

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 termofisiologico di abbigliamento sportivo per mezzo di test in camera climatica



Relatori

prof.ssa Ada Ferri
dott.ssa Laura Rizzi

Candidato

Beghini Giulia

Marzo 2018

Sommario

Questa tesi di laurea, condotta presso il laboratorio LATT di Città Studi di Biella, si inserisce nell'ambito di uno studio commissionato da un'azienda leader nel settore della produzione di grafene, allo scopo di valutare il comfort termico di alcuni capi di abbigliamento dotati di una stampa in grafene, finalizzata a uniformare la temperatura corporea dell'atleta. Considerato che i dati presentati e discussi in questa tesi sono riguardanti prodotti di proprietà di un'azienda e non ancora in commercio, verranno approfonditi più nel dettaglio i metodi utilizzati per la raccolta e l'elaborazione dei dati, rispetto ai risultati stessi.

Sono stati eseguiti in primo luogo dei test sui tessuti al fine di valutarne le caratteristiche di permeabilità all'aria e di gestione e trasporto del sudore. Successivamente sono stati condotti test in vivo in camera climatica seguendo precisi protocolli sperimentali. I dati rilevati mediante sensori sono: temperatura e umidità cutanea, temperatura e umidità del microclima, battito cardiaco e potenza sviluppata. Vengono inoltre rilevati: quantità di sudore, temperatura superficiale esterna dei capi grazie all'utilizzo di una termocamera e comfort termico percepito grazie all'utilizzo di questionari.

Analisi statistiche sono state eseguite sui dati rilevati in camera climatica per individuare eventuali differenze significative in termini di prestazioni tra il capo con la stampa e il capo di controllo. A completamento di questa analisi è stato sviluppato un algoritmo in ambiente Matlab per permettere lo svolgimento di analisi quantitative delle termografie, fino ad oggi non possibili con il programma di analisi in uso.

Indice

| | |
|--|----|
| Elenco delle figure | IV |
| Elenco delle tabelle | VI |
| 1 Introduzione | 1 |
| 2 Termoregolazione, bilancio termico ed equazione del comfort | 3 |
| 2.1 Introduzione | 3 |
| 2.2 Termoregolazione | 3 |
| 2.3 Bilancio termico | 5 |
| 2.4 Equazione del comfort termico | 7 |
| 3 Il grafene | 11 |
| 3.1 Introduzione | 11 |
| 3.2 Proprietà termiche | 12 |
| 3.3 Problemi relativi alla stampa | 14 |
| 4 Test effettuati sui tessuti | 17 |
| 4.1 Introduzione | 17 |
| 4.2 Permeabilità all'aria | 17 |
| 4.2.1 La prova | 17 |
| 4.2.2 Risultati | 18 |
| 4.3 Liquid Moisture Management | 19 |
| 4.3.1 La prova | 19 |
| 4.3.2 Risultati | 20 |
| 5 Sperimentazioni in camera climatica | 27 |
| 5.1 Protocollo sperimentale | 27 |
| 5.2 Parametri valutati | 29 |
| 5.2.1 Parametri fisiologici | 30 |
| 5.2.2 Parametri soggettivi | 32 |
| 5.2.3 Analisi termografica | 33 |

| | | |
|----------|---|-----------|
| 6 | Elaborazione dei risultati | 35 |
| 6.1 | Introduzione | 35 |
| 6.2 | Temperatura e umidità | 35 |
| 6.2.1 | Dati considerati | 35 |
| 6.2.2 | Grafici | 36 |
| 6.2.3 | Test di Student e p-value | 37 |
| 6.2.4 | Istogrammi | 38 |
| 6.3 | Frequenza cardiaca e potenza | 38 |
| 6.4 | Parametri soggettivi | 41 |
| 6.5 | Analisi termografica | 43 |
| 7 | Metodo proposto per l'analisi quantitativa delle termografie | 49 |
| 7.1 | Introduzione | 49 |
| 7.2 | Parametri aggiuntivi proposti | 49 |
| 7.2.1 | Indice di kurtosis | 50 |
| 7.2.2 | Indice di skewness | 51 |
| 7.2.3 | Contrasto | 54 |
| 7.3 | Osservazioni ulteriori | 63 |
| 8 | Conclusioni | 69 |
| | Lista dei Simboli | 71 |
| | Bibliografia | 75 |
| | Ringraziamenti | 79 |

Elenco delle figure

| | | |
|-----|--|----|
| 3.1 | Nel grafico sono rappresentate le curve relative alle due componenti dell'energia cinetica, ovvero quella interna in blu e quella esterna in rosso, e la loro somma, cioè l'energia cinetica totale, in nero (Wen-Jun & Bing-Yang 2016). | 13 |
| 3.2 | Modello teorico del network di fogli di grafene presenti in un PMC. Si evidenziano i parametri di sovrapposizione tra fogli (a) e la distanza lungo la verticale tra filler contigui (h) (Bigdeli & Fasano 2017). . . | 16 |
| 4.1 | Grafico water content vs time in cui viene presentato l'andamento comune alla maggior parte dei tessuti testati. | 22 |
| 4.2 | Grafico water location vs time caratteristico della maggior parte dei tessuti testati. | 23 |
| 4.3 | Grafico water content vs time eseguito sul tessuto sensitive stampato senza finissaggio, in cui viene evidenziata la conducibilità del grafene. | 24 |
| 4.4 | Grafico water location vs time eseguito sul tessuto sensitive stampato senza finissaggio. | 25 |
| 5.1 | Fitbike utilizzata nelle prove. | 28 |
| 5.2 | Treadmill utilizzato nelle prove. | 29 |
| 5.3 | Esempio prova su treadmill | 29 |
| 5.4 | Esempio prova su fit bike | 30 |
| 5.5 | Posizione dei sensori di temperatura per la valutazione della temperatura media cutanea. | 31 |
| 5.6 | Sensori wireless I-button Maxim Integrated DS1923 | 31 |
| 5.7 | Tester dopo l'applicazione dei sensori aggiuntivi sul torso. | 32 |
| 5.8 | Sensori wireless PCE-MSR 145 | 32 |
| 6.1 | Esempio di andamento della temperatura media cutanea e relative deviazioni standard (media sui 5 tester). | 36 |
| 6.2 | Temperatura media cutanea e rispettiva deviazione standard per l'abbigliamento con stampa G+ e il controllo CTR. | 37 |
| 6.3 | Istogrammi delle temperature. | 39 |
| 6.4 | Il grafico rappresenta la frequenza cardiaca di uno dei tester. | 40 |

| | | |
|------|--|----|
| 6.5 | Il grafico rappresenta la potenza sviluppata da uno dei tester. . . . | 40 |
| 6.6 | Frequenza cardiaca e potenza per ogni tester suddivise per fasi. . . | 41 |
| 6.7 | Il grafico rappresenta la frequenza cardiaca media globale. | 41 |
| 6.8 | Il grafico rappresenta la potenza media globale. | 42 |
| 6.9 | Esempio di analisi della sensazione termica. | 44 |
| 6.10 | Esempio di analisi della sensazione di umidità. | 45 |
| 6.11 | Esempio di radar plot complessivo realizzato con le sensazioni e il voto finale. | 46 |
| 6.12 | Output complessivo utile per l'analisi termografica. | 46 |
| 6.13 | Andamento della temperatura superficiale ricavato dalle termografie. | 47 |
| 7.1 | Valori assunti dall'indice di kurtosis. | 50 |
| 7.2 | Andamento nel tempo dei valori assunti dall'indice di kurtosis per il capo con stampa in grafene e per il controllo | 51 |
| 7.3 | Valori assunti dall'indice di skewness o asimmetria | 53 |
| 7.4 | Andamento nel tempo dei valori assunti dall'indice di skewness per il capo con stampa in grafene e per il controllo | 53 |
| 7.5 | Direzioni lungo le quali è possibile eseguire la scansione: orizzontale (0°), verticale (90°) e in obliquo lungo le due diagonali (45° e 135°) | 55 |
| 7.6 | Esempio di costruzione della GLCM | 57 |
| 7.7 | Andamento del contrasto nel tempo. | 60 |
| 7.8 | Immagine di riferimento Standard 1. | 65 |
| 7.9 | Immagine di riferimento Standard 2. | 66 |
| 7.10 | Andamento nel tempo della derivata della temperatura e del valore dei parametri proposti per il controllo e per G+. | 67 |
| 7.11 | Andamento nel tempo della derivata dell'umidità e del valore dei parametri proposti nel capo di controllo e con G+. | 68 |
| 8.1 | Termografie in cui si evidenzia l'effetto di gestione del calore della stampa in grafene. | 70 |

Elenco delle tabelle

| | | |
|------|---|----|
| 4.1 | Parametri di prova utilizzati nella misura della permeabilità all'aria dei tessuti. | 17 |
| 4.2 | Risultati delle prove di permeabilità all'aria. | 18 |
| 4.3 | Risultati del test MMT | 20 |
| 4.4 | Tessuti testati con MMT | 21 |
| 7.1 | Valori dell'indice di kurtosis per il capo di controllo. | 52 |
| 7.2 | Valori dell'indice di kurtosis per il capo con stampa in grafene. . . . | 52 |
| 7.3 | Valori dell'indice di skewness per il capo di controllo. | 54 |
| 7.4 | Valori dell'indice di skewness per il capo con stampa in grafene. . . . | 54 |
| 7.5 | Valori del contrasto per il capo di controllo. | 59 |
| 7.6 | Valori del contrasto per il capo con stampa in grafene. | 59 |
| 7.7 | P-value per confronti in ciascuna categoria di capi. | 60 |
| 7.8 | P-value per confronti tra categorie di capi. | 61 |
| 7.9 | Valori del contrasto per le matrici standard. | 62 |
| 7.10 | Scala di confronto in termini di contrasto e livelli di grigi tra standard e valori misurati. | 62 |
| 7.11 | P-value per confronti tra gli standard e le due categorie di capi. . . . | 63 |

Capitolo 1

Introduzione

Nell'ambito dell'analisi prestazionale di abbigliamento sportivo, assume particolare importanza l'aspetto del comfort o benessere termico. Il benessere termico, definito come l'atteggiamento mentale di soddisfazione per l'ambiente da un punto di vista termico, dipende da variabili fisiche che descrivono: l'ambiente in cui è collocato il soggetto, il suo abbigliamento e il suo livello di attività fisica e metabolica. La sua importanza deriva dal fatto che esso è direttamente correlato al meccanismo di termoregolazione (Fanger 1973), il quale ha il vitale compito di garantire il mantenimento della temperatura corporea al valore corrispondente alla massima efficienza metabolica, fattore essenziale per la sopravvivenza e per l'attività sportiva soprattutto se intensa o a temperature estreme (Parsons 2003). In questo contesto si applicano le eccezionali proprietà di conduzione termica del grafene, dovute alla sua peculiare struttura atomica. Questo innovativo materiale abbina un valore di conducibilità termica eccezionale (Zhen-Qiang et al. 2015) a modalità di trasporto del calore aggiuntive rispetto a quelle comunemente presenti (Wen-Jun & Bing-Yang 2016). Questo lavoro di tesi, svolto presso il laboratorio LATT di Città Studi di Biella, ha lo scopo di affiancare lo studio eseguito su capi di abbigliamento sportivo, all'interno dei quali è presente una stampa in grafene che si pone l'obiettivo di uniformare la temperatura corporea e permettere così il raggiungimento del comfort termico. A tal proposito sono stati eseguiti in primo luogo test di permeabilità all'aria e di liquid moisture management, i quali verificano le proprietà fondamentali di qualsiasi tessuto utilizzato in ambito sportivo. Successivamente, per entrare nel merito del contributo che grafene dà alla gestione del calore, sono stati condotti test in vivo in camera climatica su un gruppo di tester. Queste prove seguono precisi protocolli sperimentali i quali fissano le caratteristiche di ambiente e abbigliamento in cui si trova il soggetto e variano in modo controllato il livello di attività fisica rilevando i cambiamenti nel corso della prova di parametri importanti per la definizione del comfort termico quali: la temperatura e l'umidità cutanee e del microclima. Viene valutato anche il comfort soggettivo attraverso la somministrazione di questionari. Vengono inoltre eseguite, per tutta la durata della prova,

delle termografie per osservare il flusso di calore in uscita dal capo di abbigliamento. I dati relativi a umidità e temperatura vengono sottoposti a una verifica statistica per stabilire se la stampa provoca significative differenze in termini di performance del tessuto. Parte del lavoro svolto si è focalizzato sullo sviluppo di un algoritmo in ambiente di lavoro Matlab con l'obiettivo di ricavare per le termografie parametri in grado permettere osservazioni quantitative, non permesse dall'attuale programma utilizzato. L'elaborato presenta una parte iniziale nella quale vengono descritti il meccanismo di termoregolazione e il bilancio termico che coinvolge il corpo umano, chiarendo così la loro correlazione con la valutazione del comfort termico. Successivamente vengono approfondite le proprietà termiche del grafene e le variazioni delle stesse quando il materiale è interessato ad un processo di stampa. Si entra poi nel merito della sperimentazione con il capitolo riguardante i test fisici che sono stati eseguiti sui tessuti. La parte che segue riguarda il protocollo sperimentale adottato nelle prove in vivo. Nella sezione successiva viene presentata l'analisi statistica dei dati raccolti in camera climatica, la quale fornisce elementi fondamentali per poter dare un giudizio sull'efficacia del capo testato. La parte finale è costituita dal capitolo in cui viene descritto l'algoritmo sviluppato appositamente per poter fornire ulteriori parametri di valutazione dell'omogeneità di temperatura che il capo testato dovrebbe contribuire ad ottenere.

Capitolo 2

Termoregolazione, bilancio termico ed equazione del comfort

2.1 Introduzione

Gli esseri umani sono animali omeotermi, sono cioè sono in grado di mantenere la temperatura interna entro un intervallo molto ristretto di temperatura, pari a $37 \pm 0.5 \text{ }^\circ\text{C}$, nonostante la temperatura dell'ambiente esterno subisca ampie variazioni.

Il valore preciso e costante della temperatura corporea è legato alle limitazioni in campo biologico della legge di Arrhenius. Tale legge chimica, che lega in modo esponenziale la velocità di reazione all'aumento di temperatura, in ambito biologico ha un valore critico oltre il quale la velocità delle reazioni diminuisce.

L'*omeotermia* è quindi la capacità di mantenere la temperatura interna al valore ottimale di $37 \pm 0.5 \text{ }^\circ\text{C}$, per il quale le reazioni metaboliche catalizzate da enzimi raggiungono la loro massima efficienza, sia a riposo, ovvero in condizioni di metabolismo basale, sia durante l'esecuzione di lavoro muscolare.

2.2 Termoregolazione

Il mantenimento della temperatura corporea al valore corrispondente alla massima efficienza metabolica è garantito del *meccanismo della termoregolazione*. Tale meccanismo non è altro che un sistema di controllo a *retroazione negativa*, implementato su un insieme di sensori e attuatori con una sorta di termostato centrale. I termorecettori di caldo e freddo si trovano sparsi in vari distretti corporei: sulla pelle, nell'addome, lungo il midollo spinale, nel torace e in corrispondenza delle vene di maggior diametro. La parte centrale del sistema di regolazione ha sede invece nell'ipotalamo, il quale è dotato di neuroni termosensibili, stimolati dai suddetti termorecettori.

Questo meccanismo mette quindi in atto provvedimenti in modo da far rientrare nei limiti di sicurezza variazioni di temperatura eccessive: diminuendo la temperatura interna nel caso ne venga registrato un valore maggiore del limite superiore, pari a $37.5\text{ }^{\circ}\text{C}$, e aumentandola nel caso il valore rilevato dai termorecettori sia minore del limite inferiore, pari a $36.5\text{ }^{\circ}\text{C}$. In particolare, una diminuzione della temperatura corporea sotto la soglia inferiore, viene contrastata mediante i seguenti meccanismi:

- *Vasocostrizione*: causa una diminuzione del flusso sanguigno cutaneo e quindi della temperatura superficiale del corpo, riducendo così la quantità di calore dispersa dal corpo verso l'ambiente. Il massimo livello di vasocostrizione provoca una diminuzione del flusso sanguigno cutaneo dal valore nominale di $300 - 500\text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$ a $30\text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$.
- *Termogenesi chimica*: la produzione dell'ormone di rilascio della tireotropina, stimola l'ipofisi ad aumentare la secrezione della tirotropina, la quale a sua volta promuove la produzione dell'ormone di Tiroxina da parte della tiroide, innescando così un aumento del metabolismo cellulare e, conseguentemente, di calore. Un aumento del metabolismo cellulare è causato inoltre da un aumento della stimolazione del sistema simpatico e dal rilascio di adrenalina e noradrenalina da parte del midollo surrenale.
- *Brividi o Shivering*: il centro motorio da cui questa risposta si genera è situato nella parte posteriore dell'ipotalamo e viene attivato dai segnali provenienti dai recettori del freddo situati nella pelle e nel midollo spinale. In seguito all'attivazione, l'impulso viene ritrasmesso ai motoneuroni che aumentano il tono dei muscoli scheletrici fino a un livello superiore a una soglia predefinita, causando un brivido. Questo meccanismo può aumentare il calore superficiale prodotto del 500 %. Possiede tuttavia una durata limitata a qualche ora, perchè, consumando il glucosio presente nei tessuti muscolari, fa raggiungere al muscolo uno stato di affaticamento.

Al contrario, in caso di superamento del limite superiore permesso, i meccanismi che contrastano la variazione di temperatura sono i seguenti:

- *Vasodilatazione*: condizione opposta alla vasocostrizione, stimola il rilassamento dei muscoli lisci delle arteriole con conseguente dilatazione dei vasi sanguigni collocati a livello cutaneo. Questo causa un aumento del flusso sanguigno cutaneo e quindi della temperatura della cute, promuovendo così un trasferimento di calore dal corpo verso l'ambiente esterno. Il massimo livello di flusso sanguigno cutaneo raggiunto con la vasodilatazione passa così da un valore nominale di $300 - 500\text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$ a uno di $3000\text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$.

- *Rallentamento del metabolismo*: riduce la produzione di calore corporeo, grazie all'inibizione dei meccanismi di termogenesi chimica e brividi introdotti precedentemente.
- *Sudorazione*: se il calore è sufficientemente alto, le fibre colinergiche simpatiche che innervano le ghiandole sudoripare rilasciano Acetilcolina, stimolando la produzione di calore. In questo modo si attiva il più efficace meccanismo di smaltimento del calore, ovvero l'evaporazione. Tale trasformazione fisica è in grado di rimuovere dal corpo quantità di calore notevoli se paragonate al metabolismo basale, che per un uomo adulto di media corporatura è di circa 1800 kcal/giorno (con variazioni a seconda del sesso, dell'età e del livello di attività fisica del soggetto). Basti considerare infatti che sono necessarie 580 calorie (ovvero 2024 J) per far evaporare un solo grammo di acqua e che in attività fisiche di modesta intensità si arriva a perdere $100 - 500 \text{ g}$ di sudore.

2.3 Bilancio termico

Appare chiaro quindi che la termoregolazione sia un meccanismo molto complesso e che la sensazione di comfort termico di un individuo sia una diretta conseguenza delle sollecitazioni alle quali tale meccanismo viene sottoposto.

La complessità in questione deriva dal fatto che i fenomeni di scambio di calore tra un soggetto e l'ambiente sono di vario tipo e possono essere riassunti nella seguente equazione di bilancio termico (Parsons 2003):

$$M - L - Q_c - Q_r - Q_k - Q_{trp} - Q_{sdz} - Q_{rps} - Q_{rpl} = \frac{dU}{d\tau} \quad (2.1)$$

Gli scambi di calore coinvolti nel bilancio termico corporeo avvengono sulla superficie esterna del corpo umano, a livello cutaneo e all'interno della cavità polmonare, e sono i seguenti:

M : potenza generata dall'attività metabolica (W);

L : potenza meccanica scambiata tra il soggetto e l'ambiente (W);

Contributo di scambio a livello cutaneo:

Q_c : potenza termica sensibile scambiata per convezione (W);

Q_r : potenza termica sensibile scambiata per irraggiamento (W);

Q_k : potenza termica sensibile scambiata per conduzione (W);

Q_{tr} : potenza termica latente scambiata per traspirazione (diffusione del vapore) attraverso la pelle (W);

Q_{sdz} : potenza termica latente scambiata per evaporazione del sudore sulla superficie della pelle (W);

Contributo di scambio a livello polmonare:

Q_{rps} : potenza termica sensibile scambiata nella respirazione (W);

Q_{rpl} : potenza termica latente scambiata nella respirazione (W);

È necessario specificare che il termine $\frac{dU}{dt}$, definito come variazione dell'energia interna del corpo umano nell'unità di tempo, può essere considerato nullo, in quanto il meccanismo di termoregolazione tende a mantenere costante la temperatura corporea. Si può quindi considerare nulla l'energia interna per esposizioni sufficientemente lunghe ad ambienti nè troppo caldi, nè troppo freddi, con un'attività svolta in modo costante:

$$M - L - Q_c - Q_r - Q_k - Q_{trp} - Q_{sdz} - Q_{rps} - Q_{rpl} = 0 \quad (2.2)$$

Si può definire il rendimento di conversione dell'energia metabolica in lavoro come:

$$\eta = \frac{L}{M} \quad (2.3)$$

con il lavoro, considerato come eseguito dall'individuo sull'ambiente, che può assumere anche negativo valori negativi (come nel caso di una camminata in discesa). In generale il corpo umano risulta una macchina abbastanza inefficiente, con rendimenti pari al 15% - 30% (Dall'O 2016). Andando maggiormente nel merito, possiamo raggruppare i termini del bilancio come segue:

Q_c : calore sensibile scambiato per convezione. Dipende dalle seguenti grandezze:

- T_a : differenza di temperatura pelle-aria.
- ω_a : velocità dell'aria
- R_v : resistenza termica del vestiario

Q_r : calore sensibile scambiato per radiazione. Dipende dalle seguenti grandezze:

- T_{mr} : differenza di temperatura pelle/vestiario-superfici del locale
- ϵ_v : proprietà radiative (emissività) del vestiario
- ϵ_s : emissività delle superfici circostanti
- F_{v-s} : dimensione apparenti e distanza tra le superfici radianti

Q_{ev} : calore latente trasportato con l'evaporazione da pelle (sudorazione) e cavità polmonare (respirazione). Dipende dalle seguenti grandezze:

- φ_a : differenza tra il titolo del vapore sulla pelle e nella cavità polmonare ed il titolo nell'aria
- T_a : temperatura dell'aria
- π_v : permeabilità al vapore del vestiario

M : energia generata dai processi di trasformazione dell'energia chimica degli alimenti e utilizzata per supportare funzioni vitali di base e attività fisica svolta dal soggetto. Per l'utilizzo pratico conviene utilizzare il metabolismo specifico, cioè l'energia metabolica trasformata per unità di tempo e di superficie corporea (per un individuo di corporatura media la superficie disperdente ($1.8 m^2$)). Di conseguenza l'unità metabolica specifica, il *Met*, per un individuo seduto in riposo risulta pari a:

$$1 \text{ met} = 58 \text{ W/m}^2 \quad (2.4)$$

L : lavoro meccanico ovvero livello di attività fisica condotta dal soggetto e dipendente dal rendimento η .

Gli ultimi due termini introdotti possono essere legati e descritti in modo più compatto come segue:

$$H = M \cdot (1 - \eta) \quad (2.5)$$

2.4 Equazione del comfort termico

Tra tutte le grandezze descritte dalle quali dipendono i vari contributi di scambio termico, solo alcune risultano influenzare in modo significativo la sensazione di comfort termico. La normativa *ASHRAE Standard 55 – 92 (Thermal environmental conditions for human occupancy)*, la quale definisce il *benessere termico* come "l'atteggiamento mentale di soddisfazione per l'ambiente da un punto di vista termico", considera preponderanti le seguenti variabili fisiche (Fanger 1973):

- Temperatura (T_a), umidità (φ_a) e velocità dell'aria (ω_a)
- Temperatura media radiante delle pareti che delimitano l'ambiente interno (T_{mr})
- La resistenza termica dell'abbigliamento (R_v)
- Attività svolta (H)

Dai risultati delle numerose prove sperimentali eseguite negli studi di Fanger è emerso che, in uno stato di benessere termico, le variabili T_{sk} e Q_{sdz} , sono fortemente

legate al metabolismo specifico e al rendimento meccanico. I dati sperimentali suggeriscono quindi che i valori di temperatura della pelle e di flusso termico sviluppato per sudorazione in una condizione di comfort termico siano i seguenti:

$$Q_{\text{sdz}}^* = 0.42 \cdot A_p \cdot \left[\frac{M(1-\eta)}{A_p} - 58.15 \right] \quad (2.6)$$

$$T_{\text{sk}}^* = 35.7 - \frac{0.0275 \cdot M \cdot (1-\eta)}{A_p} \quad (2.7)$$

Sostituendo ora nell'equazione 2.2 del bilancio energetico i contributi per ciascuna modalità di scambio di calore e utilizzando la 2.6 e la 2.7, si ottiene l'*equazione degli stati di equilibrio termico in condizioni di benessere o equazione del benessere*:

$$\begin{aligned} M \cdot (1-\eta) - h_{\text{cp}} \cdot f_v \cdot A_p \cdot (T_v^* - T_a) - f_{\text{eff}} \cdot f_v \cdot A_p \cdot h_{\text{rp}} \cdot (T_v^* - T_{\text{rm}}) - \\ r \cdot \Pi \cdot f_d \cdot A_p \cdot (1-\beta) \cdot (p_{\text{sk}}^* - p_a) - 0.42 \cdot A_p \cdot \left[\frac{M \cdot (1-\eta)}{A_p} - 58.15 \right] - \\ G_x \cdot c_{\text{pa}} \cdot (T_x - T_a) - G_x \cdot r \cdot (x_x - x_a) = 0 \end{aligned} \quad (2.8)$$

L'equazione seguente fornisce invece la temperatura esterna del corpo abbigliato in condizioni di benessere:

$$T_v^* = T_{\text{sk}}^* - R_v \cdot \{M - L - Q_{\text{trp}} - Q_{\text{sdz}}^* - Q_{\text{rps}} - Q_{\text{rpl}}\} \quad (2.9)$$

Le infinite combinazioni delle sei variabili fisiche contenute nelle equazioni 2.8 e 2.9 permettono di calcolare lo *stato neutro di benessere termico*. Se si mantengono cioè costanti le tre grandezze $\frac{M}{A_p}$ (1 Met), R_v (1 Clo) e φa (50%), le equazioni 2.8 e 2.9 sono soddisfatte da terne di valori di T_a , T_{mr} e ωa appartenenti a curve definite *linee di isocomfort*. Per alcuni valori predefiniti di velocità dell'aria, tali linee di isocomfort forniscono tutte le coppie di temperature ambiente e temperatura media radiante corrispondenti a una sensazione di neutralità termica, caratterizzata da un valore nullo di un parametro definito come Predicted Mean Vote o PMV, del quale si parlerà in modo più approfondito in seguito. Ogni curva $T_{\text{mr}} = f(T_a)$ è approssimabile a una retta e questo permette di calcolare la temperatura dell'aria corrispondente a uno scambio termico e a una sensazione di comfort tipici del caso reale, cioè con scambi convettivi e radiativi compresi:

$$T_o = a \cdot T_a + (1-a) \cdot T_{\text{mr}} \quad (2.10)$$

dove a è funzione della velocità dell'aria come segue:

$$\begin{aligned} a = 0.5 & \quad \text{se } 0.0 \text{ m/s} < \omega a < 0.2 \text{ m/s} \\ a = 0.6 & \quad \text{se } 0.2 \text{ m/s} < \omega a < 0.6 \text{ m/s} \\ a = 0.7 & \quad \text{se } 0.6 \text{ m/s} < \omega a < 1.0 \text{ m/s} \end{aligned}$$

T_o viene definita *temperatura operativa o operante* ed considerata un "indicatore parziale del benessere termico" (Carbonari 2009):

$$T_o = \frac{h_r \cdot T_{mr} + h_c \cdot T_a}{\alpha} \quad (2.11)$$

dove:

T_a = temperatura dell'aria

T_{mr} = temperatura media radiante

h_r = coefficiente di scambio radiativo per l'uomo

h_c = coefficiente di scambio convettivo per l'uomo

$\alpha = h_r + h_c$ = coefficiente di adduzione termica sulla superficie corporea

Nei casi in cui la differenza tra la temperatura dell'aria e la temperatura media radiante sia inferiore a $4^\circ C$ e la velocità dell'aria sia inferiore a 0.2 m/s , T_o si ottiene dalla semplice media aritmetica tra T_a e T_{mr} .

Oltre alle variabili fisiche appena descritte, viene seguito l'andamento di variabili soggettive tramite giudizi verbali scelti sulla base della scala bipolare per la valutazione del comfort termico percepito a sette step (molto freddo, freddo, leggermente freddo, neutro, leggermente caldo, caldo, molto caldo), descritta nella norma *UNI EN ISO 28802:2012 "Ergonomics Of The Physical Environment - Assessment Of Environments By Means Of An Environmental Survey Involving Physical Measurements Of The Environment And Subjective Responses Of People"*.

Sensazioni diverse da quella neutra, cioè $PMV=0$, corrispondono a sensazioni di caldo e freddo e sono proporzionali al carico termico che il sistema di termoregolazione ha il compito di smaltire. Questo carico termico ha inoltre una correlazione statistica con l'indice di benessere. L'indice PMV viene quindi usato per prevedere il voto medio che la sensazione termica otterrà nei questionari posti ai tester nelle prove sperimentali e, per ogni combinazione delle sei variabili T_a , T_{mr} , $\frac{M}{A_p}$, R_v , φa , ωa , il suo valore è tabulato.

È bene specificare anche nel caso in cui si abbia un Predicted Mean Vote nullo, si avrà nel complesso un 5% di persone che descriverebbero la loro situazione termica con i giudizi della scala bipolare di molto caldo, caldo, molto freddo e freddo. Di questo fenomeno si prende nota grazie al parametro che descrive la percentuale prevedibile di persone che saranno insoddisfatte, ovvero l'indice definito Predicted Percentage of Dissatisfied o PDD, che nel caso descritto assume quindi un valore pari a 5.

Solitamente questi bilanci termici vengono calcolati per la progettazione di ambienti interni e il parametro di interesse è proprio la temperatura che l'isolamento termico fornito dall'edificio deve garantire (Fanger 1972). In questo contesto si intereisce anche il diagramma del benessere proposto dall'ASHRAE (Standard 55 – 92), relativo ad attività sedentaria ($1 - 1,2 \text{ Met}$), a velocità dell'aria inferiore a 0.17 m/s

e a un abbigliamento con valori compresi tra 0.5 e 0.7 *Clo*. Tuttavia nel caso particolare di questa analisi di comfort termico fornito da capi di abbigliamento stampati con grafene, si tende a ragionare in modo inverso: si impostano all'interno della camera climatica condizioni di temperatura media radiante, temperatura, umidità e velocità dell'aria simili a quelle reali e viene redatto un protocollo che definisce un livello di attività fisica verosimile con la destinazione d'uso del capo ($\frac{M}{A_p}$) e quindi si valuta se, considerato il valore di R_v del capo con stampa in grafene, il tester sia collocabile nella regione di benessere termico ed eventualmente se la presenza del grafene aumenti l'ampiezza della zona di comfort percepito.

Capitolo 3

Il grafene

3.1 Introduzione

Il grafene è un materiale costituito da uno strato monoatomico di atomi di carbonio i quali, essendo ibridizzati sp^2 , sono disposti secondo un reticolo planare costituito da celle esagonali. Questa particolare geometria ha ripercussioni sulla struttura elettronica a bande, la quale conferisce proprietà meccaniche, elettroniche e termiche peculiari al materiale. (Di Francia et al. 2011).

Queste particolari caratteristiche sono determinate dallo spettro di energia nei cosiddetti *punti di carica neutra*, ovvero in prossimità del massimo della banda di valenza e del minimo della banda di conduzione, in quanto il grafene è l'unico semiconduttore conosciuto con *energy gap nullo*. I punti della zona di Brillouin in cui queste due bande sono in contatto, corrispondono ai sei vertici dell'esagono che compone la struttura del grafene. Il suo reticolo cristallino può essere visto come la sovrapposizione di due sottoreticoli equivalenti di carbonio A e B, ciascuno generato da due vettori primitivi \vec{a}_1 e \vec{a}_2 . Di conseguenza, dei sei punti della zona di Brillouin, tre appartengono al reticolo primitivo A e sono equivalenti tra loro, gli altri tre appartengono invece al reticolo B e sono anch'essi tra loro equivalenti. Per descrivere le proprietà del sistema, quindi, basta prendere una coppia di punti costituita da un punto per ciascuno dei due reticoli primitivi e il resto della struttura risulta equivalente a questa coppia, in quanto interamente ottenibile tramite traslazioni di questi due punti per distanze dettate dai vettori \vec{a}_1 e \vec{a}_2 dei due reticoli primitivi che compongono la struttura. I due punti in questione sono definiti *punti di Dirac* (Di Francia et al. 2011).

Nelle zone di carica neutra, le bande assumono una forma conica e la *legge di dispersione* si sviluppa in modo lineare rispetto al vettore d'onda k . Questo significa che i portatori di carica si comportano come particelle relativistiche, ovvero come elettroni privi della loro massa a riposo m_0 e vengono detti *fermioni di Dirac privi di massa* in quanto obbediscono all'*equazione di Dirac*. Questo comporta una mobilità decisamente elevata, con valori di $15000 - 27000 \text{ cm}^2/Vs$ a temperatura ambiente

(Zhen-Qiang et al. 2015). Questi valori possono aumentare ancora se la quantità di impurezze è ridotta e non decadono ad alte concentrazioni di portatori di carica, al contrario di quello che capita per i comuni semiconduttori. Questo fa sì che i portatori di carica del grafene si muovano all'interno del suo reticolo senza subire fenomeni di scattering per distanze sub-micrometriche (Di Francia et al. 2011). Questi fattori contribuiscono all'eccezionale conducibilità termica del grafene pari a $3000 - 5000 W/mK$ (Zhen-Qiang et al. 2015).

3.2 Proprietà termiche

Per capire quanto le proprietà termiche del grafene siano influenzate dalla sua struttura atomica, vengono condotte delle analisi mediante tecniche computazionali di simulazione indicate con il termine *Dinamica Molecolare*. Queste simulazioni, attraverso l'integrazione delle equazioni del moto, permettono di studiare la dinamica di evoluzione di un sistema fisico e chimico a livello atomico e molecolare (Ronchetti 1991).

Le analisi di dinamica molecolare hanno dimostrato che c'è una forte dipendenza tra la conducibilità termica e la dimensione media del grano nel grafene nanocristallino. La distribuzione e la morfologia dei grani sono invece parametri trascurabili nella determinazione della conducibilità termica. Una diminuzione di questa proprietà e quindi un aumento della resistenza termica a bordo grano, per grani di dimensione maggiore a $5nm$, sembra sia dovuta al fenomeno dell' *out-of-plane corrugation*. Questo fenomeno è riferito alla presenza di gruppi di atomi, nelle zone prossime al bordo grano, che sono dislocati verticalmente rispetto alla configurazione piana 2D caratteristica del grafene. Questa dislocazione aumenta lo scattering di fononi ad elevata lunghezza d'onda influenzando in modo negativo sulla conducibilità termica. Per quantificare questo fenomeno, è stato usato lo scarto quadratico medio del vettore spostamento rispetto o alla posizione media degli atomi o alla funzione sinusoidale che descrive la situazione di deformazione sinusoidale del foglio di grafene tipica di grani con un raggio maggiore di $8nm$ (Hahn et al. 2016).

Per descrivere con precisione il meccanismo di trasporto del calore nel grafene, tuttavia, il solo valore della conducibilità termica non è sufficiente. Questo si evidenzia in modo inequivocabile dalle simulazioni di dinamica molecolare condotte su un foglio di grafene investito da un flusso di calore costante e di intensità ridotta. In queste condizioni di prova, infatti, appaiono spontaneamente delle increspature e il calore risulta quindi trasportato da fononi, ovvero vibrazioni quantizzate del reticolo cristallino, seguendo la legge di conduzione del calore di Fourier. Tuttavia, quando il flusso di calore incidente sul piano del grafene supera una certa soglia, si assiste alla formazione di onde meccaniche che forniscono un canale aggiuntivo alla conduzione del calore di tipo non-Fourier, provocando un aumento della

conducibilità del grafene (Wen-Jun & Bing-Yang 2016).

Per avere un'idea più chiara della situazione energetica caratteristica del grafene, si può scomporre l'energia cinetica totale nei due contributi di cui è composta:

Temperatura reale T' : Contributo riferito solamente all'energia interna con andamento di tipo lineare tra i valori limite del *termostato*.¹

Differenza di temperatura $T-T'$: Contributo riferito all'energia meccanica esterna con andamento sinusoidale, causato dall'onda meccanica che si genera per valori di flusso superiori a 2200 GW/m^2 .

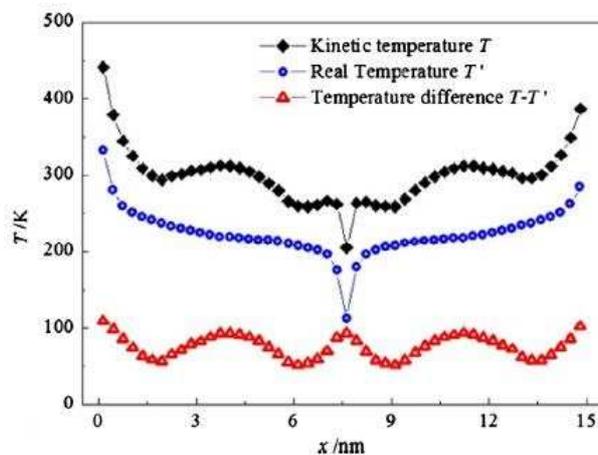


Figura 3.1: Nel grafico sono rappresentate le curve relative alle due componenti dell'energia cinetica, ovvero quella interna in blu e quella esterna in rosso, e la loro somma, cioè l'energia cinetica totale, in nero (Wen-Jun & Bing-Yang 2016).

In conclusione possiamo dire che per flussi di calore e stress elevati, il meccanismo di conduzione di calore del grafene passa da un andamento lineare (Fourier), ad uno ondulatorio. Il meccanismo di trasporto di calore mediante onda meccanica avviene quindi solo per flussi di calore di elevata intensità in grafene sottoposto

¹Nel campo della Dinamica Molecolare, il termostato è uno strumento utilizzato per eseguire in modo corretto le simulazioni. Prima di tutto è importante capire che, in questi casi, per temperatura si intende la *temperatura (cinetica) istantanea*, calcolata dall'energia cinetica del sistema attraverso il teorema dell'equipartizione dell'energia. Lo scopo del termostato è quello di assicurare che, in media, la temperatura del sistema assuma un valore corretto. Questo perché le simulazioni dinamiche molecolari analizzano il comportamento di un numero molto ridotto di particelle, fatto questo che comporta fluttuazioni elevate rispetto ai casi reali in cui un numero elevatissimo di molecole è coinvolto. Il ruolo del termostato, in particolare di quello di Nosé-Hoover (Wen-Jun & Bing-Yang 2016), è assicurare una temperatura media del sistema ragionevole e che garantisca fluttuazioni ridotte.

a trazione. Quest'onda meccanica permette di rendere il grafene più conduttivo, senza tuttavia modificare il valore originario di conducibilità termica, dipendente unicamente dal contributo lineare di Fourier alla conduzione che rimane invariato. La frequenza di questo fenomeno ondulatorio è due ordini di grandezza inferiore rispetto alle vibrazioni random del reticolo ed aumenta con l'aumentare del flusso di calore o della lunghezza di legame. L'energia trasportata da quest'onda meccanica aumenta con l'aumentare dell'intensità del flusso di calore. Quello accade è un cambiamento a livello di equilibrio termodinamico: il gradiente di temperatura ha un andamento non lineare rispetto al flusso di calore e questo rende più efficiente il trasporto di calore all'interno della struttura cristallina del grafene (Wen-Jun & Bing-Yang 2016).

3.3 Problemi relativi alla stampa

Le eccezionali proprietà del grafene a livello teorico, vanno tuttavia incontro ad alcuni problemi quando si passa alle applicazioni pratiche in cui sono utilizzate. In questo caso il problema sorge nel momento in cui viene effettuata la stampa sul tessuto.

La questione più rilevante riguardo la stampa è la complessità della formulazione che comprende tensioattivi, agenti stabilizzanti e solventi di vario tipo. Spesso i solventi sono ad elevata temperatura di ebollizione (maggiore di $100^{\circ}C$), tossici e costosi. Sono presenti sul mercato anche alternative senza solventi, nel caso in cui gli agenti stabilizzanti abbiano parametri di solubilità di Hansen compatibili o solventi a bassa temperatura di ebollizione (minore di $100^{\circ}C$). In quest'ultimo caso si crea una stabile formulazione dell'inchiostro grazie al fatto che la miscela di solventi utilizzati migliora l'affinità tra la formulazione e il materiale 2D, tuttavia si potrebbe incorrere in instabilità reologica dovuta alla presenza di due solventi che hanno velocità di evaporazione diverse. Altri problemi possono derivare inoltre dall'ostruzione dell'ugello nel caso di viscosità troppo elevate (Carey et al. 2017).

Per il grafene è già stata proposta (Carey et al. 2017) una formulazione con solvente ad alto punto di ebollizione in cui si inserisce il materiale stratificato, i cui piani vanno incontro ad esfoliazione. Successivamente si trasferisce tutto in un solvente a basso punto di ebollizione. Quando la goccia di inchiostro viene a contatto con il substrato, si distribuisce su di esso seguendo l'equazione di Young. La differenza tra la tensione superficiale di inchiostro a base grafene (30 mNm^{-1}) e la sostanza polimerica, PEDOT:PSS nel caso di questa formulazione (44 mNm^{-1}), su cui avviene la stampa è minima e questo permette alla gocce di coalescere anche su superfici con bassa tensione superficiale, come il poliuretano, permettendo stampe uniformi.

Nel caso delle sperimentazioni di cui si tratta in questa tesi, non è nota la formulazione. In ogni caso, durante il processo di stampa prima e finissaggio poi,

è inevitabile la presenza di sostanze polimeriche a stretto contatto con il grafene. I polimeri hanno valori di conducibilità termica molto ridotti, tipicamente $0.2 - 0.5 W/mK$, perciò, soprattutto operazioni di finissaggio, causano inevitabilmente un abbassamento delle eccellenti proprietà termiche del grafene. Non solo, le proprietà termiche possono subire peggioramenti a causa della possibile distribuzione anisotropica del grafene all'interno dell'inchiostro, fatto questo che peggiora la conduzione out-of-plane del calore, e a causa delle interfacce che si creano inevitabilmente tra grafene e sostanze polimeriche. Considerato che il sistema in esame ha molte caratteristiche simili ad un composito grafene-polimero, possiamo pensare che molte delle considerazioni fatte in questo campo possano essere valide anche per la stampa in esame, sebbene analisi più approfondite in questo senso dovrebbero essere eseguite. Dalle conoscenze derivate dagli studi fatti su compositi che usano grafene come filler e polimeri come matrice, sappiamo che:

- Il maggior ostacolo al trasporto termico conduttivo in questi sistemi è rappresentato dalla *resistenza di Kapitza* a livello filler-filler e filler-matrice (Bigdeli & Fasano 2017)
- La resistenza di Kapitza² è principalmente dovuta a due effetti: lo scattering all'interfaccia tra le due fasi e la differenza tra gli spettri fononici delle due fasi (Bigdeli & Fasano 2017).
- Un fattore chiave per il trasporto termico nei *PMC (Polymer matrix composites)* a base grafene è la *percolazione*. Infatti il calore è in grado di essere trasmesso per conduzione solo se si forma un network, cioè un vero e proprio collegamento fisico, tra i filler di grafene. Nel caso di network possono emergere dei vincoli aggiuntivi alla conduzione dovuti a modifiche degli equilibri energetici (Cao et al. 2016), ma evitabili in parte attraverso il cross-linking dei fogli di grafene tramite legami covalenti (Bigdeli & Fasano 2017).
- La conducibilità termica dei filler grafenici aumenta con l'aumentare della taglia per lunghezze inferiori al Libero Cammino Medio, ovvero la distanza media percorsa da una particella tra due urti successivi, ma per dimensioni maggiori a questa soglia risulta indipendente dalla taglia.
- Attualmente non è ancora compreso totalmente il fenomeno di trasferimento del calore attraverso l'interfaccia e non esiste un modello matematico che descriva questa trasmissione conduttiva di calore. Esiste tuttavia un modello

²A proposito della resistenza di Kapitza, si riporta il caso del calcolo del valore di tale resistenza per un composito grafene-resina epossidica. La resistenza termica calcolata a bordo grano R_k tra le due fasi varia tra $3.24 \cdot 10^{-8}$ e $9.18 \cdot 10^{-8} m^2/KW$ in base alla pressione all'interfaccia e al grado di cross-linking (Mortazavi et al. 2013).

per il calcolo della conducibilità termica effettiva che tenga conto di tutte le considerazioni fatte precedentemente, nonostante le ancora numerose zone d'ombra del fenomeno. Questo modello trova le sue basi in quello di Maxwell-Garnett, modificato da Shahil e Balandin al fine di considerare la resistenza di Kapitza. Dalle analisi eseguite utilizzando questo modello emerge che la resistenza di Kapitza ha un effetto trascurabile per ridotte frazioni volumetriche di filler, mentre gioca un ruolo significativo in caso di frazioni in volume elevate. Si è evidenziata inoltre una correlazione esponenziale diretta tra la conducibilità effettiva (λ_{eff}) e la sovrapposizione tra i filler (a) e inversa tra λ_{eff} e la distanza tra filler contigui (h) (Bigdeli & Fasano 2017).

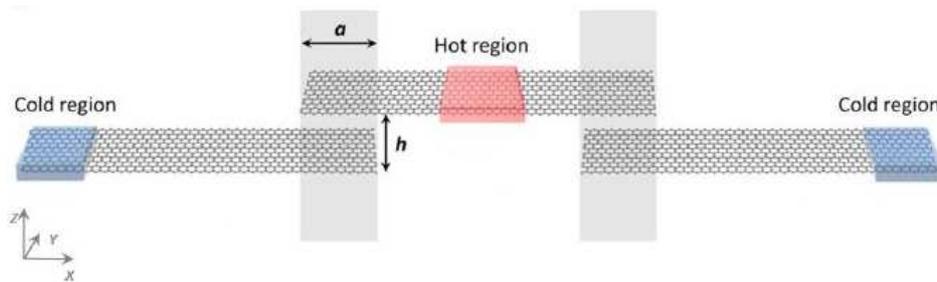


Figura 3.2: Modello teorico del network di fogli di grafene presenti in un PMC. Si evidenziano i parametri di sovrapposizione tra fogli (a) e la distanza lungo la verticale tra filler contigui (h) (Bigdeli & Fasano 2017).

Riassumendo quindi risulta evidente che la questione degli effetti di una stampa al grafene all'interno di un capo di abbigliamento sia molto complicata a livello teorico e pratico, soprattutto quando si tratta di discriminare con precisione i fattori più influenti ai fini dell'ottenimento di un prodotto funzionante in modo efficace.

Capitolo 4

Test effettuati sui tessuti

4.1 Introduzione

Sono stati eseguiti dei test fisici con lo scopo di misurare la permeabilità all'aria e la capacità di gestione del sudore dei tessuti.

4.2 Permeabilità all'aria

4.2.1 La prova

La *permeabilità all'aria* è definita dalla norma *UNI EN ISO 9237:1995* come "la velocità di un flusso d'aria che passa perpendicolarmente attraverso un campione standard di tessuto, in condizioni specificate di *area di prova*, *caduta di pressione* e *tempo*". La prova ha quindi lo scopo di misurare la portata d'aria che attraversa perpendicolarmente un tessuto in precise condizioni di prova. I campioni devono essere ambientati prima di essere sottoposti al test in un'atmosfera di prova fissata dalla normativa precedentemente citata. Lo strumento utilizzato è il permeabilmetro *Branca air permeability n37s* e le prove sono state svolte utilizzando i parametri in tabella 4.1.

Tabella 4.1: Parametri di prova utilizzati nella misura della permeabilità all'aria dei tessuti.

| | |
|-------------------------------------|-----------|
| Riduzione | 20 cm^2 |
| Depressione | 100 Pa |
| Volume d'aria | 100 l |
| Numero di prove per campione | 10 |

4.2.2 Risultati

I tessuti che sono stati forniti dall'azienda sono quelli presentati in tabella 4.2. Sono stati utilizzati due finissaggi diversi:

Finissaggio 1 : fissatore di stampa a base di tannino liquido.

Finissaggio 2 : fissatore di stampa composto da una dispersione di nanoparticelle a base poliuretanic.

Tutti i tessuti con stampa in grafene hanno un peso di $230g/m^2$.

Alcuni dei tessuti sono stati sottoposti ad un lavaggio eseguito dal macchinario per tintura *Mathis Labomat BFA 12*. È stata utilizzata una soluzione standard di $4 g/l$ *ECE* ed una rotazione di $50 rpm$, per $60 s$ in senso orario e per $60 s$ in senso antiorario. Il programma utilizzato prevedeva una temperatura di $40 ^\circ C$, raggiunta mediante una rampa di $5 ^\circ C/s$ per un tempo totale di $35 minuti$. In seguito al lavaggio è stata eseguita un'asciugatura per una durata di $14 ore$ a $40 ^\circ C$.

Tabella 4.2: Risultati delle prove di permeabilità all'aria.

| Tipo di tessuto Sensitive $\text{\textcircled{R}}$ | Media (mm/s) | Deviazione standard |
|--|--------------|---------------------|
| Non stampato, non lavato | 430.41 | 26.90 |
| Stampato, non lavato | 338.58 | 22.15 |
| Stampato, finissaggio 1, non lavato | 393.48 | 27.06 |
| Stampato, finissaggio 1, lavato | 275.11 | 22.24 |
| Stampato, finissaggio 2, non lavato | 482.65 | 10.88 |

La permeabilità all'aria risulta elevata per i tessuti Sensitive tal quali e quelli con finissaggio di tipo 2, i quali sono caratterizzati anche dalla minima deviazione standard tra tutte le prove. Risultati peggiori si ottengono invece per il tessuto stampato e per il tessuto con il finissaggio del primo tipo. Si nota inoltre una diminuzione della permeabilità all'aria in seguito al lavaggio nel caso del finissaggio 1.

Nel caso di capi destinati ad ambienti invernali o con ventilazione elevata, sono consigliate permeabilità all'aria ridotte, al fine di minimizzare il passaggio di aria attraverso il tessuto e il flusso di calore convettivo disperso verso l'ambiente.

Per situazioni in cui le attività sono intense e svolte in ambienti a temperature medio-alte, la minore permeabilità all'aria potrebbe essere un fattore limitante nella trasmissione del calore verso l'esterno. Tuttavia, se viene compensata da una migliore capacità radiativa e conduttiva del capo di abbigliamento, la riduzione di flusso di calore convettivo può non essere eccessivamente penalizzante.

4.3 Liquid Moisture Management

4.3.1 La prova

Il test valuta il *Liquid Moisture Management* di un tessuto secondo la norma americana *AATCC 195-2009 "Liquid Moisture Management of Textile Fabrics"* e mediante lo strumento *Moisture Management Tester (MMT)* della SDL Atlas (Inghilterra) (Bao-guo et al. 2006). Il test ha lo scopo di valutare la capacità di un tessuto di assorbire il sudore prodotto durante l'attività fisica e di trasferirlo sul lato esterno del capo d'abbigliamento per facilitarne l'evaporazione (Roshan 2015). In particolare, l'MMT è in grado di valutare la capacità del tessuto di trasferire una soluzione salina in tre direzioni differenti:

1. trasporto radiale sulla superficie interna a contatto con la pelle, ovvero la prima a bagnarsi durante il test, definita top;
2. trasferimento dalla superficie interna a quella esterna;
3. trasporto radiale sulla superficie esterna, definita bottom.

Per quantificare questi tre processi, vengono forniti una serie di indici:

Absorption Rate (AR) : velocità media di assorbimento del liquido dalla parte dell'interno (top) e dell'esterno (bottom) durante la fase iniziale del test;

Wetting Time (WT) : tempo impiegato dai due lati per iniziare a bagnarsi dopo la partenza del test. Un tempo di 120 s (pari al tempo totale del test) significa che la superficie è rimasta asciutta;

Spreading Speed (SS) : velocità di trasporto radiale dal punto di caduta della soluzione salina al massimo raggio di bagnatura del tessuto;

Accumulative One-Way Transport Capability (R) : trasporto del liquido dall'interno all'esterno, sulla base della differenza dell'area bagnata delle due superfici rispetto al tempo;

Overall Liquid Moisture Management Capability (OMMC) : indice della capacità complessiva di un tessuto di trasportare il liquido, calcolata dal sistema sulla base dei risultati ottenuti da 3 dei parametri misurati: AR bottom, SS bottom e R.

Il tessuto ideale per lo sport dovrebbe avere una piccola superficie bagnata a contatto pelle, un'elevata velocità di trasferimento del liquido sulla faccia esterna del tessuto e una grande superficie bagnata sul lato esterno del tessuto, per massimizzare la velocità di evaporazione e di conseguenza quello che viene definito *evaporative cooling*, cioè il raffreddamento del corpo dovuto all'evaporazione del sudore.

4.3.2 Risultati

Per tutti gli indici introdotti in precedenza, lo strumento fornisce i valori numerici e i corrispettivi "grade", calcolati rapportando i dati numerici in una scala da 1 a 5, dove 1 rappresenta la prestazione peggiore per un tessuto per uso sportivo e 5 la migliore. I dati, per ogni tessuto, sono il risultato della media di 5 campioni dello stesso tessuto.

Si precisa inoltre che i tessuti ricevuti dall'azienda presentavano la stampa in grafene sul lato esterno del tessuto, pur essendo la stampa destinata al lato interno del capo. Per questo motivo si è ritenuto opportuno eseguire il test su entrambe le facce del tessuto. Con retro si intende il lato interno senza la stampa G+.

Verranno presentati di seguito i dati medi per ciascun tessuto. MWR indica il Max Wetted Radius, raggio massimo della macchina di soluzione salina depositata sul tessuto.

Tabella 4.3: Risultati del test MMT

| Tessuti | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
|------------------|-----|-----|---|------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| Sensitive | | | | | | | | | | |
| WT Top | 4 | 4 | 5 | 4.5 | 4.5 | 4.5 | 5 | 5 | 4 | 4 |
| WT Bottom | 3 | 3 | 5 | 3.5 | 3.5 | 4 | 4 | 4 | 3.5 | 3.5 |
| AR Top | 4 | 4 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 |
| AR Bottom | 4 | 3.5 | 3 | 4 | 3.5 | 3.5 | 4 | 4 | 3.5 | 3.5 |
| MWR Top | 1 | 1 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 |
| MWR Bottom | 1 | 1 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 |
| SS Top | 1.5 | 1.5 | 4 | 3.25 | 3.5 | 3.5 | 3.5 | 3.5 | 3 | 2.5 |
| SS Bottom | 1 | 1 | 3 | 2.75 | 3 | 3 | 3 | 3 | 2.5 | 2 |
| R | 4 | 4 | 3 | 3.75 | 4 | 2.5 | 4 | 4 | 3 | 2.5 |
| OMMC | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |

Vengono riportati di seguito alcuni grafici rappresentanti il contenuto dell'acqua in funzione del tempo e la localizzazione dell'acqua in funzione del tempo. Nel primo caso (grafici water content vs time) la linea verde rappresenta l'andamento del lato interno, mentre la linea blu quello del lato esterno. Nel secondo caso (grafici water location vs time) il disegno a sinistra rappresenta il lato superiore e quello a destra il lato inferiore. Il nero rappresenta le aree rimaste asciutte, mentre l'azzurro rappresenta le aree raggiunte dalla goccia d'acqua.

Tutti i tessuti dimostrano ottime capacità di gestione del sudore, con alta assorbimento soprattutto sul lato interno dal tessuto, ovvero il primo che incontra il liquido, e rapida asciugatura.

Ci sono alcune osservazioni che si possono fare in base ai risultati ottenuti. La prima riguarda le proprietà conduttive del grafene. Dal grafico water content vs

Tabella 4.4: Tessuti testati con MMT

| | |
|----|---|
| 1 | Sensitive |
| 2 | Sensitive retro del tessuto |
| 3 | Sensitive stampato |
| 4 | Sensitive stampato retro del tessuto |
| 5 | Sensitive stampato con finissaggio 1 |
| 6 | Sensitive stampato con finissaggio 1 retro del tessuto |
| 7 | Sensitive stampato con finissaggio 1 lavato |
| 8 | Sensitive stampato con finissaggio 1 lavato retro del tessuto |
| 9 | Sensitive stampato con finissaggio 2 |
| 10 | Sensitive stampato con finissaggio 2 retro del tessuto |

time del tessuto Sensitive stampato senza finissaggio si riportato in figura 4.3, si può vedere che la curva corrispondente al lato in cui è presente il grafene non parte da zero. Questo è dovuto al fatto che il tessuto va posizionato tra due piastre conduttive dotate di sensori che registrano curve diverse da zero quando entrano in contatto con l'acqua che ha conduttività non nulla. Quando è assente il finissaggio, i sensori rilevano a contatto con il grafene una conducibilità diversa da zero. In tutti i casi in cui viene posto un finissaggio sulla stampa, questo fenomeno non si verifica. Considerato che proprietà termiche ed elettriche sono sempre correlate tra loro, è possibile che il finissaggio comprometta in modo rilevante le proprietà conduttive del tessuto con stampa G+.

Altre osservazioni si possono fare sul modo in cui il liquido si spande sui diversi tessuti. infatti nel caso del tessuto stampato e soprattutto nel tessuto con finissaggio 1, la soluzione salina si diffonde maggiormente lungo le aree stampate. Nel caso invece del finissaggio 2 e del tessuto con finissaggio 1 sottoposto a lavaggio, il liquido mostra una diffusione di tipo circolare, senza seguire vie preferenziali di diffusione intorno alla stampa

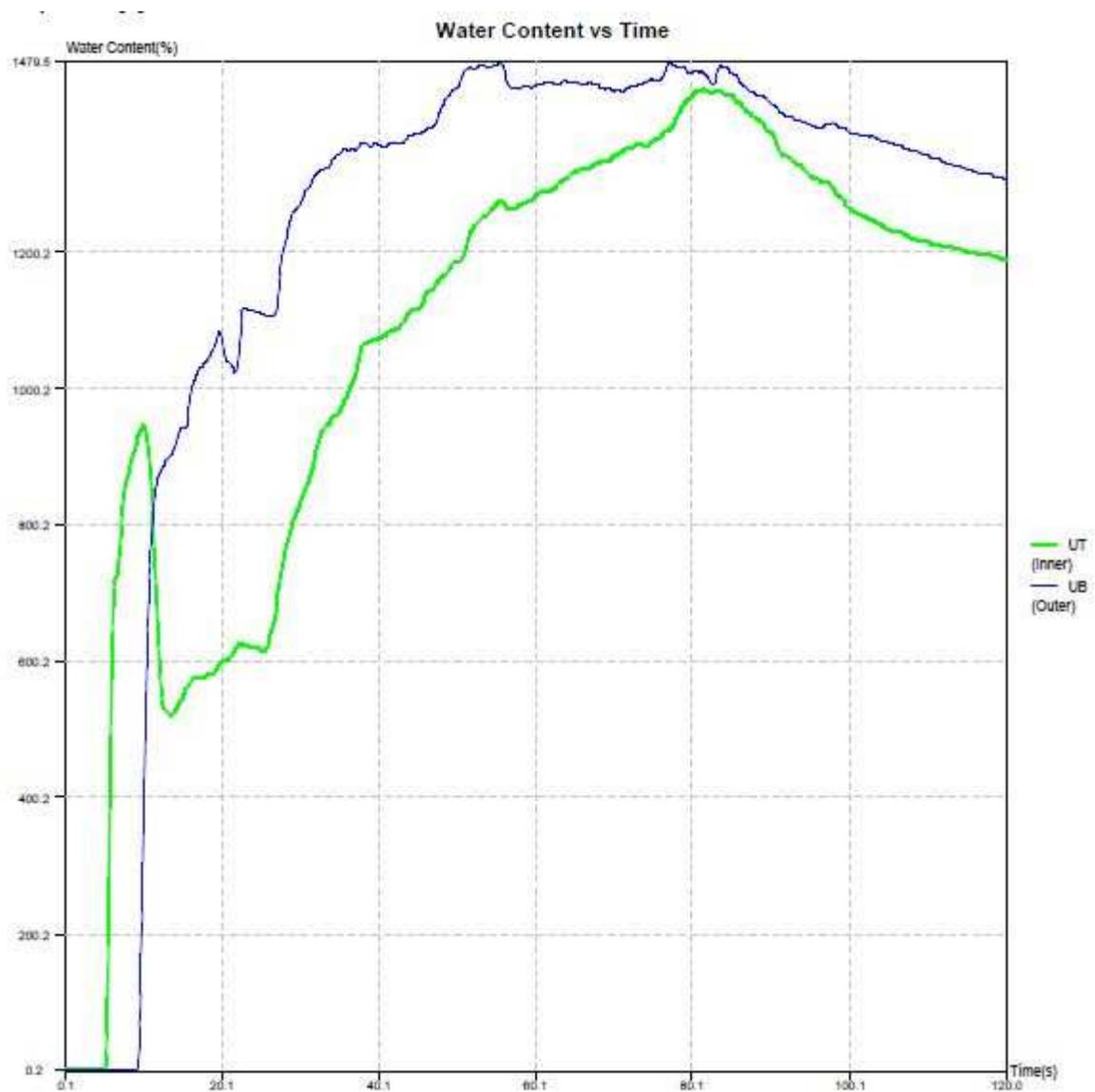


Figura 4.1: Grafico water content vs time in cui viene presentato l'andamento comune alla maggior parte dei tessuti testati.

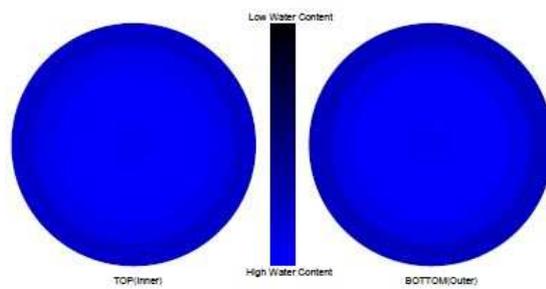


Figura 4.2: Grafico water location vs time caratteristico della maggior parte dei tessuti testati.

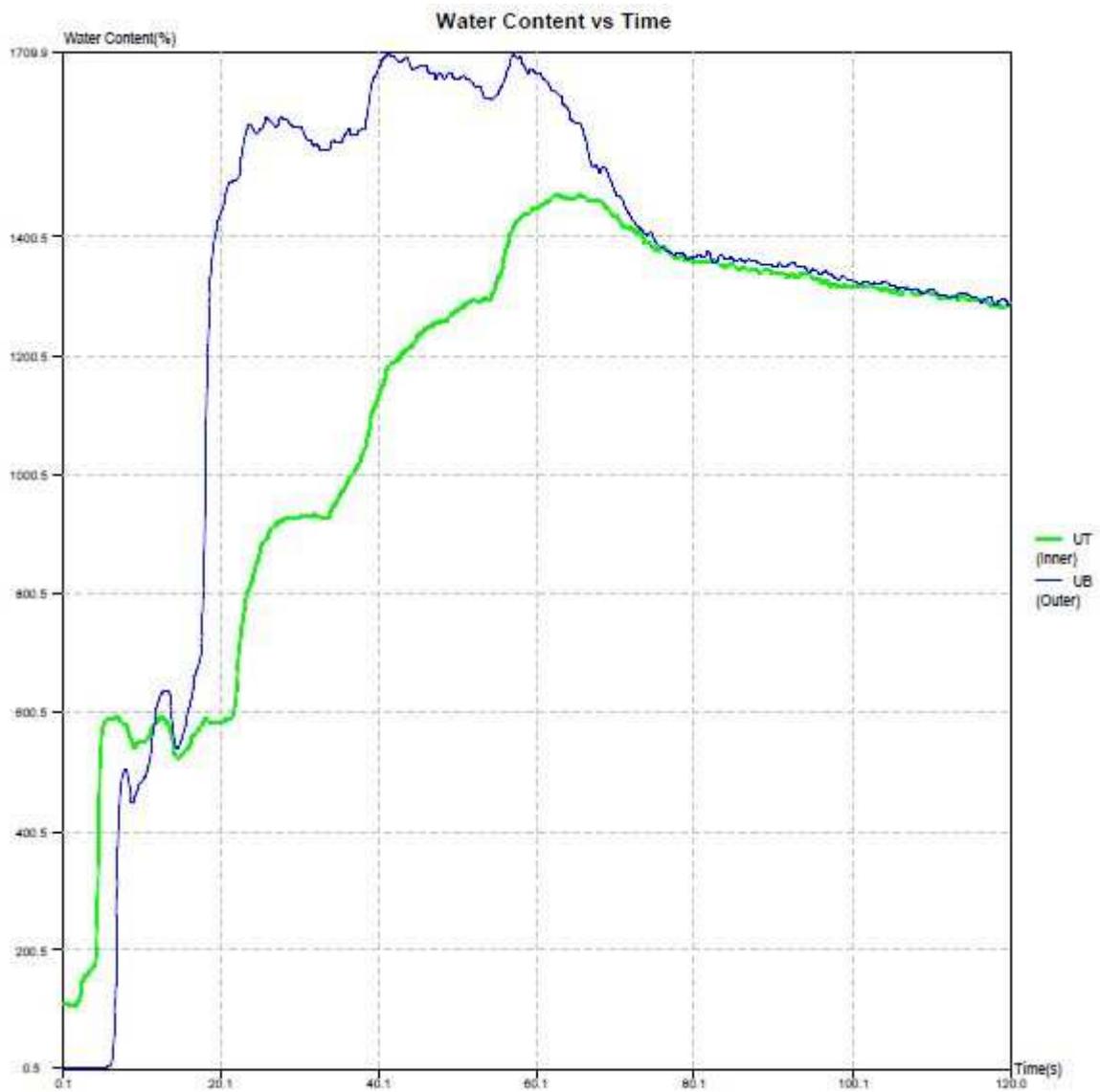


Figura 4.3: Grafico water content vs time eseguito sul tessuto sensitive stampato senza finissaggio, in cui viene evidenziata la conducibilità del grafene.

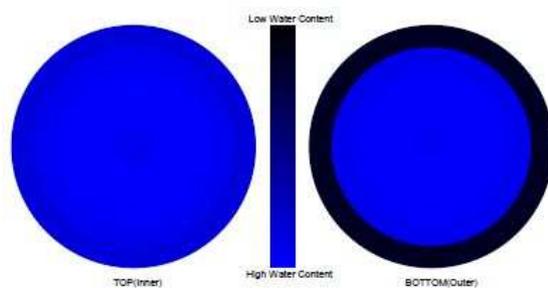


Figura 4.4: Grafico water location vs time eseguito sul tessuto sensitive stampato senza finissaggio.

Capitolo 5

Sperimentazioni in camera climatica

5.1 Protocollo sperimentale

Per la valutazione del comfort termofisiologico sono stati condotti dei test di indosso nella camera climatica dei laboratori LATT di Biella. A seconda del capo di abbigliamento da testare, sono state selezionate le condizioni di temperatura (in un range $-10\text{ }^{\circ}\text{C} : 50\text{ }^{\circ}\text{C}$) e umidità (in un range da $0 : 100\%$) il più possibile corrispondenti alla reale condizione di utilizzo e poi mantenute costanti per tutta la durata della prova. Viene definito in secondo luogo un protocollo sperimentale che permetta di verificare l'efficacia del capo di abbigliamento testato. I test di indosso sono svolti generalmente da un gruppo di 5 tester, ciascuno dei quali svolge due prove:

- un test con l'abbigliamento da testare, in questo caso un capo di abbigliamento con stampa contenente grafene (indicato con G+)
- un test con l'abbigliamento di controllo, in questo caso un capo di abbigliamento identico al precedente ma senza stampa (indicato con CRT)

I test di indosso sono stati effettuati in due giorni ravvicinati e alla stessa ora, in modo da minimizzare gli effetti dei cicli circadiani sulla fisiologia umana. L'ordine dei test (prima G+ e poi CTR o viceversa) è stato casuale per impedire che l'ordine possa influenzare i tester nella risposta al questionario del quale tratteremo in seguito. I capi di abbigliamento sono stati ambientati in camera climatica prima dell'indosso. Ciascun tester ha trascorso la fase di preparazione al test (circa 20 *minuti* durante i quali il soggetto si è pesato ed è poi stato preparato mediante il posizionamento dei sensori) al di fuori della camera (a circa $20\text{ }^{\circ}\text{C}$). Al suo ingresso in camera, il tester indossa l'abbigliamento completo della prova, la quale inizia con una fase di ambientamento di 20 *minuti* in cui il Tester rimane seduto, in modo che possa acclimatarsi senza sudare. La prova, che ha una durata totale di 60 *minuti*, suddivisa come segue:

Fase 1 : Prima fase ad intensità ridotta, solitamente di una durata pari a 10 o 15 minuti. Queste prove in genere sono condotte su treadmill o fit bike:

- Nel caso del *treadmill*, è possibile regolare *velocità e inclinazione*. Nelle fasi a intensità ridotta solitamente viene impostata una velocità intorno ai 4 – 6 *km/h* senza inclinazione.
- Nel caso della *fit bike*, è possibile regolare i *giri al minuto* delle ruote attraverso la taratura dell'attrito tra freno e ruota. Nelle fasi a intensità ridotta, si tende a simulare un tratto in discesa con ridotto attrito, corrispondente a valori intorno a 100 *rpm*, e con una *ventilazione* nella camera di 13 *km/h*.



Figura 5.1: Fitbike utilizzata nelle prove.

Fase 2 : Prima fase ad intensità elevata, di durata pari a 10 *minuti*.

- Nel caso del treadmill solitamente viene impostata una velocità intorno a 10 *km/h* con un'inclinazione del 6%.
- Nel caso della fitbike, per la fase ad elevata intensità si simula un tratto in salita aumentando l'attrito a livello della ruota, arrivando a 85 *rpm*, e annullando la ventilazione.

Fase 3 : Seconda fase ad intensità ridotta di 10 *minuti*.

Fase 4 : Seconda fase ad intensità elevata di durata pari a 10 *minuti*.



Figura 5.2: Treadmill utilizzato nelle prove.

Fase 5 : Fase di recupero con il tester seduto per un tempo generalmente di 15 o 20 *minuti*, a volte con una leggerissima ventilazione (2 *km/h*).

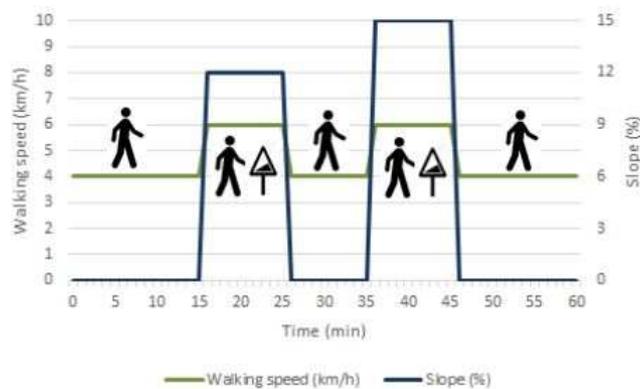


Figura 5.3: Esempio prova su treadmill

5.2 Parametri valutati

Per valutare il comfort termo-fisiologico, durante i test vengono acquisiti:

1. I seguenti *parametri fisiologici*:
 - temperatura e umidità della pelle (Furmański & Łapka 2017);
 - temperatura e umidità del microclima (Irzmanska 2016);

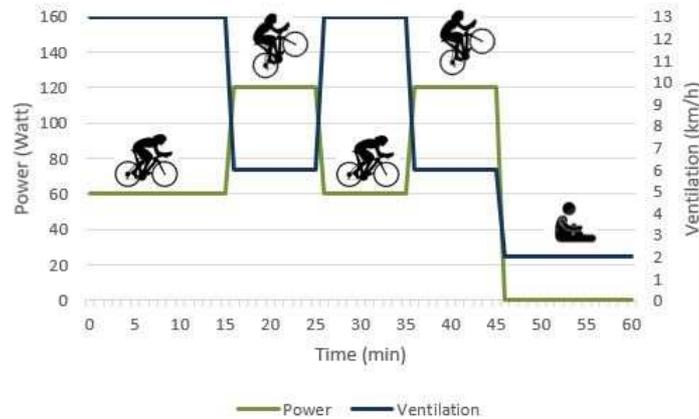


Figura 5.4: Esempio prova su fit bike

- quantità di sudore prodotto;
 - frequenza cardiaca (accoppiata alla potenza sviluppata solo nel caso della fit bike).
2. I giudizi soggettivi sull'outfit testato acquisiti mediante questionari.
 3. La distribuzione delle temperature è valutata attraverso l'esecuzione di termografie.

5.2.1 Parametri fisiologici

Temperatura media cutanea e umidità relativa della pelle : La temperatura media cutanea viene misurata, in accordo con la norma *UNI EN ISO 9886*, con la seguente formula:

$$T_{sk} = T_{forehead} \cdot 0.07 + T_{scapuladx} \cdot 0.175 + T_{chestsx} \cdot 0.175 + T_{deltoiddx} \cdot 0.07 + T_{elbowsx} \cdot 0.07 + T_{handsx} \cdot 0.05 + T_{tighdx} \cdot 0.19 + T_{calfsx} \cdot 0.20 \quad (5.1)$$

Tale formula richiede l'acquisizione della temperatura in otto distretti cutanei: scapola destra, pettorale sinistro, deltoide destro, gomito sinistro, mano sinistra, coscia destra, polpaccio sinistro e fronte. Queste temperature sono state acquisite ogni 10 secondi per mezzo dei *sensory wireless I-button Maxim Integrated DS1923*, fissati sulla pelle per mezzo di un cerotto traspirante e anallergico.

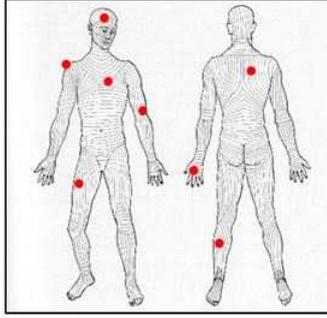


Figura 5.5: Posizione dei sensori di temperatura per la valutazione della temperatura media cutanea.



Figura 5.6: Sensori wireless I-button Maxim Integrated DS1923

Temperatura media cutanea e umidità del distretto corporeo coperto : solitamente si tratta della zona del torso e viene calcolata tramite la seguente formula:

$$T_{skintorso} = T_{scapuladx} \cdot 0.4167 + T_{chestsx} \cdot 0.4167 + T_{deltoidx} \cdot 0.1667 \quad (5.2)$$

La formula 5.2 non fa riferimento a una norma internazionale, ma è stata ricavata mantenendo la stessa proporzione tra i pesi di scapola, petto e deltoide utilizzati nell'equazione 5.1. In altre parole i coefficienti dell'equazione 5.2 tengono conto dell'estensione relativa della superficie dei distretti cutanei coperti dal capo oggetto dell'indagine. In particolare, considerato che l'obiettivo dei capi testati è centrato sull'uniformità della temperatura, in questo caso nel distretto coperto sono stati posizionati cinque ulteriori sensori (pettorale dx, scapola sx, deltoide sx, zona lombare dx e sx), in modo da avere una mappatura più dettagliata di temperatura e umidità nella zona coperta dal capo di abbigliamento.

Le stesse formule multilineari sono state utilizzate per esaminare l'andamento dell'*umidità relativa della pelle*, sia media che nel comparto coperto dall'outfit.



Figura 5.7: Tester dopo l'applicazione dei sensori aggiuntivi sul torso.

Temperatura e umidità del microclima : monitorate durante il test attraverso *sensory wireless PCE – MSR145*. Solitamente vengono fissati due sensori posizione anteriore (in corrispondenza dello sterno), uno tra pelle e primo strato e uno tra primo e secondo strato, e uno in posizione posteriore (in corrispondenza della zona lombare), collocato tra primo e secondo strato. Le acquisizioni dei dati vengono effettuate con una cadenza di 10 *secondi*.



Figura 5.8: Sensori wireless PCE-MSR 145

Quantità di sudore : Per valutare la quantità di sudore prodotta da ciascun volontario durante il test e la quantità residua sui capi al termine del test, i parametri misurati sono:

- Peso dei volontari prima e dopo il test (*Bilancia elettronica*, risoluzione 5g)
- Peso dei capi prima e dopo il test (*Bilancia scientifica*, risoluzione 1 mg)

Frequenza cardiaca e potenza : La frequenza cardiaca e la potenza sono state monitorate per mezzo dell'acquisitore *Garmin Edge 520* durante l'intera durata del test, ma i dati relativi alla potenza possono essere rilevati solo se il test fa uso della fitbike.

5.2.2 Parametri soggettivi

Per valutare il comfort termo-fisiologico percepito da ciascun soggetto o *comfort soggettivo* è stato elaborato un questionario idoneo a monitorare le sensazioni termiche

Capitolo 6

Elaborazione dei risultati

6.1 Introduzione

Verranno presentati e commentati ora i risultati ottenuti dalle analisi operate in camera climatica, eseguite seguendo le procedure descritte nel capitolo precedente. Come già accennato, trattandosi di dati sensibili, i grafici seguenti sono presi da diverse sperimentazioni ed utilizzati a titolo esemplificativo, allo scopo di non rendere pubblico il pool di dati completi riguardanti uno specifico prodotto. Per quanto riguarda l'analisi delle immagini termografiche verranno utilizzate solamente le termografie delle sperimentazioni con fitbike, per le motivazioni già introdotte.

6.2 Temperatura e umidità

6.2.1 Dati considerati

I dati per calcolare temperatura e umidità medie cutanee, secondo l'equazione 5.1, sono stati raccolti con una frequenza di 10 secondi tramite i sensori wireless I-button Maxim Integrated DS1923, posizionati negli otto distretti cutanei specificati dalla normativa UNI EN ISO 9886. È stata calcolata la media tra le temperature medie cutanee di tutti i tester allo stesso istante e con lo stesso tipo di abbigliamento.

Solitamente vengono calcolate la temperatura e l'umidità media cutanea riferite solo ai distretti corporei coperti dall'outfit in esame, in modo da avere un dato che sia più rappresentativo di quanto accade. Nella maggior parte delle sperimentazioni, tale distretto coincide con la zona del torso, perciò il calcolo viene eseguito seguendo la formula 5.2. Inoltre, in tutte le sperimentazioni eseguite su capi con stampa in grafene, è stato raddoppiato il numero di sensori normalmente posizionati sul torso al fine di ottenere una mappatura ancora più completa ed attendibile di temperatura e umidità. Anche questi dati sono stati raccolti utilizzando sensori wireless I-button

Maxim Integrated DS1923, i quali hanno effettuato una rilevazione ogni 10secondi per tutta la durata della prova.

La temperatura e l'umidità del microclima sono state monitorate durante il test attraverso sensori wireless PCE-MSR 145, con acquisizioni ogni 10 secondi. Anche in questo caso viene calcolata, per ciascuno strato, la media dei valori raccolti dai sensori presenti in quello strato per tutti i tester allo stesso istante, sia per la temperatura che per l'umidità.

6.2.2 Grafici

Per tutti questi dati si costruisce un grafico, come quello presentato in figura 6.1, in cui si può distinguere l'evoluzione temporale di due curve: la curva in nero che descrive l'evolversi delle medie di dati descritti in precedenza per i capi di controllo (CRT); la curva in rosso che descrive invece l'evoluzione temporale delle medie per l'abbigliamento G+. Insieme alle medie vengono riportate anche le relative deviazioni standard (DS). Le linee grigie verticali separano le varie fasi del test.

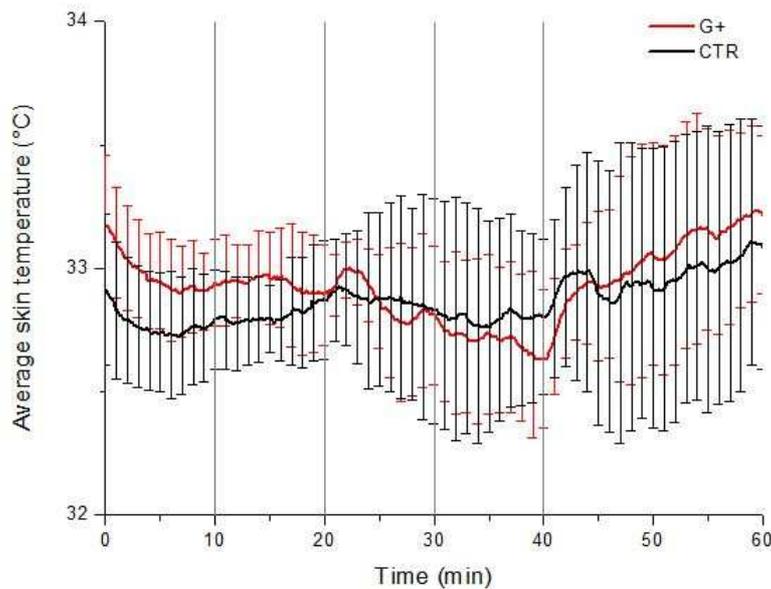


Figura 6.1: Esempio di andamento della temperatura media cutanea e relative deviazioni standard (media sui 5 tester).

Per ciascuna tipologia di dati (temperatura media cutanea, temperatura media cutanea del torso, temperatura del microclima, umidità media cutanea, umidità media cutanea del torso, umidità del microclima) viene calcolata la media complessiva dei valori raccolti in tutto l'arco della prova per tutti i test, sempre discriminando tra il capo di controllo CRT e per il capo trattato G+.

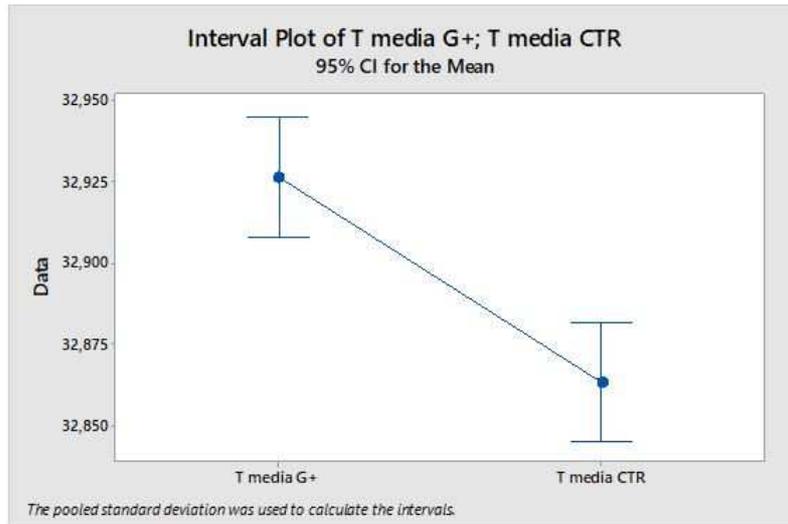


Figura 6.2: Temperatura media cutanea e rispettiva deviazione standard per l'abbigliamento con stampa G+ e il controllo CTR.

6.2.3 Test di Student e p-value

È necessario a questo punto operare un'analisi statistica per capire se la differenza di performance ottenuta con i due capi risulta essere significativamente differente o se non esiste una differenza misurabile tra le performance dei due capi di abbigliamento.

A tal proposito è stato eseguito un test statistico parametrico, chiamato *test t di Student*, che permette di verificare se le differenze tra i valori medi di due distribuzioni di dati siano dovute al caso o se esistono effettivamente delle differenze tra i valori medi delle due popolazioni (Bottarelli 2017).

Per fare questo deve essere definita l'*ipotesi nulla*, cioè l'ipotesi secondo cui eventuali differenze tra i due valori medi siano dovuti al caso o, più precisamente, che la differenza tra le medie dei due campioni sia pari a zero. A questo punto è necessario eseguire un test di significatività statistica che permetta di valutare se l'ipotesi fatta sia corretta o meno.

Viene definito a tal proposito il *p-value*, ovvero la stima quantitativa della probabilità che le differenze osservate siano dovute al caso. Solitamente il livello di significatività viene stabilito pari a 0.05. Più precisamente, il p-value è definito come la probabilità di ottenere un risultato altrettanto estremo o più estremo di quello osservato se la diversità è interamente dovuta alla sola variabilità campionaria, ovvero se l'ipotesi iniziale nulla è vera. In termini pratici, considerato che il valore p è una probabilità e che quindi può assumere solo valori tra 0 e 1, più il valore p si avvicina a 0 e più bassa è la probabilità che la differenza osservata sia casuale.

I risultati dell'analisi statistica eseguita su capi dotati di stampa, ma con destinazioni d'uso differenti, hanno i seguenti punti in comune:

- mediamente l'umidità risulta più elevata se è presente la stampa contentente grafene.
- in quasi tutti i casi si ha un'inversione di temperatura tra la zona cutanea e il microclima.

6.2.4 Istogrammi

Con i dati di temperatura rilevati nei distretti cutanei coperti è stato realizzato un istogramma, sia globale sia per ciascuna delle fasi in cui viene suddiviso il test, interpolato da linee a campana rappresentanti l'andamento dei dati.

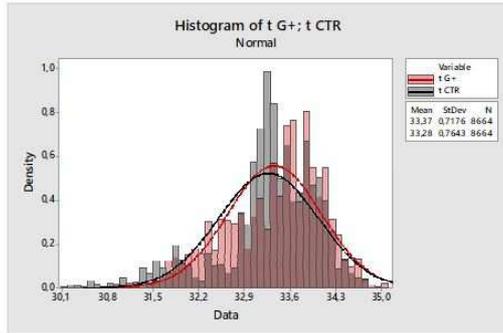
I grafici riportati 6.3 riguardano capi destinati ad attività fisiche moderate in ambiente a basse temperature. La moda dell'istogramma relativo alle temperature cutanee misurate per i capi G+, si posiziona a valori di temperatura maggiori rispetto al controllo. Lo stesso vale per l'istogramma relativo alle temperature misurate nella zona coperta dal capo G+. Inoltre, sempre per G+, la distribuzione risulta avere meno code, cioè i valori si discostano meno dalla media, e una deviazione standard più stretta, come indicato dalla minor ampiezza della curva a campana. Dagli istogrammi relativi ad ogni fase, si evidenzia una temperatura media maggiore e una maggiore uniformità di valori per G+ nelle prime due fasi del test, in cui il livello di attività fisica e di conseguenza calore e sudore prodotti sono limitati, mentre nelle restanti fasi CRT e G+ assumono andamenti molto simili.

Per i capi destinati ad attività intense e svolte a temperature medio-alte si nota invece una distribuzione con forma e deviazione standard simile tra G+ e controllo, ma con la distribuzione di G+ centrata a temperature leggermente inferiori rispetto al controllo.

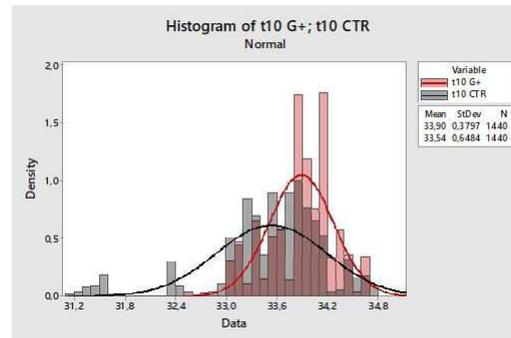
Quindi si ha l'effetto desiderato di una temperatura cutanea mediamente più elevata con G+ per abbigliamento sportivo invernale. Nel caso invece di capi destinati a temperature ed intensità di attività fisica maggiori, si osserva che la temperatura cutanea risulta leggermente minore con G+. Si può osservare come la medesima stampa su capi finalizzati a condizioni ambientali e di attività differenti, portino a risultati diversi tra loro, ma adeguati alla situazione nella quale devono operare.

6.3 Frequenza cardiaca e potenza

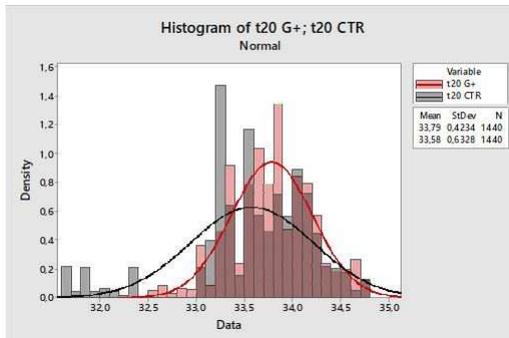
Si riportano, a titolo di esempio, i grafici della frequenza cardiaca in figura 6.4 e della potenza in figura 6.5 di un tester (Meyer et al. 2015). Di seguito si riportano le medie relative ad ogni fase del test in figura 6.6 e i grafici rappresentanti la media globale per la frequenza cardiaca in figura 6.7 e per la potenza in figura 6.8.



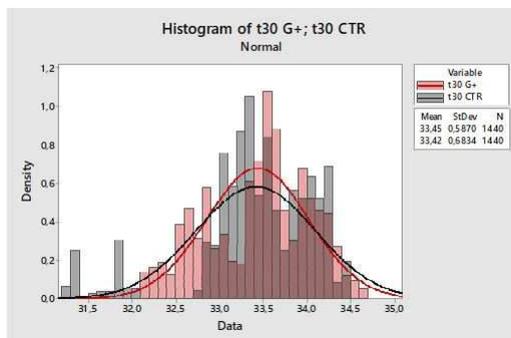
(a) *Istogramma delle temperature nei distretti coperti di CRT e G+ per la durata dell'intera prova*



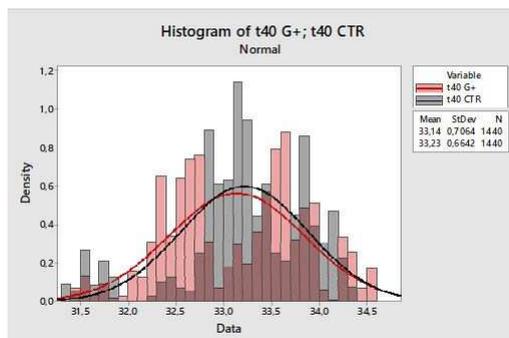
(b) *Istogramma delle temperature nei distretti coperti nella prima fase della prova. Si evidenzia la maggior temperatura media e uniformità di G+.*



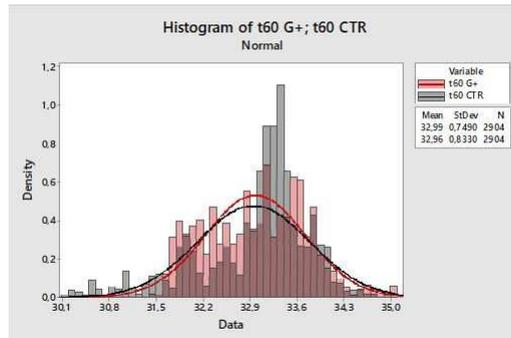
(c) *Istogramma delle temperature nei distretti coperti nella seconda fase della prova. Si evidenzia la maggior temperatura media e uniformità di G+.*



(d) *Istogramma delle temperature nei distretti coperti nella terza fase della prova. Da questa fase in poi non sono più rilevabili notevoli differenze tra G+ e controllo.*



(e) *Istogramma delle temperature nei distretti coperti nella quarta fase della prova.*



(f) *Istogramma delle temperature nei distretti coperti nell'ultima fase della prova.*

Figura 6.3: Istogrammi delle temperature.

Il monitoraggio del battito cardiaco è utilizzato per mostrare la ripetibilità dei

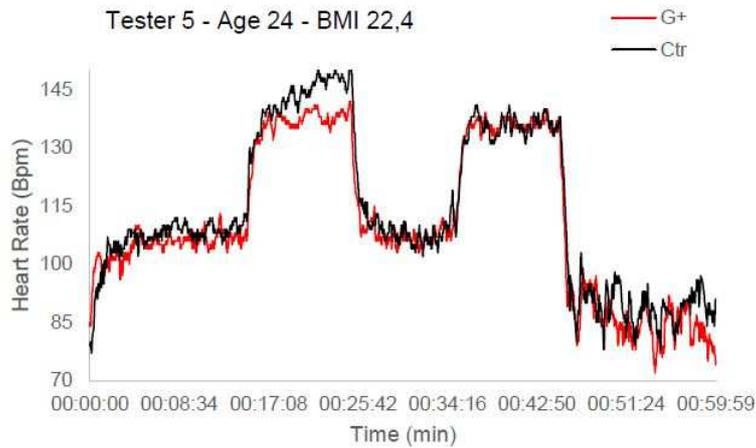


Figura 6.4: Il grafico rappresenta la frequenza cardiaca di uno dei tester.

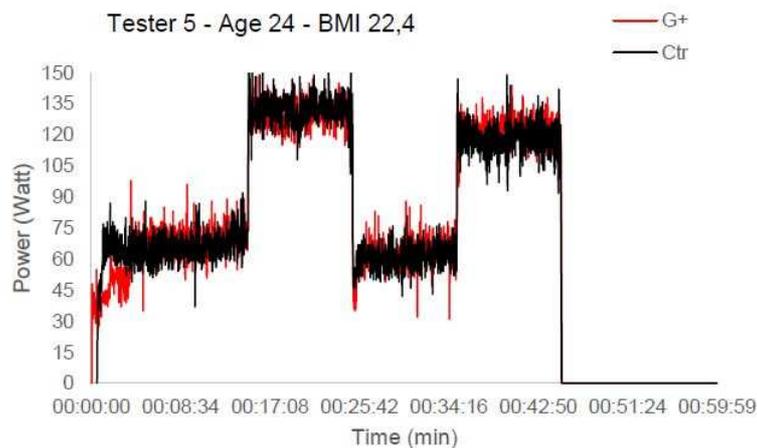


Figura 6.5: Il grafico rappresenta la potenza sviluppata da uno dei tester.

test eseguiti, infatti l'andamento della curva non presenta variazioni tra G+ e controllo, sottolineando anche l'assenza di effetti del trattamento con grafene a livello cardio-circolatorio.

Lo stesso vale per la potenza sviluppata. La prova è stata svolta dai tester cercando di mantenere la potenza sviluppata costante in ciascuna fase, grazie alla visualizzazione di tale valore sullo schermo del Garmin Edge 520. I valori di riferimento sono bassi nelle fasi ad intensità ridotta 1 e 3 (50 – 70 W) e superiori nelle fasi ad intensità elevata 2 e 4 (100 – 120W) .

| | Tester 1 | | Tester 2 | | Tester 3 | | Tester 4 | | Tester 5 | |
|---------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| | G+ | CTR |
| Frequenza cardiaca | | | | | | | | | | |
| <i>Fase 1</i> | 87.5 | 98.7 | 109.4 | 102.1 | 98.0 | 100.4 | 117.1 | 112.0 | 104.6 | 106.5 |
| <i>Fase 2</i> | 118.8 | 109.2 | 133.6 | 119.9 | 127.2 | 128.9 | 139.9 | 136.8 | 135.6 | 141.9 |
| <i>Fase 3</i> | 93.9 | 97.6 | 122.2 | 110.1 | 104.4 | 107.0 | 121.5 | 114.8 | 108.9 | 110.8 |
| <i>Fase 4</i> | 124.2 | 124.8 | 132.2 | 117.6 | 128.2 | 133.8 | 133.1 | 137.1 | 134.5 | 134.4 |
| <i>Fase 5</i> | 86.4 | 87.1 | 110.2 | 92.3 | 88.8 | 91.0 | 97.5 | 99.7 | 88.3 | 91.4 |
| <i>Media</i> | 102.2 | 103.5 | 121.5 | 108.4 | 109.3 | 112.2 | 121.8 | 120.1 | 114.4 | 117.0 |

| Potenza | | | | | | | | | | |
|----------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| <i>Fase 1</i> | 73.3 | 56.0 | 50.5 | 45.3 | 55.9 | 55.0 | 60.1 | 66.6 | 62.7 | 64.8 |
| <i>Fase 2</i> | 125.6 | 89.6 | 88.0 | 76.9 | 104.1 | 106.7 | 113.2 | 120.0 | 129.2 | 131.6 |
| <i>Fase 3</i> | 70.6 | 61.8 | 48.9 | 44.9 | 53.6 | 57.6 | 67.1 | 65.5 | 62.2 | 61.5 |
| <i>Fase 4</i> | 125.1 | 109.5 | 76.0 | 72.1 | 102.5 | 113.8 | 105.1 | 116.5 | 122.1 | 117.6 |
| <i>Fase 5</i> | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| <i>Media</i> | 98.7 | 79.2 | 65.9 | 59.8 | 79.0 | 83.3 | 86.4 | 92.2 | 94.1 | 93.9 |

Figura 6.6: Frequenza cardiaca e potenza per ogni tester suddivise per fasi.

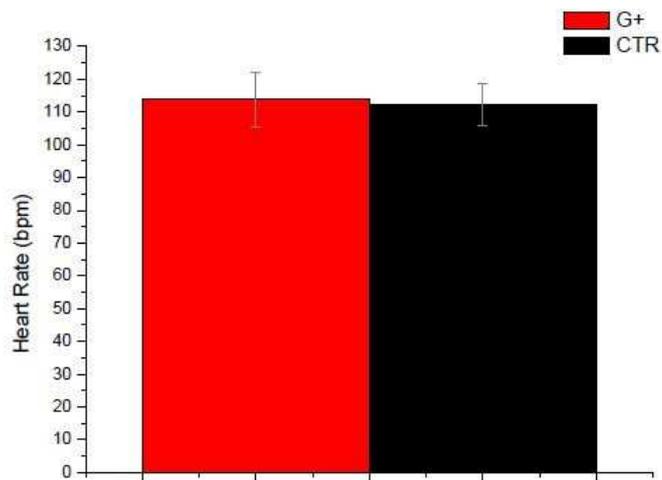


Figura 6.7: Il grafico rappresenta la frequenza cardiaca media globale.

6.4 Parametri soggettivi

Si riportano di seguito le frequenze delle risposte relative ai tre parametri sotto indagine nelle diverse fasi del test:

- sensazione termica
- sensazione di umidità

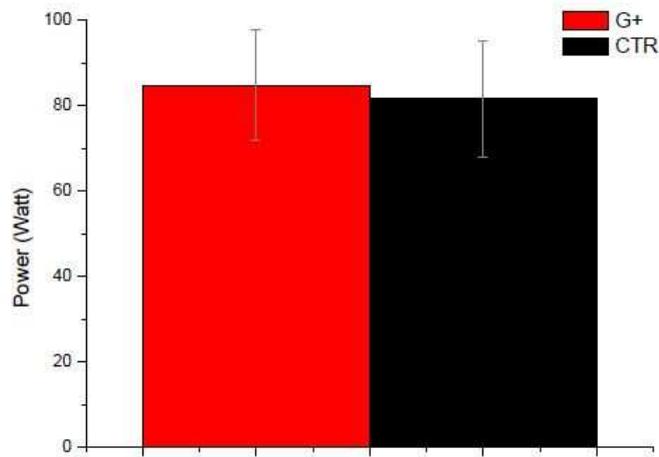


Figura 6.8: Il grafico rappresenta la potenza media globale.

- comfort termico

I grafici a colori forniscono l'informazione visiva della frequenza delle sensazioni associate a ciascun colore: più l'area di ciascun colore è estesa, più la sensazione corrispondente a quel colore è frequente nelle risposte dei Tester. Per il comfort termico non viene riportato il grafico poiché tutti i tester in tutte le fasi dei test sono sempre rimasti in una situazione di comfort generale. I grafici riguardanti la sensazione termica mostrano in entrambi i casi un aumento dell'area gialla corrispondente alla sensazione "leggermente caldo" in corrispondenza delle due fasi ad intensità maggiore. Tra queste due fasi si può notare come la sensazione "caldo" sia più frequente nella prima fase intensa per G+ e nella seconda fase intensa per il controllo. Per quanto riguarda la sensazione di umidità, per entrambi i capi le aree con colori corrispondenti alle sensazioni dal "leggermente umido" al "bagnato" si trovano per le due fasi di attività fisica intensa. Inoltre in entrambi i casi si può notare come, al contrario di quanto accade per la sensazione termica, non ci sia il recupero della condizione di neutralità a fine prova. Rimane invece una sensazione di umidità seppur leggera recepita anche a termine della fase di recupero, che è in accordo con il raggiungimento della saturazione dei sensori cutanei di umidità. Dalle risposte si può notare che, anche per la sensazione di umidità, le risposte ottenute nella seconda fase intensa sono più positive nel caso di G+ rispetto al capo di controllo. In coda ai grafici, sono riportate le singole risposte suddivise per Tester e per fase con i colori ad evidenziare le diverse sensazioni percepite. Queste tabelle risultano particolarmente utili in quanto permettono di associare ciascuna singola risposta al tester che l'ha fornita. Considerato infatti che solitamente le prove vengono effettuate con un numero di tester non elevato, può essere utile verificare le risposte date da un tester che effettua una prova di questo genere per la prima volta. Nel caso inoltre di singole risposte che si staccano dall'andamento

generale, è possibile risalire tramite il numero del tester alla prova e verificare che non ci siano stati problemi anche per le misure rilevate dai sensori.

Per tutte le sperimentazioni, non si sono riscontrate grandi differenze nelle risposte date per il capo oggetto dell'indagine e il capo di controllo e il voto medio assegnato è sempre stato nell'intervallo 7.2 – 7.7.

Viene realizzato poi il radar plot complessivo con l'insieme di tutte le sensazioni nelle varie fasi e con il voto finale per ogni sperimentazione come quello che segue in figura 6.11.

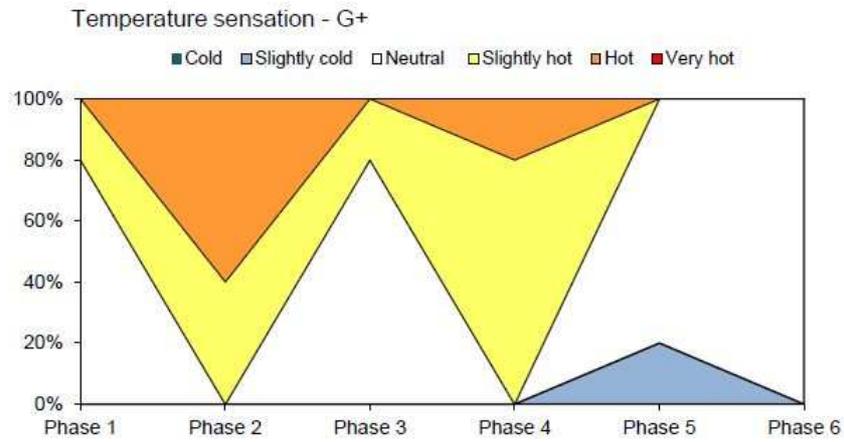
6.5 Analisi termografica

Vengono riportati di seguito i risultati delle analisi termografiche eseguite. Al termine dei test sono state eseguite termografie sul lato interno dei capi, tuttavia queste termografie si sono dimostrate troppo sensibili nei casi in cui la sperimentazione si svolge in condizioni di bassa temperatura ($-4,5^{\circ}C$). Il programma di elaborazione di immagini, utilizzato per analizzare le termografie acquisite per mezzo della *termocamera Nec G100ex*, fornisce i seguenti dati di output evidenziati nell'immagine 6.12 :

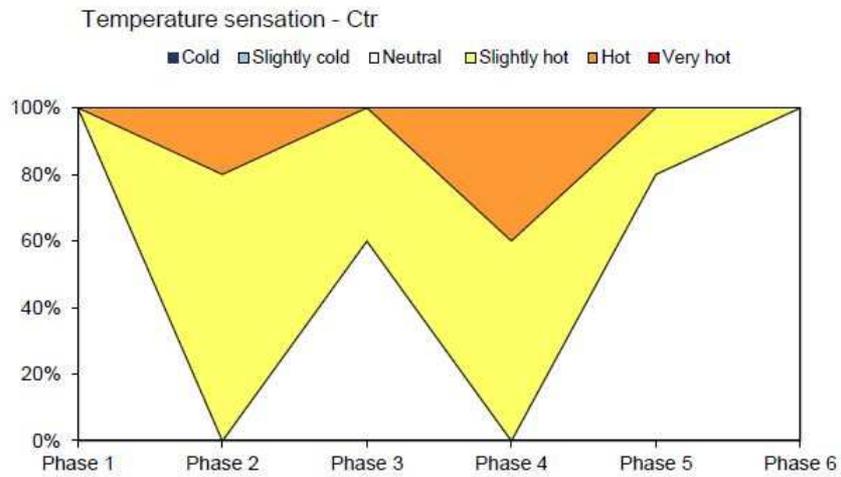
- Temperatura minima
- Temperatura massima
- Temperatura media
- Istogramma delle temperature

Utilizzando i valori relativi alle temperature medie ottenute grazie al programma di elaborazione immagini utilizzato, si costruisce il grafico 6.13 che rappresenta l'andamento complessivo della temperatura superficiale nel corso della prova.

La conclusione che si può ricavare da queste informazioni è che l'andamento medio della temperatura superficiale di queste aree risulta simile per le due tipologie di capi, con il G+ che tende ad avere una temperatura maggiore nella parte iniziale del test (Fase 1) e in quella finale (recupero). Nelle fasi più intense invece la temperatura risulta superiore con il CTR. Queste conclusioni evidenziano tuttavia un confronto molto approssimativo, vista la limitatezza dei parametri di giudizio, e soprattutto la scarsa ripetibilità del giudizio.



(a) Risposte per il capo con stampa G+.



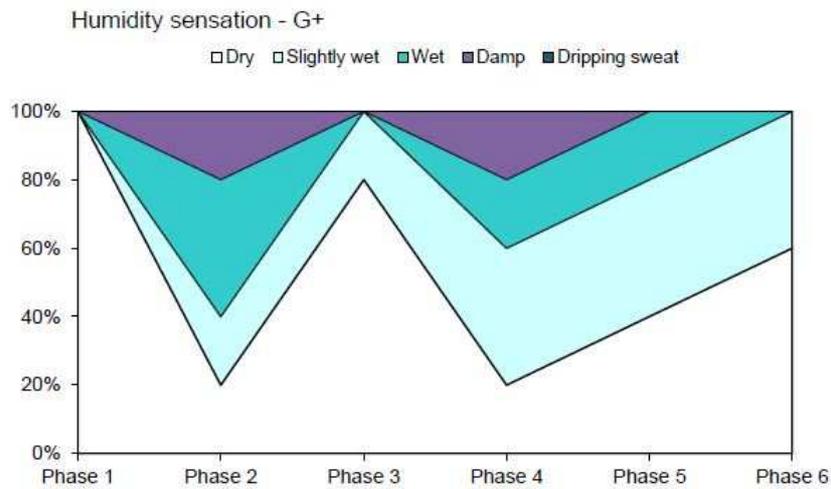
(b) Risposte per il capo di controllo.

| | G+ | | | | | CRT | | | | |
|--------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| | Tester 1 | Tester 2 | Tester 3 | Tester 4 | Tester 5 | Tester 1 | Tester 2 | Tester 3 | Tester 4 | Tester 5 |
| FASE 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| FASE 2 | 1 | 2 | 1 | 2 | 2 | 1 | 1 | 1 | 1 | 2 |
| FASE 3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 |
| FASE 4 | 1 | 1 | 1 | 1 | 2 | 1 | 2 | 1 | 1 | 2 |
| FASE 5 | 0 | -1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| FASE 6 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

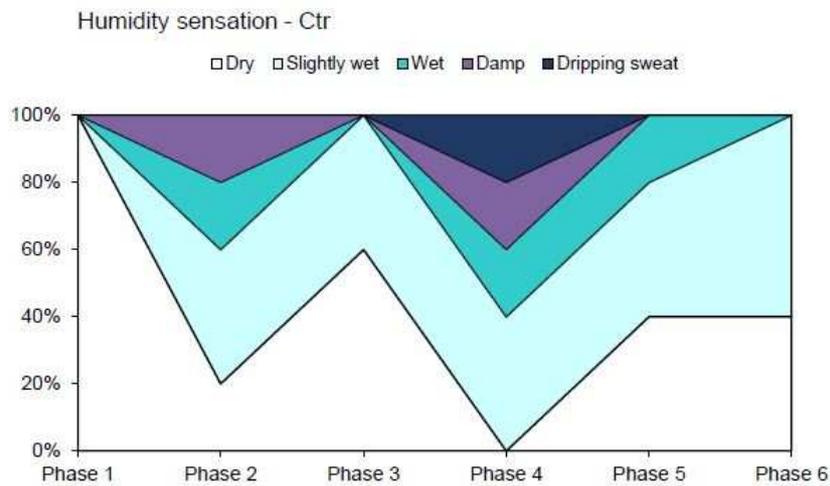
| | | | | | | | | | | | | | |
|---|--------------|---|--------|----|--------------------|---|--------|---|-------------------|---|-------|---|-------------|
| 3 | Molto freddo | 2 | Freddo | -1 | Leggermente freddo | 0 | Neutro | 1 | Leggermente caldo | 2 | Caldo | 3 | Molto caldo |
|---|--------------|---|--------|----|--------------------|---|--------|---|----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

(c) Risposte suddivise per fasi e per tester.

Figura 6.9: Esempio di analisi della sensazione termica.



(a) Risposte per il capo con stampa G+.



(b) Risposte per il capo di controllo.

| | G+ | | | | | CRT | | | | |
|--------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| | Tester 1 | Tester 2 | Tester 3 | Tester 4 | Tester 5 | Tester 1 | Tester 2 | Tester 3 | Tester 4 | Tester 5 |
| FASE 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| FASE 2 | 0 | 1 | 3 | 2 | 2 | 1 | 0 | 3 | 1 | 2 |
| FASE 3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 |
| FASE 4 | 1 | 0 | 3 | 1 | 2 | 1 | 1 | 3 | 4 | 2 |
| FASE 5 | 0 | 0 | 2 | 1 | 1 | 0 | 0 | 2 | 1 | 1 |
| FASE 6 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 |

| | | | | | | | | | |
|---|----------|---|-------------------|---|-------|---|---------|---|---------------------|
| 0 | Asciutto | 1 | Leggermente umido | 2 | Umido | 3 | Bagnato | 4 | Sudore che gocciola |
|---|----------|---|-------------------|---|-------|---|---------|---|---------------------|

(c) Risposte suddivise per fasi e per tester.

Figura 6.10: Esempio di analisi della sensazione di umidità.

Global

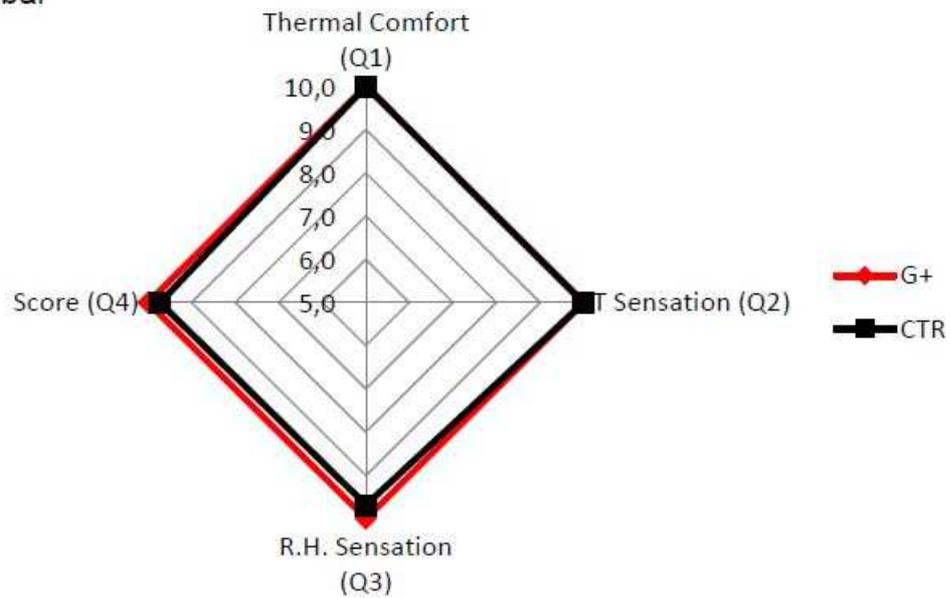
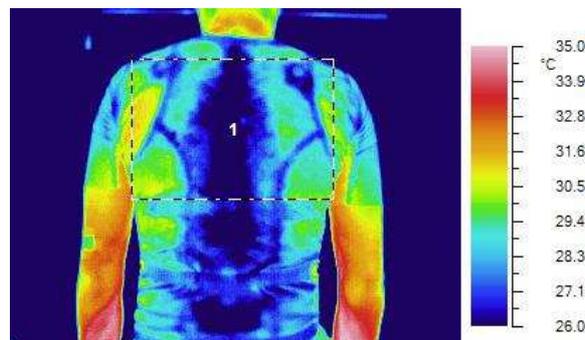
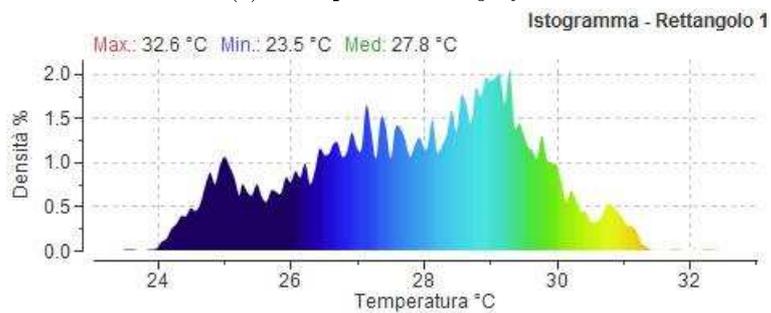


Figura 6.11: Esempio di radar plot complessivo realizzato con le sensazioni e il voto finale.



(a) Esempio di termografia.



(b) Dati forniti dal programma con istogramma e temperature massima, minima e media.

Figura 6.12: Output complessivo utile per l'analisi termografica.

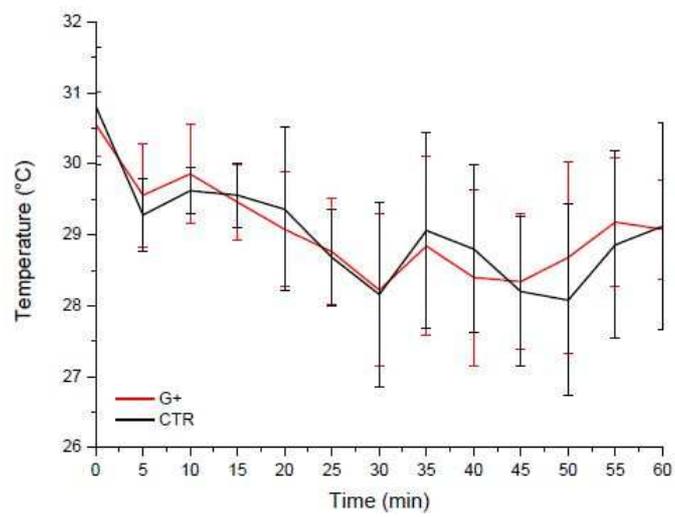


Figura 6.13: Andamento della temperatura superficiale ricavato dalle termografie.

Capitolo 7

Metodo proposto per l'analisi quantitativa delle termografie

7.1 Introduzione

Una premessa necessaria riguarda i soggetti delle termografie: l'indagine termografica è stata effettuata selezionando un'area sulla parte superiore della schiena, per evitare errori di valutazione dovuti al diverso modello dei capi testati. Nel caso del capo di controllo infatti le tasche molto più estese rispetto a G+ rendono questa zona del capo più isolante, considerata la presenza di un doppio strato di tessuto.

Obiettivo principale che si pone il metodo proposto è quello di garantire un sistema che fornisca risultati numerici, non basati su un'osservazione sommaria dei grafici rappresentanti l'andamento della temperatura in funzione del tempo, e ripetibili.

7.2 Parametri aggiuntivi proposti

Per rendere più completa l'analisi termografica è stato sviluppato un algoritmo in ambiente di lavoro Matlab [®]. Le immagini, che sono acquisite in formato RGB, vengono convertite in scala di grigi su 8 bit e discretizzate su 256 livelli.

Viene adottata una scala di temperatura fissa per tutte le termografie, avente come estremo inferiore il valore minimo di temperatura riscontrato tra tutte le immagini e come estremo superiore il valore massimo riscontrato in tutto il set di immagini. In questo modo si evita la presenza di outliers e si conferisce maggiore fluidità e rapidità all'algoritmo.

Al valore inferiore di 22.6°C viene assegnato il valore 0 nella scala dei grigi (corrispondente al nero), mentre al valore 32.6°C viene assegnato il valore 255 della scala di grigi (corrispondente al bianco).

Dalla matrice contenente le temperature convertite in scala di grigi si procederà con il calcolo del contrasto. Mentre dalla matrice a questa corrispondente ma contenente i valori di temperatura, viene costruito l'istogramma delle temperature dal quale si calcolano i due indici statistici di kurtosis e skewness.

7.2.1 Indice di kurtosis

In statistica, l'indice di kurtosis dà informazioni riguardo la forma di una distribuzione (Brown 2016). È un indice di dispersione di confronto con la gaussiana standard, indica cioè se i valori di temperatura si addensano maggiormente verso la media, oppure verso gli estremi della distribuzione (McNeese 2016). In particolare l'indice di kurtosis assume valori:

- *pari a 0* per la distribuzione normale;
- *negativi* per distribuzioni gaussiane platicurtiche, cioè centrate intorno alla media meno di quanto accade per una distribuzione gaussiana;
- *positivi* per distribuzioni gaussiane leptocurtiche, cioè concentrata intorno alla media più di una distribuzione gaussiana.

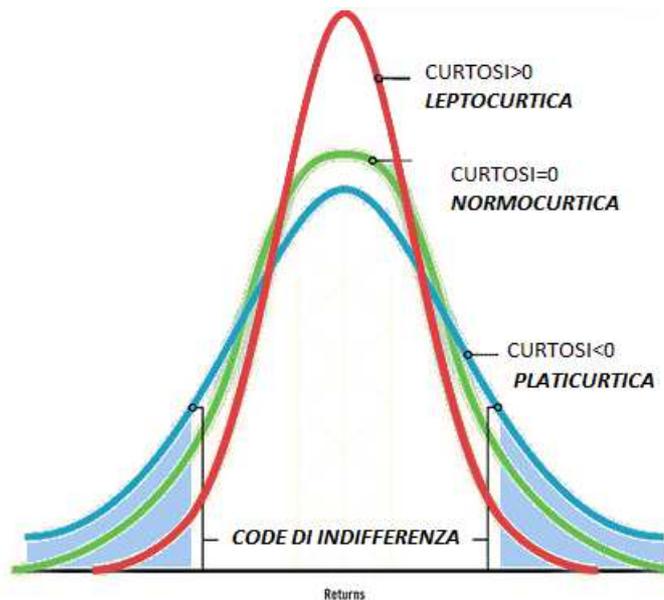


Figura 7.1: Valori assunti dall'indice di kurtosis.

Nel caso del grafene quindi la distribuzione ideale sarebbe di tipo leptocurtico. Quindi maggiori sono i valori dell'indice di kurtosis calcolato per una termografia

e più sono le probabilità che la stampa in grafene contribuisca ad uniformare la temperatura cutanea.

Viene riportato nel grafico 7.2 l'andamento dell'indice di kurtosis in funzione del tempo. Per un preciso tempo e per un determinato tipo di tessuto, il valore dell'indice è ottenuto dalla media dei valori per i cinque tester. Si può vedere come

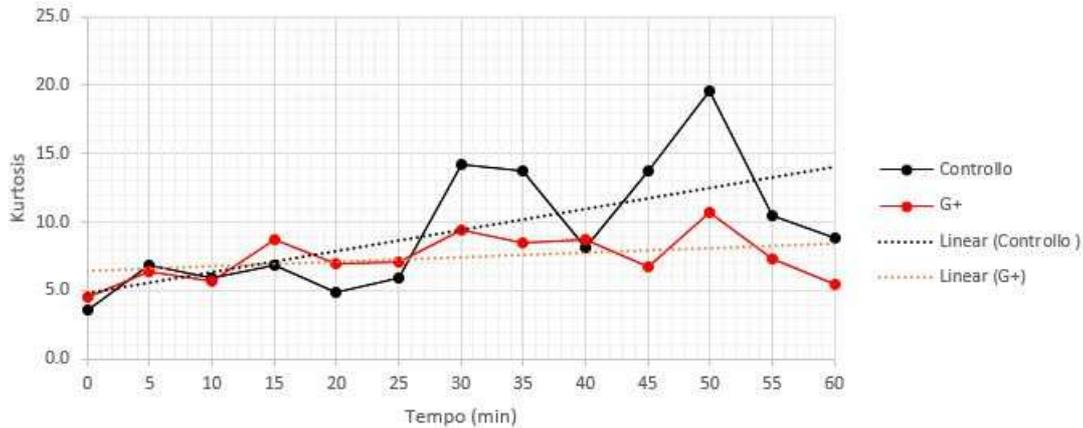


Figura 7.2: Andamento nel tempo dei valori assunti dall'indice di kurtosis per il capo con stampa in grafene e per il controllo

l'indice di kurtosis assuma valori positivi per entrambi i capi, tuttavia si hanno valori maggiori nel caso del controllo. Si nota anche che nel caso di G+ il valore dell'indice presenta una maggiore stabilità durante tutta la prova.

Vengono riportati nelle tabelle 7.1 e 7.2 tutti i valori dell'indice di kurtosis con i valori medi per ciascun tempo che sono stati utilizzati per costruire i grafici precedenti.

7.2.2 Indice di skewness

In statistica l'indice di skewness o di asimmetria fornisce una misura della mancanza di simmetria in una distribuzione (Brown 2016). In particolare per valori di indice di skewness:

- pari a 0 la distribuzione è *simmetrica*;
- maggiori di 0 è presente un'*asimmetria positiva o destra*. In questo caso i valori che si allontanano maggiormente dalla media sono quelli corrispondenti alle alte temperature. La successione delle 3 misure di tendenza centrale da sinistra a destra è: moda, mediana, media;
- minori di 0 si ha un'*asimmetria negativa o sinistra*. I valori estremi più distanti dalla media, sono quelli corrispondenti alle basse temperature. La

Tabella 7.1: Valori dell'indice di kurtosis per il capo di controllo.

| | Tester 1 | Tester 2 | Tester 3 | Tester 4 | Tester 5 | Medie |
|------------|----------|----------|----------|----------|----------|-------|
| t0 | 3.6 | 3.1 | 3.0 | 4.1 | 4.5 | 3.6 |
| t5 | 4.2 | 12.2 | 8.4 | 4.1 | 5.2 | 6.8 |
| t10 | 5.1 | 4.9 | 5.5 | 3.6 | 10.6 | 5.9 |
| t15 | 3.3 | 7.9 | 8.7 | 4.6 | 9.6 | 6.8 |
| t20 | 4.9 | 1.7 | 5.3 | 4.0 | 8.1 | 4.8 |
| t25 | 11.0 | 3.0 | 3.4 | 4.9 | 7.2 | 5.9 |
| t30 | 9.1 | 38.2 | 10.8 | 4.6 | 8.4 | 14.2 |
| t35 | 10.7 | 30.9 | 11.1 | 4.0 | 12.0 | 13.7 |
| t40 | 4.5 | 12.2 | 9.7 | 5.5 | 8.7 | 8.1 |
| t45 | 8.8 | 41.3 | 9.2 | 5.0 | 4.1 | 13.7 |
| t50 | 5.9 | 43.3 | 10.1 | 4.0 | 34.7 | 19.6 |
| t55 | 6.8 | 28.2 | 4.2 | 3.6 | 9.9 | 10.5 |
| t60 | 7.2 | 19.6 | 10.0 | 3.0 | 4.7 | 8.9 |

Tabella 7.2: Valori dell'indice di kurtosis per il capo con stampa in grafene.

| | Tester 1 | Tester 2 | Tester 3 | Tester 4 | Tester 5 | Medie |
|------------|----------|----------|----------|----------|----------|-------|
| t0 | 4.4 | 3.0 | 6.0 | 4.5 | 4.5 | 4.5 |
| t5 | 3.9 | 8.2 | 7.0 | 4.5 | 8.4 | 6.4 |
| t10 | 6.9 | 5.5 | 6.1 | 5.2 | 4.6 | 5.7 |
| t15 | 9.2 | 8.7 | 6.3 | 8.4 | 10.8 | 8.7 |
| t20 | 8.0 | 5.3 | 8.0 | 10.6 | 2.9 | 7.0 |
| t25 | 9.5 | 3.4 | 10.4 | 4.6 | 7.5 | 7.1 |
| t30 | 11.2 | 10.8 | 7.5 | 9.6 | 8.0 | 9.4 |
| t35 | 5.3 | 11.1 | 8.5 | 10.8 | 6.6 | 8.5 |
| t40 | 8.9 | 9.7 | 5.8 | 10.8 | 8.1 | 8.7 |
| t45 | 3.9 | 9.2 | 9.9 | 8.1 | 2.7 | 6.8 |
| t50 | 13.5 | 10.1 | 10.2 | 12.0 | 7.5 | 10.7 |
| t55 | 10.3 | 4.2 | 4.2 | 10.6 | 7.6 | 7.4 |
| t60 | 3.7 | 10.0 | 3.9 | 4.6 | 5.2 | 5.5 |

successione delle tre misure di tendenza centrale da sinistra a destra è invertita rispetto all'ordine precedente: media, mediana, moda.

Tuttavia valori pari a zero di questo indice sono difficilmente ottenibili con dati reali. Possiamo quindi dire approssimativamente che (McNeese 2016):

- per valori maggiori di 1 o minori di -1 la distribuzione è molto asimmetrica;

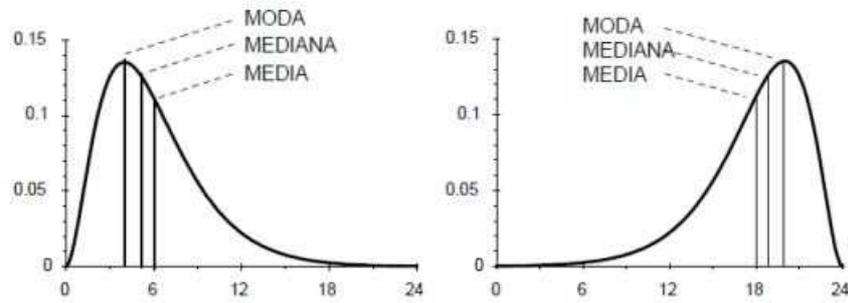


Figura 7.3: Valori assunti dall'indice di skewness o asimmetria

- per valori compresi tra -1 e -0.5 e tra 1 e 0.5 la distribuzione è moderatamente asimmetrica;
- per valori compresi tra -0.5 e 0.5 la distribuzione è considerevole simmetrica.

Nel caso del grafene sarebbe preferibile avere valori di questo indice compresi tra -0.5 e 0.5 .

Viene riportato nel grafico 7.4 l'andamento dell'indice di asimmetria in funzione del tempo. Per un preciso tempo e per un determinato tipo di tessuto, il valore dell'indice è ottenuto dalla media dei valori dei cinque tester. Sia per il G+ che per

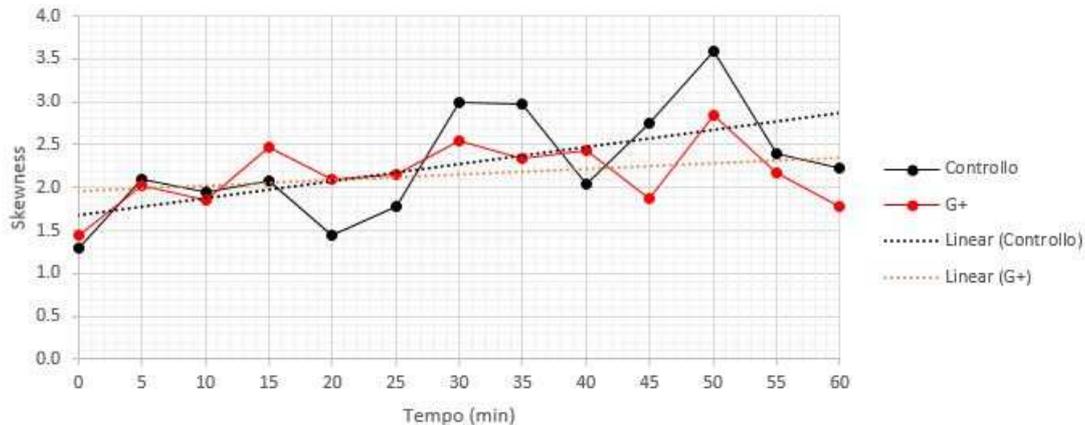


Figura 7.4: Andamento nel tempo dei valori assunti dall'indice di skewness per il capo con stampa in grafene e per il controllo

il controllo i valori sono superiori ad 1, indicando quindi una situazione di marcata asimmetria destra. Tuttavia il capo con stampa in grafene risulta avere un valore inferiore del controllo e anche più stabile nel tempo.

Vengono riportati nelle tabelle 7.3 e 7.4 tutti i valori dell'indice di skewness con i valori medi per ciascun tempo che sono stati utilizzati per i grafici precedenti.

Tabella 7.3: Valori dell'indice di skewness per il capo di controllo.

| | Tester 1 | Tester 2 | Tester 3 | Tester 4 | Tester 5 | Medie |
|------------|----------|----------|----------|----------|----------|-------|
| t0 | 1.5 | 1.3 | 0.9 | 1.4 | 1.4 | 1.3 |
| t5 | 1.6 | 3.1 | 2.4 | 1.6 | 1.8 | 2.1 |
| t10 | 1.8 | 1.8 | 1.8 | 1.4 | 2.9 | 1.9 |
| t15 | 1.4 | 2.3 | 2.4 | 1.7 | 2.7 | 2.1 |
| t20 | 1.8 | -0.3 | 1.8 | 1.5 | 2.5 | 1.5 |
| t25 | 3.0 | 0.6 | 1.4 | 1.8 | 2.1 | 1.8 |
| t30 | 2.6 | 5.8 | 2.9 | 1.6 | 2.1 | 3.0 |
| t35 | 2.9 | 5.0 | 2.7 | 1.2 | 3.1 | 3.0 |
| t40 | 1.4 | 2.0 | 2.6 | 1.7 | 2.4 | 2.0 |
| t45 | 2.5 | 6.1 | 2.5 | 1.7 | 0.9 | 2.8 |
| t50 | 1.9 | 6.4 | 2.9 | 1.4 | 5.4 | 3.6 |
| t55 | 2.1 | 4.8 | 1.3 | 1.1 | 2.7 | 2.4 |
| t60 | 2.2 | 3.9 | 2.7 | 0.7 | 1.7 | 2.2 |

Tabella 7.4: Valori dell'indice di skewness per il capo con stampa in grafene.

| | Tester 1 | Tester 2 | Tester 3 | Tester 4 | Tester 5 | Medie |
|------------|----------|----------|----------|----------|----------|-------|
| t0 | 1.6 | 0.9 | 1.8 | 1.4 | 1.6 | 1.4 |
| t5 | 1.5 | 2.4 | 2.1 | 1.6 | 2.5 | 2.0 |
| t10 | 2.1 | 1.8 | 2.0 | 1.8 | 1.6 | 1.9 |
| t15 | 2.6 | 2.4 | 1.9 | 2.5 | 2.9 | 2.5 |
| t20 | 2.5 | 1.8 | 2.4 | 2.9 | 0.9 | 2.1 |
| t25 | 2.6 | 1.4 | 2.8 | 1.6 | 2.3 | 2.1 |
| t30 | 2.8 | 2.9 | 2.1 | 2.7 | 2.2 | 2.5 |
| t35 | 1.8 | 2.7 | 2.5 | 2.9 | 1.9 | 2.3 |
| t40 | 2.7 | 2.6 | 1.7 | 2.9 | 2.3 | 2.4 |
| t45 | 1.1 | 2.5 | 2.8 | 2.5 | 0.4 | 1.9 |
| t50 | 3.2 | 2.9 | 2.9 | 3.1 | 2.2 | 2.8 |
| t55 | 2.9 | 1.3 | 1.5 | 2.9 | 2.3 | 2.2 |
| t60 | 1.4 | 2.7 | 1.5 | 1.6 | 1.7 | 1.8 |

7.2.3 Contrasto

La Matrice di Co-Occorrenza

Per il calcolo del contrasto viene utilizzato il *metodo della Matrice di Co-Occorrenza* (Renzetti & Zorzea 2011), che richiede tuttavia alcune operazioni preliminari.

Prima di tutto è necessaria la conversione in scala di grigi già citata. La scelta dei toni di grigio infatti è determinante in termini di sensibilità della scansione e di tempi di elaborazione.

La Matrice di Co-Occorrenza è una matrice quadrata di tipo $N \times N$, con N numero dei livelli di grigio in cui si è deciso di suddividere l'immagine. Nel nostro caso la variazione di temperatura tra estremo superiore ed inferiore è di $10^\circ C$. Se quindi utilizzassimo tutti i 256 livelli di grigio disponibili, ogni livello di grigio corrisponderebbe ad una variazione di temperatura di circa $0.04^\circ C$. Arrivare tuttavia a questi livelli di precisione, nel caso della temperatura, è superfluo ed appesantisce l'elaborazione complessiva delle immagini. Si è quindi deciso di utilizzare una suddivisione in 50 livelli di grigio. In questo caso la differenza in termini di temperatura tra un livello e l'altro è di $0.2^\circ C$, cioè un livello di precisione molto buono ma che permetta contemporaneamente una discreta agilità di elaborazione.

Il riempimento della GLCM (Gray Level Co-Occurrence Matrix) richiede la presenza di un vettore che scansioni la matrice di partenza, corrispondente alla termografia tradotta in scala di grigi. Questo vettore è caratterizzato da un valore di lunghezza d e un'inclinazione θ . Per scegliere in modo appropriato queste due grandezze si deve considerare che:

- la lunghezza del vettore o distanza di campionamento, non può essere troppo elevata altrimenti si saltano alcune delle transizioni di grigio. In questo caso si è utilizzata una dimensione pari a uno.
- la direzione di scansione deve sempre risultare perpendicolare alla transizione che si intende rilevare, si è scelta la direzione orizzontale nel nostro caso. In figura 7.5 vengono riportate per completezza anche le altre direzioni in cui è possibile procedere con la scansione.

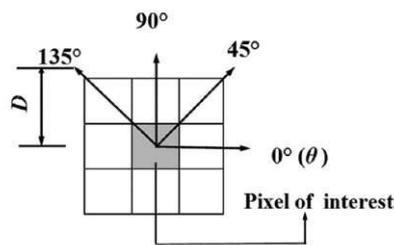


Figura 7.5: Direzioni lungo le quali è possibile eseguire la scansione: orizzontale (0°), verticale (90°) e in obliquo lungo le due diagonali (45° e 135°)

Per come è stato costruito il vettore di scansione, in questo caso si confronterà un pixel con quello immediatamente alla sua destra, cioè con il pixel spostato in direzione orizzontale di una posizione. L'oggetto del confronto è il livello di grigio

dei due pixel, infatti se il livello di grigio è diverso, significa che una transizione sia cromatica che di temperatura ha avuto luogo.

La GLCM è quindi una sorta di inventario di tutte le possibili transizioni cromatiche tra tutte le coppie di pixel contigui che compongono la matrice di partenza. L'indice i (righe) individua infatti il livello di grigio del pixel sinistro, mentre l'indice j (colonne) individua il livello di grigio del pixel destro. In particolare ciascuna cella rappresenta una specifica transizione cromatica e all'interno contiene un valore corrispondente al numero di volte che questa transizione si presenta nella matrice di riferimento.

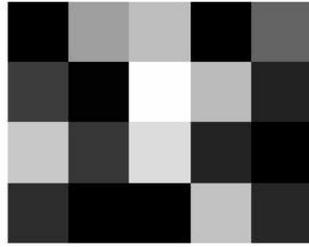
Per chiarire a fondo il concetto viene presentato l'esempio del riempimento di una matrice costruita appositamente con dimensioni ridotte (Blasi 2017). Si parte dall'immagine in scala di grigi e dalla sua corrispondente matrice numerica riportate in figura 7.6. Si sceglie un vettore di scansione con dimensione unitaria e direzione orizzontale. Si decide infine di utilizzare 4 livelli di grigio. Partendo dal pixel in alto a sinistra si procede quindi confrontandone il valore di grigio con quello del pixel adiacente. In questo caso si ha nel pixel di destra il valore 0 e a sinistra 160; il primo ricade nel primo livello di grigio, mentre il secondo ricade nel terzo. Quindi per conteggiare questa transizione dal livello 1 (letto sulle righe della GLCM, i) al livello 3 (letto sulle colonne della GLCM, j) basta scrivere un 1 in posizione (1,3) della GLCM. Si procede in questo modo per ciascuna riga, ricordando che l'ultimo pixel di ciascuna riga non è interessato da confronti verso destra e viene quindi trascurato. Viene riportata in figura la GLCM contenente il conteggio del numero di volte con cui ciascuna transizione cromatica si presenta. In realtà il modo più corretto per esprimere la matrice GLCM sarebbe in termini di probabilità che si ha di incontrare una certa transizione cromatica nell'immagine analizzata. Per costruire la matrice contenente i valori di probabilità, ciascun valore della GLCM viene diviso per il numero di tutte le possibili combinazioni che si possono presentare, ovvero viene diviso per il numero totale di transizioni presenti dato dalla somma di tutte le celle della GLCM. La probabilità viene quindi calcolata mediante l'equazione 7.1, nella quale $P(i,j)$ è la probabilità, N il numero di righe e colonne e $C(i,j)$ il valore assunto dalla cella (i,j) della GLCM.

$$P(i, j) = \frac{C(i, j)}{\sum_{i,j=1}^N C(i, j)} \quad (7.1)$$

Andando oltre l'esempio appena introdotto, solitamente il valore di probabilità corrispondente alla transizione da bianco a nero è molto basso, in quanto le transizioni cromatiche nelle immagini reali non sono nette.

Il contrasto

Uno dei valori ottenibili dalla GLCM è proprio il contrasto, che è il più usato dei 14 indicatori proposti da Halarick per classificare le immagini espresse in scala di



(a) Immagine convertita in scala di grigi.

| | | | | |
|-----|-----|-----|-----|-----|
| 0 | 160 | 190 | 0 | 100 |
| 60 | 2 | 255 | 188 | 34 |
| 200 | 55 | 220 | 35 | 0 |
| 45 | 0 | 0 | 195 | 40 |

(b) Matrice numerica corrispondente all'immagine.

| | Livello 1 (0 - 64) | Livello 2 (65 - 128) | Livello 3 (129 - 192) | Livello 4 (193 - 255) |
|--------------------------|-----------------------|-------------------------|--------------------------|--------------------------|
| Livello 1 (0 - 64) | 4 | 1 | 1 | 3 |
| Livello 2 (65 - 128) | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Livello 3 (129 - 192) | 2 | 0 | 1 | 0 |
| Livello 4 (193 - 255) | 3 | 0 | 1 | 0 |

(c) GLCM contenente il numero di volte con cui ciascuna transizione cromatica si presenta nell'immagine analizzata.

| | Livello 1 (0 - 64) | Livello 2 (65 - 128) | Livello 3 (129 - 192) | Livello 4 (193 - 255) |
|--------------------------|-----------------------|-------------------------|--------------------------|--------------------------|
| Livello 1 (0 - 64) | 0.2500 | 0.0625 | 0.0625 | 0.1875 |
| Livello 2 (65 - 128) | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 |
| Livello 3 (129 - 192) | 0.1250 | 0.0000 | 0.0625 | 0.0000 |
| Livello 4 (193 - 255) | 0.1875 | 0.0000 | 0.0625 | 0.0000 |

(d) GLCM espressa in termini di probabilità con la quale si può incontrare una certa transizione cromatica nell'immagine analizzata.

Figura 7.6: Esempio di costruzione della GLCM

grigi. Il contrasto fornisce un'informazione molto utile, considerato l'obiettivo che la stampa in grafene si pone. Fornisce infatti informazioni sull'omogeneità dei toni di grigio che compongono l'immagine e quindi sull'omogeneità delle temperature presenti sulla superficie esterna del capo. Il contrasto non è l'unico parametro utilizzabile, tuttavia gli altri parametri mostrano un andamento concorde al variare della temperatura, quindi per avere tempi di elaborazione ridotti è stato scelto solo questo parametro. Nonostante potrebbe sembrare più conveniente l'utilizzo dell'omogeneità (uno dei 14 indicatori di Halarick), questa presenta dei valori con variazioni di bassa intensità e quindi difficilmente leggibili (Blasi 2017). Definiamo quindi in modo più approfondito il parametro che verrà utilizzato. Il contrasto misura l'ammontare delle variazioni locali presenti nell'immagine. In particolare assume valori molto piccoli quando l'immagine assume un tono di grigio costante, fino al caso limite in cui il tono di grigio sia esattamente uguale in tutta l'immagine, caso in cui il contrasto risulta nullo. Maggiore invece è l'intensità delle transizioni cromatiche presenti e maggiore sarà il suo valore di questo parametro. Il contrasto

si calcola quindi mediante la seguente formula 7.2:

$$Contrasto = \sum_{i,j=1}^N P(i,j) \cdot (i-j)^2 \quad (7.2)$$

Si può notare un'analogia tra la definizione matematica del contrasto e quella dell'inerzia rotazionale. Il momento di inerzia è la resistenza che un corpo di massa m oppone ad un moto di rotazione attorno ad un asse di riferimento. Questa resistenza dipende in modo lineare dalla massa m , equivalente alla probabilità $P(i,j)$, e in modo quadratico dalla distanza del corpo rispetto all'asse di riferimento, equivalente al termine $(i-j)$. Quindi, ritornando al contrasto, il valore complessivo dipende da:

- la probabilità con un cui la transizione da un valore di grigio ad un altro avviene. Maggiore è la differenza tra i due grigi e minore è la probabilità che questa transizione si presenti.
- la distanza tra il pixel selezionato e la diagonale della GLCM, proprio come nel caso dell'inerzia. Il momento di inerzia infatti aumenta l'importanza del contributo della massa se questa si trova distante dall'asse di rotazione. Nel caso del contrasto, probabilità diverse da zero posizionate in celle della GLCM lontane dalla diagonale, provocano un aumento netto del valore del contrasto.

Monitoraggio del contrasto e analisi statistica

Per ciascuna delle immagini è stato quindi calcolato il valore del contrasto. Vengono riportati nelle tabelle 7.5 e 7.6 i valori calcolati che saranno utilizzati successivamente per l'analisi statistica.

Gli aspetti che si vogliono verificare sono i seguenti:

1. Nel caso del capo con stampa in grafene, ci si aspetta che con il trascorrere della prova ci raggiunga una maggior uniformità di temperatura e quindi che ci sia una diminuzione del contrasto
2. Per un dato istante, il valore del contrasto nel caso del capo G+ dovrebbe essere inferiore rispetto a quello del capo di controllo.

Per avere un'idea generale di come poter rispondere al primo punto, viene riportato di seguito il grafico raffigurante l'andamento del contrasto nel corso del tempo. Vengono riportati per il tessuto con grafene e per il tessuto di controllo i valori medi presenti nell'ultima colonna delle tabelle rispettivamente 7.6 e 7.5.

A giudicare dal grafico 7.7 si può notare come entrambe le curve presentino un massimo in corrispondenza del tempo $t=30$ min, ovvero 5 minuti dopo la fine della prima fase di pedalata intensa. Possiamo constatare quindi la presenza di un'inerzia termica, dovuta al tempo che impiega il calore prodotto ad arrivare allo

Tabella 7.5: Valori del contrasto per il capo di controllo.

| | Tester 1 | Tester 2 | Tester 3 | Tester 4 | Tester 5 | Medie |
|------------|----------|----------|----------|----------|----------|-------|
| t0 | 3.8 | 5.2 | 4.0 | 5.4 | 4.7 | 4.6 |
| t5 | 4.4 | 4.7 | 4.9 | 5.3 | 5.2 | 4.9 |
| t10 | 3.8 | 5.1 | 6.6 | 5.9 | 3.5 | 5.0 |
| t15 | 4.7 | 3.7 | 5.9 | 4.6 | 3.4 | 4.5 |
| t20 | 3.8 | 3.4 | 6.6 | 4.4 | 5.2 | 4.7 |
| t25 | 2.7 | 6.9 | 7.1 | 4.1 | 6.5 | 5.5 |
| t30 | 4.7 | 11.6 | 7.2 | 4.5 | 9.8 | 7.6 |
| t35 | 2.6 | 12.0 | 8.4 | 5.1 | 4.9 | 6.6 |
| t40 | 8.2 | 8.1 | 7.7 | 4.8 | 5.1 | 6.8 |
| t45 | 8.7 | 10.0 | 6.4 | 4.8 | 8.0 | 7.6 |
| t50 | 3.4 | 7.0 | 6.4 | 4.5 | 13.5 | 7.0 |
| t55 | 3.3 | 9.6 | 8.1 | 4.7 | 13.2 | 7.8 |
| t60 | 3.4 | 11.5 | 9.2 | 3.9 | 7.6 | 7.1 |

Tabella 7.6: Valori del contrasto per il capo con stampa in grafene.

| | Tester 1 | Tester 2 | Tester 3 | Tester 4 | Tester 5 | Medie |
|------------|----------|----------|----------|----------|----------|-------|
| t0 | 4.6 | 5.4 | 4.3 | 4.8 | 5.3 | 4.9 |
| t5 | 5.1 | 5.4 | 5.8 | 5.1 | 5.2 | 5.3 |
| t10 | 3.9 | 5.4 | 3.8 | 5.4 | 4.3 | 4.5 |
| t15 | 5.1 | 4.7 | 4.8 | 4.9 | 4.5 | 4.8 |
| t20 | 3.8 | 3.9 | 2.9 | 5.4 | 9.0 | 5.0 |
| t25 | 7.1 | 6.2 | 7.4 | 4.5 | 5.6 | 6.2 |
| t30 | 8.7 | 9.8 | 9.3 | 4.2 | 12.1 | 8.8 |
| t35 | 4.1 | 7.4 | 9.3 | 4.1 | 10.0 | 7.0 |
| t40 | 5.2 | 7.8 | 7.3 | 4.1 | 6.0 | 6.1 |
| t45 | 9.2 | 5.4 | 9.8 | 4.3 | 8.3 | 7.4 |
| t50 | 9.1 | 5.9 | 9.0 | 5.7 | 8.0 | 7.6 |
| t55 | 5.1 | 6.5 | 9.1 | 3.7 | 8.8 | 6.6 |
| t60 | 4.5 | 9.8 | 7.5 | 4.9 | 9.0 | 7.2 |

strato esterno del tessuto. Inoltre, osservando le linee di tendenza, si può vedere che il contrasto per il G+ parte da valori più elevati rispetto al controllo, ma col proseguire della prova il suo valore aumenta in modo più contenuto. A t=60 infatti il contrasto di G+ è inferiore rispetto al controllo.

Per vedere se le differenze tra i valori del contrasto con il passare del tempo

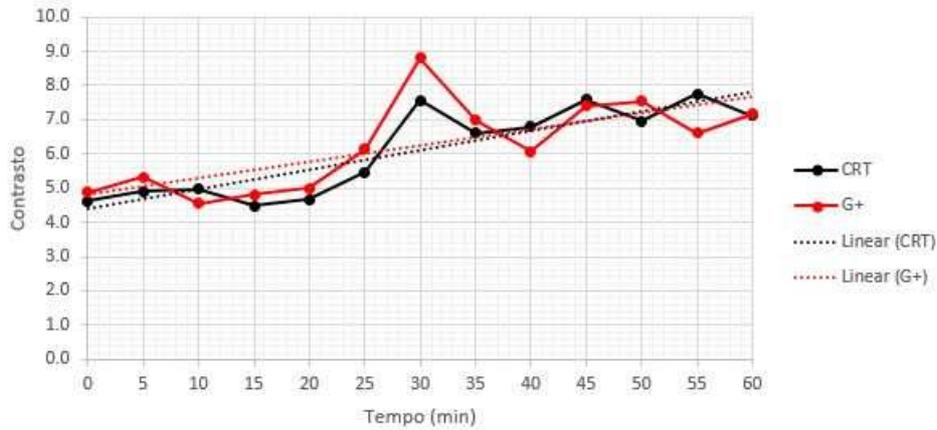


Figura 7.7: Andamento del contrasto nel tempo.

sono significative, viene utilizzato il test t di Student già introdotto in precedenza. La tabella 7.7 riporta i p-value dei vari confronti che sono stati eseguiti.

Tabella 7.7: P-value per confronti in ciascuna categoria di capi.

| | Controllo | G+ |
|------------------|-----------|----------|
| t0 - t5 | 0.32107 | 0.19976 |
| t5 - t10 | 0.89119 | 0.13371 |
| t10 - t15 | 0.30680 | 0.51443 |
| t15 - t20 | 0.72747 | 0.88565 |
| t20 - t25 | 0.36479 | 0.36479 |
| t25 - t30 | 0.07543 | 0.07942 |
| t30 - t35 | 0.44600 | 0.10155 |
| t35 - t40 | 0.91446 | 0.38758 |
| t40 - t45 | 0.33793 | 0.30702 |
| t45 - t50 | 0.74432 | 0.72574 |
| t50 - t55 | 0.22000 | 0.37332 |
| t55 - t60 | 0.65401 | 0.55479 |
| t0 - t25 | 0.37673 | 0.12509 |
| t0 - t30 | 0.09357 | 0.09357 |
| t0 - t45 | 0.04141* | 0.10591 |
| t0 - t50 | 0.24887 | 0.03668* |
| t0 - t60 | 0.17305 | 0.07392 |

Si può dire quindi che non ci siano aumenti significativi di contrasto tra termografie fatte con 5 minuti di distanza l'una dall'altra. Per quanto riguarda il capo di controllo, il valore di contrasto registrato a tempo zero risulta significativamente

inferiore rispetto a quello registrato alla fine della seconda fase di pedalata intensa. Nel caso del grafene il valore registrato cinque minuti dopo la seconda fase intensa risulta significativamente superiore rispetto alla quantità di partenza, sottolineando l'effetto di inerzia termica già citato che potrebbe essere dovuto ad un effetto di conservazione del calore della stampa in grafene.

Per quanto riguarda il secondo punto invece, vengono riportati nella tabella 7.8 i valori di probabilità per i confronti eseguiti tra i diversi capi nel medesimo istante. Non ci sono quindi differenze significative in termini statistici tra il controllo e il

Tabella 7.8: P-value per confronti tra categorie di capi.

| | | | | | | |
|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| t0 | t5 | t10 | t15 | t20 | t25 | t30 |
| 0.32330 | 0.11488 | 0.52943 | 0.46447 | 0.79986 | 0.51642 | 0.29525 |
| t35 | t40 | t45 | t50 | t55 | t60 | |
| 0.82730 | 0.32774 | 0.89649 | 0.76604 | 0.38193 | 0.95747 | |

capo in grafene. Questo conferma che l'andamento sia in termini di contrasto che, conseguentemente, di omogeneità di temperatura, è molto simile per entrambi.

Definizione di uno standard di riferimento

Considerato che il confronto tra il capo di controllo e quello con stampa di grafene a tempo costante non ha dato informazioni utili, viene proposto di seguito uno standard di riferimento da utilizzare come confronto anche in altre sperimentazioni su capi che si pongano lo stesso obiettivo della stampa con il grafene (Raj & Sreenivasan 2009). Se ci si pone l'obiettivo di omogeneizzare la temperatura, il caso ideale sarebbe ottenere una termografia con un unico tono di grigio. In questo caso le uniche transizioni possibili sono appartenenti ad uno stesso livello di grigio e quindi nella matrice GLCM gli unici valori possibili sono presenti sulla diagonale. Perciò il contrasto risulta pari a zero, in quanto la probabilità risulta nulla per tutte le celle con i diverso da j , mentre quando è non nulla, si ha i uguale a j (visto che ci troviamo sulla diagonale della GLCM) (Hernandez-Contreras et al. 2017).

Questa situazione è tuttavia quasi impossibile che si possa fisicamente verificare. Si sono quindi create delle immagini standard con cui confrontare i valori di contrasto delle immagini termografiche. Si è costruita una matrice con distribuzione gaussiana di toni di grigio che abbia come valore medio il tono di grigio corrispondente alla temperatura media rilevata (220.16) e una deviazione standard (2.5 livelli di grigio) tale per cui la temperatura non subisca nell'immagine variazioni superiori ad $1^{\circ}C$, ovvero a 5 livelli di grigio. C'è da specificare che per livelli di grigio si intende in questo caso i 50 livelli (che differiscono l'uno dall'altro di $0.2^{\circ}C$) in cui l'intera scala di 256 grigi è stata suddivisa. Ovvero una deviazione standard di 2.5 livelli di grigio equivale a 13 toni della scala complessiva di grigi. Si è scelto

di utilizzare variazioni di $1^{\circ}C$ in quanto è considerate fisiologicamente accettabili, ci si riferirà a questa condizione come Standard 1. Tuttavia al fine di cercare di costruire una vera e propria scala di riferimento si è costruita anche un'immagine con variazioni di temperatura massime di $2^{\circ}C$, corrispondenti a 10 livelli di grigio (deviazione standard di 5 livelli di grigio). Ci si riferirà in seguito a questa condizione con il termine Standard 2. Vengono riportate le immagini standard costruite in figura 7.8 per quanto riguarda lo standard 1, e in figura 7.9 per lo Standard 2.

Si riportano ora in tabella 7.9 i valori del contrasto corrispondenti alle immagini standard. Considerato che le immagini sono pur sempre derivanti da una distribuzione entro certi limiti casuale e che gli altri valori di contrasto trattati sono dati da una media tra 5 valori, anche i contrasti delle immagini standard sono stati calcolati come una media su 5 valori. Nella tabella 7.10 vengono riportati i valori

Tabella 7.9: Valori del contrasto per le matrici standard.

| Standard 1 | Standard 2 |
|------------|------------|
| 0.7124 | 2.1708 |
| 0.7093 | 2.1795 |
| 0.7060 | 2.2058 |
| 0.7042 | 2.1318 |
| 0.7216 | 2.2055 |

di contrasto di riferimento degli Standard 1 e 2 e le rispettive variazioni massime di temperature incontrate. Si è fatta la stessa cosa con i valori di contrasto massimi e minimi trovati tra tutte le 130 termografie analizzate per dare un'idea di come si collocano rispetto allo standard. Il test t di Student eseguito sui valori medi

Tabella 7.10: Scala di confronto in termini di contrasto e livelli di grigi tra standard e valori misurati.

| | $1^{\circ}C$ (Standard 1) | $2^{\circ}C$ (Standard 2) | $3^{\circ}C$ | $5^{\circ}C$ |
|-------------------|---------------------------|---------------------------|--------------|--------------|
| Livelli di grigio | 5 | 10 | 15 | 25 |
| Contrasto | 0.7 | 2.2 | 4.5 | 12.0 |

dei due standard ha riportato un p-value di $2.8 \cdot 10^{-8}$, quindi i due Standard sono significativamente diversi tra loro. A questo punto si procede per verificare in modo statistico se i capi testati abbiano raggiunto o no una situazione di omogeneità di temperatura. Una situazione del genere corrisponde a p-value non significativi nel confronto tra le medie dello standard scelto e i valori di contrasto delle termografie dei capi. I risultati dell'analisi sono riportati nella tabella 7.11. Possiamo quindi

Tabella 7.11: P-value per confronti tra gli standard e le due categorie di capi.

| p-value | Standard 1 - CRT | Standard 1 - G+ | Standard 2 - CRT | Standard 2 - G+ |
|------------|------------------|-----------------|------------------|-----------------|
| t0 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| t5 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| t10 | 0.00 | 0.00 | 0.01 | 0.00 |
| t15 | 0.00 | 0.00 | 0.01 | 0.00 |
| t20 | 0.00 | 0.02 | 0.01 | 0.06* |
| t25 | 0.01 | 0.00 | 0.02 | 0.00 |
| t30 | 0.01 | 0.00 | 0.02 | 0.01 |
| t35 | 0.02 | 0.01 | 0.05 | 0.02 |
| t40 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| t45 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.01 |
| t50 | 0.02 | 0.00 | 0.05 | 0.00 |
| t55 | 0.02 | 0.00 | 0.03 | 0.01 |
| t60 | 0.01 | 0.00 | 0.03 | 0.01 |

affermare che viene raggiunta una condizione di omogeneità di temperatura secondo lo Standard 2 solo sul capo con stampa in grafene e in corrispondenza di $t=20$, ovvero dopo 5 minuti dall'inizio della prima fase di camminata intensa.

7.3 Osservazioni ulteriori

Per completare l'analisi sono stati esaminati gli andamenti dei parametri proposti nel tempo in modo congiunto all'andamento nel tempo di:

- Temperatura
- Derivata della temperatura rispetto al tempo
- Umidità
- Derivata dell'umidità rispetto al tempo

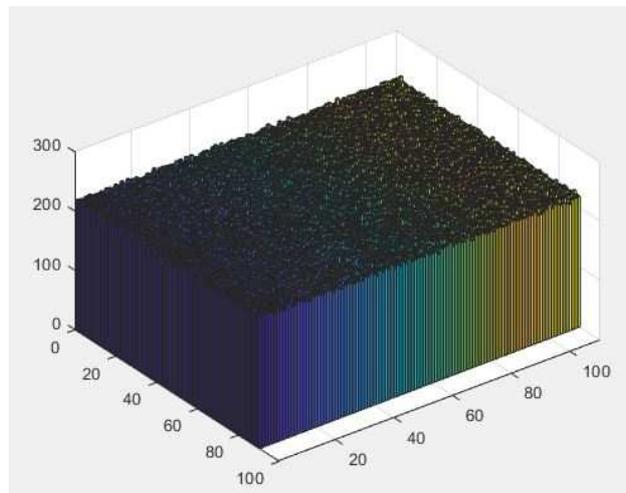
I grafici risultanti nella maggior parte dei casi non hanno evidenziato andamenti particolari. Verranno riportati di seguito solo i grafici che evidenziano qualche probabile correlazione. In tutti i grafici la curva in rosso rappresenta la grandezza fisica con cui si effettua il confronto (Temperatura, Umidità, Derivata temperatura, Derivata umidità), la curva blu rappresenta l'andamento del parametro proposto in questione (contrasto, indice di Kurtosis e indice di Skewness) per il capo di controllo e quella in verde per il capo con stampa in grafene.

Nel grafico 7.10 viene messo in evidenza l'andamento della derivata della temperatura moltiplicato per un fattore 10 in modo da evidenziare le variazioni della curva. Si può notare che la curva dei parametri proposti risulta quasi speculare rispetto alla derivata della temperatura, al contrario di quanto accade per il G+. Per entrambi i capi si nota comunque che il momento con il picco più evidente di disuniformità si verifica per $t=30$. Tuttavia con CRT il contrasto subisce variazioni basse ma in costante crescita, mentre per il grafene il picco centrale è molto intenso, ma poi le variazioni sono di intensità più ridotta e la loro linea di base sembra stabilizzarsi ad un'ordinata fissa (con valore maggiore rispetto al tratto orizzontale iniziale). Tuttavia per tutti i parametri proposti, il G+ sembra risentire di meno delle variazioni di temperatura rispetto al controllo.

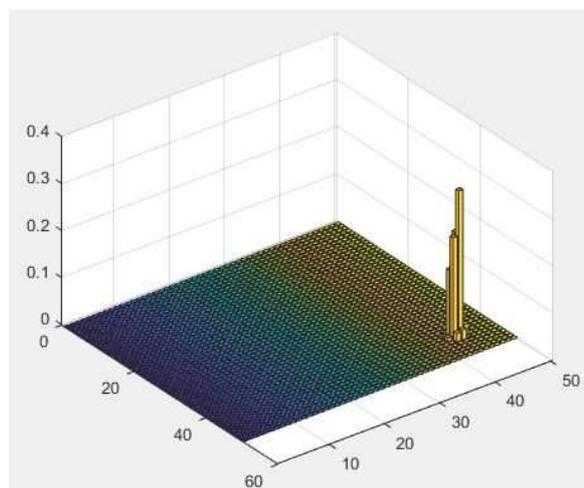
In tutte le sperimentazioni si rileva sempre che l'umidità arriva a saturazione prima del termine della prova e con una rampa di pendenza elevata. Questo comporta che, considerando la sua derivata rispetto al tempo, ci sia sempre un picco corrispondente proprio a questa rampa. Nel grafico in figura 7.11 si può vedere come dopo il picco, ovvero dopo la variazione massima di umidità, la linea di base sia per il controllo che per G+ nel caso del contrasto tenda a passare da un andamento piano ad uno crescente. Per gli indici statistici invece si nota che dopo il picco CRT inizia ad avere variazioni molto significative, mentre il grafene mostra variazioni di ampiezza contenuta. Questo potrebbe significare che l'innesco della perdita di uniformità sia dovuto all'aumento dell'umidità piuttosto che della temperatura, sottolineando il fatto che G+ risente meno di questo problema.



(a) *Immagine in scala di grigi.*

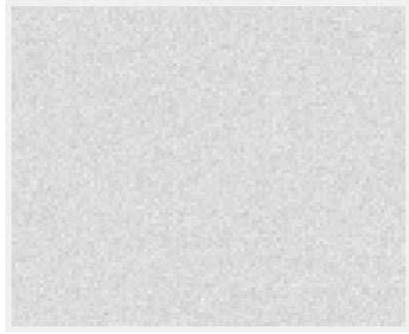


(b) *Grafico a barre raffigurante la distribuzione dei toni di grigio nell'immagine standard.*

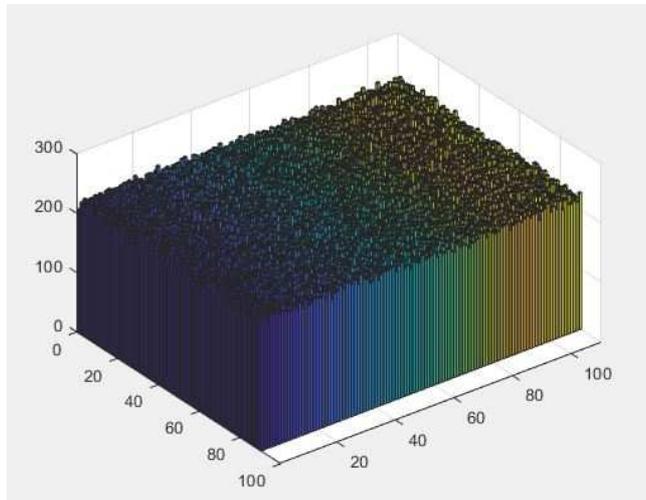


(c) *Grafico a barre raffigurante la distribuzione della probabilità che si ha di trovare nell'immagine standard ciascun livello di grigio.*

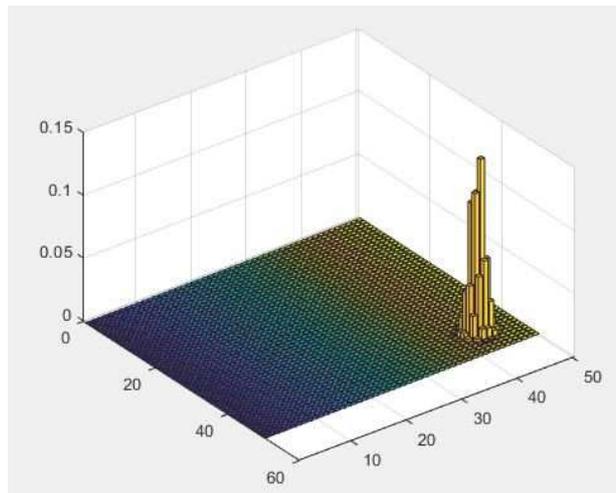
Figura 7.8: Immagine di riferimento Standard 1.



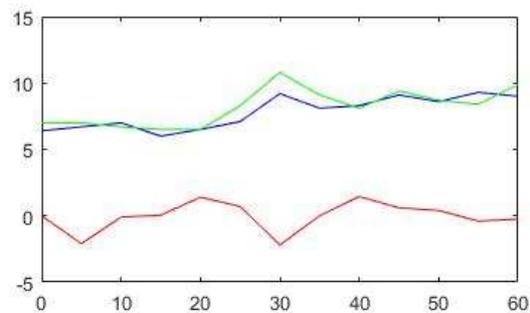
(a) Immagine in scala di grigi.



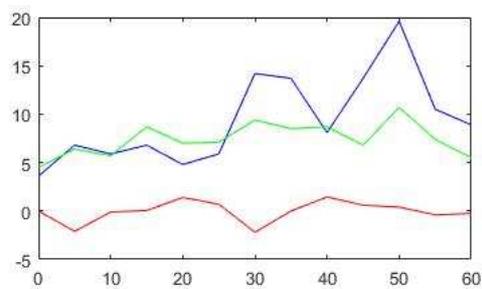
(b) Grafico a barre raffigurante la distribuzione dei toni di grigio nell'immagine standard.



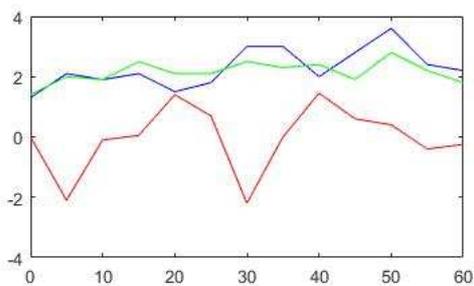
(c) Grafico a barre raffigurante la distribuzione della probabilità che si ha di trovare nell'immagine standard ciascun livello di grigio.



(a) *Contrasto.*

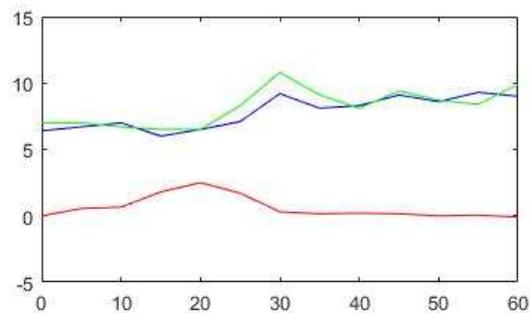


(b) *Indice di kurtosis.*

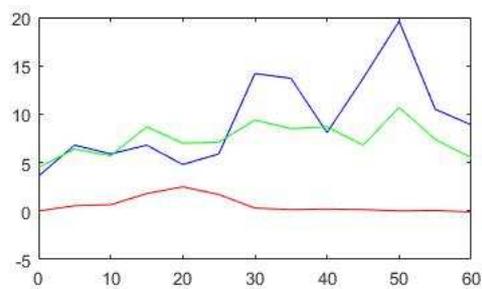


(c) *Indice di Skewness.*

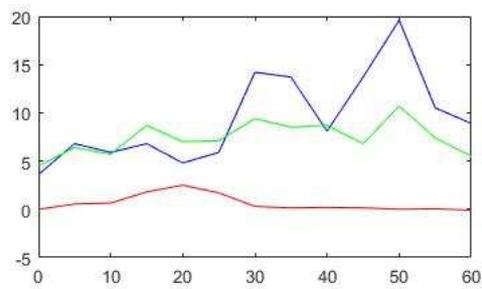
Figura 7.10: Andamento nel tempo della derivata della temperatura e del valore dei parametri proposti per il controllo e per G+.



(a) *Contrasto.*



(b) *Indice di kurtosis.*



(c) *Indice di Skewness.*

Figura 7.11: Andamento nel tempo della derivata dell'umidità e del valore dei parametri proposti nel capo di controllo e con G^+ .

Capitolo 8

Conclusioni

Questo lavoro di tesi ha lo scopo di valutare il comfort termico di alcuni capi di abbigliamento dotati di una stampa in grafene, finalizzata a uniformare la temperatura corporea dell'atleta, e si inserisce nell'ambito di uno studio commissionato da un'azienda leader nel settore della produzione di grafene. Lo studio ha permesso di evidenziare molti interessanti fenomeni.

La stampa riportata su abbigliamento sportivo invernale ha avuto come effetto una temperatura cutanea mediamente più elevata, mentre per capi destinati a temperature ed intensità di attività fisica maggiori, si può osservare una temperatura cutanea leggermente minore con G+ nelle fasi centrali della prova. La stessa stampa su capi finalizzati a condizioni ambientali e di attività differenti, sembra portare a risultati diversi tra loro, ma adeguati alla situazione nella quale devono operare.

Altro fenomeno correlato alla stampa è l'inversione della temperatura tra pelle e microclima. Questo potrebbe essere dovuto al fatto che i sensori per la misura del microclima sono posizionati a stretto contatto con il capo di abbigliamento e potrebbero risentire della temperatura del capo stesso. Infatti, dal momento che il grafene ha un assorbimento radiativo elevato, è possibile che la temperatura del microclima sia influenzata dalla temperatura leggermente più elevata del capo di abbigliamento G+ rispetto al CTR.

Le prove sui tessuti indicano invece il finissaggio a base di nanoparticelle a base poliuretaniche per il fissaggio della stampa come miglior soluzione, in quanto conferisce le migliori caratteristiche di permeabilità all'aria di gestione del sudore. Per future sperimentazioni sarebbe tuttavia necessario verificare gli effetti del lavaggio. Questo infatti ha dimostrato di provocare lievi peggioramenti sulla permeabilità all'aria nel caso del fissatore di stampa a base di tannino. Nel complesso la miglior permeabilità e gestione del sudore offerte dal finissaggio 2 potrebbero essere una soluzione rispetto ai risultati dell'indagine statistica, i quali mostrano l'umidità significativamente maggiore per G+. Infatti, per quanto riguarda l'umidità, dopo che i sensori cutanei raggiungono una condizione di saturazione, si può notare sia per G+ che per il controllo un aumento deciso del contrasto. Contemporaneamente,

sempre dopo il raggiungimento della saturazione, si hanno variazioni per i parametri statistici di kurtosis e skewness molto accentuate nel controllo e molto lievi per G+. Queste considerazioni sull'umidità richiedono tuttavia ulteriori approfondimenti. La scelta del tipo di finissaggio potrebbe inoltre risultare determinante sulla conducibilità, come evidenziato nel test di Liquid Moisture Management. In ogni caso molte termografie mostrano in modo evidente le diverse proprietà termiche della stampa, segno che il finissaggio potrebbe avere effetti severi sulla conducibilità elettrica, ma trascurabili su quella termica. Studi più approfonditi vanno eseguiti per capire a fondo come i fogli di grafene siano posizionati nella stampa e se le quantità di calore da smaltire siano tali da attivare il meccanismo di trasporto del calore con onda meccanica. Vengono riportate in figura 8.1 due immagini che evidenziano quanto detto.

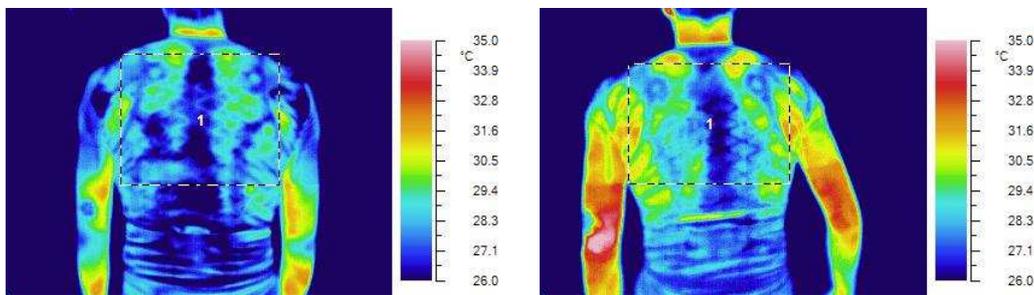


Figura 8.1: Termografie in cui si evidenzia l'effetto di gestione del calore della stampa in grafene.

Sarebbe utile inoltre modificare il design della stampa per vedere quali effetti questo provoca sul passaggio del sudore e sulla distribuzione del calore.

Per quanto riguarda la parte di analisi termografica, l'algoritmo ha permesso di quantificare le deduzioni fatte dall'analisi qualitativa e di aggiungere ulteriori e più complete informazioni. In particolar modo gli indici statistici di kurtosis e skewness hanno permesso di capire che il grafene garantisce una maggiore stabilità in termini di distribuzione della temperatura nel corso della prova. Per quanto riguarda il contrasto, non si sono rilevate differenze significative confrontando in un dato istante i due capi, tuttavia il confronto per un medesimo capo a tempi diversi ha permesso di evidenziare il fenomeno del buffer termico. Questo fenomeno potrebbe essere utile per applicazioni sportive nel ritardare il post-exercise chill. Per rendere più completo l'algoritmo e adatto ad analisi di qualsiasi tipo di capo, si può valutare di implementare le equazioni 2.8 e 2.9 e far calcolare all'algoritmo se la temperatura ottenuta nelle termografie corrisponde a quella in condizione di comfort.

Lista dei simboli

| | |
|-------------------------------|--|
| M | Potenza generata dall'attività metabolica (W) |
| L | Potenza meccanica scambiata tra il soggetto e l'ambiente (W) |
| Q_c | Potenza termica sensibile scambiata per convezione (W) |
| Q_r | Potenza termica sensibile scambiata per irraggiamento (W) |
| Q_k | Potenza termica sensibile scambiata per conduzione (W) |
| Q_{tr} | Potenza termica latente scambiata per traspirazione (diffusione) (W) |
| Q_{sdz} | Potenza termica latente scambiata per evaporazione (sudorazione) (W) |
| Q_{rps} | Potenza termica sensibile scambiata nella respirazione (W) |
| Q_{rpl} | Potenza termica latente scambiata nella respirazione (W) |
| $\frac{dU}{dt}$ | Variazione dell'energia interna del corpo umano nell'unità di tempo |
| η | Rendimento di conversione dell'energia metabolica |
| T_a | Differenza di temperatura pelle-aria |
| ω_a | Velocità dell'aria |
| R_v | Resistenza termica del vestiario |
| T_{mr} | Differenza di temperatura pelle/vestiario-superfici del locale |
| ϵ_v | Proprietà radiative (emissività) del vestiario |
| ϵ_s | Emissività delle superfici circostanti |
| F_{v-s} | Dimensione apparenti e distanza tra le superfici radianti |
| Q_{ev} | Calore latente trasportato con l'evaporazione (sudorazione e respirazione) |
| φ_a | Differenza tra il titolo del vapore sulla pelle/cavità polmonare e nell'aria |
| T_a | Temperatura dell'aria |
| π_v | Permeabilità al vapore del vestiario |
| H | Coefficiente che lega lavoro meccanico, energia metabolica e rendimento |
| T_{sk} | Temperatura della pelle |
| Q_{sdz}^* | Q_{sdz} in condizioni di comfort (W) |
| T_{sk}^* | Temperatura della pelle in condizione di comfort |
| A_p | Superficie corporea media data dalla relazione di Du Bois |
| T_v^* | Temperatura del vestiario in condizioni di comfort |
| h_{cp} | Conduttanza convettiva unitaria sulla persona ($\frac{W}{m^2 \cdot K}$) |
| Π | Permeanza della pelle al vapore d'acqua ($1.27 \cdot 10^{-9} \frac{Kg}{m^2 \cdot s \cdot Pa}$) |
| f_v | Fattore adimensionale di area coperta dal vestiario |
| f_{eff} | Coefficiente di area efficace (0.71) |

| | |
|------------------|---|
| h_{rp} | Conduttanza radiativa unitaria sulla persona ($\frac{W}{m^2 \cdot K}$) |
| r | Calore latente dell'acqua alla temperatura di $35^\circ C$ ($\frac{J}{Kg}$) |
| f_d | Fattore di resistenza al vapore del vestiario |
| β | Frazione di superficie corporea bagnata (0.1 – 0.15) |
| p_{sk}^* | Pressione di saturazione del vapore d'acqua a T_{sk}^* |
| p_a | Pressione parziale del vapore d'acqua a T_a |
| G_x | Portata d'aria nel cavo polmonare |
| c_{pa} | Calore specifico dell'aria a pressione costante ($1004 \frac{J}{kg \cdot K}$) |
| T_x | Temperatura aria espirata e del cavo polmonare ($34^\circ C$) |
| x_a | Umidità specifica dell'aria ambiente |
| x_x | Umidità specifica aria espirata |
| T_o | Temperatura operativa |
| a | Parametro funzione della velocità dell'aria |
| h_r | Coefficiente di scambio radiativo per l'uomo |
| h_c | Coefficiente di scambio convettivo per l'uomo |
| α | Coefficiente di adduzione termica sulla superficie corporea |
| PMV | Predicted Mean Vote |
| PDD | Predicted Percentage of Dissatisfied |
| A | Primo sottoreticolo della struttura del grafene |
| B | Secondo sottoreticolo della struttura del grafene |
| \vec{a}_1 | Vettore primitivo del sottoreticolo A |
| \vec{a}_2 | Vettore primitivo del sottoreticolo B |
| PEDOT:PSS | poli(3,4-etilenediossiofene) polistirene sulfonato |
| PMC | Polymer Matrix Composites |
| λ_{eff} | Conducibilità effettiva |
| a | Sovrapposizione tra filler |
| h | Distanza tra filler contigui |
| ECE | Sigla del detersivo di riferimento secondo la normativa |
| G+ | Capo con stampa in grafene |
| CRT | Capo di controllo |
| MMT | Moisture Management Tester |
| AR | Absorption Rate |
| WT | Wetting Time |
| SS | Spreading Speed |
| R | Accumulative One-Way Transport Capability |
| OMMC | Overall Liquid Moisture Management Capability |
| MWR | Max Wetted Radius |

| | |
|-------------------|---|
| Tforehead | Temperatura della fronte |
| Tscapuladx | Temperatura della scapola destra |
| Tchestsx | Temperatura del pettorale sinistro |
| Tdeltoidx | Temperatura deltoide destro |
| Telbowsx | Temperatura gomito sinistra |
| Thandsx | Temperatura mano sinistra |
| Ttighdx | Temperatura coscia destra |
| Tcalfsx | Temperatura polpaccio sinistro |
| DS | Deviazione Standard |
| N | Numero di livelli di grigio in cui viene suddivisa l'immagine |
| GLCM | Gray Level Co-Occurrence Matrix |
| d | Lunghezza del vettore di scansione utilizzato |
| θ | Inclinazione del vettore di scansione utilizzato |
| i | Indice delle righe |
| j | Indice delle colonne |
| P(i,j) | Probabilità |
| C(i,J) | Valore assunto dalla cella (i,j) nella GLCM |
| t0 | Istante di inizio della prova |
| t5 | Istante a 5 minuti dopo l'inizio della prova |
| t10 | Istante a 10 minuti dopo l'inizio della prova |
| t15 | Istante a 15 minuti dopo l'inizio della prova |
| t20 | Istante a 20 minuti dopo l'inizio della prova |
| t25 | Istante a 25 minuti dopo l'inizio della prova |
| t30 | Istante a 30 minuti dopo l'inizio della prova |
| t35 | Istante a 35 minuti dopo l'inizio della prova |
| t40 | Istante a 40 minuti dopo l'inizio della prova |
| t45 | Istante a 45 minuti dopo l'inizio della prova |
| t50 | Istante a 50 minuti dopo l'inizio della prova |
| t55 | Istante a 55 minuti dopo l'inizio della prova |
| t60 | Istante a 60 minuti dopo l'inizio della prova |

Bibliografia

- AATCC 195-2009: Liquid Moisture Management of Textile Fabrics* (2009).
- ASHRAE Standard 55 92: Thermal environmental conditions for human occupancy* (1992).
- Bao-guo, Y., Yi, Liand Jun-yan, H., Yi-lin, K. & Kwok-wing, Y. (2006), ‘An improved test method for characterizing the dynamic liquid moisture transfer in porous polymeric materials’, *Polymer testing* **25**, 677 – 689.
- Bigdeli, M. B. & Fasano, M. (2017), ‘Thermal transmittance in graphene based networks for polymer matrix composites’, *International Journal of thermal science* **117**, 98 – 105.
- Blasi, G. (2017), Applicazione del metodo della matrice di co-occorrenza ad immagini termografiche come indice di valutazione del grado di cellulite, Tesi di laurea magistrale, Politecnico di Torino.
- Bottarelli, E. (2017), ‘Confrontare due medie: il test t di student’.
URL: <http://www.quadernodiepidemiologia.it/epi/assoc/t,tu.htm>
- Brown, S. (2016), ‘Measure of shape: Skewness and kurtosis’.
URL: <https://brownmath.com/stat/shape.htm>
- Cao, B.-Y., Yao, W.-J. & Ye, Z.-Q. (2016), ‘Networked nanoconstrictions: An effective route to tuning the thermal transport properties of graphene’, *Carbon* **96**, 711 – 719.
- Carbonari, A. (2009), *Comfort termico*.
- Carey, T., Cacovich, S., Divitini, G., Jiesheng, R., Mansouri, A., Kim, J. M., Wang, C., Ducati, C., Sordan, R. & Torrisi, F. (2017), ‘Fully inkjet-printed two-dimensional material field effect heterojunctions for wearable and textile electronics’, *Nature communications* .
- Corsi, L. & Luca, L. (2009), ‘Il concetto di comfort: come passare dalla sensazione ad una valutazione oggettiva’.

- Dall’O, G. (2016), *Comfort termoigrometrico*.
- Di Francia, G., Massera, E., Mara, M., Nasti, I. & Polichetti, T. (2011), Il grafene: proprietà, tecniche di preparazione ed applicazioni, report enea, Enea.
- Fanger, P. O. (1972), ‘Thermal comfort: analysis and applications in environmental engineering’, *Danish Technical Press* **92**, 164 – 164.
- Fanger, P. O. (1973), ‘Assessment of man’s thermal comfort in practice’, *British Journal of Industrial Medicine* **30**, 313–324.
- Furmański, P. & Łapka, P. (2017), ‘Evaluation of a human skin surface temperature for the protective clothing – skin system based on the protective clothing–skin imitating material results’, *International Journal of Heat and Mass Transfer* **114**, 1331–1340.
- GROMACS (2018), *GROMACS manual*.
- Hahn, K. R., Melis, C. & Colombo, L. (2016), ‘Structural, vibrational, and thermal properties of nanocrystalline graphene in atomistic simulations’, *The journal of physical chemistry C* **120**, 3026 – 3025.
- Hernandez-Contreras, D., Peregrina-Barreto, H., Rangel-Magdaleno, J., Gonzalez-Bernal, J. & Altamirano-Robles, L. (2017), ‘A quantitative index for classification of plantar thermal changes in the diabetic foot’, *Infrared Physics Technology* **81**, 242 – 249.
- Irzmanska, E. (2016), ‘Evaluating the comfort of use of protective footwear: Validation of a method based on microclimate parameters and peripheral blood flow’, *Measurement* **77**, 34 – 39.
- McNeese, B. (2016), ‘Are the skewness and kurtosis useful statistics?’.
URL: <https://www.spcforexcel.com/knowledge/basic-statistics/are-skewness-and-kurtosis-useful-statisticsskewness>
- Meyer, D., Dungs, C. & Senner, V. (2015), Estimating the relationship between heart rate and power output for short term cycling exercises, pp. 237–243.
- Mortazavi, B., Benzerarac, O., Meyerc, H., Bardonn, J. & Ahzia, S. (2013), ‘Combined molecular dynamics-finite element multiscale modeling of thermal conduction in graphene epoxy nanocomposites’, *Carbon* .
- Parsons, K. C. (2003), *Human Thermal Environments*, second edn, CRC Press, Boca Raton.

- Raj, S. & Sreenivasan, S. (2009), 'Total wear comfort index as an objective parameter for characterization of overall wearability of cotton fabrics', *Journal of Engineered Fibers and Fabrics* **4**, 29 – 41.
- Renzetti, F. R. & Zortea, L. (2011), 'Use of a gray level co-occurrence matrix to characterize duplex stainless steel phases microstructure', *Frattura ed integrità strutturale* **16**.
- Ronchetti, M. (1991), 'Dinamica molecolare'.
URL: <http://www.treccani.it/enciclopedia/dinamica-molecolare/>
- Roshan, S. (2015), *Textile for Sportswear*, Woodhead Publishing Series in Textile, Cambridge.
- UNI EN ISO 105-C06: Tessili - Prove di solidità del colore - Parte C06: Solidità del colore al lavaggio domestico e commerciale (2014).
- UNI EN ISO 28802:2012: Ergonomics Of The Physical Environment - Assessment Of Environments By Means Of An Environmental Survey Involving Physical Measurements Of The Environment And Subjective Responses Of People (2012).
- UNI EN ISO 9237:1995: Determination of the permeability of fabrics to air (1995).
- UNI EN ISO 9886:2004: Valutazione degli effetti termici (thermal strain) mediante misurazioni fisiologiche. (2004).
- Wen-Jun, Y. & Bing-Yang, C. (2016), 'Triggering wave-domain heat conduction in graphene', *Physics Letter A* **380**, 2015 – 2110.
- Zhen-Qiang, Y., Bing-Yang, C., Wen-Jun, Y., Tianli, F. & Xiulin, R. (2015), 'Spectral phonon thermal properties in graphene nanoribbons', *Carbon* **93**, 915 – 923.

Ringraziamenti

Vorrei ringraziare le mie relatrici, la professoressa Ada Ferri e la dottoressa Laura Rizzi, per avermi dato la possibilità di svolgere questo progetto ed avermi aiutato nella stesura di questa tesi. Ringrazio anche Barbara Cravello e Francesca Dotti del LATT di Biella per il loro aiuto e la loro gentilezza. Un grazie va anche a Giuseppe Blasi, del quale ho ripreso in parte il lavoro, per la disponibilità dimostrata.

Voglio ringraziare i miei genitori che mi hanno sempre permesso di seguire le mie passioni (per quanto l'ingegneria e il calcio potessero sembrare scelte discutibili agli occhi di molti) e per avermi insegnato che fare il proprio dovere è indispensabile, ma prendersi troppo sul serio non è necessario. Ringrazio anche mio fratello e mia sorella, senza i quali la mia vita sarebbe stata di gran lunga più noiosa.

Voglio ringraziare poi la mia migliore amica Marta per essere stata il mio punto di riferimento in tutti questi anni e per ricordarmi sempre cosa voglia dire tornare a casa. Ringrazio tutte le persone che questa città mi ha regalato, soprattutto ringrazio Peppone che mi ha fatto conoscere il reparto migliore di questo Policlinico: grazie ad Agostino, Andre, Ciccio, Davide, Gianni, Gianluca, Leandro, Marco, Mauro e grazie alle donne Alessandra, Alida, Chiara, Emilia, Flavia, Giusy, Stefania e Valentina. Un grazie particolare va a Silvia che mi ha dato qualche consiglio per questo e per altri progetti. Un grazie anche alle ragazze e ai ragazzi del Politeam perchè è stato un onore indossare una maglia in nome della quale sono state compiute imprese di vario genere e sempre epiche. Grazie anche a Davide che, insieme soprattutto al dottor Cimarello e al Tedesco, mi ha sostenuto durante i mesi lisboneti. Un grazie va anche a Federica e Claudia per avermi impedito di farmi sopraffare dalla noia e dal peso di alcuni esami e di molte ore di lezione. Voglio ringraziare anche Eleonora per la nostra convivenza di cinque anni di diete boicottate e risate.