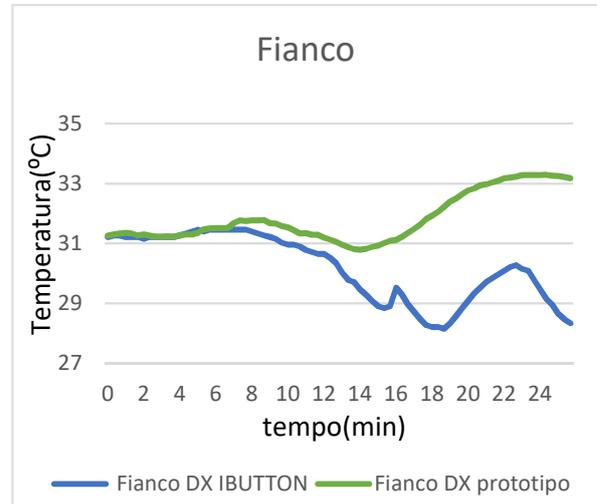


Fig. 5. 100: temperatura fianco

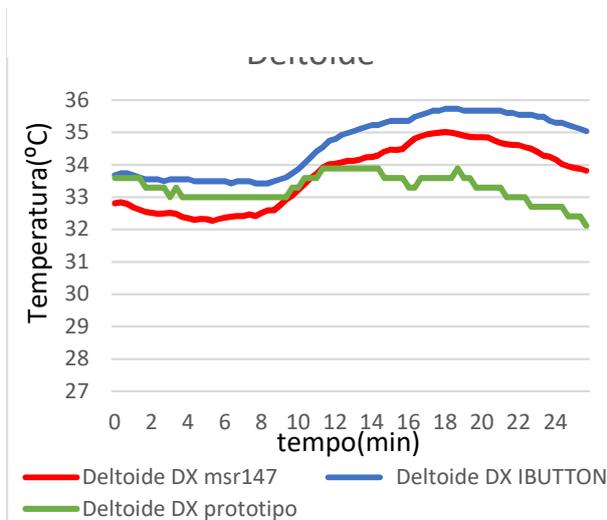


Fig. 5. 101: temperatura deltoide

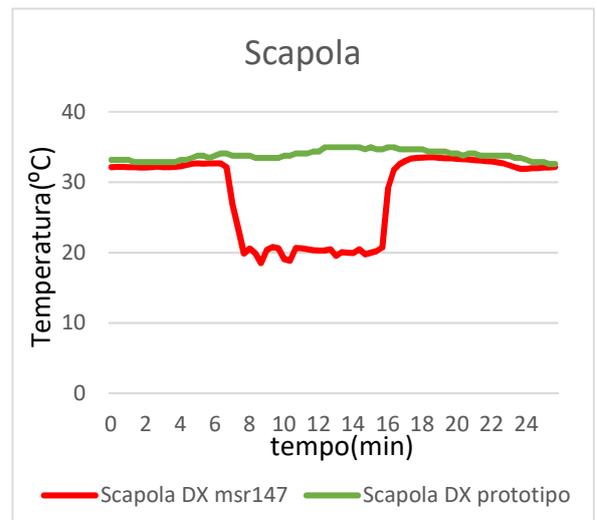


Fig. 5. 102: temperatura scapola

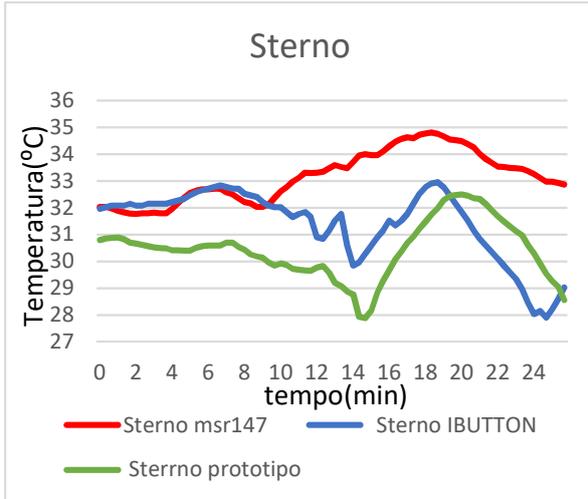


Fig. 5. 103: temperatura sterno

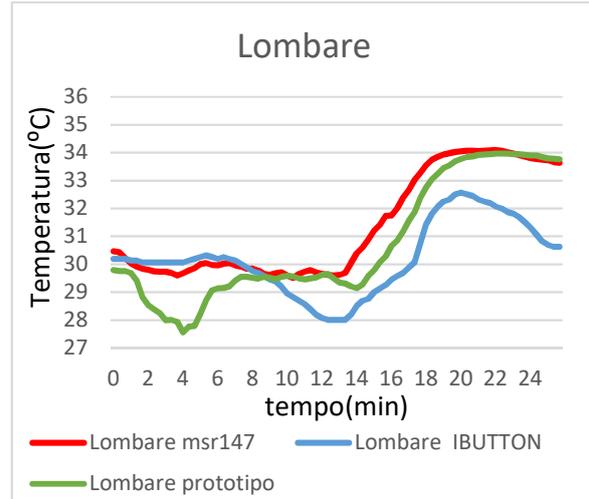


Fig. 5. 104: temperatura lombare

È possibile osservare dai grafici che i sensori del sistema prototipale forniscono valori in linea con quelli dei sistemi commerciali. Anche l'andamento delle curve è confrontabile, con i picchi di temperatura presenti negli stessi intervalli di tempo per tutti e tre i sistemi. Si hanno anomalie nei grafici di scapola e fianco, dovute ad un temporaneo distacco del sensore dalla pelle del tester.

Umidità relative

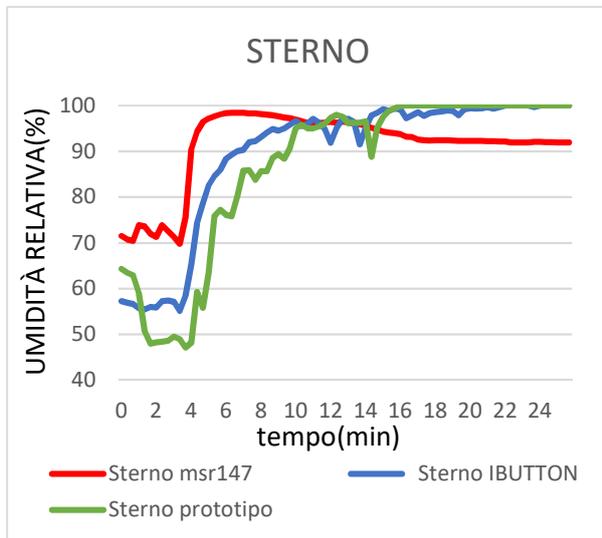


Fig. 5. 105: umidità relativa sterno

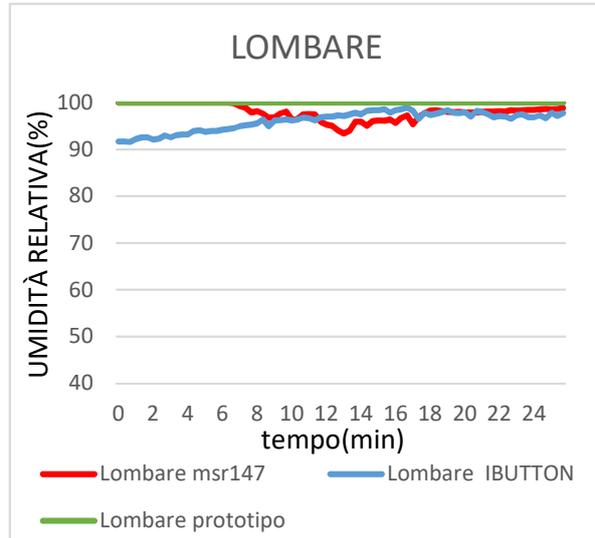


Fig. 5. 106: umidità relativa lombare

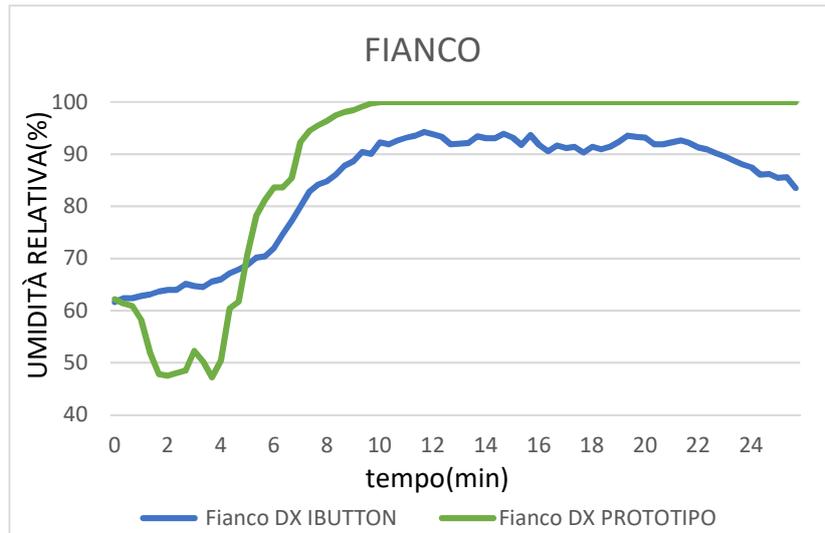


Fig. 5. 107: umidità relativa fianco

Per quanto riguarda l'umidità relativa, si può vedere che i valori registrati dai 3 sensori si differenziano maggiormente tra di loro rispetto a quelli di temperatura. In tutti e 3 i punti il primo sensore che va a saturazione è quello del sistema prototipale. Questo è sicuramente dovuto alla custodia del sensore digitale, che va dunque a causare un'esposizione diversa al sudore della pelle rispetto agli altri. Quindi si può notare che il sistema prototipale fornisce valori di umidità più bassi di circa 10 unità percentuali, per valori però sotto il 60% di umidità relativa prendendo come riferimento gli altri sensori. Per valori invece di MSR o Ibutton molto elevati, il sistema prototipale raggiunge rapidamente la saturazione e non si discosta dal 100% neanche durante il periodo di riposo.

6. Conclusioni

In questo lavoro di tesi sono stati confrontati due sistemi commerciali per l'acquisizione della temperatura e dell'umidità relativa sulla superficie del corpo umano. I data loggers Ibutton e MSR147WD sono stati utilizzati in una serie di test fisici in camera climatica a diverse condizioni di temperatura, con e senza ventilazione e con e senza abbigliamento a coprire le zone della pelle interessate, applicati sul corpo umano secondo la norma a quattro punti ISO 9886:2004.

Per quanto riguarda i valori di temperatura misurati, si sono registrati per l' Ibutton valori maggiori rispetto all' MSR147WD nella quasi totalità dei casi. Il gap tra i due tipi di sensori rimane però di piccola ampiezza e raggiunge al massimo 1°C nelle prove a bassa temperatura (15°C). Si è notato invece che aumentando la temperatura ambientale, i gap tra i valori di temperature fisiologiche tendono a diminuire e vengono ad essere perfettamente corrispondenti in molti casi. L' effetto della ventilazione, che tende ad abbassare la temperatura della pelle, risulta più rilevante nella prova a bassa temperatura a 15°C, con valori che si abbassano anche di 4°C. Per le prove a temperatura ambiente 25 e 35 °C, si ha un abbassamento massimo della temperatura della pelle di 1°C.

Risultati diversi, invece, si sono ottenuti per quanto riguarda l'analisi dell' umidità relativa. In questo caso infatti il gap tra i due sensori risulta molto più ampio rispetto ai valori di temperatura. L' Ibutton fornisce sempre valori più alti rispetto all' MSR147WD e una crescita dei valori più rapida, ma i gap tra le curve possono raggiungere in alcuni istanti anche le 40 unità percentuali. L' Ibutton raggiunge velocemente i valori di saturazione, mentre con l' MSR si può notare il picco di sudorazione corrispondente alla fase di massimo sforzo fisico. Le differenze maggiori si hanno a più bassa temperatura, mentre a 35°C i gap tendono a ridursi, specialmente nelle zone dove si registra un'alta produzione di sudore come la mano e lo stinco, zone in cui entrambi i sensori raggiungono la saturazione.

La caratteristica che farebbe propendere per l'utilizzo dell' MSR147WD per quanto riguarda i valori di umidità relativa rispetto al data logger Ibutton riguarda l'andamento dei dati dopo il picco di massima sudorazione. Infatti per l' MSR, tranne per le zone in cui i valori si mantengono prossimi alla saturazione per una grande produzione di sudore, dopo il picco intorno al 40° minuto, i valori di umidità vanno progressivamente a scendere durante la fase di riposo, per avvicinarsi a quelli iniziali. Questa situazione invece non accade per il sensore Ibutton. Per quest'ultimo infatti, dopo aver raggiunto la saturazione, non si registra una diminuzione dei valori dopo il termine del periodo di massimo sforzo fisico. L'umidità relativa rimane invece costante fino al termine della prova in camera climatica.

Per poter fare un confronto con i valori ricavati durante i test fisici, è stato condotto un esperimento utilizzando contenitori riempiti con acqua e ponendo i due sensori appena sopra la superficie, per simulare la misura in condizioni di sudorazione sulla pelle, evitando la variabilità del sistema biologico. Si è potuto notare, in questo caso, che la differenza fra i valori di temperatura e umidità relativa misurati dai due sensori si riduce ulteriormente, mentre nei test fisiologici potevo avere gap da 30 a 40 unità percentuali. Questo andamento è

spiegabile con la differenza strutturale dei due tipi di sensori, che va ad influenzare il loro modo di applicazione sulle superficie della pelle umana e quindi la misura. Infatti l' Ibutton presenta un foro per il passaggio del vapore acqueo sul lato che viene direttamente applicato sulla pelle, mentre l'MSR presenta delle estremità con sensori plug-in più esposti all'aria. È per questa caratteristica che l' Ibutton fornisce valori di umidità relativa più alti e soprattutto mantiene valori elevati e costanti anche dopo il termine delle fasi a massimo sforzo fisico, in quanto il sensore risulta più a diretto contatto con il sudore e inoltre riduce di molto l'evaporazione dalla pelle verso l'ambiente.

È stato inoltre effettuato un confronto tra i sistemi commerciali e un sistema prototipale sviluppato presso il Dipartimento di Elettronica e Telecomunicazioni, sotto la supervisione del Prof. Vallan. Per quanto riguarda le temperature, il prototipo ha mostrato una buona affidabilità, con andamenti medi che si collocano a metà tra i valori dei sistemi precedentemente descritti, e differenze minime di misura.

Una risposta leggermente diversa si è avuta invece per quanto riguarda l'umidità relativa. Il prototipo ha fornito valori inferiori di circa 10 unità percentuali per valori sotto il 60 %, mentre ha raggiunto rapidamente la saturazione in corrispondenza di valori medi degli altri sensori intorno al 90%. Questo andamento va di nuovo a sottolineare l'importanza delle differenze strutturali e del modo di applicazione sulla pelle rispetto ai valori di umidità relativa misurati. La custodia infatti dei sensori digitali del prototipo crea un'esposizione diversa nei confronti della pelle e del vapore acqueo rispetto ai sistemi commerciali.

Grazie ai questionari è stato poi possibile osservare una correlazione tra le sensazioni soggettive e i dati rilevati dai sensori, e con le termografie si è potuta vedere l'influenza delle fasi della prova sulle temperature rilevate dalla termocamera.

Bibliografia e riferimenti

- [1] K. Parsons, *Human Thermal Environments: The Effects of Hot, Moderate, and Cold Environments on Human Health, Comfort, and Performance, Third Edition*, CRC Press, 2014.
- [2] J. Huang, *Thermal parameters for assessing thermal properties of clothing*, Journal of Thermal Biology, Vol. 31, Issue 6, Agosto 2006, 461-466.
- [3] D.Uttam, *Objective Measurement of Heat Transport through Clothing*, International Journal of Engineering Research and Development, Vol. 2, Issue 12, Agosto 2012, 43-47.
- [4] http://satratechnology.com/files/evaluating_comfort_sweating_guarded_hotplate.pdf
- [5] https://www.msr.ch/media/pdf/Datalogger_MSR147WD_Datasheet.pdf
- [6] <https://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/DS1923.pdf>
- [7] P. I. Dolez, O. Vermeersch, V. Izquierdo, *Advanced Characterization and Testing of Textiles*, Woodhead Publishing, 2017.
- [8] L. Hes, I. Dolezal, *Indirect measurement of moisture absorptivity of functional textile fabrics*, J. Phys.: Conf. Ser. 1065 122026, 2018.
- [9] Bao-guo Yao, Yi Li, Jun-yan Hu, Yi-lin Kwok, Kwok-wing Yeung, *An improved test method for characterizing the dynamic liquid moisture transfer in porous polymeric materials*, Vol. 25, Issue 5, Agosto 2006, 677-689.
- [10] I. Holmér, *Thermal manikin history and applications*, European Journal of Applied Physiology, Vol. 92, Issue 6, September 2004, 614–618.
- [11] D. Celcar, H. Meinander, J. Geršak, *Heat and moisture transmission properties of clothing systems evaluated by using a sweating thermal manikin under different environmental conditions*, International Journal of Clothing Science and Technology, Vol. 20, Issue: 4, 2008, 240-252.
- [12] M. Matusiak, W. Sybilska, *Thermal resistance of fabrics vs. thermal insulation of clothing made of the fabrics*, The Journal of The Textile Institute Volume 107, Issue 7, 2016, 842-848.
- [13] ISO 9886:2004 Ergonomics -- Evaluation of thermal strain by physiological measurements.

- [14] <http://www.bifreezer.it/index.php/prodotti/test-chambers/generiche>
- [15] ISO 11092:2014 Textiles -- Physiological effects -- Measurement of thermal and water-vapour resistance under steady-state conditions (sweating guarded-hotplate test).
- [16] ASTM F1868 - 02 Standard Test Method for Thermal and Evaporative Resistance of Clothing Materials Using a Sweating Hot Plate.
- [17] ISO 8996:2004 Ergonomics of the thermal environment -- Determination of metabolic rate.
- [18] ASTM D1518 - 85(2003) Standard Test Method for Thermal Transmittance of Textile Materials.