

POLITECNICO DI TORINO

Collegio di Ingegneria Chimica e dei Materiali

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

Tesi di Laurea Magistrale

**Valutazione dell'isolamento termico di scarponi
per l'alpinismo**



Relatori

Prof. Ada Ferri
Prof. Francesca Dotti

Candidato

Alessandro Protti

Ottobre 2023

Indice

INTRODUZIONE	3
1. COMFORT TERMICO	4
1.1 TEMPERATURA DELL'ARIA	5
1.2 TEMPERATURA RADIANTE MEDIA	7
1.3 UMIDITÀ DELL'ARIA	8
1.4 VELOCITÀ DELL'ARIA	9
1.5 CALORE METABOLICO.....	10
1.6 EQUAZIONE DEL BILANCIO TERMICO PER IL CORPO UMANO	13
1.6.1 <i>Produzione di calore all'interno del corpo (M – W)</i>	13
1.6.2 <i>Calore disperso sulla pelle (C + R +K + E)</i>	14
1.6.3 <i>Calore disperso dalla respirazione (C_{res} + E_{res})</i>	16
1.7 L'IREQ.....	17
1.8 CALCOLO DI I _{CL,R}	20
1.9 CALCOLO DI R _{E,T}	24
2. LO SCARPONE PHANTOM TECH	26
2.1 LA "REGOLA DEI TRE LAYERS"	27
2.1.1 <i>Base layer</i>	27
2.1.2 <i>Mid layer</i>	27
2.1.3 <i>Outer-Shell layer</i>	28
2.2 LO SCAFO.....	29
2.3 LA GHETTA.....	30
2.4 ZEPPA E BATTISTRADA	31
3. PROCEDURE E SETUP SPERIMENTALE	33
3.1 NORMA ISO 20344	33
3.1.1 <i>Condizionamento prima e durante il test</i>	33
3.1.2 <i>Preparazione del provino</i>	33
3.1.3 <i>Procedura</i>	34
3.2 DEVIAZIONE RISPETTO ALLA NORMA.....	34
3.3 APPARECCHIATURE E SOFTWARE UTILIZZATI	36
3.3.1 <i>Camera climatica</i>	36
3.3.2 <i>Sensori</i>	37
3.3.3 <i>Termocamera</i>	39
3.3.4 <i>Software di elaborazione dati</i>	40
3.4 VARIAZIONE DEI RIEMPIMENTI INTERNI AGLI SCARPONI	41
4. TEST DI DISPERSIONE TERMICA CON SUOLA ASCIUTTA.....	43
4.1 RISULTATI PER IL MODELLO PHANTOM TECH NUMERO 42	43
4.2 RISULTATI PER IL MODELLO PHANTOM TECH NUMERO 38	51
4.3 RISULTATI PER IL MODELLO PHANTOM 6000 NUMERO 42	53

4.4	RISULTATI PER IL MODELLO PHANTOM 6000 NUMERO 37	56
4.5	RISULTATI PER IL MODELLO PHANTOM 8000 NUMERO 42	58
4.6	RISULTATI PER IL MODELLO PHANTOM 8000 NUMERO 38	61
4.7	CONCLUSIONI	63
5.	TEST CON DIFFERENTI TIPI DI RIEMPIMENTI INTERNI DELLO SCARPONE.....	67
5.1	TEST IN ARIA CON DIVERSI RIEMPIMENTI.....	69
5.2	TEST IN SOLUZIONE A BASE GLICOLE CON DIVERSI RIEMPIMENTI	76
5.3	TEST IN GHIACCIO CON DIVERSI RIEMPIMENTI	81
5.4	CONCLUSIONI	86
6.	CONFRONTO TRA AMBIENTI DIVERSI	88
6.1	TEST CON RIEMPIMENTO IN ACCIAIO IN AMBIENTI DIVERSI	88
6.2	TEST CON RIEMPIMENTO IN RISO IN AMBIENTI DIVERSI	92
6.3	TEST CON RIEMPIMENTO DI ACQUA IN AMBIENTI DIVERSI	95
6.4	CONCLUSIONI	99
7.	CONCLUSIONI.....	100
	BIBLIOGRAFIA E SITOGRAFIA.....	103

Introduzione

Il seguente lavoro di tesi è stato svolto con l'obiettivo principale di valutare l'isolamento termico di tre diverse tipologie di scarponi per l'alpinismo prodotti da SCARPA. L'isolamento termico è indispensabile per garantire un certo livello di comfort soprattutto quando si ha a che fare con ambienti freddi. Una condizione di comfort termico ottimale permette all'organismo di mantenere una temperatura corporea centrale stabile, promuovendo il benessere fisico e psicologico dell'individuo. Le estremità del corpo, come i piedi, risentono maggiormente delle basse temperature e questo porta a situazioni di disagio termico significativamente maggiori rispetto ad altre zone del corpo; da qui deriva l'importanza di indossare scarponi che consentano un corretto isolamento termico.

La maggior parte del lavoro di tesi è stato svolto presso il Laboratorio di Alta Tecnologia Tessile del Politecnico di Torino situato a Biella, dove è presente una camera climatica all'interno della quale è possibile variare le condizioni ambientali, come la temperatura, l'umidità o la velocità dell'aria, ottenendo così un clima controllato. Per l'acquisizione dei dati sono stati utilizzati sette sensori di temperatura posti all'interno dello scarpone, mentre per lo studio delle temperature esterne si è fatto ricorso ad una termocamera.

Gli scarponi analizzati in questo lavoro di tesi sono: il Phantom Tech, il Phantom 6000 e il Phantom 8000.

Per ciascuna tipologia di scarpone sono state effettuate due acquisizioni con due taglie differenti. Inizialmente i test si sono focalizzati sullo studio delle aree maggiormente soggette al raffreddamento e dei meccanismi che regolano la trasmissione del calore, andando anche a confrontare le variazioni di temperatura che si osservano sia tra taglie diverse della stessa calzatura, sia tra le tre tipologie di scarpone.

Ci si è successivamente concentrati sul solo Phantom Tech e i test sono proseguiti andando a variare sia i riempimenti interni dello scarpone, sia le condizioni ambientali esterne. Lo scopo è di studiare come cambiano le temperature misurate internamente ed esternamente al variare delle condizioni in cui si trova lo scarpone.

Il contenuto della tesi è organizzato nel seguente modo:

- Nel primo capitolo viene descritto il significato di comfort termico e l'equazione del bilancio termico con le principali variabili che la determinano.
- Nel secondo capitolo viene descritta la struttura dello scarpone Phantom Tech con un accenno ai principali materiali utilizzati.
- Nel terzo capitolo vengono descritte le procedure impiegate per l'acquisizione dei dati e il setup sperimentale utilizzato durante i test.
- Nel quarto capitolo ci si è concentrati sull'analisi dei dati sperimentali relativi alle tre tipologie di scarpone e delle due taglie utilizzate.
- Nel quinto capitolo si è andati a studiare la variazione delle temperature interne ed esterne misurate andando a variare il riempimento, mantenendo le condizioni ambientali invariate.
- Nel sesto capitolo ci si è focalizzati sulla variazione delle temperature interne ed esterne che si osservano quando si vanno a variare le condizioni ambientali, mantenendo invariato il riempimento interno.
- Nell'ultimo capitolo sono presentate le conclusioni e le osservazioni finali.

1.

Comfort termico

Si definisce comfort termico "una condizione mentale nella quale si percepisce soddisfazione nei confronti dell'ambiente esterno" (ASHRAE, 1996). La definizione è molto generica e si porta dietro alcune criticità: innanzitutto un individuo può trovarsi in una condizione di comfort termico ma può riscontrare delle problematiche di vario genere con l'ambiente che lo circonda ed in secondo luogo il comfort termico dovrebbe corrispondere ad una condizione umana nella quale la persona non percepisce alcun segnale termico (caldo o freddo che sia) in nessuna zona corporea (Taylor, 2014). Se ne potrebbe trarre che dunque non esista un vero e proprio comfort, ma solo l'assenza di una forte sensazione di discomfort.

Per evitare che ciò accada è indispensabile che la temperatura interna del corpo sia mantenuta all'interno di limiti ottimali attraverso l'interazione di meccanismi di regolazione termica interna ed esterna, che consentano alle funzioni vitali di operare in modo efficiente senza sforzi eccessivi.

Il "comfort termico" è influenzato da una serie di fattori, tra cui la temperatura dell'aria, l'umidità relativa, la velocità del vento, l'abbigliamento indossato e l'attività fisica svolta. L'obiettivo è raggiungere una temperatura che sia coerente con le esigenze dell'individuo, che sono comuni a tutti gli esseri umani. Per una persona in salute la temperatura interna ("di core") si attesta nel range di $37 \pm 0.3^{\circ}\text{C}$. Il calore interno, prodotto dai processi metabolici, è trasportato attraverso il sangue e parzialmente trasmesso attraverso i tessuti fino alla pelle dove avviene la dissipazione nell'ambiente esterno. Questo meccanismo è controllato dal sistema termoregolatorio situato nell'ipotalamo ed è costituito da una serie di termorecettori, in grado di riconoscere il cambiamento di temperatura esterna e sono in grado di trasmettere segnali all'ipotalamo che a sua volta di invia stimoli agli "effettori" che mettono in atto sistemi di difesa come la vaso dilatazione/costrizione (Bogdan, 2011).

Per "core" ci si riferisce a tutti i tessuti situati ad una profondità sufficiente per non essere influenzati dal gradiente di temperatura che si osserva attraverso i tessuti superficiali. Tuttavia, all'interno del core sono possibili differenze di temperatura a seconda delle condizioni locali metaboliche, alla concentrazione delle reti vascolari e alle variazioni locali del flusso sanguigno; la temperatura di core non è quindi un concetto univoco. Essa può essere approssimata se si eseguono delle misurazioni di temperatura in varie zone del corpo, tra cui esofago, retto, bocca e timpano (ISO 9886).

La temperatura della pelle, d'altra parte, varia ampiamente sulla superficie del corpo, soprattutto se ci si trova in un ambiente freddo. È possibile quindi sia riferirsi alla temperatura della pelle di specifiche zone del corpo, sia a quella media, che è valutata sommando in maniera pesata le temperature delle differenti aree in funzione della loro superficie occupata (ISO 9886).

Una condizione di comfort termico ottimale consente all'organismo umano di mantenere una temperatura corporea centrale stabile, attivando meccanismi di regolazione. Questo equilibrio non solo promuove il benessere fisico, ma ha anche un impatto significativo sul benessere psicologico,

influenzando l'umore, la qualità della vita e la produttività. È stato dimostrato ad esempio che il raffreddamento dei muscoli ne rallenta la velocità di contrazione e ne diminuisce la forza (Debenham, 2021). Il comfort termico è quindi un elemento cruciale nella progettazione, nonché nella scelta dell'abbigliamento adatto alle diverse condizioni climatiche.

Alla condizione di comfort termico, che ha una definizione più scientifica ed oggettiva, si affianca una seconda definizione che è quella di sensazione, che può essere diversa tra individuo ed individuo. Questo significa che ciò che è considerato confortevole da una persona potrebbe non esserlo per un'altra, a seconda di fattori come l'adattamento, le esperienze personali e le preferenze culturali. Ad esempio, è stato osservato come le donne tendano ad essere più sensibili ad un ambiente particolarmente caldo o freddo rispetto agli uomini (Liu et al, 2018), mentre le persone anziane tendono a preferire ambienti più caldi rispetto ai giovani (Shellen et al, 2010). La ricerca e la progettazione mirate a ottimizzare il comfort termico tengono conto di queste sfumature individuali e cercano di creare abbigliamento che soddisfino una gamma diversificata di esigenze.

Il corpo umano risponde agli stimoli termici dell'ambiente che lo circonda in modo dinamico e se la risposta è inappropriata questo può risentire di stress termici, che nei casi più gravi può portare a danni, anche permanenti, all'individuo.

Vi sono quattro variabili ambientali di base che possono incidere il comfort termico:

- Temperatura dell'aria
- Temperatura radiante media
- Umidità
- Velocità dell'aria

Questi quattro parametri combinati con il calore metabolico generato dal corpo umano e dall'abbigliamento, che è in grado di trattenere il calore, costituiscono i sei fattori fondamentali che definiscono lo *"human thermal environment"*. Questi parametri permettono di valutare i requisiti minimi per un utile punto di partenza su cui è possibile basare un'analisi del comfort termico. Di seguito verranno analizzati singolarmente (Parson 2003).

1.1 Temperatura dell'aria

Gli esseri umani vengono definiti sia esseri omeotermici sia endotermici. Per omeotermia ci si riferisce alla condizione di stabilità termica del corpo, per cui, entro certi limiti, la temperatura rimane stazionaria, indipendentemente dalle oscillazioni termiche dell'ambiente e dal variare della quantità di calore prodotto nei processi metabolici (Enciclopedia Treccani). È necessario per un essere umano mantenere la propria temperatura di core vicino ai 37°C; una differenza di qualche grado da questo valore può portare a conseguenze anche gravi. Allo stesso tempo si definiscono anche come esseri endotermici poiché in grado di produrre energia da soli tramite i processi metabolici (Ooijen, 2008).

La temperatura del corpo umano è fortemente influenzata dalla temperatura dei fluidi e/o dei solidi dai quali il corpo stesso è circondato. Generalmente la pelle di un individuo si trova o a contatto con i vestiti, o a contatto con l'aria. In realtà un sottile strato d'aria è normalmente presente anche tra il capo di abbigliamento e la pelle, ma questo argomento verrà approfondito più nel dettaglio successivamente. La differenza di temperatura tra l'aria e la pelle è quindi tra le principali forze spingenti per quel che riguarda il trasferimento di calore tra il corpo umano e l'ambiente.

Per convenzione si definisce la **temperatura dell'aria** come la temperatura dell'aria che circonda il corpo umano e che è rappresentativa di quell'aspetto dell'ambiente ed è quindi in grado di determinare il flusso di calore che viene scambiato tra il corpo umano e l'aria stessa. La temperatura dell'aria, infatti non è costante: ad una certa distanza dal corpo questa assumerà un valore, mentre quella immediatamente adiacente un altro. Quando la temperatura dell'aria è troppo elevata essa può superare la capacità del corpo di raffreddarsi attraverso la dissipazione del calore, portando a situazioni

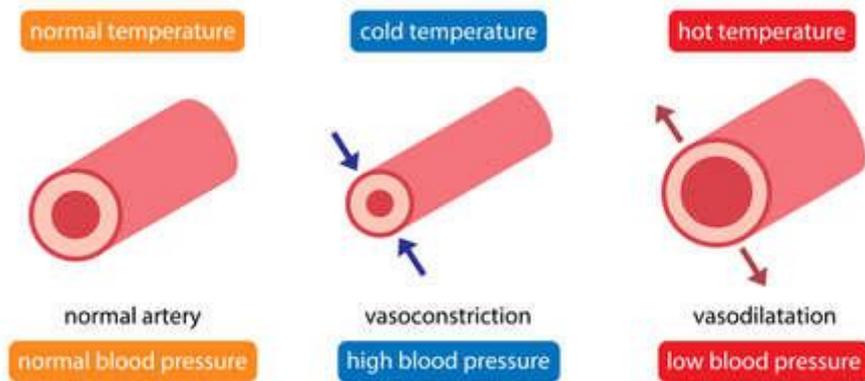


Figura 1.1: Vaso-dilatazione e vaso-costrizione

di disagio e sudorazione eccessiva: tramite la sudorazione vengono infatti espulsi dall'organismo anche sali minerali, come Magnesio e Potassio, che contribuiscono al normale funzionamento del sistema nervoso e alla funzionalità muscolare. Come risposta il corpo umano tenderà a far dilatare i vasi sanguigni tramite un processo chiamato vaso-dilatazione, permettendo così, da una parte al calore di essere dissipato attraverso la pelle e dall'altra all'acqua di evaporare (sudorazione) (Figura 1.1).

Viceversa, in caso di temperatura troppo bassa i vasi sanguigni si restringono attraverso un processo chiamato vaso-costrizione; questo riduce la quantità di sangue che fluisce verso la pelle riducendo così la perdita di calore e, poiché il quantitativo di sangue che raggiunge la superficie esterna del corpo è minore, ne rimarrà di più nelle zone centrali del corpo, contribuendo a prevenire il raffreddamento eccessivo degli organi interni. Inoltre, a seguito della vaso-costrizione, la quantità di sangue che raggiunge le estremità del corpo, come mani e piedi è limitata e questo può causare sensazione di freddo ed intorpidimento, spesso percepito come fastidioso. La pianta del piede possiede un'alta concentrazione di termorecettori che in situazioni di freddo può generare una situazione di discomfort localizzata. E noto che esista una separazione tra discomfort locale e generalizzato, per cui si possono avere i piedi in una condizione di disagio, mentre il resto del corpo rimanere in una situazione termicamente confortevole. Tuttavia, a causa della presenza massiccia di questi termorecettori nei piedi, essi portano ad un disagio termico significativamente maggiore, rispetto ad altre zone del corpo. Dunque, anche se svolgono un ruolo minore su quel che è il comfort generale, mani e piedi forniscono un riscontro molto potente rispetto al comfort locale (Taylor et al, 2009)

I rischi di una eccessiva esposizione ad una temperatura bassa per lunghi periodi sono diversi e di varia severità. Si può passare dalla semplice sensazione di intorpidimento e perdita di sensibilità, soprattutto delle zone più periferiche del corpo umano, a danni ai tessuti (a causa della mancanza di ossigeno e nutrienti per un tempo prolungato a seguito della vaso-costrizione), fino all'ipotermia che inizia quando la temperatura interna del corpo scende al di sotto dei 35°C (ipotermia lieve) ed è caratterizzata da pallore del viso e del corpo, presenza di brividi continuati, battito cardiaco accelerato, fino ai casi più gravi, quando la temperatura scende al di sotto dei 26°C con conseguente

compromissione delle funzioni vitali, perdita di coscienza e morte dovuta ad arresto cardio-respiratorio (ISS, Oxmoor House).

1.2 Temperatura radiante media

La temperatura radiante è un fattore importante nella valutazione complessiva del comfort termico ed è legato alla temperatura a cui si trovano gli oggetti o individui presenti all'interno di un ambiente.

In un contesto di comfort termico, infatti, non è solo la temperatura dell'aria che influenza come ci sentiamo, ma anche la temperatura dei materiali circostanti, come pareti, pavimenti, mobili e altre superfici. Le superfici possono emettere, assorbire o riflettere calore sotto forma di radiazione elettromagnetica infrarossa e questa è legata tramite l'equazione di Stefan-Boltzmann alla quarta potenza della temperatura:

$$q = \varepsilon \sigma T^4 \quad (1.1)$$

Dove:

- ε è l'emissività, cioè una misura di quanto un corpo è in grado di emettere energia tramite radiazione. Per un corpo nero ideale essa è pari a 1, mentre per i corpi reali è sempre minore di 1.

- q è l'emittanza, ovvero la potenza emessa in unità di superficie [W/m^2]

- σ è la costante di Stefan-Boltzmann e vale $5.67 \cdot 10^{-8}$ [$W/(m^2K^4)$]

- T è la temperatura assoluta del corpo [K]

In ciascun ambiente vi è quindi un continuo scambio, riflessione ed assorbimento di energia. Si tratta di un campo radiante nel quale in ogni punto vi è uno scambio dinamico di energia tramite radiazione. Il risultato sarà un flusso netto di calore dalle superfici calde alle superfici più fredde. Complessivamente questo campo può essere definito in termini di calore scambiato o, più convenientemente, in termini di **temperatura radiante media**.

Questa grandezza viene definita come la media ponderata delle temperature delle superfici circostanti tenendo conto anche della loro area ed emissività. Se la temperatura radiante media è significativamente diversa da quella dell'aria, ciò può influenzare la percezione del comfort termico. Ad esempio, in una stanza con pareti fredde, anche se l'aria è calda, si potrebbe avvertire comunque la sensazione di freddo a causa del calore perso tramite radiazione.

Vi è tuttavia un'ulteriore temperatura radiante da tenere in considerazione ed è la **temperatura piana radiante**. Questa tipologia di temperatura viene normalmente utilizzata quando si vuole verificare un'asimmetria della temperatura lungo un ipotetico piano dovuto dalla presenza di un elemento che irradia ad una temperatura molto diversa da quella dell'ambiente circostante (presenza di un camino, vetrata, ecc....). Questo gradiente di temperatura può determinare un dis-comfort.

La temperatura radiante media può essere valutata secondo differenti orientazioni; ad esempio, dall'alto verso il basso o da destra verso sinistra. Per quel che riguarda il corpo umano è più probabile assistere ad asimmetria della temperatura lungo l'altezza piuttosto che lungo le altre direzioni.

1.3 Umidità dell'aria

L'umidità gioca un ruolo importante nel comfort termico delle persone. L'umidità relativa dell'aria, cioè la quantità di vapore acqueo presente nell'aria rispetto alla quantità massima che essa potrebbe contenere a una data temperatura, ha un impatto significativo sul modo in cui percepiamo la temperatura stessa.

Quando un liquido, generalmente acqua o sudore, è scaldato dal corpo umano e successivamente evapora, il calore che ha generato questa transizione passa dal corpo all'ambiente. Il risultato è che il corpo è stato raffreddato. La *driving force* per questo trasferimento di massa (vapore) è la differenza in massa per unità di volume dell'aria umida, cioè la differenza in umidità assoluta tra quella misurata sulla pelle e quella presente in ambiente. È possibile correlare la pressione di vapore parziale con l'umidità assoluta tramite la formula proposta da Kerslake:

$$Ua = 2.17 \frac{Pa}{T}$$

(1.2)

Dove:

- Ua è l'umidità assoluta
- Pa è la pressione parziale
- T è la temperatura

Generalmente l'umidità è espressa in termini di umidità relativa, cioè il rapporto tra la pressione parziale del vapore acqueo misurato e la pressione parziale di vapore acqueo saturo (P_{SA}):

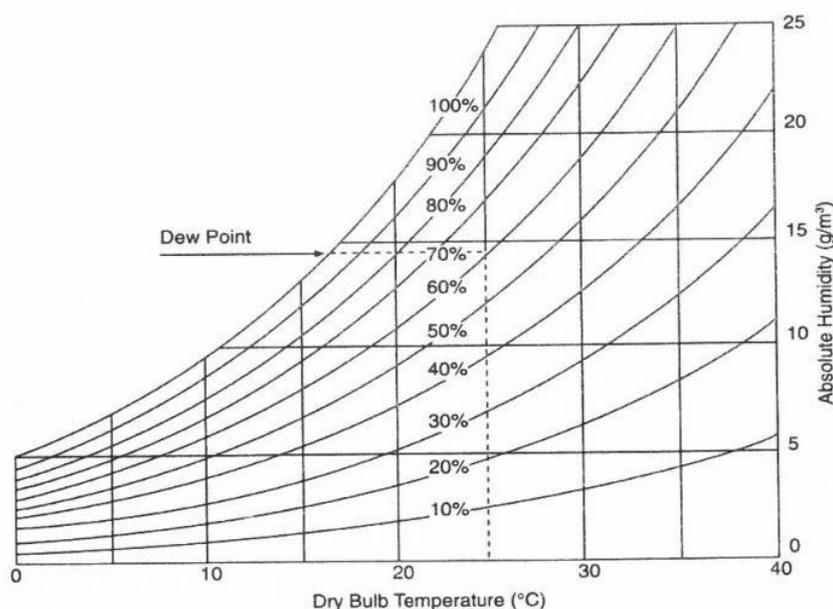


Figura 1.2: Caratteristiche dello stato fisico dell'aria umida

$$\phi = \frac{Pa}{Psa}$$

(1.3)

È un numero puro che varia tra 0 e 1 o, in alternativa, può essere espressa in percentuale.

P_{sa} può essere valutata, in funzione della temperatura, tramite l'equazione di Antoine:

$$P_{sa} = \exp \left(18.956 - \frac{4030.18}{t+235} \right)$$

(1.4)

Minore è il valore di Φ , maggiore sarà la capacità dell'aria di immagazzinare ulteriore vapore acqueo. Nel nostro caso specifico se l'umidità relativa è elevata, per il corpo sarà più difficile permettere l'evaporazione del sudore presente sulla pelle, riducendo così la possibilità di smaltire il calore attraverso la sudorazione.

L'umidità è in grado di influenzare la percezione della temperatura del corpo umano. Aumentando l'umidità, diminuisce la capacità dell'aria di far evaporare il sudore, con il risultato che il nostro corpo percepisce la temperatura più elevata di quello che è effettivamente. Questa sensazione di disagio può farsi evidente, in condizioni di elevata umidità, anche nei casi in cui la temperatura sia moderata. Viceversa, in inverno, l'aria poco umida e fredda può far percepire il freddo in modo più intenso, per lo stesso motivo appena descritto: l'aria secca, infatti, favorisce l'evaporazione più rapida dell'umidità presente sulla pelle, portando via il calore corporeo più rapidamente.

1.4 Velocità dell'aria

La velocità dell'aria può influenzare il flusso di calore dal corpo e portare ad una modifica della temperatura dello stesso. Il movimento dell'aria varia nel tempo, spazio e direzione rendendo questo parametro molto complesso da analizzare. Per convenzione la velocità dell'aria viene considerata la velocità dell'aria media in un lasso di tempo di nostro interesse integrata in tutte le direzioni (può essere anche solo la radice quadrata della somma quadratica delle velocità nelle tre direzioni).

Il movimento dell'aria, così come la temperatura, influiscono sulla velocità alla quale l'aria calda o il vapore vengono allontanati dal corpo andando così a modificarne la temperatura. Ovviamente maggiore è la velocità dell'aria, maggiore sarà questo effetto.

Quando c'è vento, infatti, l'aria circostante rimuove rapidamente il calore dal corpo umano attraverso la convezione forzata. Anche in condizioni di temperatura relativamente moderata, la velocità del vento può far sembrare la temperatura percepita molto più fredda rispetto a quanto segnala il termometro. Il vento, inoltre, può favorire l'evaporazione del sudore sulla pelle: quando c'è, l'evaporazione avviene in modo più rapido, rimuovendo il calore dalla pelle e creando una sensazione di freschezza. Questo può contribuire al comfort termico in ambienti caldi o, viceversa, aumentare la percezione del freddo.

Esiste un parametro definito *indice di raffreddamento del vento* o *wind chill index (WCI)* che viene utilizzato per quantificare l'effetto combinato del vento e della temperatura fredda. È un calcolo

empirico e può variare leggermente anche in base alle unità di grandezza utilizzate. Di seguito si riporta quella più comunemente usata:

$$WCI = 13.12 + 0.6215 \times Ta - 11.37 \times V^{0.16} + 0.3965 \times Ta \times V^{0.16} \quad (1.5)$$

Dove:

- WCI è l'indice di raffreddamento del vento ed è espresso in gradi [°C]
- Ta è la temperatura dell'aria [°C]
- V è la velocità del vento [km/h]

La velocità media, come detto in precedenza, offre un valore utile, ma approssimato per rappresentare questo effetto sul corpo. Analisi più dettagliate possono aumentarne la complessità, ma possono avere una certa utilità in specifiche applicazioni.

1.5 Calore metabolico

Il metabolismo è l'insieme di tutte le reazioni chimiche che avvengono all'interno di un organismo vivente e che permettono di mantenerlo in vita. Queste reazioni chimiche includono la sintesi, la rottura e la trasformazione delle molecole all'interno delle cellule. Il metabolismo è responsabile di diverse funzioni vitali, tra cui la produzione di energia, la sintesi di molecole necessarie per la crescita e la riparazione dei tessuti, la regolazione delle reazioni chimiche nel corpo e l'eliminazione dei prodotti di scarto.

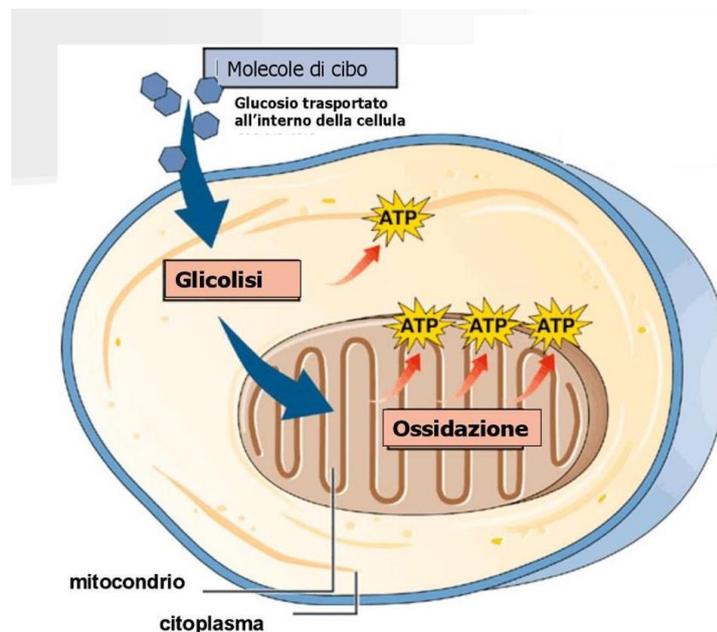


Figura 1.3: Respirazione cellulare

Molte delle reazioni metaboliche che avvengono all'interno delle cellule sono esotermiche, il che significa che rilasciano energia sotto forma di calore. Il tasso metabolico (metabolic rate), ovvero la conversione di energia chimica in energia meccanica e/o termica, misura il costo energetico del carico muscolare ed è importante per determinare il comfort quando si è esposti ad un ambiente di lavoro o mentre si svolge un'attività fisica. In particolare, quando si ha a che fare con ambienti caldi, l'alto livello di calore metabolico prodotto sommato al lavoro muscolare, può aggravare lo stress di tipo termico, poiché una maggiore quantità di calore deve essere dissipata. La norma ISO 8996 fornisce utili informazioni su come ricavare il tasso metabolico in vari contesti di attività lavorative. Innanzitutto, quello che è importante sapere è che l'efficienza meccanica del lavoro muscolare è bassa. In molti contesti lavorativi è sufficientemente bassa da essere considerata trascurabile e questo significa che si assume che l'energia spesa per una determinata attività venga completamente trasformata in calore. Vi sono quattro differenti approcci per valutare il tasso metabolico:

- **Livello 1: "Screening"**.
Si tratta di un metodo molto semplice che permette di valutare in maniera rapida l'attività svolta e suddividerla in quattro grandi categorie: lavoro leggero, moderato, pesante e molto pesante. In tabella 1.1 sono riportate le quattro tipologie di attività correlate con alcuni esempi; si tratta ovviamente di una classificazione molto grezza, che presenta un'incertezza elevata.
- **Livello 2: "Osservazione"**
Si tratta di una procedura più accurata, ma che necessita di avere informazioni dettagliate sia sul soggetto in esame, sia sulle condizioni di lavoro (sesso, peso ed altezza del soggetto, peso del carico trasportato, velocità di movimentazione, ecc...) e fornisce un valore di tasso metabolico molto specifico circa l'attività e il soggetto presi in esame. L'errore associato a questa misurazione è di circa il 20%
- **Livello 3: "Analisi"**
Il tasso metabolico viene valutato dalle registrazioni della frequenza cardiaca durante un periodo rappresentativo. Esiste infatti una relazione che lega queste due grandezze. E un metodo accurato con un'incertezza compresa tra il 10 e il 15%.
- **Livello 4: "Competenza"**
Richiede misure molto specifiche che devono essere eseguite da personale esperto. Vi sono diverse metodologie per valutare il tasso metabolico come lo studio del consumo di ossigeno o la calorimetria diretta. Si tratta di un metodo molto accurato con un'incertezza inferiore al 5%.

Class ^a	Range of metabolic rates W	Examples
0 Resting	100 to 125	Resting, sitting at ease
1 Low metabolic rate	125 to 235	Sedentary activity (office, dwelling, school, laboratory: writing, typing, drawing, sewing, book keeping). Standing, light activity (shopping, laboratory, light industry). Hand and arm work (small bench tools, inspection, assembly or sorting of light materials). Light arm and leg work (driving vehicle in normal conditions, operating foot switch or pedal). Machining with low power tools [drilling (small parts), milling (small parts), coil winding, sawing]. Casual walking (2 km·h ⁻¹) on a level, even path, solid with load ≤ 30 kg.
2 Moderate metabolic rate	235 to 360	Sustained hand and arm work (hammering in nails, filing, loading, polishing). Arm and leg work (off-road operation of lorries, tractors or construction equipment). Arm and trunk work (work with pneumatic hammer, tractor assembly, plastering). Weeding, hoeing, picking fruits or vegetables. Pushing or pulling lightweight carts or wheelbarrows. Bricklaying, 5 bricks/min. Intermittent handling of moderately heavy material. Walking (2,5 to 5 km·h ⁻¹) on a level, even path, solid with load ≤ 20 kg. Walking (2,5 to 3 km·h ⁻¹) on levelled but irregular to unstable ground with load ≤ 20 kg. Walking (≤2,5 km·h ⁻¹) on stable ground uphill (≤5 %) with load ≤ 20 kg. Intense arm and trunk work with hand tools or machines. Carrying heavy material, shovelling.
3 High metabolic rate	360 to 465	Sledgehammer work, sawing, planing or chiselling hard wood, hand mowing, digging. Walking (5,5 to 7 km·h ⁻¹) on a level, even path, solid with load ≤ 20 kg. Walking (3,5 to 5 km·h ⁻¹) on levelled but irregular to unstable ground with load ≤ 20 kg. Walking (2,5 to 3 km·h ⁻¹) on stable ground uphill (≤5 %) with load ≤ 10 kg. Pushing or pulling heavily loaded hand carts or wheelbarrows. Chipping castings, concrete block laying.
4 Very high metabolic rate	> 465	Intense activity at fast to maximum pace. Working with an axe; intense shovelling or digging; climbing stairs, ramp or ladder. Walking (>7 km·h ⁻¹) on a level, even path, solid, with or without load. Walking (>5 km·h ⁻¹) on levelled but irregular to unstable ground with or without load. Walking (>3 km·h ⁻¹) on stable ground uphill (≥5 %) with or without load. Running (>6 km·h ⁻¹).

^a The qualitative terms low, moderate and high refer to a whole work shift.

Tabella 1.1: Esempi di attività lavorative, con rispettivo calore metabolico prodotto

1.6 Equazione del bilancio termico per il corpo umano

Come detto in precedenza, il corpo umano, per mantenersi in uno stato di comfort deve mantenere la sua temperatura attorno ai 37°C; ciò implica che il calore generato dal corpo deve essere bilanciato con il calore uscente dallo stesso. Se il calore generato è maggiore di quello uscente la temperatura tenderà ad aumentare e viceversa.

Anche se vi sono diverse equazioni che possono descrivere il bilancio energetico per il corpo umano, tutte queste coinvolgono essenzialmente tre contributi: uno relativo alla generazione del calore da parte del metabolismo umano, uno relativo al trasferimento del calore e uno relativo all'accumulo termico. Nello specifico si può definire una generica equazione concettuale del bilancio termico, seguendo le indicazioni della norma ISO 11079. Risolvendo l'equazione del bilancio termico è inoltre possibile valutare l'IREQ (required clothing insulation), ovvero l'isolamento minimo richiesto dall'abbigliamento per mantenere il corpo all'interno di specifici criteri fisiologici, senza andare incontro a stress termici. L'equazione proposta dalla norma ISO 11079 è la seguente:

$$M - W = E_{res} + C_{res} + E + K + R + C + S$$

(1.6)

I termini a sinistra dell'equazione stanno ad indicare il calore metabolico (M), che fornisce energia al corpo per permettergli di compiere del lavoro meccanico (W) e questi contributi possono essere valutati seguendo le indicazioni della norma ISO 8996 descritta in precedenza. I termini a destra sono la somma del calore scambiato tramite respirazione ($C_{res} + E_{res}$), dello scambio termico che avviene attraverso la pelle ($E + K + R + C$) e del calore accumulato dal corpo (S). Se quest'ultimo termine è positivo significa che il corpo sta aumentando la temperatura e viceversa; mentre se ci si trova in condizione di equilibrio sarà pari a 0. $M - W$ è sempre positivo, mentre gli altri termini sono positivi se il calore viene perso e negativi se il calore viene guadagnato. In generale quindi, in una situazione di equilibrio l'equazione diventerà:

$$M - W - E_{res} - C_{res} - E - K - R - C = 0$$

(1.7)

Di seguito verranno analizzati più nel dettaglio i singoli termini.

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

La produzione di calore all'interno del corpo è legata ai processi metabolici, durante i quali, l'ossigeno giunto al sangue, tramite la respirazione polmonare, viene trasportato alle cellule del corpo dove è utilizzato per scindere composti come zuccheri semplici, amminoacidi e acidi grassi, fornendo energia al corpo umano. A questo contributo va aggiunto quello relativo alla eventuale attività fisica che si sta svolgendo. La stragrande maggioranza di questa energia viene rilasciata sotto forma di calore, andando ad aumentare il contributo di M nell'equazione 1.7. In tabella 1.1 sono riportati alcuni esempi di attività lavorative con il rispettivo calore metabolico prodotto.

1.6.2 Calore disperso sulla pelle (C + R + K + E)

I termini C, R e K dell'equazione 1.7 si riferiscono al calore che viene disperso nell'ambiente attraverso la pelle e dipendono dal contributo di tre parametri, legati ai tre diversi meccanismi di dissipazione del calore: convezione, conduzione ed irraggiamento. La dissipazione di calore tramite conduzione (K) è spesso molto piccola e può essere "inglobata" dalle espressioni relative agli altri due meccanismi. Si hanno quindi due contributi fondamentali che sono:

$$R = f_{cl} \cdot h_r \cdot (t_{cl} - t_r) \quad (1.8)$$

Dove:

- R flusso radiativo di calore [W/m²], ovvero lo scambio di calore radiativo tra la superficie del capo di abbigliamento + la frazione di superficie corporea "nuda" e l'ambiente circostante.

- f_{cl} è la frazione di area coperta dall'abbigliamento

- h_r è il coefficiente di trasferimento del calore tramite convezione [W/(m²°C)]

- t_{cl} è la temperatura superficiale dell'abbigliamento [°C]

- t_r è la temperatura radiante media

Il secondo termine C è dato da:

$$C = f_{cl} \cdot h_c \cdot (t_{cl} - t_a) \quad (1.9)$$

Dove:

- C è il flusso convettivo di calore [W/m²], ovvero lo scambio di calore per convezione tra la superficie del capo di abbigliamento + la frazione di superficie corporea "nuda" e l'ambiente circostante

- h_c è il coefficiente di trasferimento di calore tramite convezione [W/(m²°C)]

- t_a è la temperatura dell'aria [°C]

h_r è, come detto, il coefficiente di trasferimento di calore radiativo e può essere calcolato secondo l'equazione:

$$h_r = \varepsilon_{cl} \cdot \sigma \cdot \frac{(t_{cl} + 273)^4 - (t_r + 273)^4}{t_{cl} - t_r} \quad (1.10)$$

Dove

- ε è l'emissività del vestiario ed è un numero puro compreso tra 0 e 1,

- σ è la costante di Stefan-Boltzmann e vale 5.67×10^{-8} [W/(m²K⁴)]

h_c è invece il coefficiente di trasferimento del calore tramite convezione ed è strettamente legato alla velocità del vento. La formula per ricavarlo è la seguente:

$$h_c = \frac{f_{cl}}{I_{a,r}} - h_r$$

(1 . 11)

Con $I_{a,r}$ pari a:

$$I_{a,r} = 0.092 \cdot e^{(0.15 \cdot v_a - 0.22 \cdot v_w)} - 0.0045$$

(1 . 12)

Dove:

- $I_{a,r}$ è definita la "boundary layer thermal insulation" [m^2C/W]
- v_a è la velocità dell'aria [m/s]
- v_w è la velocità di camminamento [m/s]

Questa equazione empirica è valida per valori di v_a compresi tra 0.4 e 18 m/s e per valori di v_w compresi tra 0 e 1.2 m/s

Infine, il quarto ed ultimo termine (E) è legato al flusso di calore tra la pelle e l'ambiente tramite evaporazione. L'umidità può trasferire il calore tra il corpo e l'ambiente circostante e questo è particolarmente importante quando la pelle suda. L'equazione per il calcolo di E è data da:

$$E = w \frac{(p_{sk,s} - p_a)}{R_{e,T}}$$

(1 . 13)

Dove:

- E è il flusso di calore tramite evaporazione [W/m^2]
- w è il fattore di bagnabilità ed è la frazione di pelle bagnata che partecipa allo scambio termico tramite evaporazione. Esso può variare da 0.6 circa, quando l'evaporazione avviene unicamente tramite processi diffusivi a 1, quando l'evaporazione è massima e la pelle è completamente bagnata.
- $p_{sk,s}$ è la pressione del vapore acqueo saturo sulla superficie della pelle [kPa] e viene calcolata a partire dalla temperatura media della pelle (t_{sk}) tramite l'equazione:

$$p_{sk,s} = e^{\frac{(17.27 \cdot t_{sk})}{(t_{sk} + 23.3)}}$$

(1 . 14)

- p_a è la pressione parziale di vapore acqueo [kPa]
- $R_{e,T}$ è la resistenza totale all'evaporazione data dal contributo dell'abbigliamento e dello strato d'aria superficiale [m^2kPa/W]. Questo termine verrà ulteriormente approfondito nel paragrafo 1.9.

1.6.3 Calore disperso dalla respirazione ($C_{res} + E_{res}$)

Il calore disperso tramite respirazione è dovuto ad un trasferimento convettivo di esso dal corpo umano all'ambiente esterno. Durante la respirazione, infatti l'aria fredda proveniente dall'esterno viene inalata, passa nei polmoni dove è scaldata ed esalata nell'ambiente (C_{res}).

$$C_{res} = \frac{c_p \cdot V(t_{ex} - t_a)}{A_{Du}}$$

(1 . 15)

Dove:

- C_{res} è il flusso di calore convettivo dovuto alla respirazione [W/m^2]
- c_p è il calore specifico dell'aria secca a temperatura costante [$J/(kgK)$]
- V è il rate di respirazione [$kg(aria)/s$]
- t_{ex} è la temperatura dell'aria espirata [$^{\circ}C$], che è correlata alla temperatura inspirata (ambiente) t_a dall'equazione: $t_{ex} = 29 + 0.2 t_a$
- t_a è la temperatura dell'aria [$^{\circ}C$]
- A_{Du} è l'area della superficie del corpo di Dubois [m^2]

Vi è inoltre un secondo contributo dovuto al fatto che l'aria inalata, quando passa nei polmoni, viene "umidificata". Quando è espirata vi è dunque anche un trasferimento di massa dal corpo all'ambiente circostante (E_{res}), dove:

$$E_{res} = \frac{c_e \cdot V(W_{ex} - W_a)}{A_{Du}}$$

(1 . 16)

- E_{res} è il flusso di calore evaporativo dovuto alla respirazione [W/m^2]
- c_e è il calore latente di evaporazione dell'acqua [J/kg]
- W_{ex} è il tasso di umidità dell'aria espirata [$kg(acqua)/kg(aria\ secca)$]
- W_a è il tasso di umidità dell'aria inalata [$kg(acqua)/kg(aria\ secca)$]

1.7 L'IREQ

Una volta descritta in dettaglio l'equazione di bilancio termico è possibile andare a ricavare l'IREQ, che, come già accennato, permette di valutare quale sia il livello minimo di isolamento che viene richiesto all'abbigliamento per mantenere il corpo all'interno di dei limiti fisiologici, evitando di andare incontro a stress di natura termica.

Prima di passare alla formulazione dell'equazione per ricavare l'IREQ è necessario un ulteriore passaggio. Lo scambio termico attraverso l'abbigliamento è un processo che avviene tramite conduzione, convezione, radiazione e tramite l'evaporazione del sudore e può essere espresso come:

$$\frac{t_{sk} - t_{cl}}{I_{cl,r}} = R + C = M - W - E_{res} - C_{res} - E - S \quad (1.17)$$

Dove

- t_{sk} è la temperatura media della pelle [°C]

- t_{cl} è la temperatura della superficie del capo d'abbigliamento [°C]

- $I_{cl,r}$ è definito come la risultante dell'isolamento dell'abbigliamento, corretto tenendo in considerazione l'effetto di permeabilità dell'aria dello strato esterno dell'indumento [m^2C/W]

Sulla base delle equazioni discusse in precedenza, in regime stazionario ($S = 0$) e utilizzando l'ipotesi fatta riguardo al flusso di calore per conduzione (il termine K che viene inglobato all'interno dei termini $C + R$ poiché molto piccolo), l'isolamento richiesto per gli indumenti IREQ viene calcolato sulla base dell'equazione:

$$IREQ = \frac{t_{sk} - t_{cl}}{R + C} \quad (1.18)$$

Andando ad inserire questa equazione nell'equazione generale del bilancio termico ed andando a risolverla per t_{cl} si avrà:

$$t_{cl} = t_{sk} - IREQ \cdot (M - W - E_{res} - C_{res} - E) \quad (1.19)$$

L'equazione così scritta presenta due variabili non note: IREQ e t_{cl} , mentre i termini R e C sono funzioni di t_{cl} . È possibile quindi risolvere questa equazione tramite iterazione.

L'IREQ è una misura dello stress termico dovuto all'effetto combinato della produzione di calore interna del corpo e dello scambio termico che esso ha con l'ambiente. Maggiore sarà la capacità dell'ambiente di raffreddare il corpo, anche in base al tipo di attività che si sta svolgendo, maggiore sarà il valore di IREQ richiesto. L'IREQ è definito secondo due livelli:

- $IREQ_{min}$ definito come l'isolamento termico minimo necessario per mantenere l'equilibrio termico del corpo ad un livello subnormale della temperatura corporea media. Questo livello di isolamento porta ad un certo grado di raffreddamento, in particolare per le parti periferiche del corpo, che, come detto in precedenza, tendo a raffreddarsi più velocemente. Con esposizioni prolungate in queste condizioni il raffreddamento delle estremità può diventare un fattore limitante per la durata dell'esposizione.
- $IREQ_{neutral}$ è definito come l'isolamento termico necessario per garantire condizioni di neutralità termica, ovvero equilibrio termico mantenuto ad un livello normale di temperatura corporea media. Questo livello di isolamento non porta a nessun raffreddamento minimo del corpo umano.

L'IREQ fornisce quindi dei limiti che devono essere rispettati dal sistema di abbigliamento se si vuole evitare di andare incontro a problemi di natura termica. Per progettare un efficiente sistema di isolamento è quindi necessario confrontare i valori ottenuti di IREQ con quelli relativi all'abbigliamento.

Il più utilizzato valore di isolamento termico per quanto riguarda i capi di abbigliamento è I_{cl} o $I_{cl,r}$. Il primo si riferisce ad una proprietà intrinseca del materiale ed è una misura statica dell'isolamento termico. In Tabella 1.2 sono presentati una serie di valori tipici in base a diversi capi di abbigliamento.

Il secondo è l'isolamento termico corretto tenendo in considerazione la permeabilità del vento e fornisce informazioni su quello che è l'isolamento in condizioni reali e non statiche del capo di abbigliamento. Entrambi possono essere valutati tramite una serie di test, come il thermal manikin test (ISO 15831), che verrà descritto successivamente. Affinché un indumento sia effettivamente

Clothing ensemble	I_{cl}	
	$m^2 \cdot K \cdot W^{-1}$	clo
1. Briefs, short-sleeve shirt, fitted trousers, calf length socks, shoes	0,08	0,5
2. Underpants, shirt, fitted trousers, socks, shoes	0,10	0,6
3. Underpants, coverall, socks, shoes	0,11	0,7
4. Underpants, shirt, coverall, socks, shoes	0,13	0,8
5. Underpants, shirt, trousers, smock, socks, shoes	0,14	0,9
6. Briefs, undershirt, underpants, shirt, overalls, calf length socks, shoes	0,16	1,0
7. Underpants, undershirt, shirt, trousers, jacket, vest, socks, shoes	0,17	1,1
8. Underpants, shirt, trousers, jacket, coverall, socks, shoes	0,19	1,3
9. Undershirt, underpants, insulated trousers, insulated jacket, socks, shoes	0,22	1,4
10. Briefs, T-shirt, shirt, fitted trousers, insulated coveralls, calf length socks, shoes	0,23	1,5
11. Underpants, undershirt, shirt, trousers, jacket, overjacket, hat, gloves, socks, shoes	0,25	1,6
12. Underpants, undershirt, shirt, trousers, jacket, overjacket, overtrousers, socks, shoes	0,29	1,9
13. Underpants, undershirt, shirt, trousers, jacket, overjacket, overtrousers, socks, shoes, hat, gloves	0,31	2,0
14. Undershirt, underpants, insulated trousers, insulated jacket, overtrousers, overjacket, socks, shoes	0,34	2,2
15. Undershirt, underpants, insulated trousers, insulated jacket, overtrousers, overjacket, socks, shoes, hat, gloves	0,40	2,6
16. Arctic clothing systems	0,46 to 0,70	3 to 4,5
17. Sleeping bags	0,46 to 1,4	3 to 9

Tabella 1.2: Valori di I_{cl} di alcuni comuni capi di abbigliamento

sufficientemente isolante da evitare di incorrere in problemi relativi allo stress termico è indispensabile confrontare $I_{cl,r}$ con i livelli di IREQ precedentemente descritti. Tre sono i possibili casi:

- $I_{cl,r} > IREQ_{neutral}$
In questo caso l'abbigliamento selezionato garantisce un isolamento più che sufficiente. Troppo isolamento aumenta il rischio di surriscaldamento, sudorazione eccessiva e assorbimento di umidità da parte degli indumenti. In questo caso l'isolamento dell'abbigliamento dovrà essere ridotto
- $IREQ_{min} \leq I_{cl,r} \leq IREQ_{neutral}$
L'abbigliamento selezionato garantisce un adeguato isolamento termico. Al variare del livello di sforzo, che può sia aumentare che diminuire, le condizioni termiche sono percepite da "leggermente fredde" a "neutre" da parte del corpo.
- $I_{cl,r} < IREQ_{min}$
L'abbigliamento selezionato non fornisce un adeguato isolamento per evitare il raffreddamento del corpo, con rischio crescente di ipotermia in caso di esposizione prolungata. Le soluzioni possono essere aumentare l'isolamento degli indumenti (variando la tipologia di indumento o inserendo uno strato aggiuntivo) o limitare il tempo di esposizione (D_{lim}).

Nella terza casistica ($I_{cl,r} < IREQ_{min}$) è richiesto inoltre di calcolare il tempo limite per l'esposizione (D_{lim}). Esistono in questo caso due livelli di "stati termici" che sono definiti come:

- Low physiological strain: caratterizzato da uno stato termico neutro del corpo. In tali condizioni una persona non desidera né sentirsi più calda né sentirsi più fredda.
- High physiological strain: caratterizzato da vasocostrizione periferica e assenza di sudorazione regolatoria e corrispondente ad una sensazione termica di "freddo". In questo caso l'equilibrio termico viene mantenuto solo grazie alla vasocostrizione della pelle e delle estremità. Si verifica questa condizione quando il bilancio termico non può essere mantenuto al livello del Low physiological strain e corrisponde ad un "debito termico" di circa 140 kJ/m^2 , rispetto al caso precedente. Questa sensazione di freddo è tollerata (anche se non risulta confortevole) per esposizioni prolungate.

A seconda quindi che ci si trovi nell'uno o nell'altro caso, anche D_{lim} può assumere due valori:

- In condizioni di Low physiological strain, D_{lim} è calcolato come il tempo necessario per perdere 144 kJ/m^2 di calore corporeo.

General cooling	"High strain"	"Low strain"
IREQ	Minimal	Neutral
t_{sk} (°C)	$t_{sk} = 33,34 - 0,035 \cdot 4 \cdot M$	$t_{sk} = 35,7 - 0,028 \cdot 5 \cdot M$
w (dimensionless)	0,06	$w = 0,001 \cdot M$
D_{lim}	Long	Short
Q_{lim} ($\text{kJ} \cdot \text{m}^{-2}$)	144	144
Local cooling	"High strain"	"Low strain"
Wind chill temperature, t_{wc}	-30	-15
Finger temperature (°C)	15	24
Respiratory tract:		
Low activity ($M \leq 115 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$)	$t_a = -40$	$t_a = -20$
High activity ($M > 115 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$)	$t_a = -30$	$t_a = -15$

Tabella 1.3: criteri fisiologici suggeriti per il calcolo di IREQ e D_{lim}

- In condizioni High physiological strain, D_{lim} è invece calcolato sulla base della differenza tra $I_{cl,r}$ e $IREQ_{min}$. Le condizioni di partenza prevedono che il corpo sia già leggermente raffreddato e di conseguenza anche la temperatura della pelle.

In Tabella 1.3 sono riportati i criteri fisiologici suggeriti per il calcolo di IREQ e D_{lim} per entrambe le condizioni.

Infine, in Figura 1.4 vengono riportate le curve relative a D_{lim} al variare di $I_{cl,r}$ e della temperatura (t_o). X corrisponde a D_{lim} , mentre Y rappresenta la temperatura operativa t_o in °C. La velocità dell'aria è pari a 0.4 m/s e la permeabilità dell'aria dell'abbigliamento a 8 [1/m²s]

Le curve a, b, c, d, e, f, g corrispondono a valori di $I_{cl,r}$ rispettivamente di 0.5, 1, 1.5, 2, 2.5, 3 e 3.5 clo.

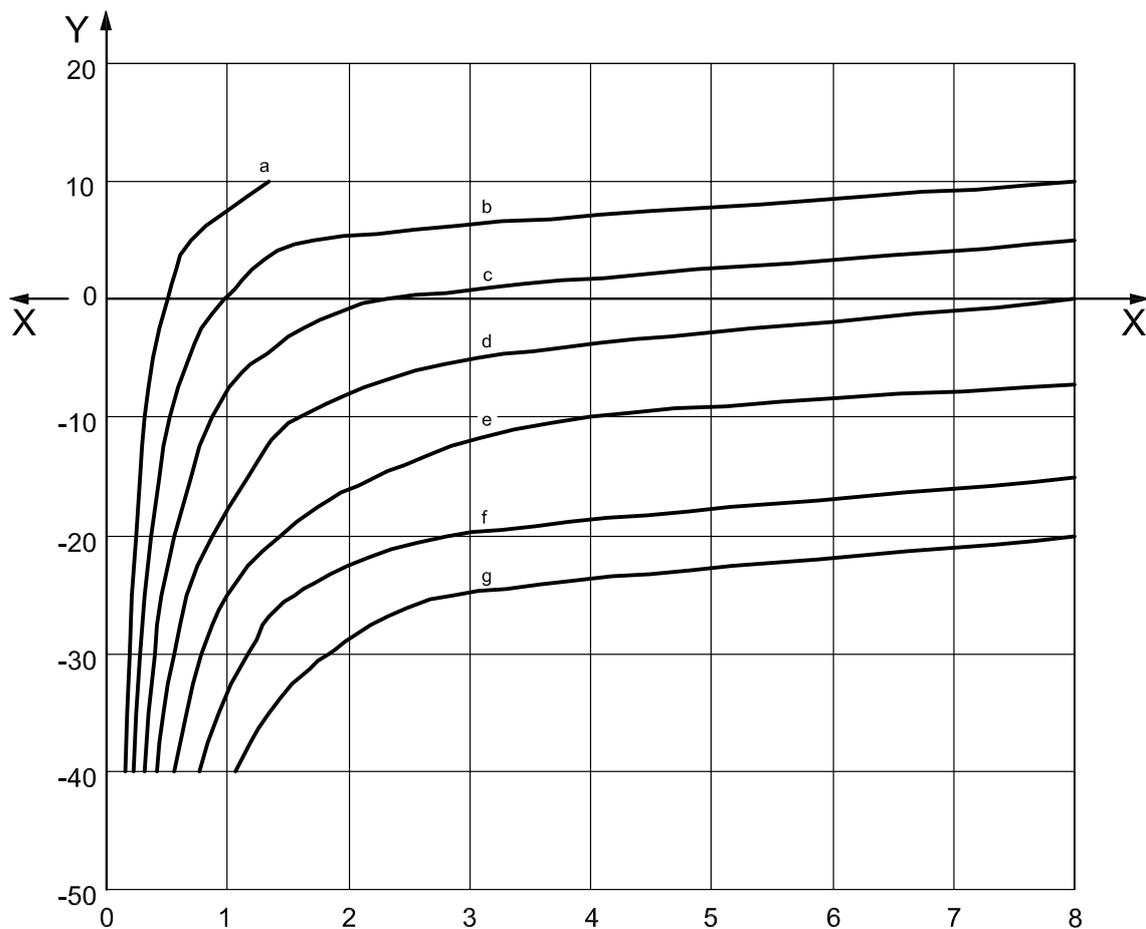


Figura 1.4: curve relative a D_{lim} al variare di $I_{cl,r}$ e della temperatura (t_o)

1.8 Calcolo di $I_{cl,r}$

Per ricavare l'isolamento di un capo di abbigliamento o di un insieme di indumenti è possibile ricorrere ad un test chiamato Thermal manikin test descritto in maniera dettagliata nella norma ISO 15831. Il test prevede l'utilizzo di un manichino termico, costituito da vari segmenti (Figura 1.5), di altezza pari a (1.70 ± 0.15) m e area di (1.7 ± 0.3) m² la cui superficie viene mantenuta ad una temperatura costante di (34.0 ± 0.2) °C. Ciascun segmento è dotato di propri sensori per misurare la temperatura e resistenze

per generare una certa potenza termica. Il manichino viene inserito all'interno di una camera climatica di dimensioni minime 2 m x 2 m x 2 m (lunghezza x altezza x profondità) con un flusso d'aria, che può essere sia orizzontale che verticale, di velocità (0.4 ± 0.1) m/s e ad una temperatura che deve essere come minimo di 12°C inferiore a quella della superficie del manichino e/o ad un valore che assicuri un flusso termico minimo di 20W/m² per ciascun segmento di cui è costituito il manichino. L'umidità relativa in camera deve essere settata in un intervallo compreso tra 30% e 70%; preferibilmente 50%. Infine, è necessario che tutti gli indumenti che si andranno a testare siano condizionati per un minimo di 12 ore all'interno della camera a (20 ± 5) °C e a (50 ± 20) % di umidità relativa. A questo punto è possibile posizionare tutti i capi d'abbigliamento sopra al manichino.

Prima di iniziare il test è necessario raggiungere lo stato stazionario. Questo si verifica quando la temperatura superficiale del manichino e l'input di potenza termica di ciascun segmento di cui è costituito rimangono costanti per almeno 10 minuti con una deviazione massima rispettivamente di ± 0.2 °C e $\pm 2\%$.

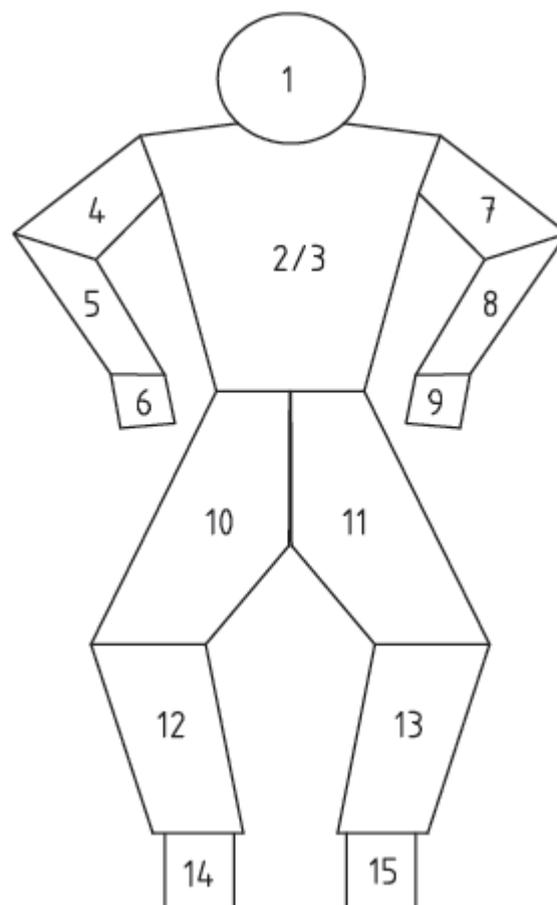


Figura 1.5: Rappresentazione schematica del manichino, con i vari segmenti

Tramite questo test è possibile ricavare due valori di isolamento che sono I_t , che fornisce l'isolamento termico totale dell'insieme del vestiario in condizioni stazionarie e/o I_{tr} , ovvero l'isolamento termico totale dell'insieme del vestiario con il manichino in movimento; entrambi sono espressi in m²C/W. Esso è infatti dotato di un motore in grado di permettere la movimentazione. In caso di calcolo in condizioni non stazionarie il manichino dovrà compiere (45 ± 2) doppi passi al minuto e (45 ± 2) movimenti doppi delle braccia al minuto.

Una volta eseguite tutte le operazioni preliminari è possibile iniziare il test. L'isolamento termico dell'insieme del vestiario può essere calcolato o sommando l'isolamento termico di ciascun segmento moltiplicato per l'area effettiva occupata da ciascuno di essi (modello in serie) o andando a calcolare il flusso di calore totale che esce dal manichino (modello in parallelo).

Nel primo caso (modello in serie) la formula utilizzata per il calcolo di I_t o I_{tr} è:

$$I_t \text{ o } I_{tr} = \sum_i f_i \cdot \left[\frac{(T_{si} - T_a) \cdot a_i}{H_{ci}} \right] \quad (1.20)$$

Dove:

- T_{si} è la temperatura superficiale del segmento i del manichino [°C]
- T_a è la temperatura dell'aria all'interno della camera climatica [°C]
- H_{ci} è la potenza termica fornita al segmento i del manichino [W]
- a_i è l'area superficiale corrispondente del segmento i -esimo del manichino [m²]
- f_i è la frazione sull'area totale della superficie del segmento i e può essere calcolata come: $f_i = a_i/A$, con A corrispondente all'area totale del manichino.

Nel secondo caso (modello in parallelo), la formula utilizzata per il calcolo di I_t o I_{tr} è:

$$I_t \text{ o } I_{tr} = \frac{(T_s - T_a) \cdot A}{H_c} \quad (1.21)$$

Dove:

- T_s è la temperatura media della superficie del manichino [°C]
- H_c è la potenza termica totale fornita al manichino [W]

Mentre le altre grandezze sono state discusse precedentemente.

La temperatura media superficiale (T_s) viene calcolata come:

$$T_s = \sum_i f_i \cdot T_{si} \quad (1.22)$$

Mentre la potenza termica totale (H_c) come:

$$H_c = \sum_i H_{ci} \quad (1.23)$$

Per arrivare ad estrapolare il valore di $I_{cl,r}$ è necessario un ulteriore passaggio, poiché bisogna tenere in considerazione il ruolo che gioca l'isolamento termico dell'aria. Se l'ambiente, infatti, avesse una perfetta conducibilità termica, la superficie dei capi d'abbigliamento crollerebbe immediatamente alla temperatura dell'ambiente circostante, cosa che non avviene: l'ambiente, infatti, fornisce una significativa resistenza termica. La conseguenza è che non conviene più considerare la resistenza del capo di abbigliamento da sola, ma aggiungendo anche il contributo dello strato d'aria superficiale (Figura 1.6).

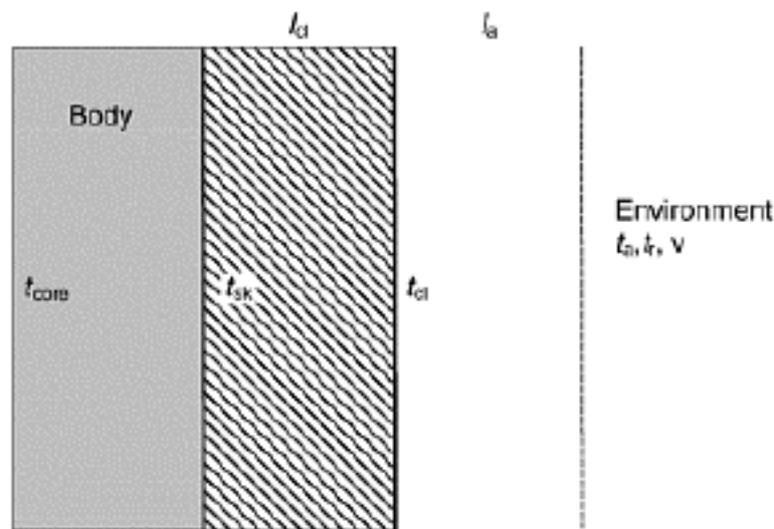


Figura 1.6: Esempio schematico del comportamento termico di abbigliamento e strato d'aria

Per calcolare questo contributo è possibile ripetere il test appena eseguito, ma lasciando il manichino tal quale nella camera climatica, senza l'aggiunta del vestiario. Anche in questo caso due valori possono essere calcolati e sono I_a , ossia l'isolamento termico dell'aria in condizioni stazionarie e I_{ar} , ossia l'isolamento termico dell'aria in condizioni dinamiche. Di nuovo, è possibile eseguire le misure in serie o in parallelo.

Nel primo caso (modello in serie) l'equazione sarà del tutto analoga a quella vista in precedenza (1.20):

$$I_a \text{ o } I_{ar} = \sum_i f_i \cdot \left[\frac{(T_{si} - T_a) \cdot a_i}{H_{ci}} \right] \quad (1.24)$$

E analogamente per il secondo caso (modello in parallelo):

$$I_a \text{ o } I_{ar} = \frac{(T_s - T_a) \cdot A}{H_c} \quad (1.25)$$

Infine è possibile ricavare $I_{cl,r}$ come:

$$I_{cl,r} = I_{tr} - \frac{I_{ar}}{f_{cl}}$$

(1 . 26)

Dove f_{cl} è definito "clothing area factor" ed è un numero puro. L'inserimento di questo parametro è dovuto al fatto che l'area superficiale del manichino vestito (A_{cl}) è maggiore della superficie del manichino nudo (A), di conseguenza il termine relativo all'isolamento dato dallo strato d'aria superficiale deve essere corretto poiché altrimenti risulterebbe sovrastimato. f_{cl} viene calcolato come:

$$f_{cl} = \frac{A_{cl}}{A}$$

(1 . 27)

Il termine f_{cl} può essere misurato tramite metodi fotografici. Tramite acquisizione di foto è infatti possibile comparare le immagini dell'area proiettata del manichino nudo, con le immagini dell'area proiettata dal manichino vestito e ricavarne così i due valori.

1.9 Calcolo di $R_{e,t}$

Dall'equazione 1.13 si è evidenziato come il termine E , relativo allo scambio di calore che avviene attraverso l'evaporazione dei liquidi presenti sulla pelle, è inversamente proporzionale alla resistenza totale all'evaporazione data dal contributo dell'abbigliamento e dello strato d'aria superficiale. Per il calcolo di questo parametro è possibile affidarsi alla norma ISO 9920, che fornisce un'equazione, che permette di correlare $R_{e,t}$ con la resistenza termica "a secco", ovvero senza considerare il contributo evaporativo.

$$R_{e,t} = \frac{0.06}{i_m} \cdot \left(\frac{I_a}{f_{cl}} + I_{cl} \right)$$

(1 . 28)

Dove:

- i_m è definito come l'indice di permeabilità statica e può essere ricavato da valori tabulati. In Tabella 1.4 sono riportati degli esempi di valori tipici.

Le altre variabili sono state già discusse in precedenza.

	Clothing description	Estimated static i_m	
		< 15 °C	> 30 °C
1	Nude	0,5	
2	Normal, permeable clothing, regardless of number of layers	0,38	
3	As 2, with tightly woven jacket	0,34	
4	As 2, with aluminized coat or trousers	0,31	
5	As 2, with two piece semi-permeable overgarment	0,17	0,15
6	As 2, with one piece semi-permeable overgarment	0,14	0,13
7	As 2, with two piece impermeable overgarment	0,12	0,07
8	As 2, with one piece impermeable overgarment	0,1	0,06
9	As 2, with one piece impermeable overgarment, covered head except face, gloves, openings sealed (e.g. immersion suit)	0,06	0,02
10	Completely encapsulating suit, all openings sealed, no skin exposed	0,05	0,0

The difference between the two temperatures is related to the occurrence of condensation at or close to the outer clothing surface, which will increase evaporative heat loss from the skin despite low or no permeability of the outer layers. Intermediate values may be interpolated as:
 $i_m = (\alpha \times i_{m,15} + (1 - \alpha) \times i_{m,30})$ with $\alpha = [(30 - \text{air temperature})/15]$ (from Reference [13]).

Tabella 1.4: Valori tipici di i_m per alcuni capi di abbigliamento

2.

Lo scarpone Phantom Tech

Il Phantom Tech è uno scarpone prodotto da SCARPA ed è studiato per l'alpinismo in quota, escursioni su ghiaccio e arrampicata su cascate. (SCARPA, Phantom Tech, <https://it.scarpa.com/product/20049852/phantom-tech-hd-linea-phantom-alpinismo-invernale-black-bright-orange>). Si è deciso di concentrarsi nello specifico su questa tipologia di scarpone, poiché nei capitoli successivi su di esso verranno eseguiti diversi test ed è quindi interessante approfondire la struttura interna e i materiali di cui è costituito lo scarpone.

Lo scarpone Phantom Tech è un sistema complesso, costituito da un gran numero di materiali, sovrapposti l'uno all'altro. Possiamo suddividere lo scarpone sostanzialmente in quattro zone: lo scafo, che costituisce la parte più interna dello scarpone, quella a diretto contatto con il piede, che ha il compito principale di isolare e permettere la traspirazione; la ghetta, che costituisce la parte esterna



Figura 2.1: Phantom Tech

dello scarpone, costituita da membrane idrorepellenti che forniscono per lo più una barriera contro neve, acqua, fango e vento; infine la zeppa e il battistrada che hanno il compito di isolare termicamente lo scarpone dal suolo e di fornire adesione al terreno. Prima di passare a descrivere più nel dettaglio ciascuna zona, cerchiamo di capire quali sono le principali caratteristiche che deve avere uno scarpone da montagna.

2.1 La “regola dei tre layers”

Quando si progetta un capo di abbigliamento adatto per l'alpinismo bisogna tenere in considerazione che in montagna l'alpinista può trovarsi ad avere a che fare con una grande varietà climatica oltre che ad una serie di attività; dalla semplice passeggiata in quota all'arrampicata su ghiaccio. Tuttavia, anche se gli scopi e le attività possono essere molto diversi gli uni dagli altri, generalmente un capo di abbigliamento sportivo per climi freddi deve possedere le seguenti caratteristiche: essere resistente all'acqua, permettere una corretta traspirazione e possedere buone proprietà isolanti.

È impossibile avere tutte queste caratteristiche utilizzando un unico materiale; quindi, per raggiungere questi risultati è una pratica comune utilizzare una sistema a tre strati chiamati: *Base layer*, *mid layer* e *outer-shell layer*. Ciascuno di essi è studiato per adempiere ad un determinato compito (Shishoo, 2015).

2.1.1 Base layer

Il Base layer rappresenta il primo strato, a diretto contatto con il piede ed ha due compiti principali: essere il più possibile “skin-friendly” e permettere una rimozione efficace dell'umidità, disperdendo rapidamente il sudore per prevenire il raffreddamento e favorendo un'evaporazione efficiente verso la superficie esterna. I materiali bagnati hanno un coefficiente di attrito più elevato e una correlazione negativa con il comfort, di conseguenza entrambi i parametri sono fortemente influenzati dalla presenza di umidità. I materiali utilizzati nella produzione dei tessuti dello strato di base devono quindi facilitare il movimento dell'umidità.

Vi sono diverse tipologie di materiali che possono essere impiegati per il Base layer, ma le più utilizzate sono le fibre di poliestere. Esse vengono classificate come fibre idrofobiche e sfruttano l'azione capillare, che porta ad un flusso di umidità da una zona ad alta concentrazione ad una zona a bassa concentrazione. Grazie alla loro struttura chimica, permettono all'acqua di essere espulsa dalla superficie delle fibre evitandone l'assorbimento e portando il tessuto ad asciugarsi velocemente.

2.1.2 Mid layer

Lo scopo principale del Mid layer è quello di fornire l'isolamento allo scarpone. È stato osservato come sia la conduzione il principale meccanismo di trasferimento del calore attraverso gli strati di un tessuto,

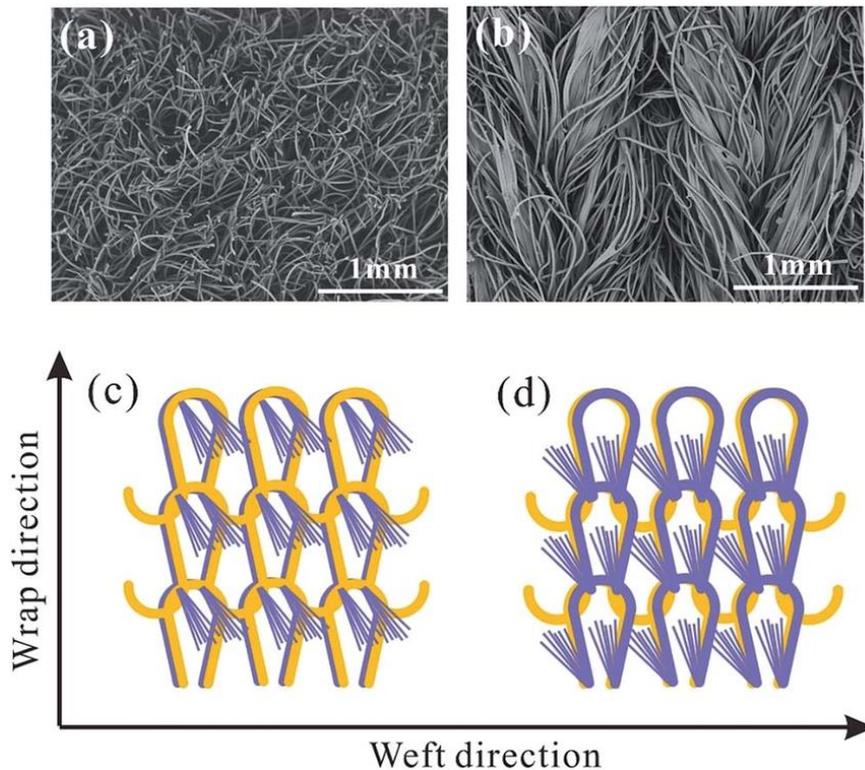


Figura 2.2: a), b) struttura del pile fotografata al SEM, c), d) diagramma del tessuto pile

per questo motivo il Mid layer è spesso costituita da materiali che siano in grado di intrappolare efficacemente l'aria, dato che essa ha una bassissima conducibilità termica (0.026 W/mK).

Anche in questo caso il poliestere, e più nello specifico il *pile*, si conferma essere il materiale maggiormente utilizzato per questo layer. Con pile ci si riferisce ad una tipologia di materiale costituito generalmente da fibre di poliestere, che, a seguito di una particolare lavorazione vengono tagliate a formare la struttura presente in Figura 2.2 (Fu et al, 2015). Questa struttura permette all'aria di rimanere intrappolata tra le fibre, portando ad un ottimo livello di isolamento termico. La conducibilità termica di questo materiale è infatti molto bassa, con valori di circa 0.03-0.04 W/mK, molto vicini a quelli dell'aria. Si tratta inoltre di fibre idrofobiche e quindi in grado di permettere il passaggio dell'umidità, proveniente dal Base layer.

2.1.3 Outer-Shell layer

L'Outer-Shell layer rappresenta lo strato più esterno ed ha il compito di proteggere il mid e il base layer dall'ingresso di acqua e vento. Tuttavia, in caso di periodi di elevato dispendio energetico esso può rappresentare una barriera all'evaporazione del sudore, pertanto il tessuto deve essere traspirante per permettere al vapore acqueo di diffondersi nell'ambiente esterno.

La capacità di essere impermeabile e allo stesso tempo traspirante è possibile in due modi: o grazie alla presenza di una struttura microporosa, nella quale le dimensioni dei pori sono tali da permettere il passaggio delle singole molecole o cluster di vapore acqueo, ma non delle gocce d'acqua, le cui dimensioni sono notevolmente maggiori; oppure tramite particolari membrane idrofiliche, il cui meccanismo è mostrato schematicamente in Figura 2.3.

Queste strutture non porose sono costituite da catene polimeriche semicristalline con presenza di gruppi funzionali polari come -OH o -NH₂. Nelle zone amorfe le molecole di vapore acqueo formano dei legami deboli con questi gruppi funzionali, rimanendo legati ad essi fino a che non vengono sostituite con altre molecole d'acqua restando così possibile il passaggio delle singole molecole di acqua dall'interno all'esterno. La driving force del sistema è data dalla differenza di pressione tra i due lati della membrana (J. McLoughlin, T. Sabir, 2017).

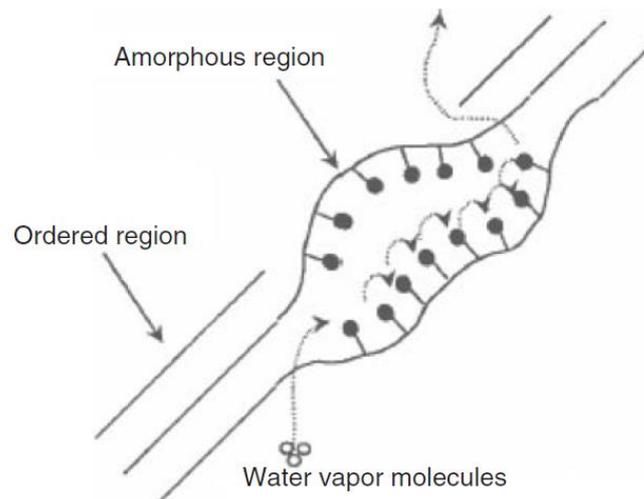


Figura 2.3: meccanismo di trasporto delle membrane idrofiliche

2.2 Lo scafo

Ritorniamo adesso allo studio del Phantom Tech, tenendo in considerazione che uno scarpone da montagna deve avere tre caratteristiche principali: essere traspirante, isolante e impermeabile.

Lo scafo costituisce la zona più interna dello scarpone, a diretto contatto con il piede; esso deve permettere un certo grado di comfort, un buon isolamento termico e una buona traspirabilità. Il corpo centrale dello scafo è costituito principalmente da PrimaLoft, un'imbottitura in microfibra di poliestere (L. Paul, 2003) con una grammatura di 100 g/m² su tutto lo scafo e una di 200 g/m² sulla parte anteriore, per permettere un maggior isolamento della zona maggiormente sensibile al freddo (la punta dello scarpone). Per microfibra si intende una tecnofibra con un titolo pari o inferiore ad un dtex (deci-tex) (UNI 10714 – 1999). Il tex è l'unità di misura per la densità lineare e indica quanti metri di una determinata fibra sono presenti in un grammo di peso:

$$1 \text{ Tex} = 1 \frac{\text{g}}{\text{km}}$$

(2.1)

Viene utilizzato nell'industria tessile per la titolazione delle fibre, anche se più comunemente si utilizza il dtex. In questo caso, dunque, un decimo di grammo è in grado di "contenere" più un kilometro di filo o, in alternativa, un grammo è in grado di contenerne più di 10 chilometri. Ovviamente minore è questo

numero, maggiore saranno i metri del materiale contenuto a parità di peso, ne consegue un diametro minore della fibra. È possibile correlare la misura del Tex al diametro della fibra (\varnothing) tramite la formula:

$$\varnothing = \sqrt{\frac{4 \times 10^{-7} dtex}{\pi\rho}}$$

(2 . 2)

La microfibra è un tessuto morbido con una grande capacità di assorbimento dell'acqua. Questo è possibile grazie all'effetto capillare, un fenomeno che permette all'acqua di scorrere in direzione opposta rispetto alla gravità grazie alla presenza di canali presenti tra le fibre. La grande densità lineare blocca inoltre le molecole d'acqua impedendo loro di uscire, rendendo così la microfibra in grado di trattenere in acqua fino ad otto volte il suo peso (Department of Environmental and Occupational Health Sciences, University of Washington, 2011).

Per quanto riguarda la linguetta, essa è costituita principalmente in micropile. Come visto in precedenza si tratta di un tessuto sintetico costituito da fibre in poliestere che conferisce a questa zona un eccellente isolamento termico grazie alla sua capacità di intrappolare aria al suo interno.

Nella parte superiore dello scafo è inoltre presente una rete con una struttura a cellette aperte a forma esagonale (nido d'ape) in grado di permettere una più facile diffusione del vapore acqueo nell'ambiente esterno.

2.3 La ghetta

La ghetta è la parte più esterna dello scarpone ed ha il compito principale di impedire a neve, acqua, fango e vento di entrare a contatto con lo scafo. Normalmente le ghette sono degli accessori a parte, che vengono applicati esternamente, tramite l'ausilio di elastici e/o cinghie, andando a coprire la parte sommitale dello scarpone. Nel caso del Phantom Tech, invece, come si può osservare in Figura 2.1, la ghetta viene cucita direttamente sullo scafo permettendo così una protezione migliore ed evitando che elementi come neve e fango possano entrare a diretto contatto con la parte più interna dello scarpone.

La ghetta del Phantom Tech è realizzata con tessuti idrorepellenti con membrana H-Dry® che forniscono allo scarpone un ottimo livello di impermeabilità e un tessuto in Poliuretano e poliestere (PuTek) con ottime proprietà di resistenza all'abrasione e tenacità.

Putek technology è una tecnologia tessile utilizzata per produrre un tessuto ad elevatissime proprietà di tenacità e resistenza all'abrasione, che viene normalmente utilizzato per la realizzazione di scarpe o guanti antinfortunistici. È costituito da un'anima in poliestere ad alta tenacità, rivestita con poliuretano; la combinazione si traduce in filati estremamente resistenti alla trazione e all'abrasione. In Figura 2.4 sono riportati i risultati del test di resistenza all'abrasione per guanti da lavoro, secondo la norma EN 388, svolti presso il CIMAC (Centro Italiano Materiali di Applicazione Calzaturiera). Il Putek viene messo a confronto con il Cordura 1000, il tessuto considerato tra i più resistenti nella produzione di scarpe antinfortunistiche. Il risultato è che il Putek riesce a sopportare fino a otto volte il numero di cicli rispetto alla controparte (Pu tek technology - https://www.lenziegisto.it/wp-content/uploads/2022/07/pieghevole-putek-WEB-19042021_c.pdf).



Figura 2.4: EN 388 prova di resistenza all'abrasione con carta vetrata

L'H-Dry è invece una tecnologia brevettata per l'impermeabilizzazione di prodotti outdoor mediante laminazione diretta di una membrana impermeabile traspirante. La particolarità dell'H-Dry non è tanto quella della membrana di per sé, quanto della tecnologia utilizzata per il suo assemblamento. La laminazione diretta della membrana all'interno della ghetta, infatti, evita che si possa creare uno spazio vuoto tra le due componenti col rischio tutt'altro che remoto di un ristagno d'acqua. La presenza di acqua può portare poi a tutta una serie di inconvenienti come crescita batterica e cattivi odori associati o, in caso di contatto diretto con il piede, una perdita dell'efficienza di isolamento (Dry – H-Dry Technology - <https://www.hdry.com/en>).

2.4 Zeppa e battistrada

La zeppa ed il battistrada costituiscono la parte inferiore della calzatura ed insieme hanno il compito sia di isolare il piede dal terreno, sia di permettere all'alpinista una buona adesione, evitando lo slipping e fornendo un'adeguata distribuzione del peso a terra. Il battistrada inoltre deve assicurare una certa stabilità e durabilità essendo la zona maggiormente soggetta a stress di varia natura a causa del contatto diretto con il terreno.

Per quanto riguarda i materiali impiegati per la realizzazione della zeppa si tratta di due tipologie di poliuretano: il TPU ed il PU a bassa densità; mentre il battistrada è costituito da una gomma sintetica prodotta da Vibram col nome di DURASTEP.

Per poliuretano (PU) si intende una famiglia di polimeri la cui catena polimerica è costituita da gruppi uretanici che si ottengono tramite reazione chimica tra di-isocianati e polioli. La lunghezza delle catene polimeriche influenza il comportamento meccanico del materiale: maggiore è la loro lunghezza, più le caratteristiche risulteranno simili a quelle della gomma.

Nel caso della zeppa si utilizzano due tipologie di PU:

- Il PU termoplastico o TPU, costituito da una catena polimerica lineare a blocchi formata da segmenti lunghi a bassa polarità alternati con segmenti più corti ad alta polarità. La spiccata polarità dei gruppi uretanici presenti in catena genera una forte attrazione tra le catene che tende a farle aggregare con la formazione di strutture rigide cristalline o semicristalline, disperse in una matrice amorfa più soffice. Le parti più ordinate e rigide agiscono come una sorta di *cross-link* fisico permettendo al TPU di raggiungere un elevato livello di elasticità, mentre le catene flessibili conferiscono al polimero le caratteristiche di allungamento. Questi “pseudo-cross-links” scompaiono quando il polimero viene scaldato, facendo così ricadere il TPU nella categoria dei termoplastici e permettendo di produrre manufatti utilizzando i classici processi industriali.

Il TPU è uno dei compound con maggiore resistenza agli oli e all'abrasione ed è impermeabile all'acqua e al gas. L'ottima elasticità e l'eccezionale rapporto di allungamento garantiscono durezza e resistenza alla lacerazione (Lubizol, Engineered Polymers (TPU), <https://www.lubrizol.com/Engineered-Polymers/About/What-is-TPU>).

- Il PU a bassa densità è costituito da un polimero termoindurente nel quale viene addizionato un espandente che forma bolle di gas durante il processo di sintesi ed è quindi in grado di formare una struttura schiumosa reticolata. Questa tipologia di polimero conferisce alla suola un serie di proprietà che sono tipiche degli espansi, come una buona resistenza all'impatto e un ottimo isolamento termico. La bassa densità del manufatto inoltre permette di ridurre il peso complessivo dello scarpone.

Infine, per quanto riguarda il battistrada esso è costituito da una miscela dal nome VIBRAM DURASTEP, un marchio registrato dell'azienda Vibram. Si tratta di una gomma vulcanizzata che è stata ottimizzata per attività quali alpinismo e trekking (Vibram, Vibram Solesystem, https://www.vibram.com/it/tecnologia/outdoor/TECH_durastep.html).

3.

Procedure e setup sperimentale

Lo scopo di questa tesi è quello di valutare l'isolamento termico di alcuni scarponi per l'alpinismo. Sebbene esista una norma per la determinazione dell'isolamento contro il freddo (ISO 20344, 2021) essa è stata studiata per la valutazione della protezione in ambienti di lavoro. Si è deciso quindi di agire basandosi parzialmente sulle direttive della stessa, andandola a modificare e ad approfondire. Di seguito viene descritta la norma e successivamente la procedura che è stata eseguita in questo lavoro di tesi.

3.1 Norma ISO 20344

Per effettuare il test la norma prevede un certo equipaggiamento:

- Una camera climatica, la cui temperatura interna deve essere mantenuta a $(-17 \pm 2) ^\circ\text{C}$
- Un mezzo di trasferimento del calore, costituito da una serie di sferette di acciaio inossidabile di 5 mm di diametro per una massa totale di (4 ± 0.1) Kg. Le sferette devono essere conformi con la norma ISO 3290-1:2014.
- Una sonda per la misurazione della temperatura, che abbia un'accuratezza di $\pm 0.5 ^\circ\text{C}$ saldata su un disco di rame di spessore (2 ± 0.1) mm e un diametro di (15 ± 1) mm
- Un misuratore di temperatura idoneo all'utilizzo con la sonda di temperatura

3.1.1 Condizionamento prima e durante il test

Tutte le componenti devono essere condizionate in condizioni standard di $(23 \pm 2) ^\circ\text{C}$ ed un'umidità di $(50 \pm 5) \% \text{RH}$ per un minimo di 24 ore prima di effettuare il test. Il tempo massimo che può trascorrere il provino tra la sua rimozione dall'atmosfera controllata e l'inserimento all'interno della camera climatica e l'inizio del test non deve superare i 10 minuti.

3.1.2 Preparazione del provino

La preparazione del provino consiste nel posizionare la sonda di temperatura alla soletta o al sottopiede, se presente, per misurare la temperatura nella parte anteriore della calzatura direttamente sopra l'area in cui la suola entra in contatto con la piastra di supporto. Successivamente si posizionano le sfere d'acciaio all'interno della calzatura.

L'apertura superiore deve essere accuratamente chiusa con un apposito "tappo" costituito da una schiuma polimerica semirigida (ad esempio polistirene) di spessore non inferiore ai 25 mm, che può

essere composto anche da più strati. Il tappo viene fissato nel gambetto mediante nastro adesivo o altro mezzo idoneo.

3.1.3 Procedura

Si regola la temperatura della camera climatica a -17 ± 2 °C e si mantiene questa temperatura durante tutto il test. Si posiziona il provino sulla piastra di supporto all'interno della cella frigorifera. Si utilizza il dispositivo di misurazione della temperatura collegato alla sonda per misurare la temperatura sulla soletta/sottopiede subito dopo aver posizionato il provino nella camera climatica e dopo 30 ± 1 minuti. Annotare la differenza delle due temperature allo 0.5 °C più vicino.

Questo tipo di test viene effettuato sulla calzatura intera e deve essere ripetuto su due calzature di due numeri differenti. In figura 3.1 è riportato in maniera sintetica lo schema esecutivo del test.

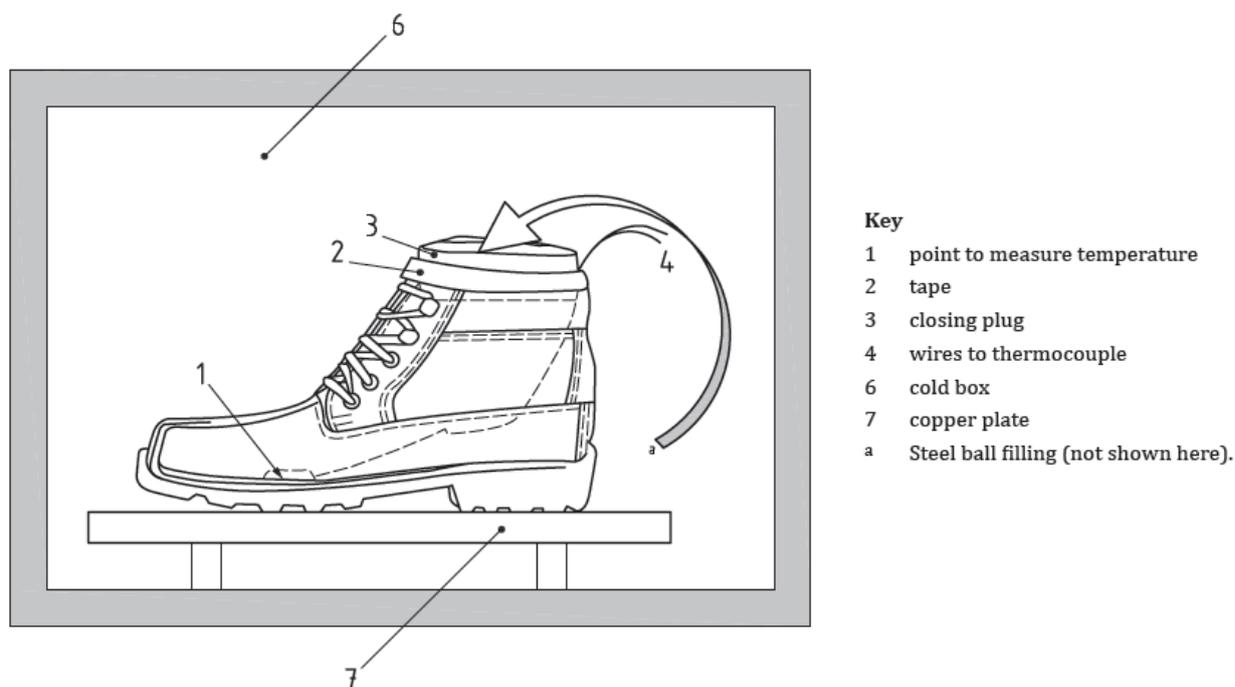


Figura 3.1: Schema esecutivo del test

3.2 Deviazione rispetto alla norma

Per l'esperimento è stato creato un tappo unendo, tramite della colla e del nastro adesivo, due lastre di polistirolo dello spessore di 20 mm l'una per un totale di 40 mm.

Oltre alla sonda richiesta dalla norma, ne sono state inserite altre 5 (Figura 3.2): una in corrispondenza dell'alluce, due lateralmente (interno ed esterno), una nella parte centrale (core), infine una sopra al "tappo" (isolante). I sensori "alluce" e "arco" sono stati ancorati direttamente alla soletta interna dello scafo tramite nastro adesivo, i sensori "interno", "esterno" e "dorso" sulle pareti interne dello scafo, mentre per il "core" lo si è inserito al centro delle sferette usate per il riempimento. Si è deciso di



Figura 3.2: Posizione dei sensori sul campione in esame

procedere in questo modo per monitorare maggiormente la temperatura in varie zone dello scarpone, in modo tale da capire quale fossero le aree maggiormente sensibili al cambiamento di temperatura.

Lo scarpone con all'interno le sonde e riempito di sferette di acciaio è stato inserito in una stufa alla temperatura di 30°C per 20 ore circa. In seguito, è stato chiuso con il tappo di polistirolo, lasciando tutti il sistema a condizionarsi per un'ora. Si è deciso di mantenere la temperatura di qualche grado più alto rispetto a quella richiesta dalla norma per simulare in maniera più verosimile quella del corpo umano.

Infine, all'interno della camera climatica è stata inserita una termocamera per permettere di studiare in maniera più dettagliata le temperature all'esterno dello scarpone, in modo tale da evidenziare le zone più soggette a raffreddamento.

L'esperimento consiste nel misurare la temperatura tramite le 6 sonde termiche inserite nello scarpone e nell'acquisire quattro termografie, tramite la termocamera: una frontale, una del lato interno, una del lato esterno ed una della suola dello scarpone ogni 10 minuti, per un totale di 2 ore.

L'esperimento è stato ripetuto su tre tipologie di scarpone differenti ideati da SCARPA per l'alpinismo:

- PHANTOM TECH: è uno scarpone tecnico per l'alpinismo in quota, escursioni su ghiaccio e arrampicata su cascate.
- PHANTOM 6000: è stato progettato per l'alpinismo di alta quota e arrampicata su ghiaccio, capace di offrire un buon isolamento in condizioni di freddo intenso.
- PHANTOM 8000: si tratta di uno scarpone doppio creato per attività di alpinismo Himalayano, ad alte quote e in condizioni di freddo estremo.

Per ciascuno scarpone sono state effettuate due misure con due numeri differenti.

Si è successivamente deciso di concentrarsi su di un unico scarpone, il PHANTOM TECH, e provare a variare sia il riempimento interno, sia la superficie di contatto con la suola, mantenendo inalterate le procedure di condizionamento e presa dati descritte precedentemente. Si è deciso di sostituire la piastra di rame inizialmente con una vaschetta contenente glicole etilenico e successivamente con del ghiaccio tritato. Poi ci si è concentrati sul riempimento; le sferette di acciaio sono state sostituite, in un



Figura 3.3: Scarpone con all'interno le sferette in acciaio inox

primo momento con del riso e in un secondo momento con dell'acqua. Ciascun riempimento è stato testato nei tre "ambienti" ovvero inizialmente lasciando lo scarpone sulla piastra di rame, poi inserendolo nella vaschetta col glicole e infine immergendo la suola nel ghiaccio tritato. L'idea è stata quella di verificare come cambiasse il comportamento dello scarpone modificando le proprietà termiche del riempimento e dell'ambiente attorno ad esso.

3.3 Apparecchiature e software utilizzati

Come già ripetuto in precedenza, tutti gli esperimenti sono stati eseguiti all'interno di una camera climatica (presente presso il Laboratorio di Alta Tecnologia Tessile del Politecnico di Torino). Per l'acquisizione dei dati, sono stati utilizzate due tipologie di sensori ed una termocamera. Di seguito verranno descritte brevemente le attrezzature utilizzate.

3.3.1 Camera climatica

Tutti i test sono stati eseguiti all'interno di una camera climatica di dimensioni 3.2 x 5 x 2.4 m (lunghezza x larghezza x altezza) per un volume complessivo di 38.4 m³. Tramite un pannello di controllo posto all'esterno, è possibile simulare diverse condizioni ambientali, andando a modificare la temperatura, umidità relativa e velocità dell'aria presenti in camera. È inoltre possibile alloggiare tutta la

strumentazione necessaria a simulare comuni attività motorie nel caso si vogliono eseguire dei test *in vivo*.

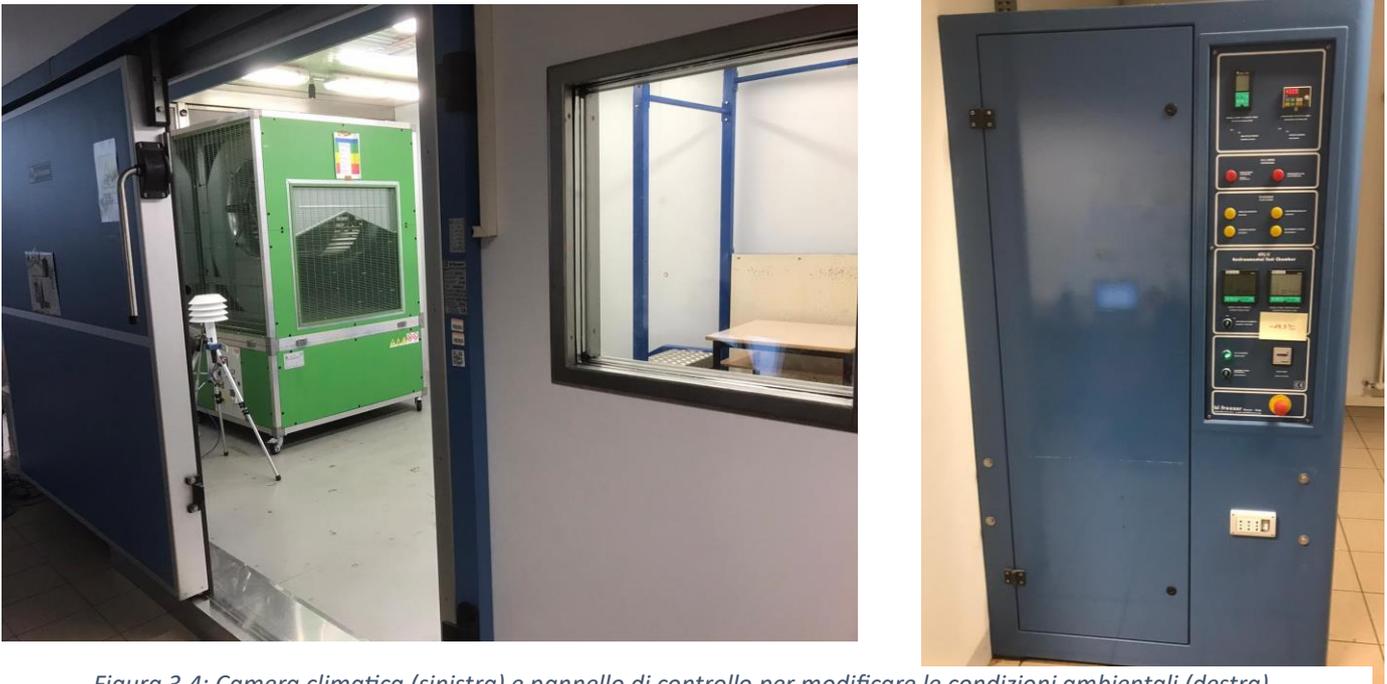


Figura 3.4: Camera climatica (sinistra) e pannello di controllo per modificare le condizioni ambientali (destra)

Questa tipologia di camera è specificatamente studiata per un uso continuo e, in caso di funzionamento normale, presenta una circolazione dell'aria, con velocità compresa tra 0,1 e 0,2 m/s. È possibile, inoltre, simulare una condizione di ventilazione più o meno modesta ricorrendo all'utilizzo di una grossa ventola posizionata ad una estremità della stanza. I range di temperatura all'interno dei quali la camera può operare sono compresi tra i -40°C e i +50°C.

3.3.2 Sensori

Per l'acquisizione dei dati sono state utilizzate due tipologie differenti di sensori: gli *IBUTTON1923* prodotti da "Analog Devices" e gli *MSR14WD* prodotti da "MSR-Group GmbH"



Figura 3.5: Sensore IBUTTON

I sensori IBUTTON (Figura 3.5) sono costituiti da un chip racchiuso in un contenitore in acciaio inox di 16 mm di diametro, resistente ad umidità, temperature (dai -20 °C agli 85 °C) e agli urti. Tramite un foro sul coperchio è possibile il passaggio dell'aria, permettendo così ad essa di raggiungere il sensore di umidità. È in grado di misurare e memorizzare i dati di temperatura (con risoluzione massima di 0,0625 °C) e valori di umidità relativa (con risoluzione di 0,04%) in una memoria da 8 Kbytes per lunghi periodi di tempo. Tramite un software ed un'interfaccia è possibile comunicare con un computer permettendo di far partire (anche con partenza ritardata) o terminare l'acquisizione dei dati; impostare una serie di parametri operativi, come la frequenza di acquisizione ed infine permettere la ricarica della batteria integrata. (IButton Link Thecnology, <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ds1923.pdf>)

Il sensore MSR (Figura 3.6) è un dispositivo in grado di misurare e registrare i valori di temperatura e umidità relativa (oltre un milione di valori) per lunghi periodi di tempo. Il range operativo per quanto riguarda la temperatura va dai -40°C ai 125°C, con una deviazione massima di $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$ (-10...+50°C) e di $\pm 1^{\circ}\text{C}$ (-40...+125°C) e da 0 a 100% di umidità relativa, con una deviazione massima di $\pm 1.8\%$ (10...85%, 0...+40°C) e $\pm 4\%$ (85...95%, 0...+40°C)

I sensori MSR sono costituiti da un corpo centrale nel quale sono presenti:

- Quattro *pin* che permettono tramite un apposito cavo in dotazione di connettere L'MSR con un computer tramite porta USB .
- Uno schermo sul quale è possibile leggere i parametri di temperatura ed umidità in tempo reale.

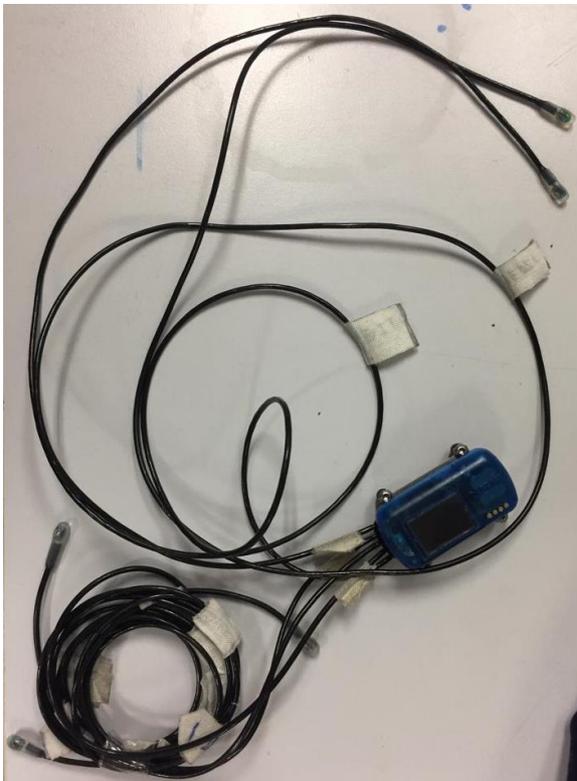


Figura 3.6: data logger MSR (a sinistra) con dettagli sul singolo sensore (a destra)

- 5 alloggiamenti per i fili di lunghezza 1 m ciascuno al fondo dei quali è presente il sensore vero e proprio.
- All'interno è presente una batteria da 4 V

Anche in questo caso tramite un software è possibile far partire o terminare un'acquisizione dati, salvare i risultati ottenuti, stabilire la frequenza di acquisizione e ricaricare la batteria (MSR Electronics GmbH, https://www.msr.ch/media/pdf/Datalogger_MS147WD_Datasheet.pdf)

3.3.3 Termocamera

La Termocamera impiegata per le analisi termiche della parte esterna degli scarponi è una FLIR A 310 da FLIR, un'azienda specializzata in termografie e tecnologie di imaging termico. La FLIR A 310 è una termocamera di sicurezza per esterni e per questo particolarmente robusta e resistente agli sbalzi termici e all'umidità. Essa è in grado di lavorare in un range di temperatura compreso tra i -40°C e i +70°C con uno zoom continuo x4.

Tramite cavo ethernet è possibile interfacciare la termocamera con un pc e attraverso il programma Flir Tools si può comunicare in tempo reale con la termocamera. Flir Tools è un software progettato per consentire agli utenti di analizzare e gestire le immagini termiche catturate utilizzando le telecamere termiche FLIR. Questo software consente agli utenti di:

- Catturare immagini termiche in tempo reale con possibilità di zoom e messa a fuoco manuale/automatica. È possibile, inoltre, modificare la scala di colori utilizzata, nonché di selezionare il range di frequenze dello spettro elettromagnetico.
- Fare operazioni di post-produzione. Una volta acquisita l'immagine è necessario fornire alla termocamera alcuni parametri come la distanza tra essa e l'oggetto che si è fotografato, le temperature della camera climatica e delle ottiche interne e i parametri di riflettività. Vi è



Figura 3.7: Termocamera FLIR A310f

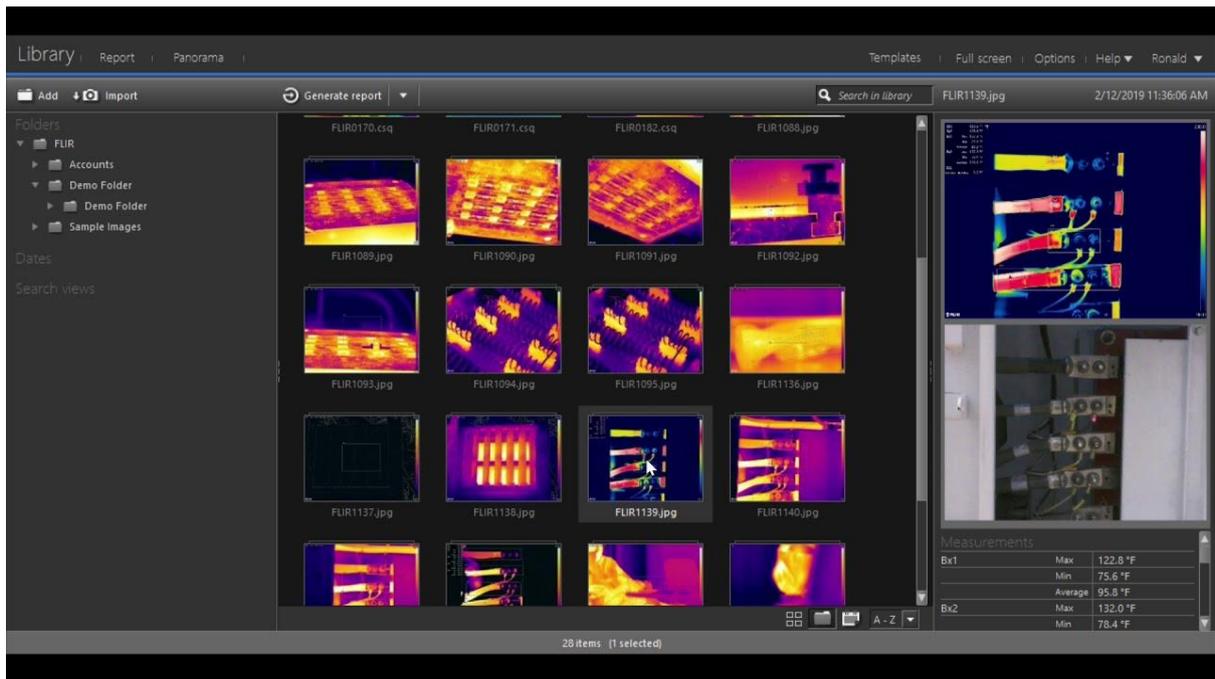


Figura 3.8: Software Flir Tools

inoltre, la possibilità di regolare il range di temperature per aumentare la luminosità ed il contrasto in zone di interesse.

- Utilizzare degli strumenti per l'analisi delle temperature. Si possono infatti marcare aree di interesse e come risposta il software fornirà informazioni sulla temperatura della zona evidenziata.
- Dopo aver completato la post-produzione Flir Tools permette agli utenti di esportare le immagini modificate ed i rapporti in diversi formati. (Teledyne FLIR, FLIR A310f, <https://www.flir.it/support/products/a310-f-automation/#Overview>)

3.3.4 Software di elaborazione dati

Oltre all'utilizzo di Flir Tools si sono utilizzati un'altra serie di programmi adatti all'analisi delle termografie.

I sistemi di analisi forniti da Flir Tools permettono di evidenziare le zone di interesse solo tramite l'ausilio di forme "rigide", di conseguenza è stato sviluppato un codice, che permette un'elaborazione più accurata. Per questo motivo una volta acquisite le immagini ed eseguite le operazioni di post-produzione, le termografie sono state salvate e, tramite il programma R Studio, è stato possibile estrarre dai file RAW i dati di temperatura "contenuti" nelle immagini. Tramite questo formato è infatti possibile estrapolare dalle termografie informazioni relative alle temperature utilizzando altri programmi che sono in grado di fornire strumenti di analisi più consoni alle nostre esigenze. Nello specifico, quello utilizzato per questo lavoro è stato *ImageJ*, un software di elaborazione delle immagini open-source progettato per l'analisi e la manipolazione di immagini scientifiche. ImageJ offre un'ampia gamma di strumenti per la manipolazione delle immagini, tra cui filtri, correzioni per la luminosità e il contrasto, ritaglio, ridimensionamento, e altro ancora. Il software fornisce, inoltre, strumenti per la segmentazione delle immagini, ovvero la suddivisione dell'immagine in regioni o oggetti di interesse. Questo può essere utile per separare parti diverse dell'immagine o per isolare particolari geometrie e conoscerne le temperature (Figura 3.9).

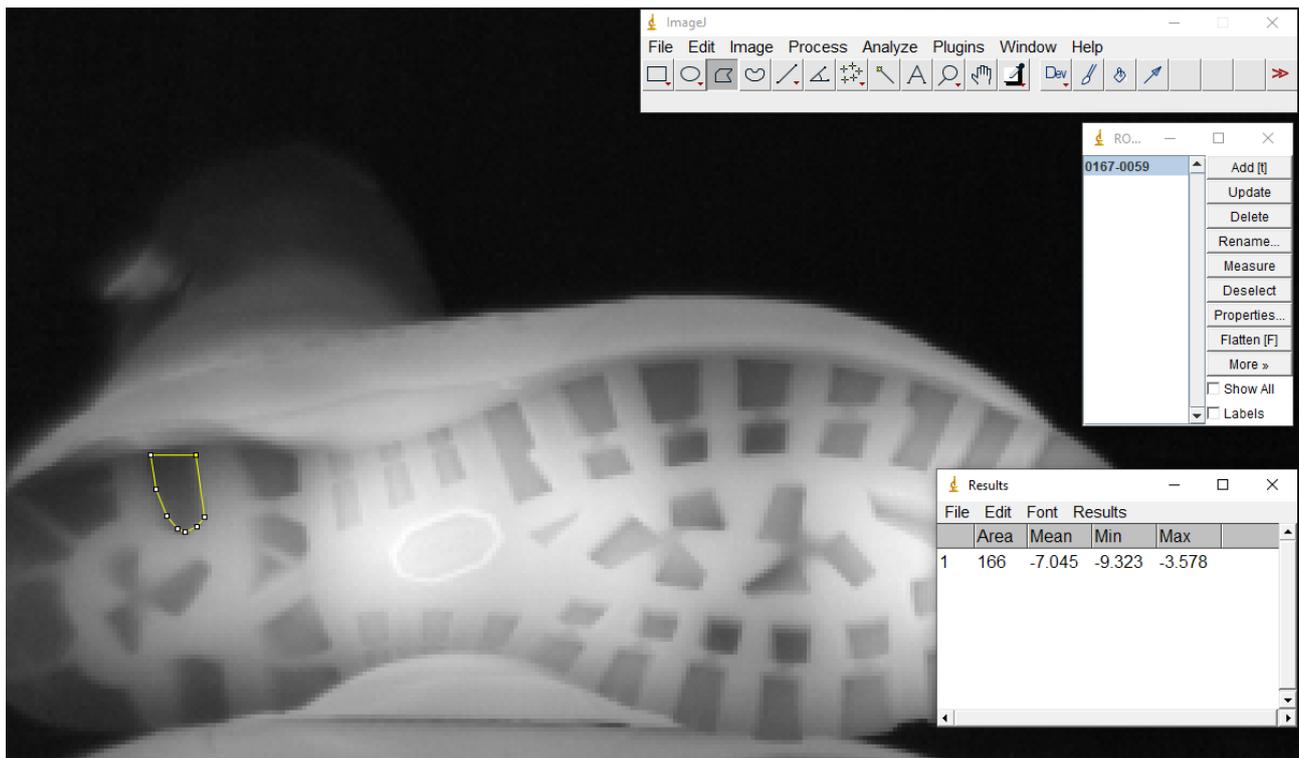


Figura 3.9: Estrapolazione valori di temperatura con ImageJ

3.4 Variazione dei riempimenti interni agli scarponi

Una volta effettuate le misurazioni con le sferette di acciaio, si è deciso di variare il riempimento interno, inizialmente con il riso e successivamente con l'acqua.

Per eseguire il test con il riso si è deciso di mantenere lo stesso volume di riempimento utilizzato precedentemente con le sferette di acciaio (860 ml). Tramite un becher graduato è stato possibile misurare con esattezza la quantità necessaria che è stata poi inserita all'interno dello scarpone a seguito del posizionamento dei sensori interni (Figura 3.10).

Anche per il test con l'acqua si è mantenuto lo stesso volume. La difficoltà con questo riempimento è stata cercare di trovare il miglior contenitore per il liquido. Sono stati eseguiti un certo numero di tentativi ed alla fine si è optato per l'utilizzo di un sacchetto in polietilene multistrato in modo tale da ridurre il rischio di forature durante l'esperienza. Tramite l'utilizzo di borotalco, per evitare l'adesione del sacchetto sulle mani dell'operatore, il sacchetto è stato inserito vuoto all'intero dello scarpone, dopo aver posizionato i sensori, e successivamente riempito con 860 ml di acqua, cercando il più possibile di far raggiungere al liquido ogni parte dello scafo interno. Si è infine chiuso il sacchetto utilizzando degli elastici. Il risultato è visibile in Figura 3.11.



Figura 3.10: Scarpone con riempimento di riso



Figura 3.11: Scarpone con riempimento di acqua

4.

Test di dispersione termica con suola asciutta

La prima fase di test ha riguardato lo studio del comportamento al freddo delle tre tipologie di scarponi (Phantom Tech, Phantom 6000, Phantom 8000), ciascuna delle quali riempita con sferette e lasciata a condizionare nella camera climatica, senza un mezzo disperdente tra la suola e il suo appoggio. Questi primi esperimenti sono stati anche un utile banco di prova per testare l'attrezzatura, farsi un'idea preliminare dei risultati che ci si sarebbe potuto attendere e capire quanto le misure effettuate fossero effettivamente replicabili.

Gli scarponi, dopo il consueto condizionamento in stufa, sono stati adagiati sulla piastra in rame e lasciati sopra di essa per tutta la durata dei test (120 minuti), tranne che nei momenti in cui l'operatore entrava in camera per girarli e permettere così di effettuare le termografie delle diverse angolazioni. Di seguito vengono analizzati i risultati ottenuti per ciascuna tipologia di scarpone per poi passare ad un confronto tra di esse.

4.1 Risultati per il modello Phantom Tech numero 42

Il primo test è stato effettuato sullo scarpone Phantom Tech numero 42, del quale sono state eseguite due ripetizioni, in modo tale da valutare la ripetibilità dei risultati. In Figura 4.1 sono riportati i risultati delle due misurazioni e delle relative derivate prime di ciascuno dei sette sensori utilizzati.

Il sensore posizionato sul tappo isolante risulta ovviamente essere quello più sensibile alla diminuzione di temperatura, essendo anche l'unico sensore ad essere posizionato al di fuori del corpo centrale dello scarpone. Seguono in ordine decrescente di velocità di raffreddamento l'alluce, il dorso, l'esterno, l'interno l'arco ed il core. Quest'ultimo nello specifico è il sensore che si raffredda meno velocemente rispetto a tutti gli altri, poiché si trova al centro delle sferette, risultando di conseguenza quello maggiormente isolato.

Il secondo sensore a mostrare la minor velocità di raffreddamento è quello dell'Arco. Per cercare di capire la motivazione, può essere utile osservare le termografie della suola (figura 4.2, d e Tabella 4.1). La posizione del sensore dell'arco si trova infatti vicina alla zona definita *Base (7)* che risulta essere il punto della suola con temperatura maggiore. Il motivo risiede nel fatto che quella porzione di suola, nonostante abbia uno spessore minore rispetto ad esempio ai tacchetti, non entra mai in contatto diretto con la piastra di rame, di conseguenza è l'aria tra la suola e la piastra a ridurre la dispersione termica dell'area dell'arco

L'alluce è la zona interna dello scarpone che maggiormente tende a cedere calore all'esterno. La spiegazione potrebbe essere che è una zona meno centrale nello scarpone (come può esserlo ad esempio il core), ha una maggior superficie specifica esposta ed è, inoltre, a diretto contatto con la suola dello scafo. Questa scambia calore direttamente con la suola ed il battistrada che sono aree in cui la dispersione del calore è molto elevata essendo a diretto contatto con la piastra di rame.

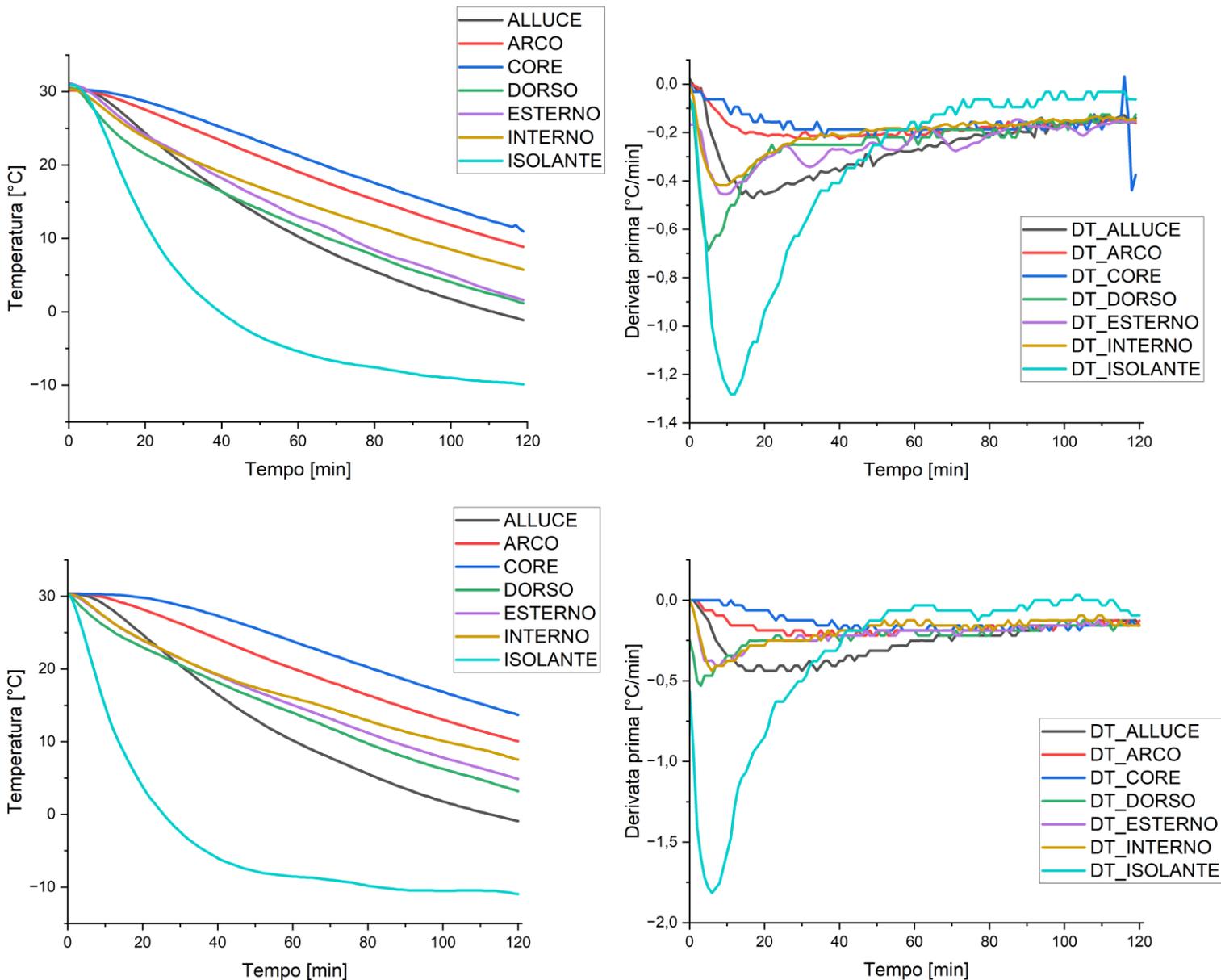


Figura 4.1: Grafici dell'andamento della temperatura in funzione del tempo con relative derivate prime

Infine, per quanto riguarda gli altri sensori (interno, esterno, dorso) le temperature risultano avere valori intermedi rispetto a quelli precedentemente analizzati. Come si vedrà in seguito con lo svolgimento degli altri test, questi tre sensori saranno quelli con la variabilità di risultati maggiore. Questo è in buona parte dovuto alla difficoltà da parte dell'operatore di riuscire a disporre i sensori di volta in volta, nello stesso identico punto dello scarpone. L'inserimento dei sensori è infatti un lavoro delicato poiché si lavora senza vedere dove essi siano effettivamente posizionati, ma ci si affida semplicemente a dei punti di riferimento presenti all'interno dello scafo dello scarpone (presenza di rigonfiamenti dovuti a strati multipli, cuciture...), cercando il più possibile di mantenere lo stesso posizionamento. Ovviamente è improbabile che da un test all'altro ciascun sensore venga posizionato esattamente nella stessa posizione, di conseguenza una certa variabilità nei risultati è prevedibile.

Osservando l'andamento delle derivate prime si osserva come il decremento di temperatura all'interno dello scarpone non è monotono. La variazione di temperatura risulta essere molto più marcata nei

primi minuti all'interno della camera, raggiunge un minimo e poi risale, fino a diventare pressoché costante nella seconda metà del test. La forza spingente dell'intero processo è data dalla differenza di temperatura tra l'esterno e l'interno dello scarpone, che tenderà ad essere massima nei primi minuti di test per poi stabilizzarsi ma mano che lo scarpone inizia a raffreddarsi internamente. In Figura 4.2 sono riportate quattro immagini termografiche, relative alle quattro angolazioni dello scarpone, acquisite al termine delle due ore in camera climatica. In queste immagini sono state evidenziate delle aree delle quali è stata estrapolata la temperatura media tramite una serie di software e i cui risultati sono riportati in Tabella 4.1. I numeri da 1 a 6 sono:

- Frontale (1) posizionato sulla punta dello scarpone.
- Fron_interno (2) posizionato nella parte anteriore dello scarpone, idealmente verso la punta, ma dalla parte dell'interno piede.
- Cent_interno (3) corrisponde ad una zona posizionata al centro dello scarpone, nella parte dell'interno piede.
- Dorso (4a e 4b), corrispondenti alla zona finale del collo del piede valutato rispettivamente dal lato interno ed esterno.
- Cent_esterno (5) corrispondente alla zona centrale dello scarpone, nella parte dell'esterno piede

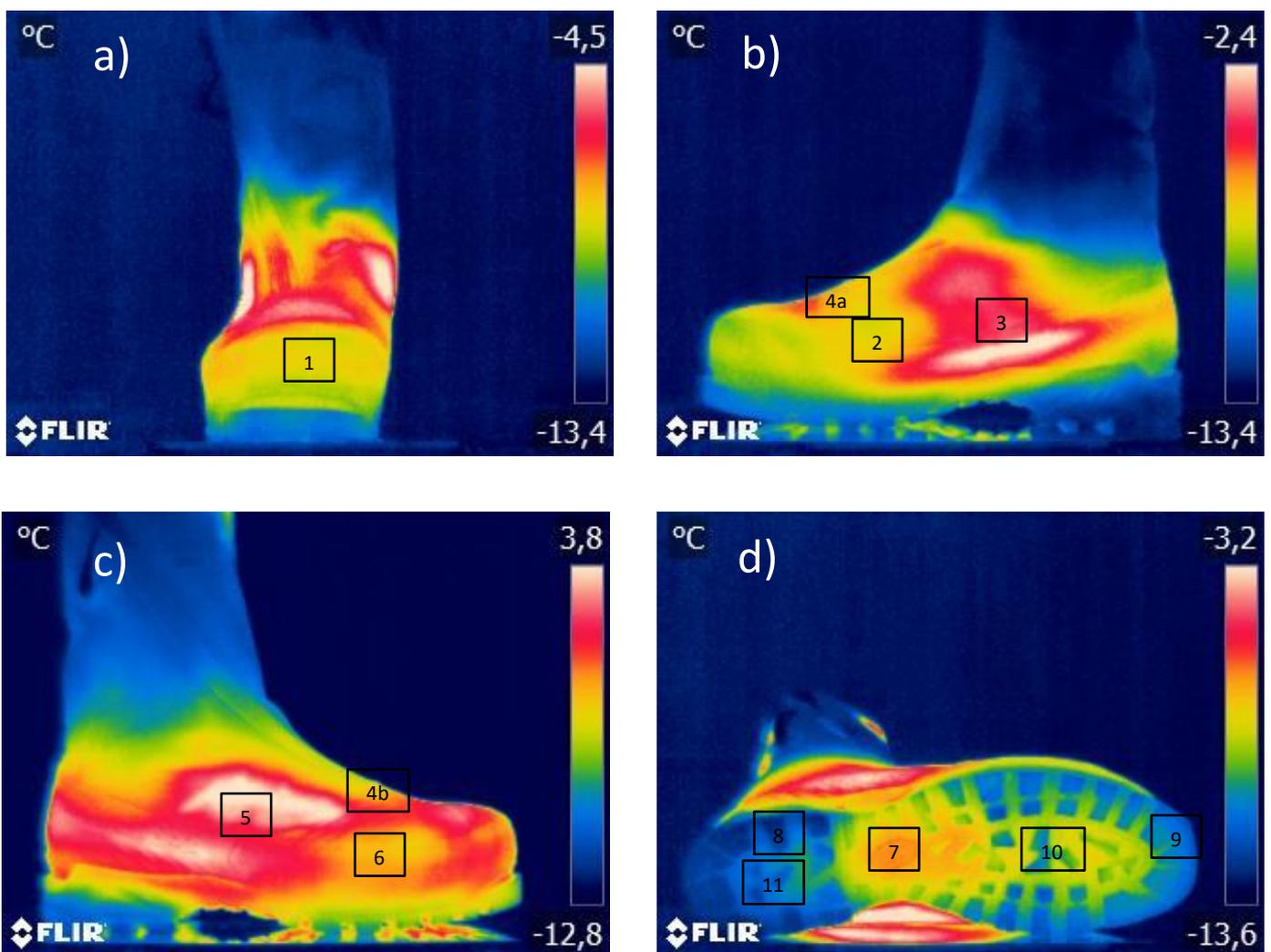


Figura 4.2: Immagini termografiche dopo 2 ore di acclimatazione in camera

	T_med (°C)	T_med (°C)
Frontale (1)	-8.496	-9.839
Front_interno (2)	-6.932	-9.301
Cent_interno (3)	-4.493	-6.754
Dorso (4a)	-6.1	-7.075
Dorso (4b)	-7.624	-8.769
Cent_esterno (5)	-3.43	-4.659
Front_esterno (6)	-7.846	-8.577
Base (7)	-6.451	-7.201
Tacco (8)	-12.315	-12.816
Punta (9)	-10.955	-11.734
Punta_centro (10)	-9.913	-10.229
Tacco_centro (11)	-11.44	-11.913

Tabella 4.1: Temperature dopo due ore delle zone evidenziate

- Front_esterno (6) posizionato nella parte anteriore dello scarpone, idealmente verso la punta, ma dalla parte dell'esterno piede.

Tutte queste zone appartengono alla ghetta/scafo dello scarpone e dai dati riportati in Tabella 4.1 si evince come quelle più fredde corrispondano alle aree 1, 2, 4b e 6. La zona 4b corrispondente al dorso è un'area non omogenea poiché è parzialmente occupata dalla zip di chiusura della ghetta. La zip essendo fatta di materiale metallico, ha un comportamento termico molto diverso rispetto al resto dello scarpone che è costituito per lo più da fibre sintetiche. Per quanto riguarda le altre aree invece, la situazione è più interessante. Si tratta infatti di zone che si trovano tutte e tre in corrispondenza della punta dello scarpone, nella parte bassa dello scafo. Queste superfici sono ovviamente più vicine alla suola, che è una zona dove lo scambio termico è molto maggiore essendo a contatto diretto col terreno, di conseguenza la temperatura tende a scendere in maniera più marcata. Contemporaneamente la zona frontale dello scafo tende ad avere uno spessore di primaloft (un materiale costituito di microfibra in poliestere) doppio rispetto che nel resto dello scarpone, portando ad una maggior isolamento termico.



Figura 4.3: Suola del Phantom Tech. I tacchetti presenti nelle aree evidenziate sono quelli che entrano in contatto col terreno

Un discorso a parte va fatto per quel che riguarda le restati aree evidenziate (7-11), che appartengono alla suola. Essendo a diretto contatto, nel nostro caso con la piastra di rame, nel caso reale con il suolo, con il quale scambia calore per conduzione termica, essa è la parte dello scarpone che più di tutte deve resistere allo sbalzo termico tra l'ambiente interno e quello esterno dello scarpone. Il contatto suola-terreno avviene attraverso un numero limitato di tacchetti. Tramite il software CAD è stato possibile evidenziare quali di questi tacchetti entrino effettivamente in contatto col suolo ed i risultati sono osservabili in Figura 4.3.

Si è deciso di analizzare la variazione di temperatura di cinque zone diverse della suola, le quali sono riportate in figura 4.2, d. Le zone 8, 10 e 11 riguardano tacchetti che entrano in contatto diretto col terreno, il tacchetto della punta (9) solo parzialmente, mentre la zona 7 rimane sollevata e non tocca mai il terreno. Il grafico riportato in figura 4 mostra l'andamento della temperatura delle cinque zone; esse sono state estrapolate dalle termografie, le quali sono state effettuate ogni 10 minuti.

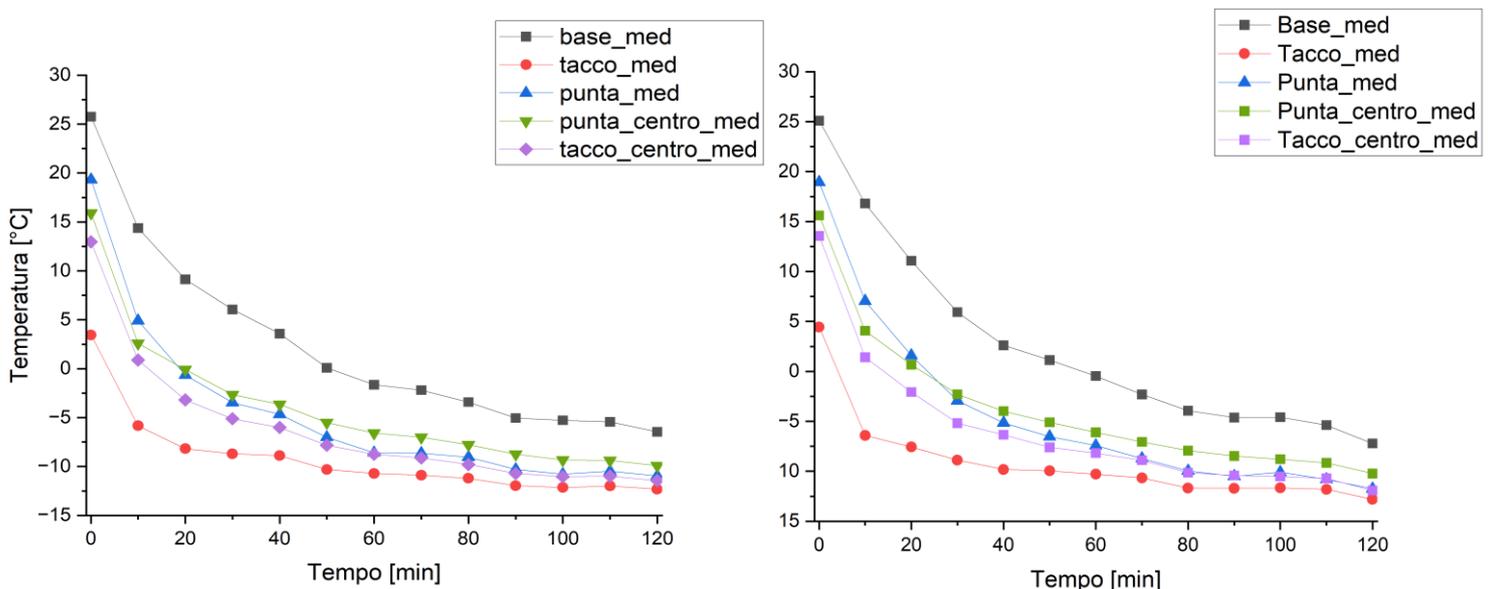


Figura 4.4: Andamento della temperatura della suola valutata in cinque aree diverse

Come già riportato in precedenza, la Base non entra mai in contatto con la piastra di rame, di conseguenza, il calore viene asportato tramite convezione naturale risultando la zona più calda della suola.

In Figura 4.4 sono riportate le temperature delle zone evidenziate della suola durante tutti i 120 minuti di permanenza in camera. La linea rossa nello specifico (denominata tacco) è relativa ad un tacchetto della suola che sappiamo entrare in contatto diretto con la piastra. La temperatura di quest'area è quella che decresce maggiormente durante il test. La spiegazione è che questo tacchetto ha un'area di contatto reale con la piastra maggiore rispetto agli altri analizzati, di conseguenza la superficie con cui può scambiare calore col terreno è maggiore. A differenza di altri tacchetti, di cui si discuterà nel paragrafo successivo, la superficie ha una geometria piatta, permettendo un miglior contatto con la piastra.

Per quanto riguarda le zone relative alle parti centrali del tacco (11) e della punta (10) la situazione è intermedia. Dall'analisi delle temperature è infatti possibile intuire come solo una porzione di queste

aree sia effettivamente in contatto con il suolo. Questo aspetto è ulteriormente dimostrabile osservando con maggiore attenzione la forma dei tacchetti presi in esame. I tacchetti infatti relativi alle zone centrali della punta e del tacco non risultano essere completamente piatti, come avviene altrove, ma presentano una geometria più complessa, come è possibile osservare nelle immagini 1 e 2 della figura 4.5. Di conseguenza l'area reale di contatto e dunque lo scambio termico per conduzione, coinvolgerà solo una frazione dell'area totale del tacchetto, mentre nella restante parte lo scambio sarà nuovamente per convezione naturale.



Figura 4.5: Dettagli tacchetti suola. Da sinistra verso destra: 1) Punta centrale, 2) Tacco centrale, 3) Punta

L'inclinazione della punta non permette a questa zona di entrare a contatto diretto con la piastra; almeno in condizioni statiche, quando l'alpinista è fermo. Le temperature che si misurano sono tuttavia molto differenti rispetto a quelle della Base, che pur condivide con la punta il mancato contatto diretto con la piastra. La vicinanza con l'appoggio in rame e la posizione maggiormente esposta potrebbero essere le cause di questa discrepanza. Nella zona della Base, infatti, l'aria riesce ad entrare con maggior difficoltà rispetto che in punta. Il risultato potrebbe essere una minore circolazione dell'aria rispetto alla punta con una conseguente minor diminuzione di temperatura.

In Figura 4.6 vengono riportate le misure relative alle cinque zone della suola con le rispettive variazioni. Il software ImageJ utilizzato per l'analisi dei dati permette di valutare la temperatura massima, minima e media di ciascuna area evidenziata. Per quanto riguarda la Base le differenze di queste tre temperature sono estremamente ridotte. La superficie è molto omogenea e non entrando mai a contatto con la piastra l'unico meccanismo di scambio termico che interviene è la convezione naturale. In tutti gli altri casi la differenza tra temperatura massima e minima è molto maggiore, indice che anche a pochi centimetri di distanza le temperature possono variare di diversi gradi. Questo fattore conferma come effettivamente solo una parte dei tacchetti analizzati risulti effettivamente a contatto con la suola.

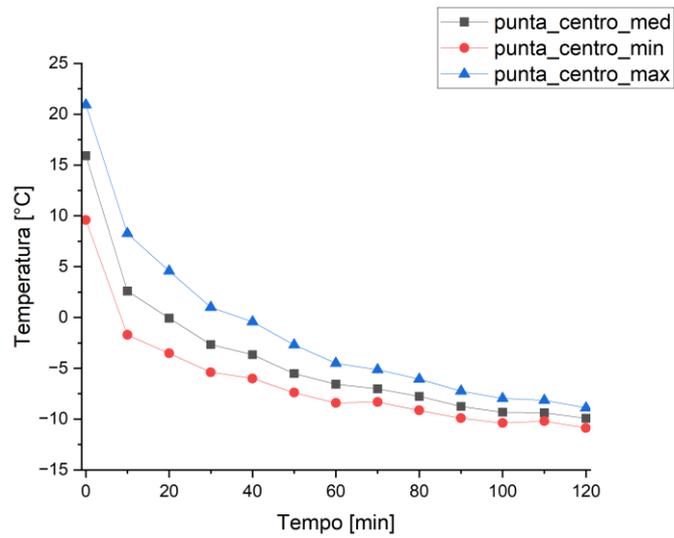
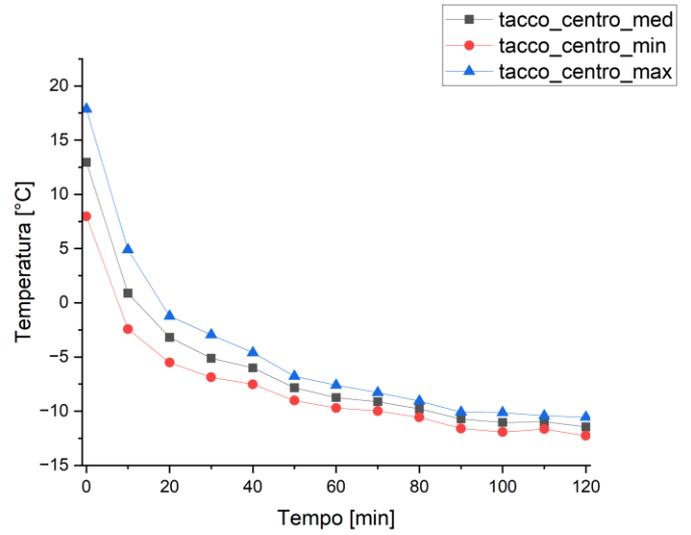
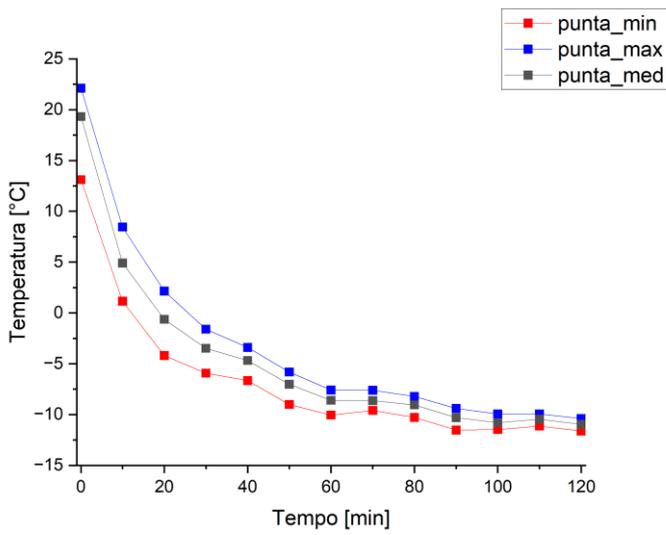
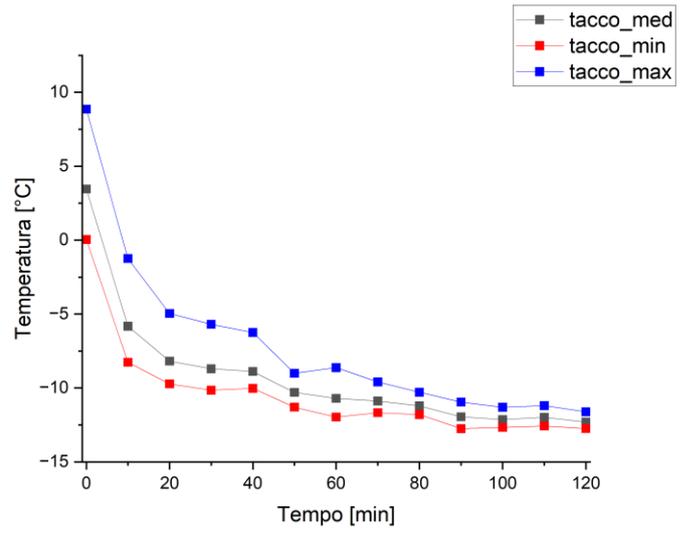
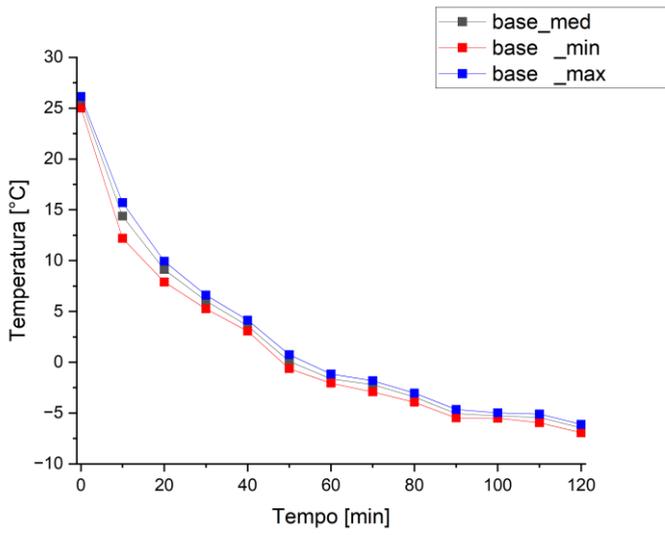


Figura 4.6: Andamento della temperatura in funzione del tempo della suola valutata in cinque aree diverse con relativa variabilità dei valori

Infine, un piccolo commento sulla ripetibilità delle misurazioni. In figura 4.7 sono riportati i risultati delle due misurazioni effettuate coi sensori interni sul Phantom Tech numero 42. Partendo dalla prima immagine in alto a sinistra si nota come le misure effettuate su alluce ed arco risultano sostanzialmente sovrapponibili. Per quanto riguarda il core e il dorso si nota una certa variabilità dei risultati. Nel caso del core la motivazione è da ricercare nel fatto che il sensore viene posizionato al centro delle sferette, ma nuovamente non essendoci un vero e proprio punto di riferimento univoco, la sonda non verrà collocata mai nella stessa identica posizione (talvolta più vicina o più lontana dalle “pareti” dello scarpone o dalla suola interna), trovandosi così di volta in volta in un ambiente differente. Un altro fattore da tenere in considerazione e che è in grado di giustificare una certa variabilità dei dati, è che i sensori, che hanno una dimensione ridotta (di qualche decina di mm) possono trovarsi in contatto sia con una sferetta sia con l’aria presente tra di esse. Inoltre, la movimentazione dello scarpone, durante l’acquisizione delle termografie, può ulteriormente modificare questa situazione nel corso dell’esperimento; le sferette, infatti, per quanto fortemente limitate nel moto, presentano una certa possibilità di movimento. Considerazioni analoghe possono essere fatte per i risultati riguardanti i sensori dorso, esterno interno. Per questi ultimi vi è inoltre da considerare la difficoltà da parte dell’operatore di posizionare i sensori nella medesima zona, come già accennato in precedenza.

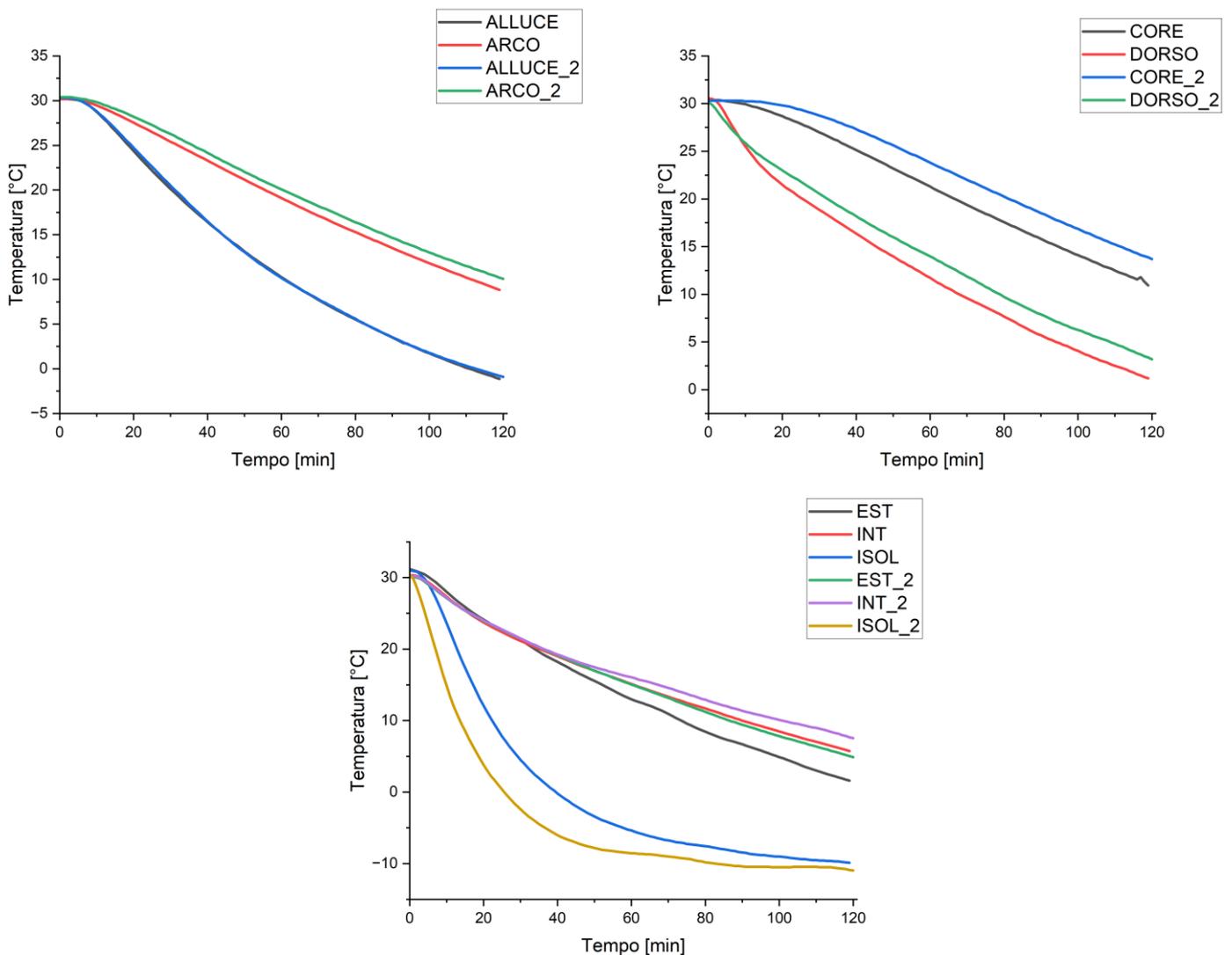


Figura 4.7: Ripetibilità delle misurazioni

L'isolante è quello che risente maggiormente del posizionamento del setup sperimentale. La posizione della strumentazione, che viene per comodità, inserita all'interno dello scarpone può assumere diverse configurazioni, in maniera totalmente randomica durante lo svolgimento dei test. L'aria fredda della camera penetra nella ghetta e raggiunge il sensore raffreddandolo, seguendo percorsi differenti a seconda dei casi, rendendo così le misurazioni non perfettamente ripetibili. Di conseguenza il sensore posizionato sull'isolante verrà comunque inserito nei grafici successivi, ma non commentato poiché le variabili che ne possono influenzare l'andamento sono tante e non sempre prevedibili.

4.2 Risultati per il modello Phantom Tech numero 38

Analogamente a quanto fatto con il Phantom Tech numero 42 si è deciso di testare il comportamento termico dello stesso scarpone, analizzando il numero 38, così come viene richiesto dalla norma. In figura 4.8 sono riportati i risultati delle misurazioni e delle relative derivate prime di ciascuno dei sette sensori interni utilizzati.

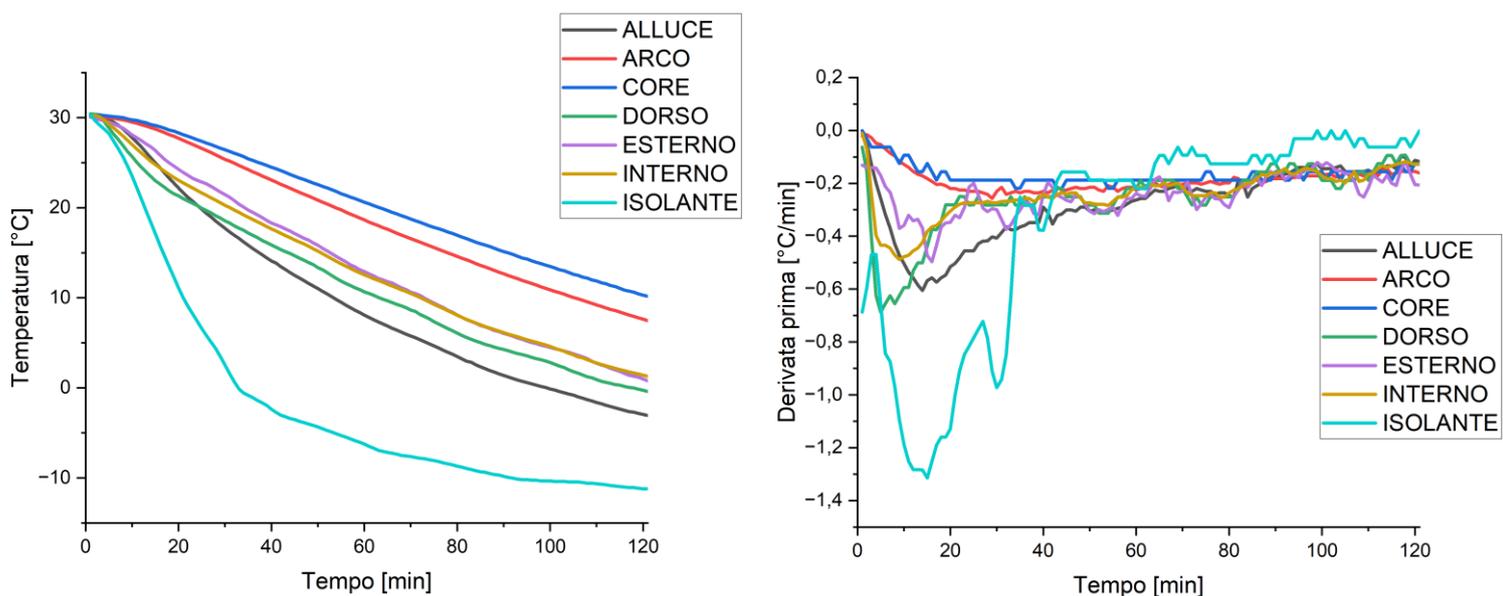


Figura 4.8: Grafici dell'andamento della temperatura in funzione del tempo con relative derivate prime

Gli andamenti delle temperature sono in linea con quelli del Phantom Tech numero 42 precedentemente analizzato. Anche in questo caso il Core rimane il sensore dove si osserva la più lenta diminuzione di temperatura e l'isolante quello che più velocemente si raffredda. Segue l'alluce, il dorso, l'interno, l'esterno ed infine l'arco. In generale valgono tutte le considerazioni che sono state fatte nel test precedente.

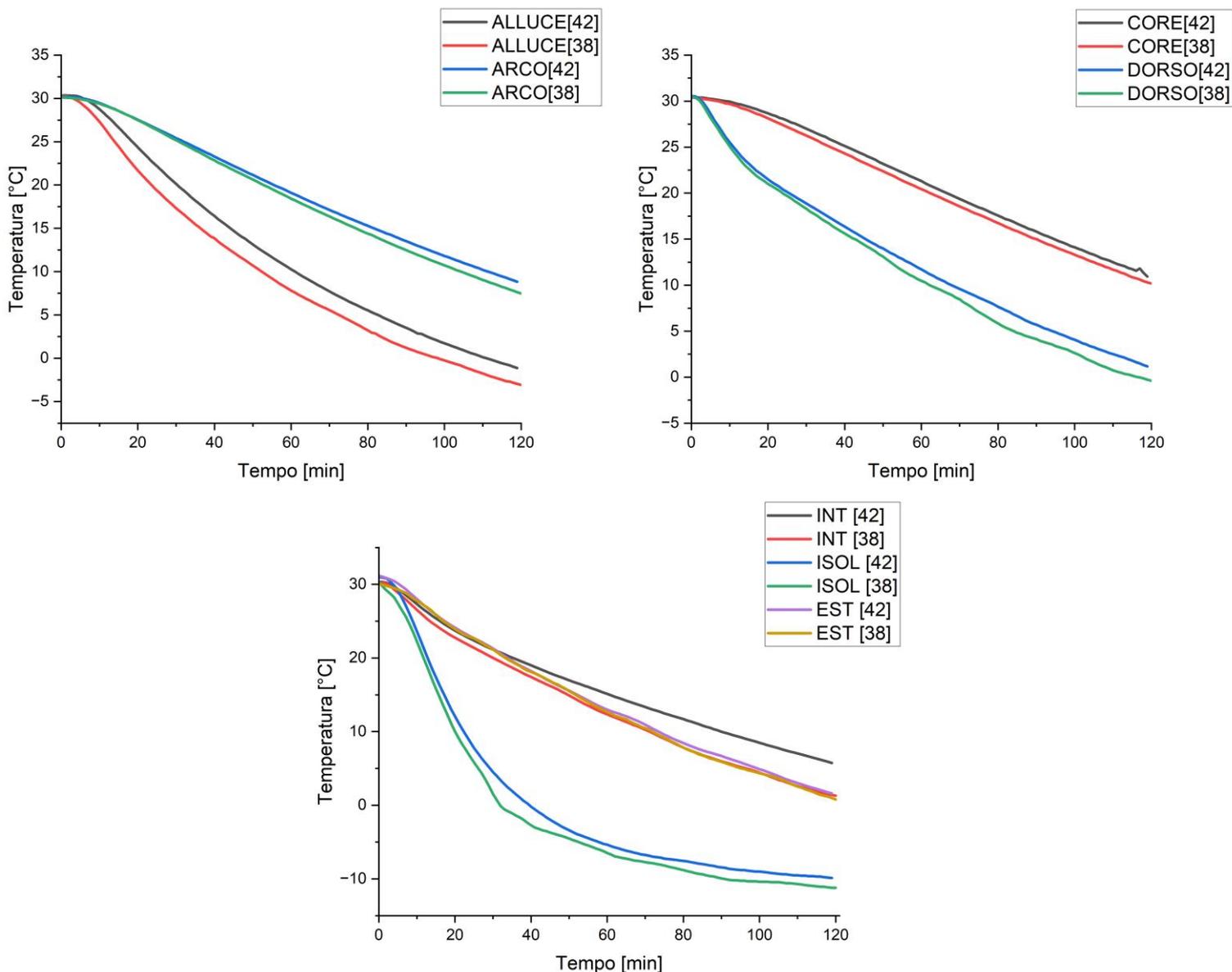


Figura 4.9: Confronto delle temperature dei sensori tra il numero 42 e 38

Nella figura 4.9 sono invece riportate i confronti tra le temperature registrate dai sensori dei due scarponi. In generale quello che si nota è che gli andamenti sono molto simili così come le temperature; unica eccezione parrebbe essere il confronto tra i due sensori “interni”. Come già detto in precedenza la motivazione potrebbe essere dovuta al non identico posizionamento della sonda nei due differenti test.

Un aspetto che balza all’occhio è che per ogni sensore la temperatura risulta leggermente inferiore nel caso dello scarpone numero 38. Questo potrebbe essere dovuto ad una semplice fluttuazione statistica, essendo che le differenze di temperature sono effettivamente minime, o dal fatto che generalmente il numero 42 tenda ad isolare maggiormente rispetto al 38. Il rapporto tra la superficie (che rappresenta la zona in cui avvengono gli scambi termici con l’esterno) e il volume, nel caso dello scarpone numero 38, è maggiore rispetto al 42 e questo potrebbe spiegare il diverso grado di isolamento. Un altro fattore che sicuramente influenza il risultato è costituito dal fatto che le sferette di acciaio inserite nel numero 42 si dispongono riempiendo bene tutto lo scafo, mentre nel caso del

numero 38 il riempimento non solo è sufficiente ad occupare tutto lo scafo, ma risale parzialmente anche nella zona del gambetto. Il risultato è che nel 38 un minor numero di sferette è presente nella parte centrale dello scafo apportando un minor contributo energetico al sistema.

La differenza di temperatura è comunque contenuta e le temperature finali differiscono tra di loro per meno di 2°C.

In tabella 4.2 sono riportate le temperature relative alle zone della ghetta evidenziate precedentemente in Figura 4.2. Si ha una conferma circa il comportamento che già era emerso nel caso del Phantom Tech numero 42, ovvero che le zone 1, 2 e 6, che corrispondono alle aree della punta dello scarpone, si attestano a temperature inferiori rispetto alle altre. Di nuovo, la motivazione potrebbe essere sia la maggior vicinanza di queste aree con la suola, che è una zona in cui lo scambio termico con l'ambiente è molto maggiore e le temperature quindi inferiori, sia la presenza dello strato di Primaloft con grammatura doppia, che porta ad un aumento dell'isolamento termico con l'esterno.

	T_med (°C)
Frontale (1)	-9.621
Front_interno (2)	-7.182
Cent_interno (3)	-3.11
Dorso (4a)	-6.28
Dorso (4b)	-6.333
Cent_esterno (5)	-3.094
Front_esterno (6)	-7.559

Tabella 4.2: Temperature dopo due ore delle zone evidenziate

Se si confrontano questi risultati con i medesimi, ma relativi alle due ripetizioni eseguite con il Phantom Tech numero 42 (Tabella 4.1), si osserva come le temperature finali del numero 38 mediamente siano di 1 °C maggiori.

4.3 Risultati per il modello Phantom 6000 numero 42

Si è dunque passati allo studio del comportamento termico dell'altra tipologia di scarpone il Phantom 6000 numero 42. Questo scarpone è progettato per l'alpinismo estremo ed è quindi dotato di una maggiore termicità. In figura 4.10 sono riportate le temperature dei sensori interni dello scarpone.

L'andamento dei risultati è analogo a quelli precedentemente commentati. Il core continua ad essere il sensore più isolato, seguono l'arco, l'interno e il dorso; poi l'esterno e l'alluce ed infine l'isolante. Solo il sensore esterno mostra un comportamento molto diverso rispetto agli altri test effettuati. La temperatura misurata rimane la più bassa tra quelli presenti all'interno del corpo centrale dello scarpone (addirittura più dell'alluce). Molto probabilmente in questo caso il sensore è stato posizionato in maniera diversa rispetto alle precedenti misurazioni portando a questa tipologia di risultato.

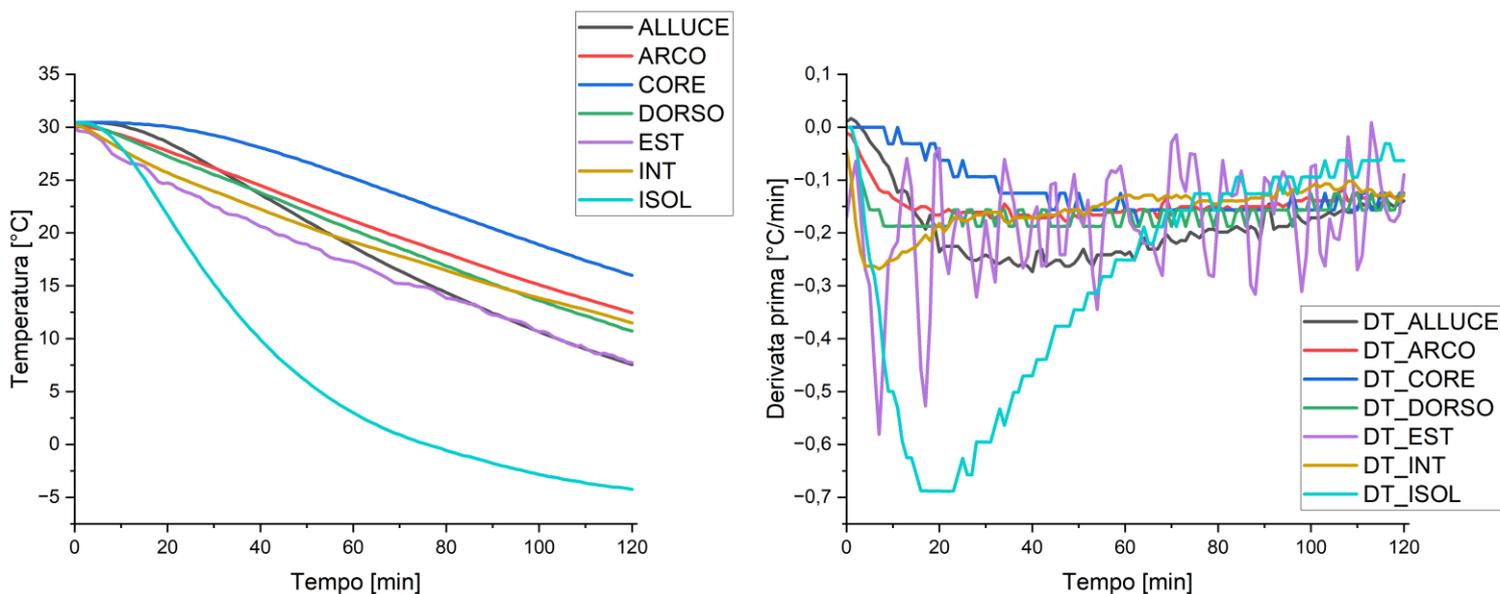


Figura 4.10: Grafici dell'andamento della temperatura in funzione del tempo con relative derivate prime

Le temperature interne in generale si attestano a valori maggiori rispetto a quelle del Phantom Tech e questo ovviamente non stupisce, dato il maggior isolamento di questa tipologia di scarpone. Da notare come anche la differenza delle temperature misurate dai sensori al termine del test risultino più uniformi nel caso del Phantom 6000. Se si esclude l'isolante, infatti, abbiamo che nel caso del Phantom Tech le temperature finali variano tra i circa 12°C del core ai quasi -1°C misurato dal sensore dell'alluce, con una differenza di temperatura di circa 13°C. Nel caso del Phantom 6000 invece, le temperature sono comprese tra i 16°C del core ai poco più che 7,5°C dell'alluce, con un ΔT di circa 8,5°C, anche questo indice di un maggior isolamento termico dello scarpone Phantom 6000 rispetto al Phantom Tech.

Per quanto riguarda le immagini termografiche in figura 4.11 sono riportate gli scatti effettuati dopo due ore di acclimatazione in camera, delle aree evidenziate prese in esame, mentre in tabella 4.3 si possono osservare le loro temperature.

In generale le temperature risultano mediamente più basse di quelle misurate nel caso del Phantom Tech. Le zone della ghetta hanno temperature che oscillano tra i -7/-11°C, ampiamente più basse del caso del Phantom Tech che variano tra i -3/-8°C, mentre per la suola le differenze sono molto minori. In realtà questo comportamento è perfettamente giustificato dalla differenza di isolamento termico tra i due modelli di scarpone. Se la temperatura esterna misurata è inferiore, come evidenziato nel caso del Phantom 6000, significa che il calore interno permea meno facilmente verso l'esterno proprio in virtù del maggior isolamento termico di questa tipologia di scarpone.

Per quel che riguarda le temperature relative alle zone evidenziate delle termografie del Phantom 6000 (Tabella 4.3) gli andamenti sono analoghi a quelli del test precedente. Le zone frontali della ghetta 1, 2 e 6 raggiungono le temperature più basse al termine del test, mentre le altre (3, 4, 5), si attestano a temperature più alte. Le aree relative alla suola (numeri 7-11) risultano essere le più fredde con l'eccezione della Base (7) che si mantiene a temperature nettamente maggiori dato il suo isolamento dovuto al non contatto diretto con la piastra di rame. Il Tacco (8) è l'area della suola che raggiunge le

	T_med (°C)
Frontale (1)	-11.4
Front_interno (2)	-9.758
Cent_interno (3)	-8.734
Dorso (4a)	-7.465
Dorso (4b)	-7.471
Cent_esterno (5)	-7.641
Front_esterno (6)	-9.748
Base (7)	-7.72
Tacco (8)	-12.34
Punta (9)	-12.00
Punta_centro (10)	-10.12
Tacco_centro (11)	-11.61

Tabella 4.3: Temperature dopo due ore delle zone evidenziate

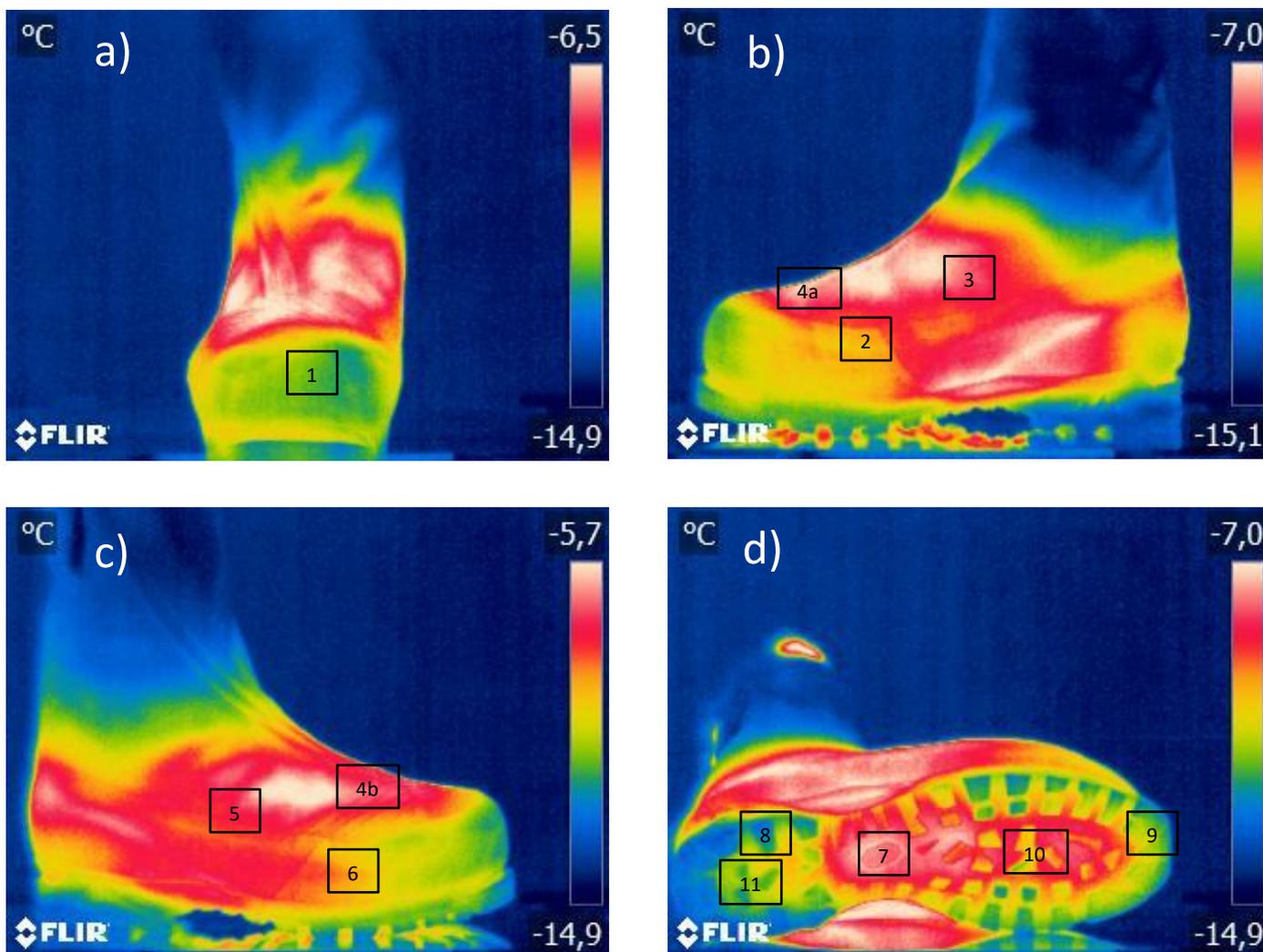


Figura 4.11: Immagini termografiche dopo 2 ore di acclimatamento in camera

temperature più basse, mentre le altre (9, 10 e 11) si attestano a temperature intermedie tra questi due estremi.

4.4 Risultati per il modello Phantom 6000 numero 37

Così come fatto per il Phantom Tech, anche per il Phantom 6000 si è deciso di testare un secondo scarpone con un numero più piccolo, in questo caso il 37. I risultati dei sensori interni sono riportati in figura 4.12.

Così come già osservato nelle precedenti prove si conferma il trend che vede l'alluce come zona più sensibile al cambiamento di temperatura (se si esclude l'isolante) e arco e core come le zone più isolate termicamente. Gli altri sensori occupano posizioni intermedie tra questi due estremi.

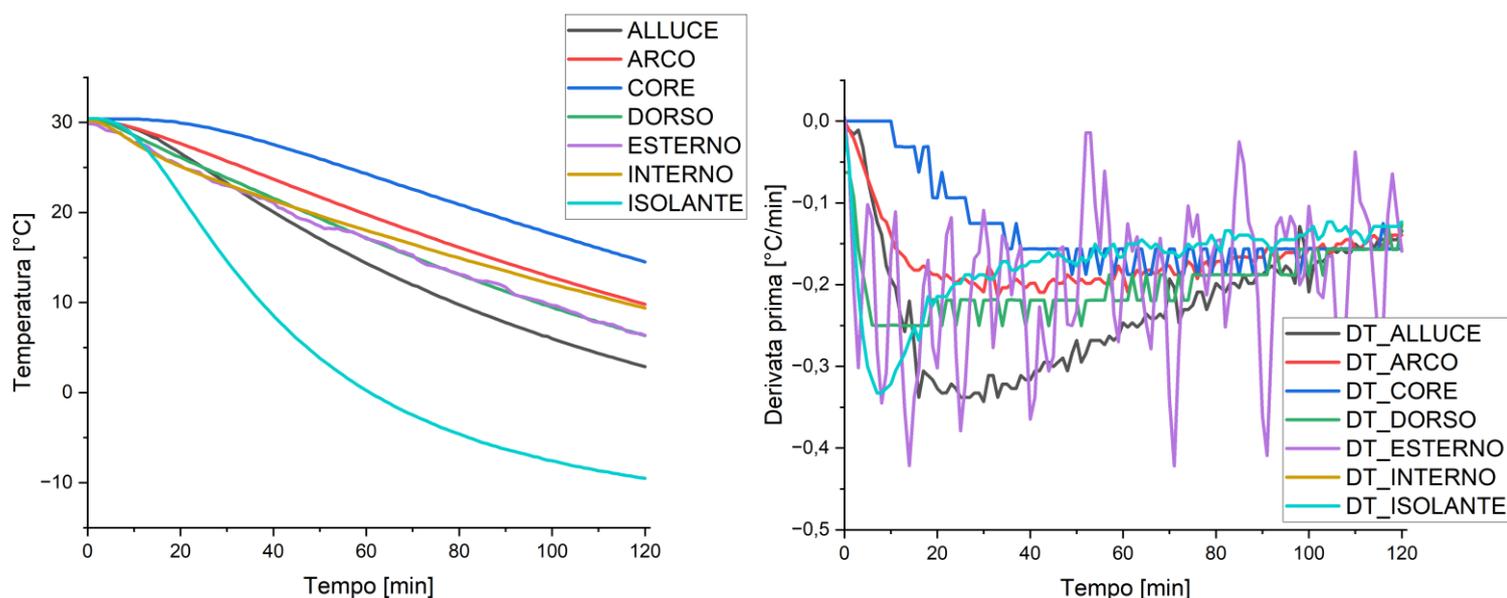


Figura 4.12: Grafici dell'andamento della temperatura in funzione del tempo con relative derivate prime

In Figura 4.13 sono invece confrontate le temperature dei sensori tra i due numeri del Phantom 6000. Anche in questo caso si osserva come le temperature da loro registrate siano maggiori nel caso del numero 42, rispetto al numero 37. A differenza di quanto osservato in precedenza con il Phantom Tech, tuttavia il ΔT tra i due numeri è molto maggiore. Mentre nel caso precedente le differenze di temperature finali erano stabilmente sotto i 2°C, nel Phantom 6000 queste variano da circa 1.5°C a più di 4°C nel caso dell'alluce. Le motivazioni per spiegare questo comportamento possono essere analoghe a quelle usate per il Phantom Tech, ovvero un minor numero di sferette di acciaio presenti nella parte centrale dello scafo e di un rapporto area/volume maggiore nel caso dello scarpone col numero più piccolo. Da aggiungere inoltre che nel caso del Phantom Tech si passa dal numero 42 al 38, mentre per il Phantom 6000 dal numero 42 al 37, quindi il comportamento è ancora più estremizzato nel secondo caso. Certo è che le differenze tra le due tipologie di scarpone sono notevoli e non è detto che la semplice differenza di un numero possa bastare a dare una spiegazione esaustiva di questo comportamento.

In Tabella 4.4 sono presenti le temperature estrapolate dalle termografie dopo due ore in camera climatica delle zone evidenziate, che coincidono con quelle già precedentemente descritte per il Phantom 6000 numero 42 (vedi Figura 4.11).

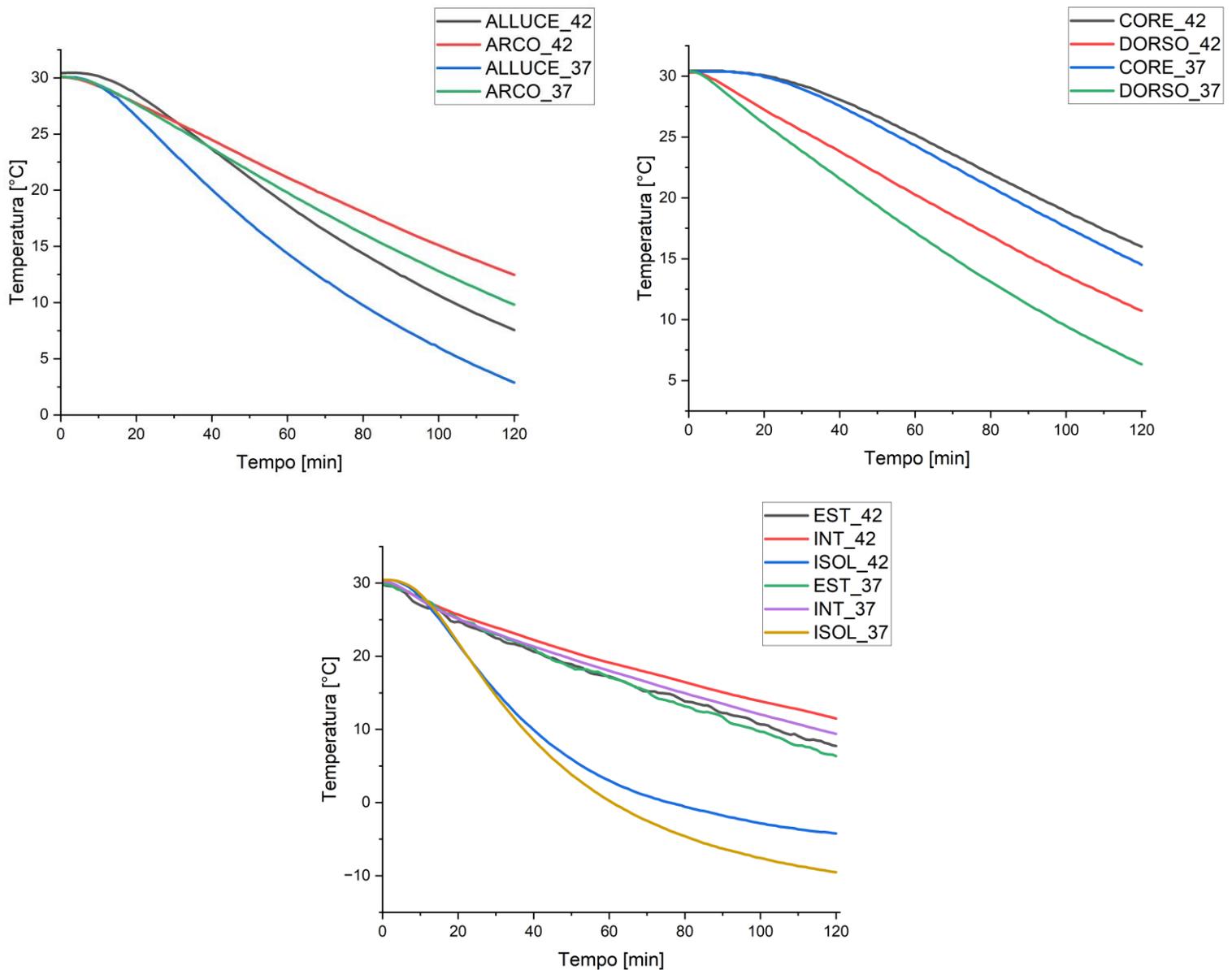


Figura 4.13: Confronto delle temperature dei sensori tra il numero 42 e 37

Per quanto riguarda la parte alta dello scarpone (numeri 1-6) le tre zone frontali 1, 2 e 6 si confermano essere le più fredde. Di nuovo la spiegazione potrebbe essere la maggior vicinanza al terreno e dal maggior isolamento termico dello scafo in punta. Anche per la suola il trend osservato con il numero 42 si ripete, con la base (7) che si conferma la zona più calda del battistrada e il Tacco (8) quella più fredda. In mezzo a questi due stremi si posizionano le temperature delle altre zone della suola.

Confrontando infine questi valori con quelli ottenuti dal Phantom 6000 numero 42, si osserva come le temperature del 37 di tutte le zone osservate risultino di circa 1°C più fredde rispetto alle equivalenti zone osservate con il numero 42. Questo comportamento sembrerebbe non essere coerente con quello visto in precedenza con il Phantom Tech.

	T_media (°C)
Frontale (1)	-12.481
Front_interno (2)	-10.829
Cent_interno (3)	-9.33
Dorso (4a)	-8.858
Dorso (4b)	-8.544
Cent_esterno (5)	-7.996
Front_esterno (6)	-11.031
Base (7)	-10.982
Tacco (8)	-14.28
Punta (9)	-13.254
Punta_centro (10)	-12.73
Tacco_centro (11)	-13.998

Tabella 4.4: Temperature dopo due ore delle zone evidenziate

4.5 Risultati per il modello Phantom 8000 numero 42

Si è infine passati allo studio del comportamento termico dell'ultima tipologia di scarpone, ovvero il Phantom 8000. Si tratta di uno scarpone doppio creato per attività di alpinismo Himalayano, ad alte quote e in condizioni di freddo estremo.

In figura 4.14 si riportano le misurazioni dei sensori interni, con relative derivate prime. Escludendo l'isolante, l'alluce si conferma come il sensore che maggiormente si raffredda e il core come quello

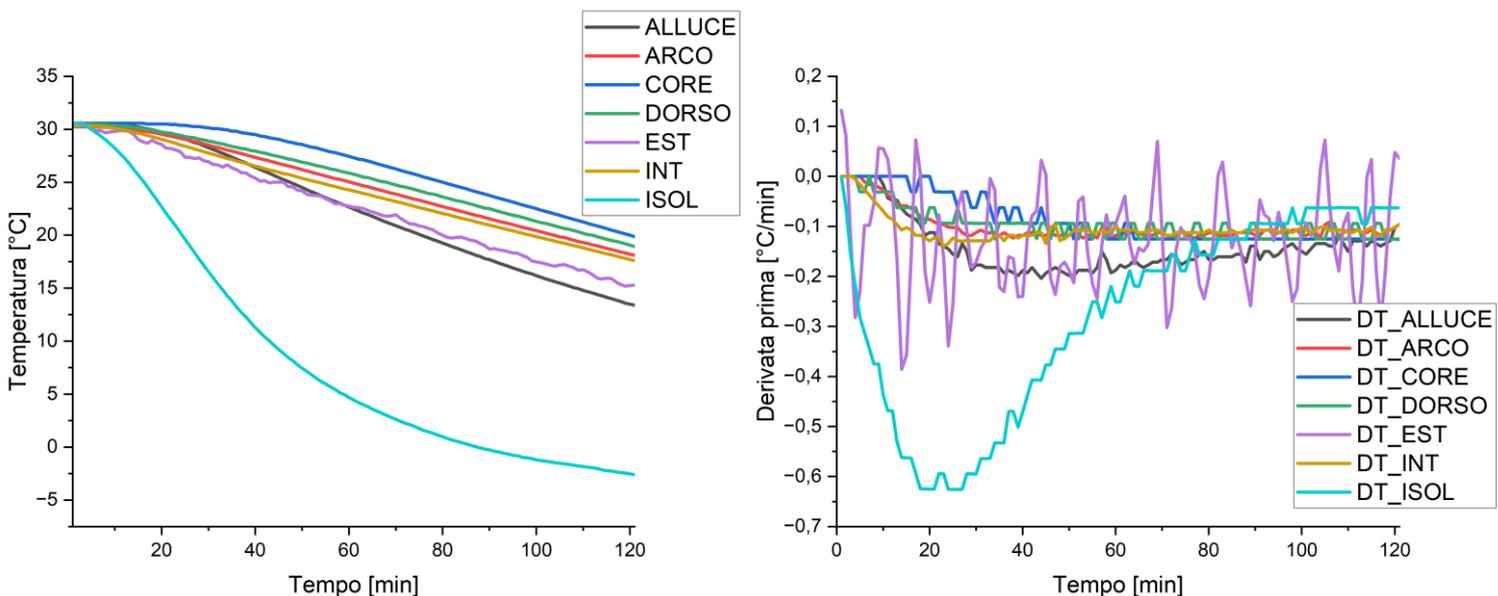


Figura 4.14: Grafici dell'andamento della temperatura in funzione del tempo con relative derivate prime

maggiormente isolato. L'arco, tuttavia, che generalmente risultava il secondo sensore in ordine decrescente di temperatura, in questo test cede il posto al dorso (seppur la differenza finale è di meno di 1 °C) e si posiziona come terzo, seguito dal sensore interno ed infine esterno.

Da notare come la tenuta della temperatura sia eccezionale, l'alluce, che pur rappresenta il sensore peggiore da questo punto di vista, dopo 2 ore in camera climatica a -17°C mantiene ancora la temperatura di 13°C a differenza del Phantom 6000 nel quale si fermava a 7.5°C o del Phantom Tech che addirittura scendeva sotto gli 0°C. Le differenze di temperature tra i vari sensori interni al termine del test sono inoltre inferiori rispetto alle altre due topologie di scarponi: si passa dai 19.9 del core ai 13.4 dell'alluce con un ΔT totale di 6.5°C minori dei 7.5°C del Phantom 6000 e dei 13°C del Phantom Tech.

In figura 4.15 sono presenti le immagini termografiche del Phantom 8000 e in Tabella 4.5 le temperature estrapolate delle zone evidenziate. Per quanto riguarda la parte superiore (numeri 1-6), sebbene la conformazione di questo scarponne si differenzia rispetto agli altri, si è cercato di mettere in evidenza le stesse aree viste in precedenza. Per le zone della suola (7-11) questo non è stato possibile poiché la struttura stessa del battistrada del Phantom 8000 è strutturalmente diversa. La geometria

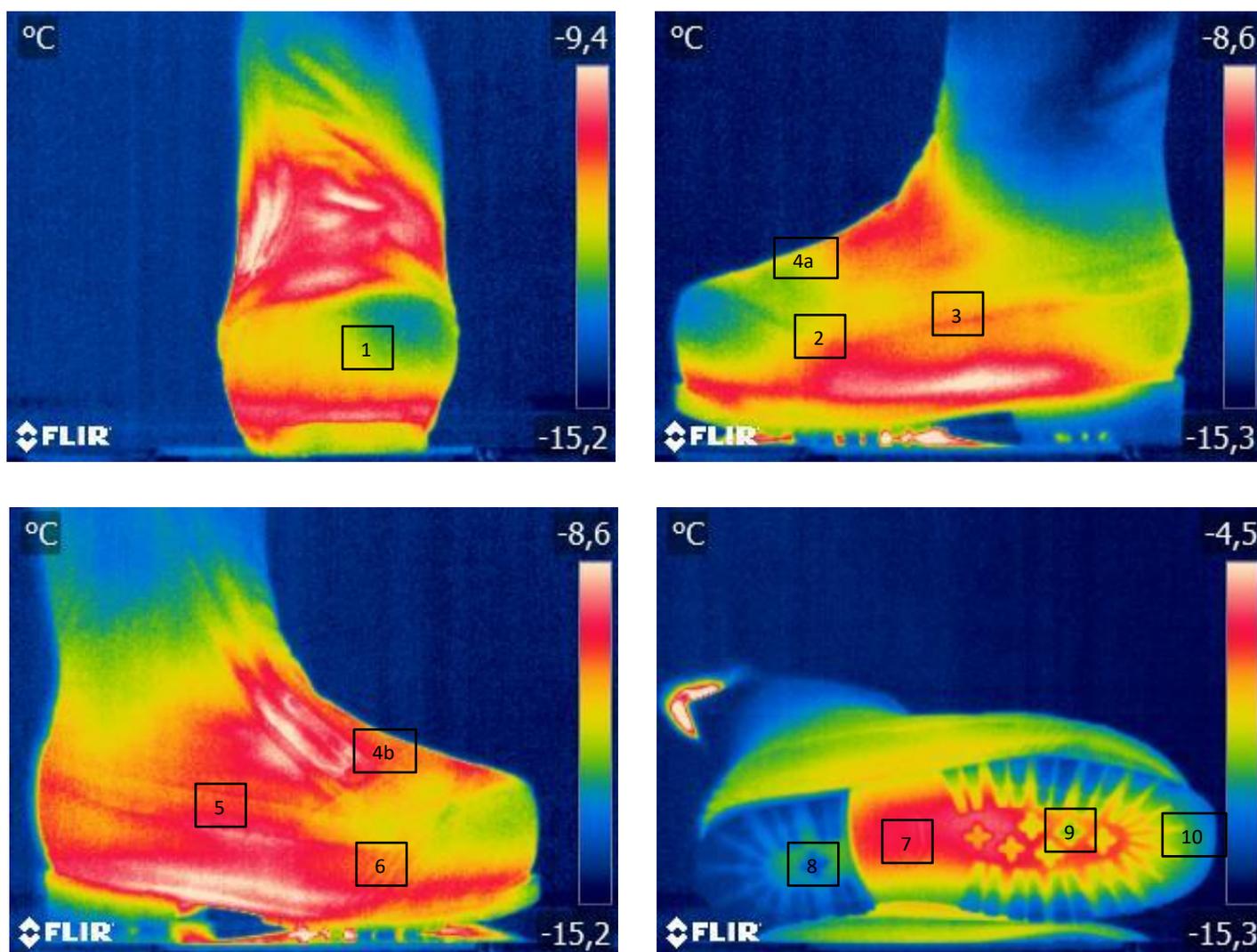


Figura 4.15: Immagini termografiche dopo 2 ore di acclimatazione in camera

	T_med (°C)
Frontale (1)	-12.482
Front_interno (2)	-11.353
Cent_interno (3)	-11.159
Dorso (4a)	-11.797
Dorso (4b)	-10.508
Cent_esterno (5)	-10.234
Front_esterno (6)	-10.787
Base (7)	-6.801
Tacco (8)	-12.916
Punta_centro(9)	-9.942
Punta(10)	-11.787

Tabella 4.5: Temperature dopo due ore delle zone evidenziate

differenti dei tacchetti, unita ad una diversa disposizione degli stessi, non permetterebbe un adeguato confronto con gli scarponi precedentemente analizzati. Si sono comunque evidenziate delle zone che potessero fornire un quadro completo delle temperature della suola dello scarpono. Più nello specifico ci si è focalizzati su 4 aree, 3 relative ai tacchetti (Tacco (8), Punta_centro (9) e Punta (10)) e una relativa, come nei casi precedenti, ad una zona che fosse posizionata centralmente e anch'essa non a contatto diretto con la piastra sottostante, denominata appunto Base (7).

I risultati riportati in Tabella 4.5 relativi alla parte superiore dello scarpono (1-6) mostrano come le temperature esterne siano inferiori a quelle dei precedenti scarponi. Si passa dai -12.5°C circa della zona Frontale ai -10.2°C della zona centrale esterno a differenza del Phantom 6000 in cui l'intervallo di temperatura si attestava tra i -7°C e i -11°C. Ancora una volta parrebbe confermata l'ipotesi che una minor temperatura esterna misurata sia correlata ad un maggior isolamento. Quello che non sembrerebbe riconfermarsi nel caso del Phantom 8000 è la minor temperatura delle zone frontali dello scarpono. Sebbene la zona 1 risulti effettivamente la più fredda, questo non si può dire delle zone 2 e 6. C'è anche da sottolineare, tuttavia, che la differenza delle temperature tra le varie aree della parte superiore dello scarpono, è davvero minima (~2°C).

Passando adesso all'analisi della suola, la Base (7) si attesta a temperature più alte rispetto a qualsiasi altra zona, così come nei casi precedenti. La zona tacco (8) raggiunge invece la temperatura più bassa; si tratta di un tacchetto che evidentemente entra in contatto con la piastra di rame con un'ampia zona della sua area superficiale, a differenza di quello che avviene con la Punta centrale (9) dove la temperatura misurata è molto più alta. È probabile che quest'ultimo tacchetto, da una parte non vada completamente a toccare il terreno e dall'altra, trovandosi circondato da un'area molto più calda, dovuta al non contatto con la piastra, tenda a mantenere una temperatura più alta. Infine, la punta (10) si mantiene ad una temperatura intermedia tra queste due ultime aree analizzate.

4.6 Risultati per il modello Phantom 8000 numero 38

Così come già fatto per le altre due tipologie di scarponi, si è deciso anche per il Phantom 8000 di testare una taglia più piccola, in questo caso il numero 38. I risultati dei sensori interni sono riportati in figura 4.16.

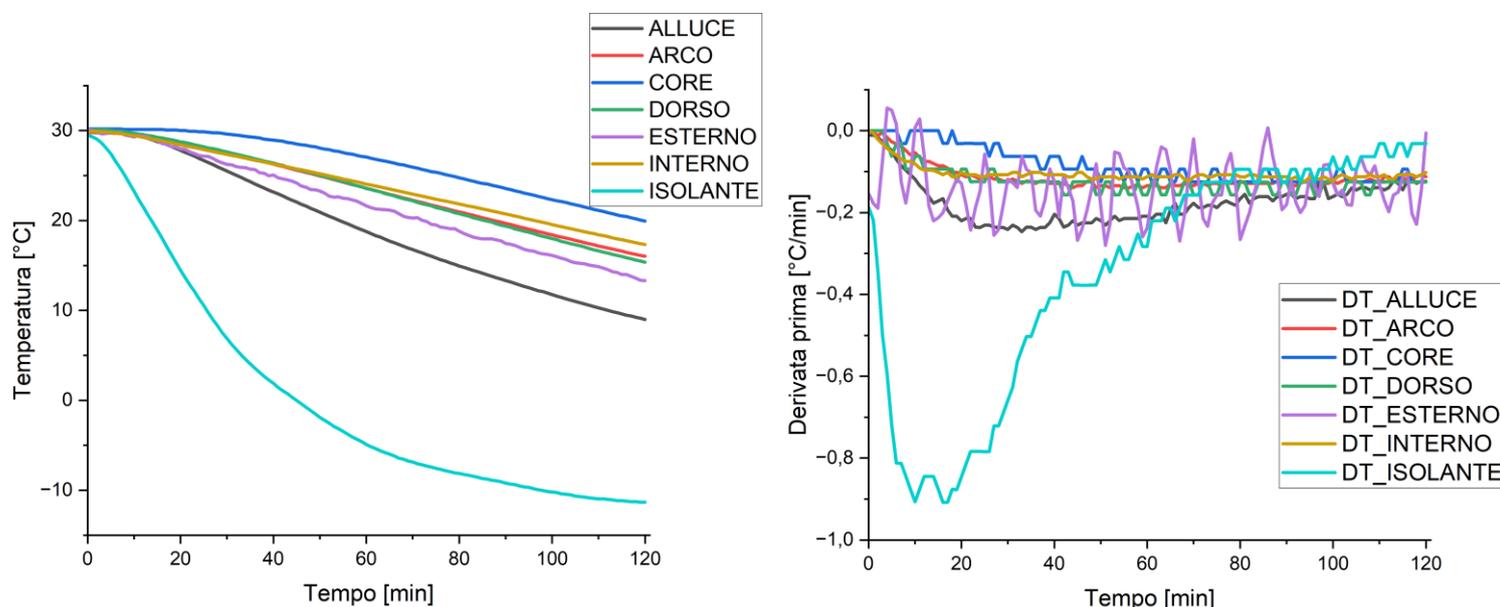


Figura 4.16: Grafici dell'andamento della temperatura in funzione del tempo con relative derivate prime

Gli andamenti delle temperature rimarcano quello che si è osservato nel caso del Phantom 8000 numero 42: l'alluce rimane il sensore più freddo, mentre il core quello più caldo. Anche in questo caso l'arco, che notoriamente si posiziona come secondo sensore più caldo, cede il posto al sensore "interno" e si piazza in terza posizione quasi sovrapponendosi con il dorso.

In figura 4.17 sono invece riportati i confronti diretti tra gli stessi sensori posizionati nei due numeri dello scarpone. La tendenza che si osserva è di una temperatura interna minore nel caso del numero 38 rispetto che il numero 42. Questa differenza è molto marcata per quanto riguarda i sensori relativi all'alluce ($>4^{\circ}\text{C}$), arco ($>2^{\circ}\text{C}$) e dorso ($>3.5^{\circ}\text{C}$), mentre risulta minima nel caso sensore esterno e addirittura nulla nel caso dell'interno e del core. Come al solito le motivazioni riguardo le differenze di temperature vanno ricercate nella minor quantità di sferette di acciaio presenti nel corpo centrale dello scarpone unita al maggior rapporto area/volume dovuto alla taglia più piccola dello scarpone. La sovrapposizione così netta di alcune curve invece rappresenta una novità. Ricordiamo tuttavia che il core e l'interno (così come il dorso e l'esterno) sono sensori la cui posizione di volta in volta può variare leggermente a causa della difficoltà del posizionamento degli stessi all'interno dello scarpone e questo può sicuramente influenzare il risultato finale.

Infine, in Tabella 4.6 sono presenti le temperature estrapolate dalle termografie dopo due ore in camera climatica delle zone evidenziate, che coincidono con quelle già precedentemente descritte per il Phantom 8000 numero 42 (vedi Figura 4.15).

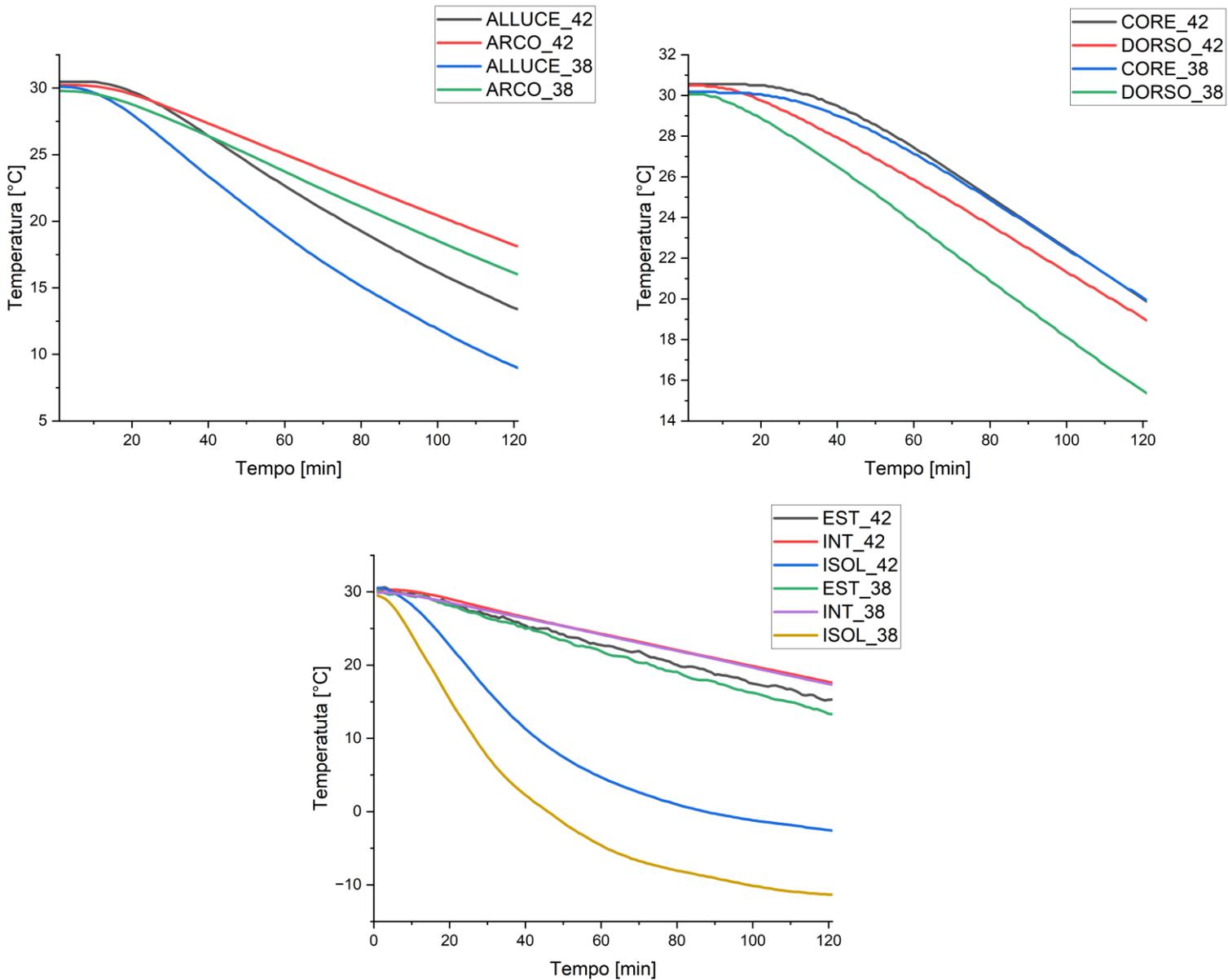


Figura 4.17: Confronto delle temperature dei sensori tra il numero 42 e 38

Le temperature delle zone superiori (1-6) oscillano da -9.2°C a -10.8°C cioè circa $1/1.5^{\circ}\text{C}$ in più rispetto numero 42. Le zone frontali hanno valori di temperatura minori rispetto alle altre parti analizzate, ma ad ogni modo la differenza tra le varie zone è comunque minima ($<2^{\circ}\text{C}$).

Per quanto riguarda le aree della suola (7-10) si ripete la tendenza vista anche con il numero 42 che vuole la base (7) come zona più calda, essendo non in contatto diretto con la piastra, seguita dalla Punta centrale (9), circondata da zone calde che non toccano il terreno più un probabile contatto col la piastra che non coinvolge tutta la superficie del tacchetto. La zona più fredda continua ad essere il tacco (8) che evidentemente ha una superficie di contatto più ampia rispetto a tutte le altre zone, mentre la Punta (10) si posiziona di nuovo a temperature intermedie. Anche per la suola del Phantom 8000 numero 38 le temperature risultano essere maggiori di circa 1 grado rispetto a quelle del numero 42.

	T_med (°C)
Frontale (1)	-10.856
Front_interno (2)	-10.182
Cent_interno (3)	-9.25
Dorso (4a)	-9.901
Dorso (4b)	-9.599
Cent_esterno (5)	-9.381
Front_esterno (6)	-9.181
Base (7)	-7.156
Tacco (8)	-12.416
Punta_centro(9)	-10.318
Punta(10)	-10.476

Tabella 4.6: Temperature dopo due ore delle zone evidenziate

4.7 Conclusioni

La prima serie di test ha portato al confronto delle temperature interne ed esterne di una serie di aree di nostro interesse, relative a tre tipologie di scarponi per l'alpinismo: il Phantom Tech, il Phantom 6000 e il Phantom 8000. I risultati appena discussi possono risultare talvolta contraddittori, per cui si è deciso di fare un *recap* cercando di tirare le somme circa le conclusioni a cui si è giunti. In generale quello che si è osservato può essere racchiuso in una serie di considerazioni di carattere più o meno generale che verranno discusse qui di seguito:

- L'analisi delle temperature dei sensori interni (escludendo l'isolante) relativi agli scarponi Phantom Tech e Phantom 6000 ha evidenziato come sia la zona dell'alluce quella che si raffredda maggiormente. Si tratta di una zona a diretto contatto con la soletta che a sua volta è a contatto con la zeppa/battistrada e con la piastra di rame e attraverso la quale si ha un forte scambio di calore, che tende quindi a raffreddare maggiormente l'alluce. Il sensore più caldo è quello posizionato nel core, che essendo al centro delle sferette risulta di conseguenza il più isolato. Al secondo posto si trova l'arco. Questo sensore, sebbene si trovi a contatto diretto con la soletta dello scafo, come nel caso dell'alluce, è collocato in un ambiente molto diverso da quest'ultimo. Infatti, l'arco si trova quasi in concomitanza della zona della suola definita "Base" la quale non entra mai in contatto diretto con la piastra, ma rimane sollevata, di conseguenza sarà solo lo scambio termico con l'aria (che ha scarse proprietà termiche) ad asportare il calore, generando un miglior isolamento termico di questa area, che si riflette poi sull'arco. Inoltre, la base trovandosi in una posizione centrale della suola dello scarponi, rimane maggiormente riparata rispetto ad esempio alla punta, permettendo così un maggior ristagno di aria calda proveniente dall'interno, che aiuta il mantenimento della temperatura.

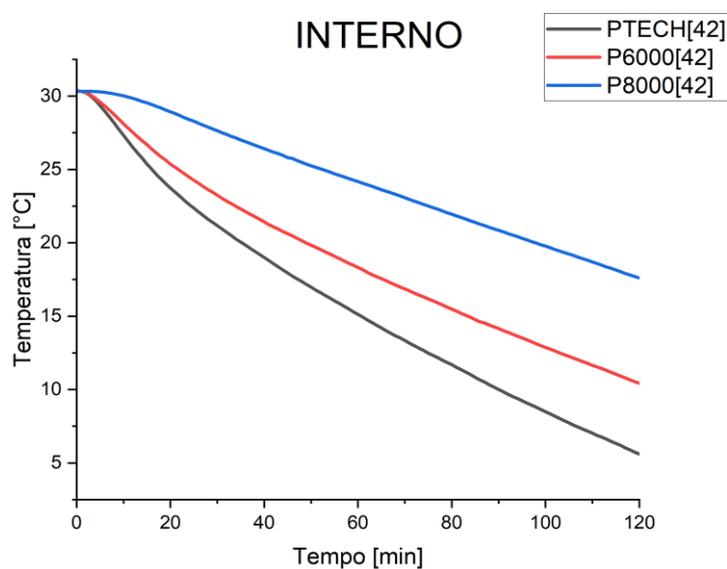
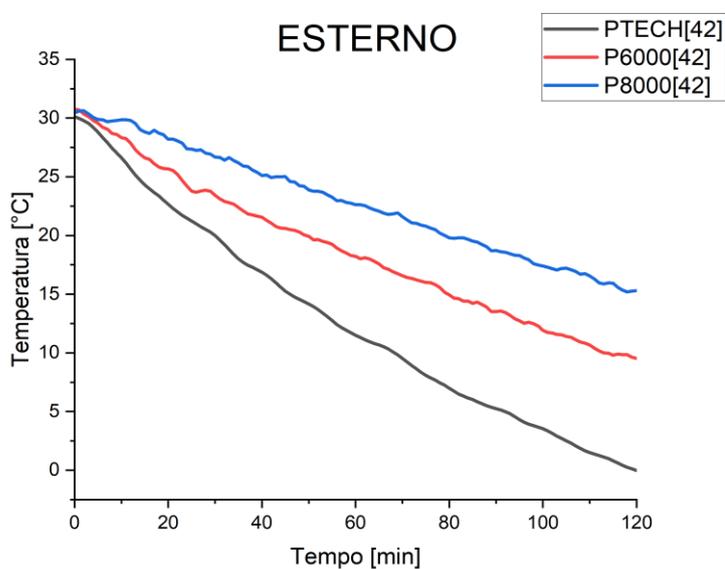
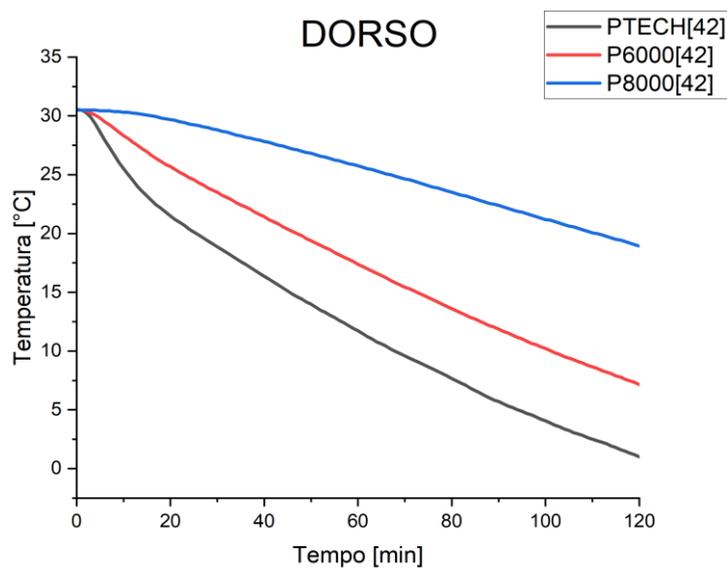
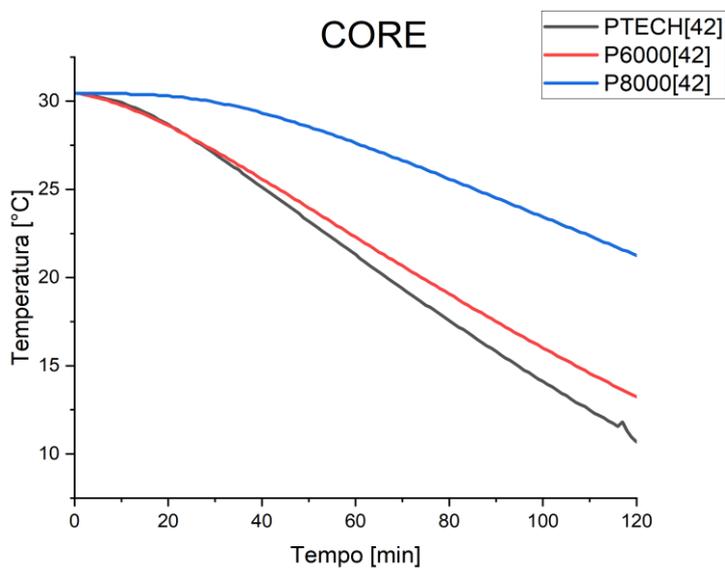
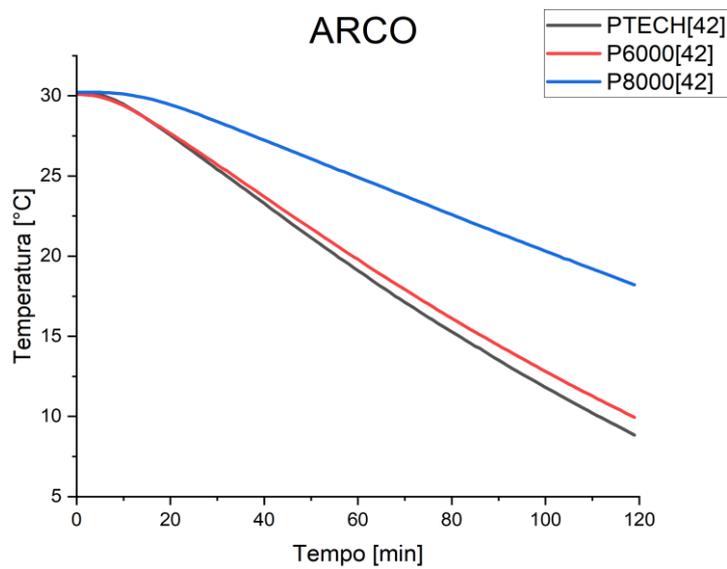
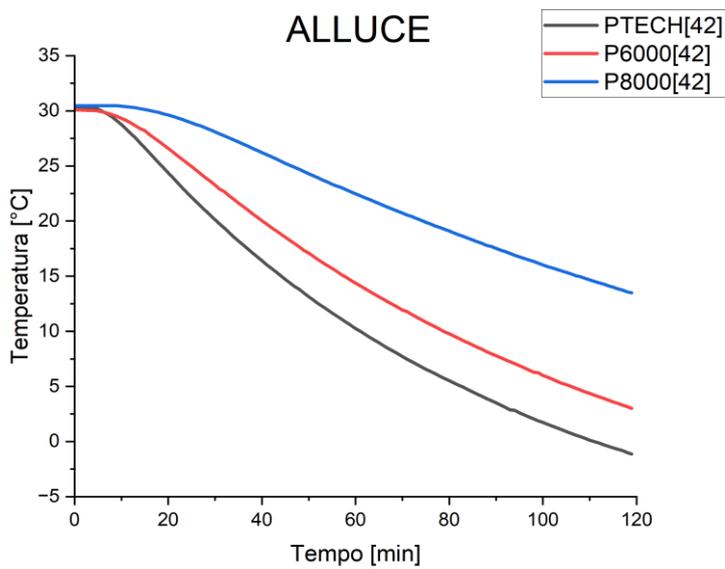


Figura 4.18: Confronto tra sensori posti nei tre diversi scarponi

Infine, per quel che concerne gli altri sensori (interno, esterno, dorso) hanno generalmente temperature intermedie. Non vi è tuttavia un pattern ricorrente e questo è dovuto alla difficoltà da parte dell'operatore di riuscire a disporre i sensori di volta in volta, nello stesso identico posto. L'inserimento dei sensori è infatti un lavoro delicato poiché si lavora senza vedere dove essi siano effettivamente posizionati, ma ci si affida semplicemente a dei punti di riferimento. Risulta perciò improbabile che da un test all'altro ciascun sensore venga posizionato esattamente nella stessa posizione, di conseguenza si osserva una certa variabilità dei dati.

- Nel caso del Phantom 8000 l'alluce e il core si comportano in modo analogo a quanto visto con gli altri due scarponi, ovvero risultano essere rispettivamente il sensore più freddo e quello più caldo. L'arco invece tende raffreddarsi più rapidamente, rispetto agli altri sensori. La struttura della suola del Phantom 8000 è molto diversa da quella degli altri due scarponi; la zona dell'arco potrebbe non coincidere più con la zona della Base, portando così ad un isolamento minore, rispetto ad altri sensori interni.
- In ogni caso il phantom 8000 si dimostra avere un'eccellente tenuta di temperatura rispetto al phantom 6000 il quale risulta a sua volta più isolante del Phantom Tech (Figura 4.18). La differenza di temperatura tra sensori interni inoltre è molto più contenuta nel Phantom 8000. Per quest'ultimo il ΔT al termine del test tra il sensore più freddo alluce (13.4°C) ed il sensore più caldo core (19.9°C) è di appena 6.5 °C. Nel caso del Phantom 6000 si passa dai 7.5°C dell'alluce ai 16°C del core con una differenza di temperatura di 8.5°C. Per il Phantom Tech invece si ha una differenza tra alluce (circa - 1°C) e core (12°C) di addirittura 13°C. Oltre alla differenza in termini assoluti delle tre tipologie di scarpone anche l'uniformità della temperatura all'interno rimane più contenuta man mano che aumenta l'isolamento termico.
- Per quanto riguarda la temperatura delle zone esterne estrapolate dalle immagini termografiche della parte superiore dello scarpone (corrispondente alla ghetta/scafo) si osserva, per quel che riguarda il Phantom Tech e il Phantom 6000, come le zone maggiormente sensibili alla diminuzione di temperatura siano quelle Frontali. Esse oltre ad essere maggiormente vicine alla suola, hanno anche il vantaggio che la parte della punta risulta essere maggiormente isolata termicamente, grazie alla presenza di un rivestimento più spesso, il che si traduce in una minor temperatura superficiale. Per quanto riguarda la suola la zona a maggior temperatura coincide con la "Base", che non toccando direttamente la piastra di rame tende a raffreddarsi molto più lentamente. La zona denominata "Tacco" è invece l'area più fredda al termine della prova e questo è dovuto in parte al fatto che questo tacchetto entra effettivamente in contatto con il terreno, in più presenta una superficie piana il che permette un'area di contatto maggiore rispetto agli altri tacchetti che hanno una geometria più complessa e che per questo motivo si posizionano a temperature intermedie tra questi due stremi.
- Anche in questo frangente il Phantom 8000 si discosta leggermente dal comportamento visto dagli altri due scarponi. Sebbene infatti il comportamento termico della suola sia analogo a quello osservato nei casi precedenti (con la Base a temperature maggiori, tacchetto del tacco a temperature minori e le restanti zone a temperature intermedie), per quanto riguarda la parte della ghetta/scafo la situazione è leggermente differente: solo alcune zone frontali risultano effettivamente più fredde rispetto alle altre. Vi è anche da considerare come i ΔT tra le zone evidenziate sulla superficie sia molto contenuto ($\sim 2^\circ\text{C}$).
- Confrontando i risultati delle temperature esterne si è notato come il Phantom 8000 raggiunga le temperature più basse, seguito dal Phantom 6000 ed infine dal Phantom Tech. Sarebbe esserci una correlazione che vede la temperatura esterna raggiunta al termine dei test inversamente proporzionale all'isolamento termico. La temperatura esterna è influenzata da

due fattori: il primo dovuto al condizionamento dello scarpone in stufa (che è uguale in ogni test), il secondo del calore interno che si trasferisce attraverso le pareti dello scarpone stesso e raggiunge la superficie esterna, disperdendosi nell'ambiente; ne consegue che una temperatura esterna minore può essere dovuta o al fatto che tutto il sistema si è raffreddato maggiormente, ma sappiamo non essere così dato che i sensori di temperatura posti all'interno forniscono dati opposti, o al fatto che l'isolamento maggiore porta ad una minore dispersione di calore dall'interno verso l'esterno.

- Analizzando le temperature delle due taglie di ciascuno scarpone (numero 42 e 38 per il Phantom Tech, numero 42 e 37 per il Phantom 6000 e 42 e 38 per il Phantom 8000) si è osservato come in tutti i casi le taglie minori si attestano a temperature minori. Il rapporto tra la superficie (che rappresenta la zona in cui avvengono gli scambi termici con l'esterno) e il volume nel caso degli scarponi numero 37/38 è maggiore rispetto al 42 e questo potrebbe spiegare il diverso grado di isolamento. Un altro fattore che sicuramente influenza il risultato è costituito dal fatto che le sferette di acciaio inserite nel numero 42 si dispongono riempiendo bene tutto lo scafo, mentre nel caso dei numeri 37/38 il riempimento non solo è sufficiente ad occupare tutto lo scafo, ma risale parzialmente anche nella zona del gambetto. Il risultato è che nei numeri 37/ 38 un minor numero di sferette è presente nella parte centrale dello scafo apportando un minor contributo energetico al sistema.
- Analizzando invece tra temperature esterne estrapolate tramite termocamera tra le due taglie di ciascuno scarpone, si osserva come nel caso del Phantom Tech le temperature siano più alte di circa 1 °C per la taglia più piccola, mentre per il Phantom 6000 e 8000 la tendenza è l'opposto. Ci si aspetterebbe che il comportamento delle temperature esterne fosse in linea con il comportamento di quelle misurate internamente (che vede la taglia più piccola raffreddarsi più velocemente), ma questo non è vero per il Phantom Tech, mentre rimane valido per gli altri due scarponi.

5.

Test con differenti tipi di riempimenti interni dello scarpone

Una volta terminati i test in cui ci si è concentrati sul confronto delle tre tipologie di scarponi si è deciso di testare il Phantom Tech variando la tipologia di riempimento utilizzato all'interno dello scarpone. Si sono quindi sostituite le sferette, con il riso e con l'acqua. L'idea è quella di valutare il diverso comportamento dello scarpone, al variare della temperatura, cambiando le proprietà termiche del riempimento. In questo caso per ciascun riempimento sono state eseguite due misurazioni, in modo tale da poter comprendere l'effettiva ripetibilità dell'esperimento.

La grandezza fisica che viene utilizzata per descrivere la propagazione di un campo termico all'interno di un materiale in condizioni non stazionarie è la **diffusività termica (α)**. Essa viene definita tramite l'equazione:

$$\alpha = \frac{k}{C_p * \rho}$$

(5 . 1)

Dove:

k = conducibilità termica [W/(m K)]

C_p = calore specifico [J/(kg K)]

ρ = densità [kg/m³]

La diffusività termica dipende esclusivamente da parametri intrinseci del corpo in esame e di conseguenza varia da materiale a materiale. Viene misurata nel SI in [m²/s].

In condizioni non stazionarie, affinché il calore venga efficacemente disperso, non è sufficiente che il corpo abbia un'alta conducibilità termica, ma viene richiesta anche una bassa densità ed un basso calore specifico. Maggiore è la densità, infatti, maggiormente le molecole tenderanno ad essere impacchettate e il sistema sarà composto da un numero più elevato di molecole in grado di immagazzinare calore a parità di volume. Analogamente un materiale con un alto calore specifico tenderà ad immagazzinare al suo interno una maggior quantità di calore, rendendo più difficile la sua diffusione.

La diffusività termica è quindi capace di dare informazioni su quanto un materiale sia più o meno rapido nel diffondere il calore. Materiali con elevata diffusività termica hanno elevata capacità di condurre il calore e scarsa capacità di immagazzinarlo; quindi, risponderanno rapidamente alle variazioni di temperatura esterna, o in altri termini hanno una bassa inerzia termica. Viceversa, materiali con bassa

diffusività termica hanno scarsa capacità di condurre il calore ed elevata capacità di immagazzinarlo, dimostrando elevata inerzia termica e rispondendo lentamente alle variazioni di temperatura esterne.

In tabella 5.1 sono riportati i valori di diffusività termica di alcuni materiali e sostanze di interesse tecnologico.

Metalli		
Oro	127 x 10 ⁻⁶	m ² /s
Acciaio	4 x 10 ⁻⁶	m ² /s
Alluminio	97 x 10 ⁻⁶	m ² /s
Solidi non metallici		
Legno	20 ÷ 30 x 10 ⁻⁶	m ² /s
Calcestruzzo	0,75 x 10 ⁻⁶	m ² /s
Mattoni	0,52 x 10 ⁻⁶	m ² /s
Vetro	0,34 x 10 ⁻⁶	m ² /s
Legno (quercia)	0,13 x 10 ⁻⁶	m ² /s
Aria		
	22,4 x 10 ⁻⁶	m ² /s
Acqua		
liquido	0,14 x 10 ⁻⁶	m ² /s
solido	1,2 x 10 ⁻⁶	m ² /s

Tabella 5.1: Diffusività termica di alcuni materiali e sostanze

Per quanto riguarda il nostro test, il riempimento con le sfere di acciaio e con il riso può essere assimilabile ad un sistema composito. L'acciaio e il riso, infatti, non occupano in maniera uniforme tutto il volume disponibile, ma parte di esso sarà occupato dall'aria. Per valutare il valore reale della diffusività termica sarà dunque necessario applicare un'equazione in grado di tener conto di questi fattori. Si è pensato di utilizzare il modello di Voigt, la cui equazione è la seguente:

$$\alpha = \alpha_1 \times V_1 + \alpha_2 \times V_2$$

Dove:

(5.2)

α_1 e α_2 sono rispettivamente i valori di diffusività termica della fase 1 e della fase 2

V_1 e V_2 sono le frazioni volumetriche delle due fasi.

Per quanto riguarda l'acqua, il valore è stato ottenuto considerando il volume interamente occupato da essa. In tabella 5.2 vengono riportati i valori delle diverse grandezze richieste

	k [W/(m K)]	ρ [kg/m ³]	C_p [J/(kg K)]	α [m ² /s]
Acciaio AISI 304	15	7900	500	3.80E-06
Aria	0.026	1.2	1005	2.16E-05
Riso	0.085	1500	1620	3.50E-08
Acqua	0.56	1000	4187	1.34E-07

Tabella 5.2: Valori di conducibilità, densità e calore specifico dei differenti materiali costituenti il riempimento

La frazione del volume occupata dall'acciaio e dal riso è stata calcolata partendo dalla massa dei due materiali (rispettivamente 4 kg e 0.79 kg) e dividendola per il volume del recipiente (0.86 L): il risultato fornisce la densità del sistema acciaio/aria e riso/aria. Dividendo entrambi i sistemi con le densità dei rispettivi due materiali puri si ottiene la frazione di volume dell'acciaio e del riso. Essa risulta essere pari a 0.59, per quanto riguarda l'acciaio, (con una frazione volumetrica dell'aria di 0.42). Analogamente per il riso si è trovata una frazione volumetrica pari a 0.612 e di 0.388 per l'aria.

Nella tabella 5.3 vengono riportati i risultati delle diffusività termiche dei tre diversi sistemi, calcolate applicando l'equazione del modello di Voigt descritta precedentemente

$\alpha_{\text{acc/aria}}$	$\alpha_{\text{riso/aria}}$	α_{acqua}
1.13E-05	8.40E-06	1.34E-07

Tabella 5.3: valori di diffusività termica dei 3 riempimenti

I sistemi composti da acciaio/aria e riso/aria hanno un valore di diffusività termica simile, ci si aspetta dunque un profilo di temperatura all'interno del riempimento dello scarpone non troppo differente nei due casi. Viceversa, per quanto riguarda l'acqua, si ha quasi un ordine di grandezza in meno, di conseguenza quello che ci si può attendere sono dei risultati che differiscano dai precedenti.

Tuttavia, pur avendo l'acqua una minore diffusività termica rispetto ad acciaio e riso, dobbiamo tenere conto che è in fase liquida, mentre riso ed acciaio sono allo stato solido. È utile a questo punto introdurre il numero di Prandtl:

$$Pr = \frac{\nu}{\alpha} \quad (5.3)$$

Dove:

- ν è definita come diffusività cinematica [m^2/s] ed è il rapporto tra la viscosità e la densità del materiale
- α è la diffusività termica [m^2/s]

Il numero di Prandtl è un numero adimensionale che esprime il rapporto tra la diffusività del momento di quantità di moto (o diffusività cinematica) e la diffusività termica. Questo valore fornisce informazioni circa il meccanismo principale che regola il trasferimento di calore attraverso un mezzo. Per piccoli valori di Pr (<1), la componente di diffusione termica tenderà ad essere predominante mentre per Pr grandi (>1) tenderà ad esserlo la convezione. Per quanto riguarda l'acqua, a $18^\circ C$ possiamo considerare un valore di Pr pari a circa 7.5 e questo suggerisce che la componente convettiva del trasporto di calore in questo caso sia predominante rispetto al trasporto diffusivo per conduzione.

5.1 Test in aria con diversi riempimenti

Di seguito (Figura 5.1) vengono confrontati i risultati dei sensori di temperatura interni degli scarponi che sono stati riempiti con le tre tipologie di materiali descritte precedentemente, mantenendo inalterato le altre condizioni del test.

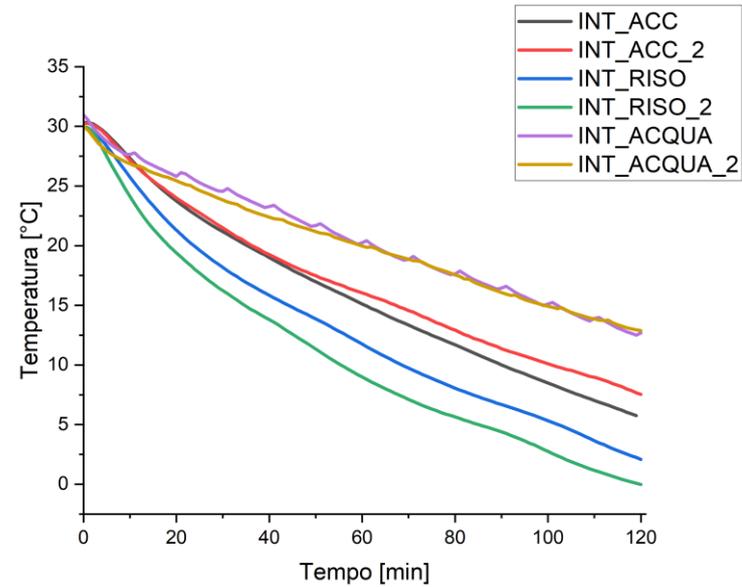
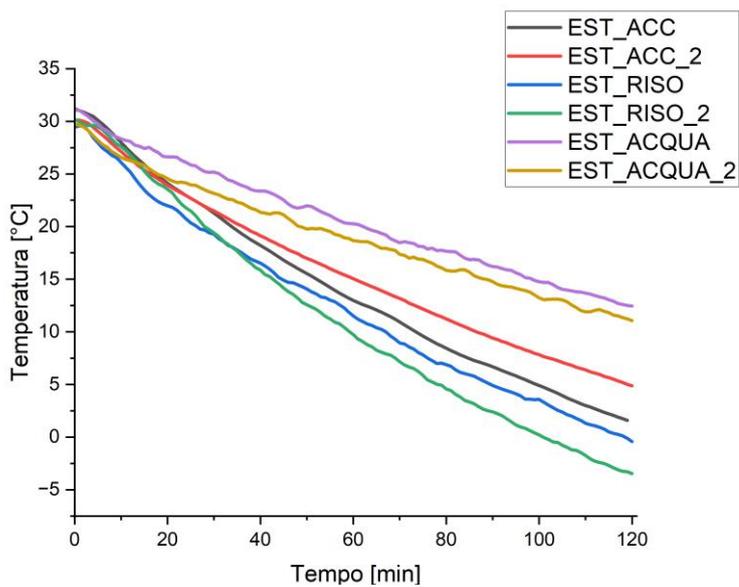
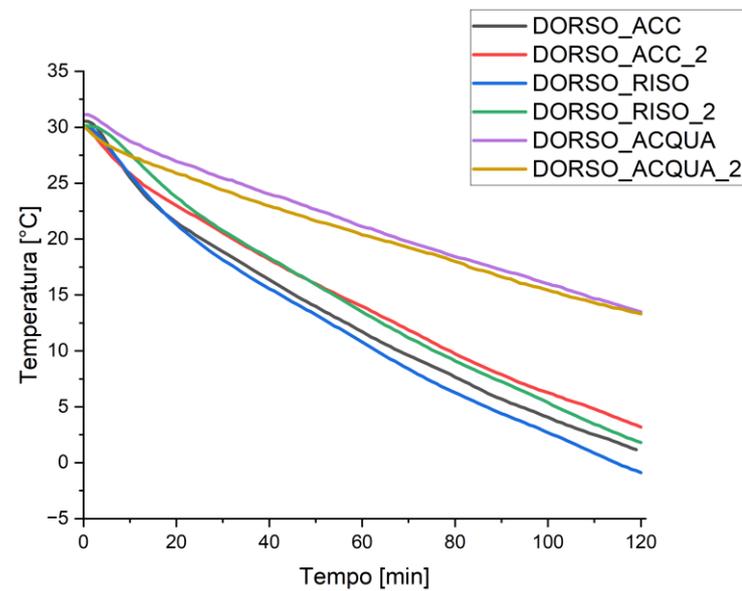
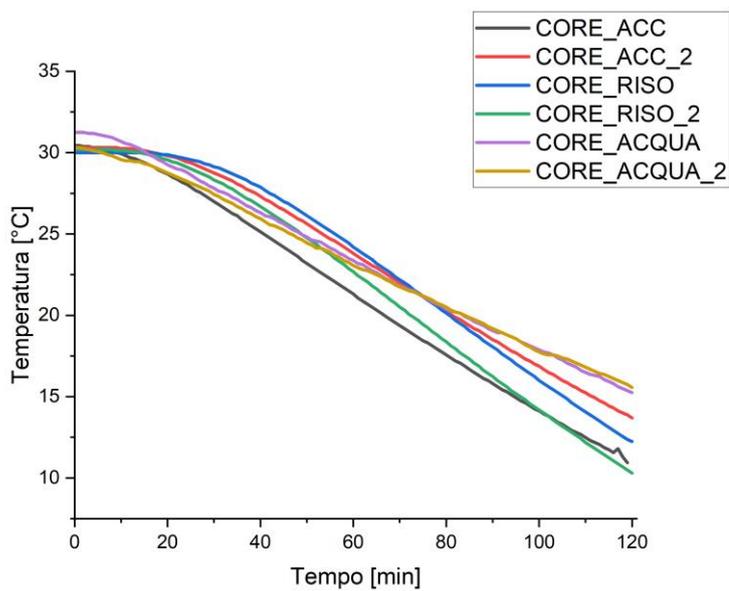
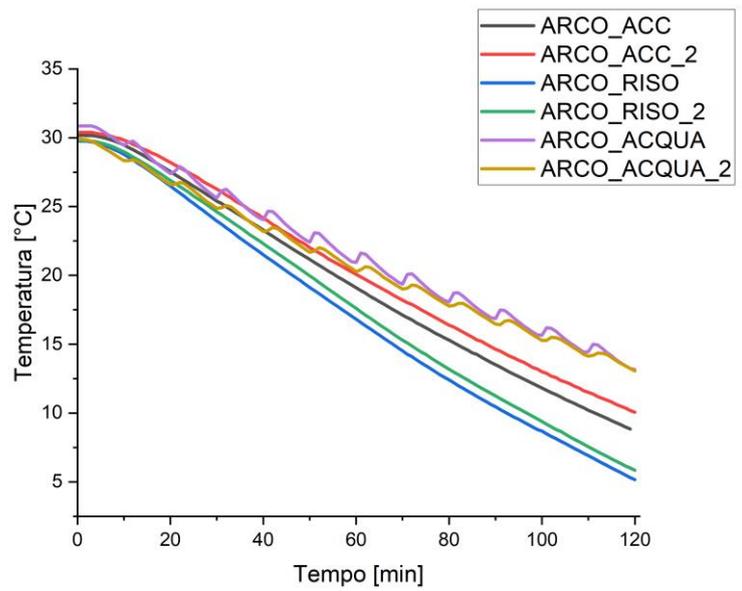
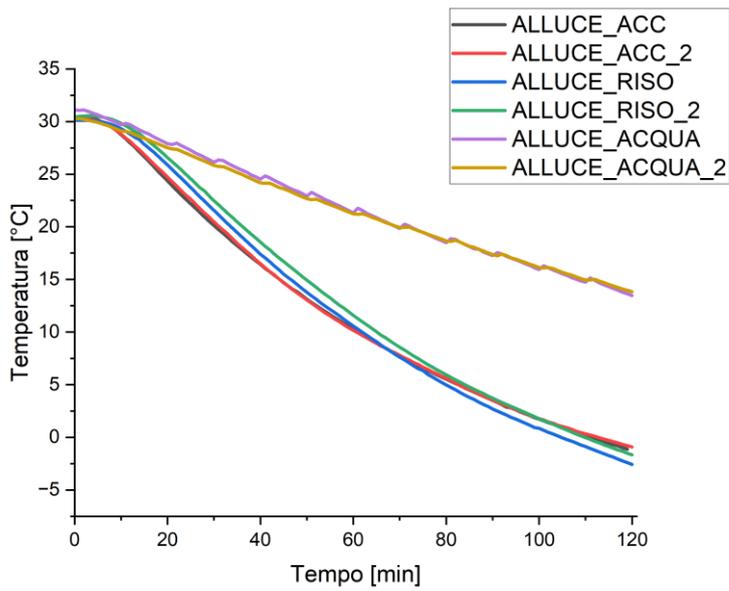


Figura 5.1: Confronto tra diversi riempimenti

Per ciascun sensore si nota come in tutte le misure effettuate utilizzando l'acqua come riempimento, i

valori di temperatura risultano essere maggiori rispetto all'acciaio e al riso. Come già accennato precedentemente i valori di diffusività termica del sistema contenente acqua sono di quasi un ordine di grandezza in meno rispetto agli altri due riempimenti e questo si riflette nella differenza dei risultati ottenuti. Si nota inoltre come l'andamento delle curve relative al riempimento con l'acqua abbiano una funzione "a gradino". Questo è dovuto al fatto che durante l'acquisizione delle termografie l'operatore è costretto a ruotare ciclicamente lo scarpone ed essendoci presente dell'acqua, questa risulta essere in grado di muoversi più facilmente rispetto ad un sistema più rigido. È probabile che durante queste operazioni i sensori, per un certo lasso di tempo (normalmente tutta l'operazione non dura più di 90 secondi) non si trovino più a diretto contatto con il liquido, ma con l'aria, interrompendo per un breve periodo lo scambio con la parete interna dello scarpone. La movimentazione dello scarpone comporta, inoltre, un mescolamento dell'acqua contenuta nel riempimento, e quindi ad una maggiore uniformità delle temperature. L'acqua contenuta nello scarpone a più diretto contatto con le pareti risulta essere più fredda di quella interna e, a seguito del mescolamento, la maggior uniformità della temperatura porta lo strato d'acqua più esterno a scaldarsi a discapito della zona più interna. Essendo i sensori ancorati alla parete interna dello scarpone questo si traduce in un incremento della temperatura da loro misurata. Inoltre, le temperature finali con l'acqua si attestano sempre tra gli 11 e i 15°C per ogni sensore, mentre negli altri due sistemi la differenza di temperatura tra i sensori è molto più marcata.

Per quanto riguarda le differenze di temperature con i riempimenti a base di riso ed acciaio, le curve sono più confuse. In alcuni casi il riempimento di acciaio mantiene temperature maggiori per tutta la durata del test (arco, interno, esterno), in altri casi le curve di acciaio e riso tendono ad intersecarsi e a mostrare una certa sovrapposizione nei valori (alluce, dorso, core). La diffusività termica dei sistemi a base di riso e acciaio è molto simile tra loro e, essendo solidi, non abbiamo la complicazione dettata dai moti convettivi e questo potrebbe essere la spiegazione del comportamento di questi ultimi sensori, anche se non spiega del tutto perché il sistema acciaio/aria sembrerebbe mantenere il calore maggiormente rispetto al riso, nei sensori arco, interno ed esterno, pur avendo un valore di diffusività termica, seppur di poco, maggiore.

La ripetibilità delle misurazioni risulta essere molto buona per ogni tipologia di riempimento per i sensori posizionati all'altezza dell'arco plantare e dell'alluce, meno per gli altri, per le motivazioni già descritte nei test precedenti. Dal Test 1 è emersa, inoltre, una certa dispersione dei dati, in caso di misure ripetute, dovuta almeno in parte, al fatto che i sensori possono trovarsi in contatto sia con una sferetta sia con l'aria presente tra di esso. Un comportamento analogo può essere attribuito anche nel caso del riempimento con il riso, poiché anche in questo frangente, il sensore potrebbe trovarsi a contatto con un chicco di riso o con l'aria presente tra di essi. Per quanto riguarda l'acqua, invece, essendo un liquido che riempie in maniera uniforme il volume a sua disposizione, non risente di questo effetto. Si nota infatti come nelle due ripetizioni in cui è presente l'acqua come riempimento i risultati siano quasi perfettamente sovrapponibili.

In tabella 5.4 sono riportate le temperature dei sensori al termine del test. Per quanto riguarda i primi due riempimenti (acciaio e riso) si nota un comportamento analogo a quello osservato nella prima serie di test. La zona dell'alluce si conferma essere la più fredda, mentre l'arco e soprattutto il core quelle meno sensibili alla diminuzione di temperatura. Gli altri sensori hanno un comportamento intermedio tra questi due estremi.

	Alluce	Arco	Core	Dorso	Est	Int
Acc_1	-1,12891	8,83447	10,93	1,179	1,59025	5,74585
Acc_2	-0,792	10,186	13,871	3,38	5,013	7,664

	Alluce	Arco	Core	Dorso	Est	Int
Riso_1	-2,41032	5,31677	12,369	-0,708	-0,12545	2,23877
Riso_2	-1,50785	6,00317	10,492	1,934	-3,29505	0,08303

	Alluce	Arco	Core	Dorso	Est	Int
Acqua_1	13,62466	13,23193	15,372	13,611	12,50661	12,49194
Acqua_2	13,9711	13,24268	15,748	13,423	11,22114	12,95313

Tabella 5.4: Temperature sensori dopo due ore in camera climatica

Per il riempimento con acqua invece la situazione è differente. Mentre il core conferma la tendenza già osservata, per l'alluce si nota come non sia affatto il sensore più freddo, ma anzi risulti il secondo più caldo in termini di temperatura, mentre, l'arco, l'interno, l'esterno e il dorso si trovano tutti a temperature inferiori. Da notare come tutti i sensori abbiano comunque una temperatura molto simile tra di loro: il ΔT è di meno di 5 °C. Questo comportamento è sicuramente legato al fatto che l'acqua, essendo un liquido, riesce ad equilibrare maggiormente la temperatura, rendendo l'ambiente più uniforme, a differenza degli altri due sistemi dove la dispersione è molto maggiore ed è di circa 10°C per l'acciaio e superiore ai 13°C nel caso del riso. Inoltre, avendo l'acqua un numero di Prandtl > di 1 sarà la componente convettiva del trasporto di calore ad essere predominante, portando così ad un rimescolamento maggiore. Da questo punto di vista è emblematico osservare, nei tre casi, la differenza di temperatura che si osserva tra il core, che rappresenta la zona più interna dello scarpone, e gli altri sensori, che invece rimangono a contatto con le pareti o la suola dello scarpone. Nel caso dell'acqua la differenza che si misura è appunto molto contenuta e non supera i 5°C, mentre è molto maggiore con gli altri due riempimenti. Il calore si trasporta più facilmente nell'acqua, pur essendo la sua diffusività termica inferiore.

	acqua_1	acqua_2	acc_1	acc_2	riso_1	riso_2
Frontale (1)	-9.046	-8.626	-8.496	-9.839	-12.042	-12.117
Front_interno (2)	-3.192	-4.176	-6.932	-9.301	-11.126	-11.036
Cent_interno (3)	-1.269	-1.938	-4.493	-6.754	-8.371	-8.222
Dorso (4a)	-2.208	-2.164	-6.1	-7.075	-9.783	-9.786
Dorso (4b)	-5.009	-5.897	-7.624	-8.769	-10.103	-10.029
Cent_esterno (5)	-0.287	-0.516	-3.43	-4.659	-6.736	-6.721
Front_esterno (6)	-3.785	-3.982	-7.846	-8.577	-10.649	-10.619
Base (7)	-3.879	-5.005	-6.451	-7.201	-7.642	-7.364
Tacco (8)	-11.522	-12.267	-12.315	-12.816	-12.464	-12.264
Punta (9)	-10.753	-10.711	-10.955	-11.734	-11.875	-11.78
Punta_centro (10)	-8.068	-8.674	-9.913	-10.229	-10.46	-10.398
Tacco_centro (11)	-10.625	-11.212	-11.44	-11.913	-11.587	-11.402

Tabella 5.5: Temperatura dopo 2 ore, delle zone esterne dello scarpone evidenziate

In tabella 5.5 sono riportate le misure delle temperature registrate tramite le termografie delle 12 zone esterne dello scarpone (evidenziate in Figura 5.2) per ciascun riempimento. Sono le stesse che sono state analizzate anche nella serie di test che hanno coinvolto le tre tipologie di scarpone. Anche in questo frangente sono riportate due misurazioni per ogni riempimento.

I numeri dall'1 al 6 si riferiscono ad aree appartenenti alla ghetta (il rivestimento più esterno del Phantom Tech); quindi, zone che non entrano a diretto contatto con la piastra di rame. I risultati ottenuti sembrano suggerire che per queste zone la temperatura esterna dello scarpone, al termine del test in camera climatica, sia maggiore per quel che riguarda il riempimento con l'acqua, seguito dal riempimento in acciaio ed infine quello con il riso. Analizzando le temperature relative al riempimento con acqua, i risultati sembrerebbero confermare il trend osservato con i sensori interni, ovvero quello di una minor tendenza al raffreddamento rispetto agli altri due sistemi. Anche per quanto riguarda gli altri due riempimenti, i risultati parrebbero confermare parzialmente il comportamento osservato coi sensori, ovvero di una diminuzione di temperatura maggiore per il riso rispetto all'acciaio. Tra queste aree si nota come in tutti e tre i riempimenti le zone con temperatura esterna maggiore sono l'area frontale (1), frontale esterna (2), frontale esterna (6) e dorso (4b). Parte della zona del dorso si trova in corrispondenza con l'inizio della zip che permette la chiusura della ghetta. La zip è costituita da un materiale metallico che tende a raffreddarsi molto più velocemente rispetto alle fibre sintetiche di cui è costituito il resto dello scarpone, motivo per cui si osserva questa riduzione della temperatura

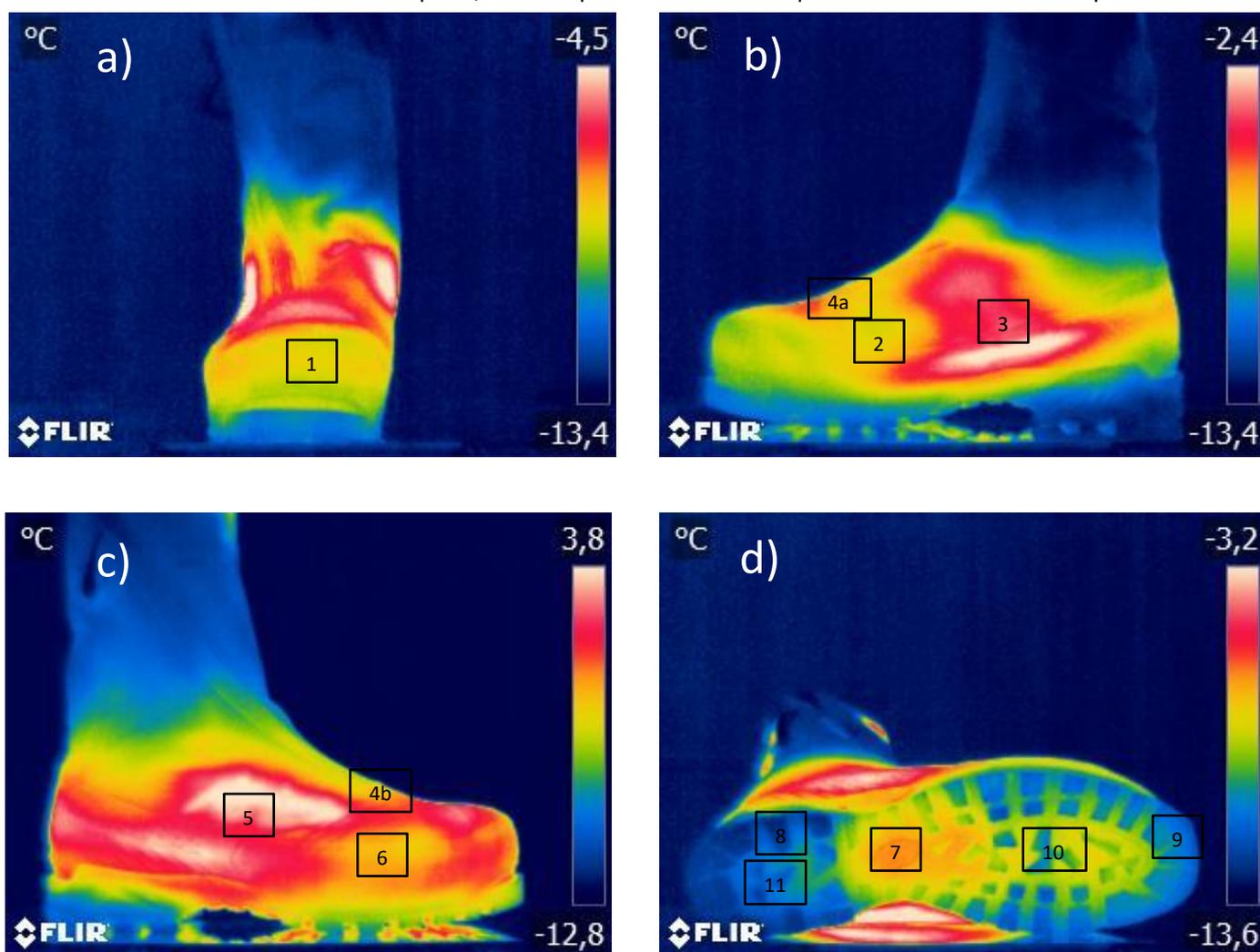


Figura 5.2: Immagini termografiche con le zone evidenziate presenti in tabella 5.5

esterna. Questa zona non è particolarmente interessante per lo studio del comportamento termico dello scarpone poiché è probabile che i risultati ottenuti siano appunto viziati dalla presenza della zip, di conseguenza non verrà ulteriormente approfondita nei test successivi. Più interessante è il caso delle altre tre zone. Nella zona dello scarpone corrispondente alla punta è infatti presente uno strato di Primaloft (un materiale sintetico a base di microfibre in poliestere) che presenta una grammatura doppia rispetto alle altre parti dello scafo. Questo spessore aggiuntivo permette un maggior isolamento della zona frontale e questo si riflette in una minor temperatura esterna. Anche la maggior vicinanza con la suola, che è la zona più fredda poiché a diretto contatto con il terreno, gioca un ruolo fondamentale per fornire una spiegazione plausibile a questi risultati. Le altre zone della parte superiore della ghetta (3, 4a, 5) si mantengono a temperature più elevate poiché lo strato isolante presente è inferiore rispetto alle zone più basse dello scarpone e la distanza con la suola è maggiore.

Le zone dal 7 all'11 sono rappresentative di aree relative alla suola. In questo caso si osserva che le differenze di temperature tra i vari riempimenti sono inferiori rispetto a quelle osservate nelle aree della ghetta, sebbene anche qui si osservi una diminuzione di temperatura minore per l'acqua, seguita rispettivamente dai sistemi a base di acciaio e riso. La suola, essendo a diretto contatto con la piastra di rame, tende a cedere molto più velocemente il calore, raffreddandosi esternamente, ma essendo meglio isolata (grazie alla presenza aggiuntiva di suola + battistrada) risente in maniera marginale delle proprietà termiche del riempimento interno. La ripetibilità delle misure riportate in Tabella 4 risulta molto buona per quel che riguarda il sistema riso/aria, con le due ripetizioni quasi perfettamente sovrapponibili. Anche l'acqua mostra una buona ripetibilità poiché, ad esclusione della zona 7, la discrepanza tra le due misurazioni si attesta al di sotto di 1 °C. Il sistema acciaio/aria fornisce la maggior dispersione di risultati, con differenze di temperature più marcate, anche superiori ai 2°C.

Infine, un breve accenno all'andamento delle temperature, durante tutti i 120 minuti del test, riguardanti le misure termografiche relative alle zone delle soles del Phantom Tech, con i diversi riempimenti. I risultati sono mostrati in Figura 5.3. Dai grafici appare evidente che la differenza del materiale utilizzato come riempimento interno dello scarpone, non si traduce in una sostanziale differenza del comportamento termico della suola, così come già osservato. Evidentemente la differenza tra la temperatura esterna ed interna dello scarpone, anche se diversa coi tre riempimenti, in aggiunta ad un buon isolamento termico della suola, non è tale da comportare particolari differenze nei tre casi analizzati.

La ripetibilità in questo caso è ottima. Anche considerando la difficoltà nell'estrapolazione di questi dati, i valori di temperatura delle curve differiscono di pochi gradi gli uni dagli altri. Essendo immagini termiche, col passare del tempo in camera, soprattutto per quanto riguarda la suola, le temperature tendono via via ad uniformarsi rendendo il contrasto di aree adiacenti meno marcato. Questo si traduce in una maggior difficoltà da parte dell'operatore di riuscire a identificare i contorni delle zone di cui si vogliono estrapolare i dati di temperatura.

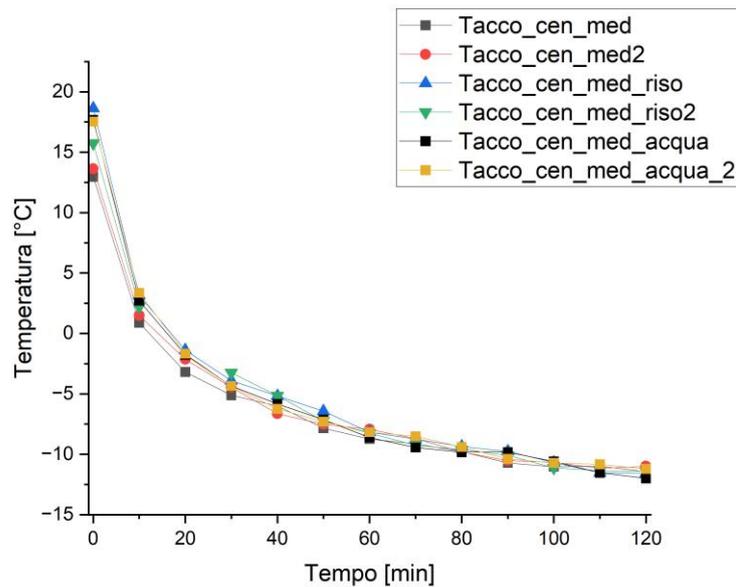
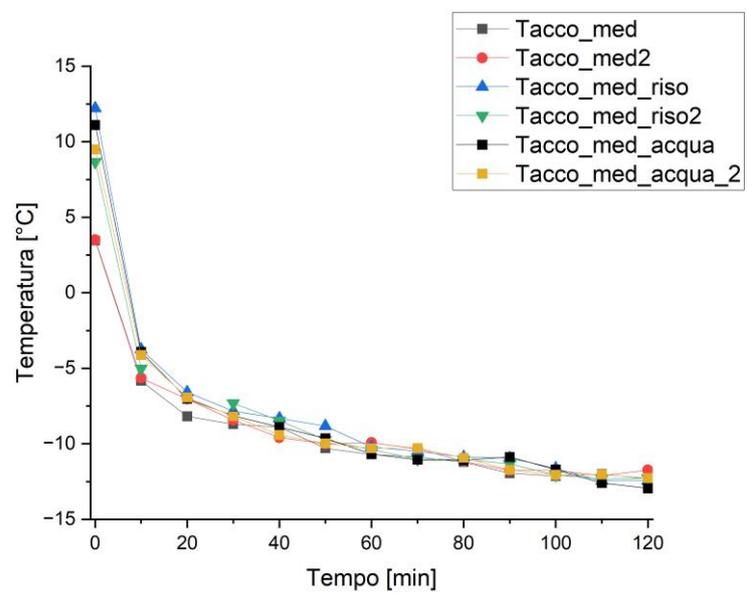
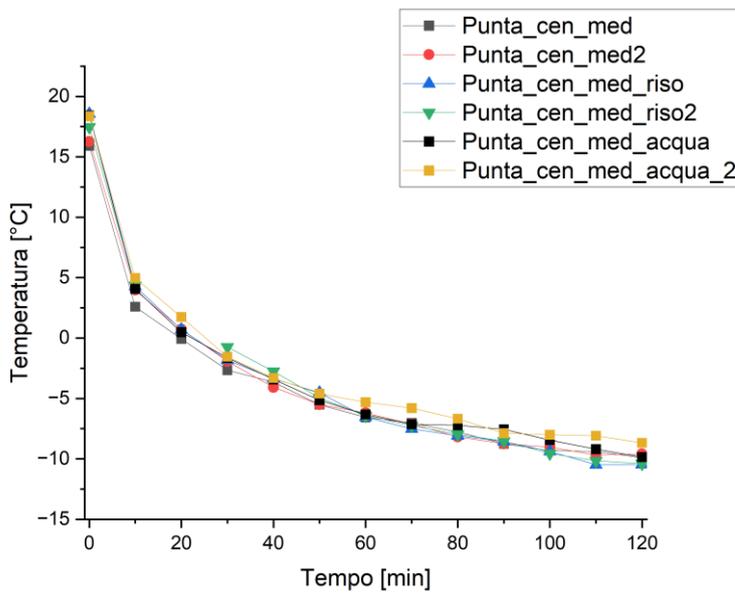
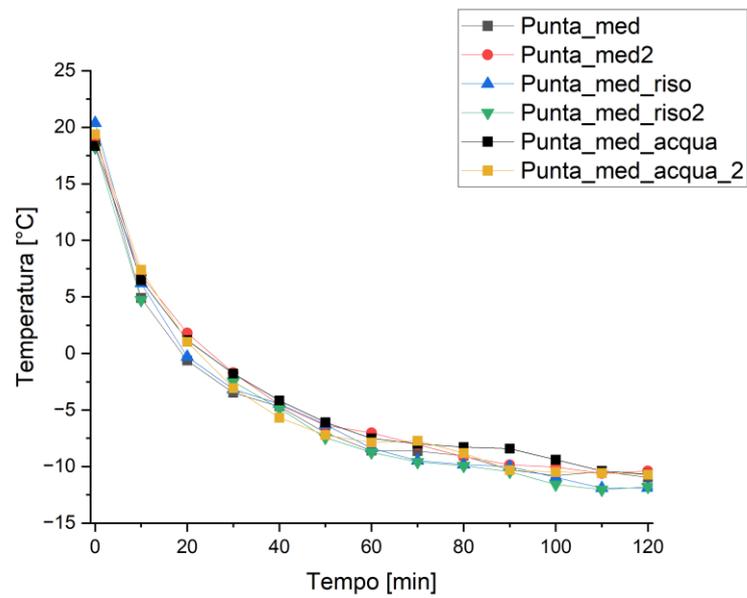
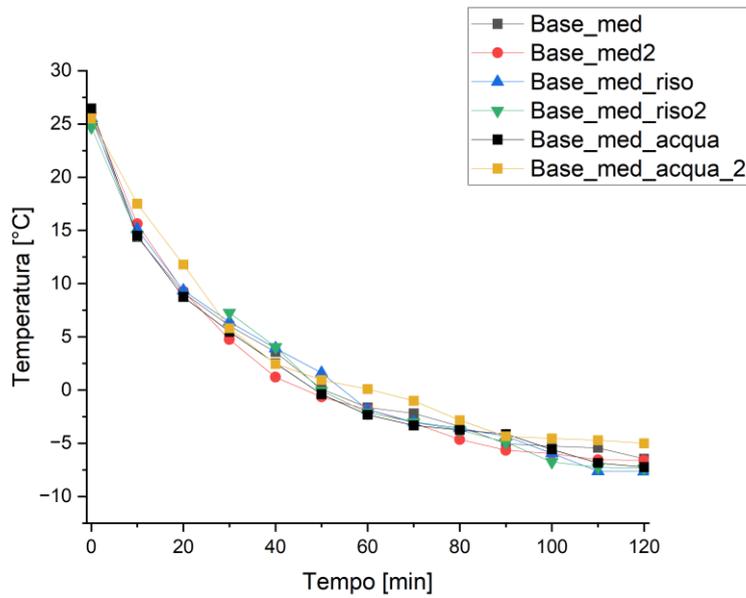


Figura 5.3: Temperature delle cinque zone della suola estrapolate dalle termoografie

5.2 Test in soluzione a base glicole con diversi riempimenti

Una volta testati i differenti riempimenti, mantenendo inalterate le condizioni ambientali, i test sono proseguiti variando le condizioni al contorno dello scarpone. È stata preparata una vaschetta in alluminio teflonata riempita con un litro di soluzione al 50% in volume di acqua e di liquido antigelo (glicole) e posta in camera climatica. Alle temperature operative dei test (-17°C) la soluzione rimane allo stato liquido. Anche in questo caso, sono state eseguite tre coppie di test, ovvero 2 ripetizioni per ciascuno dei 3 riempimenti visti prima. Dopo il solito acclimatamento di ore 20 in stufa a 30°C circa, gli scarponi vengono posti all'interno della vaschetta in modo tale che la soluzione bagni efficacemente ogni parte della suola senza raggiungere la zona della tomaia. (Figura 5.4). Come di consueto, ogni 10 minuti un operatore entra in camera climatica per permettere l'acquisizione delle termografie. Nel far ciò l'operatore solleva lo scarpone dalla vaschetta, lo dispone su di un panno assorbente per permettere la rimozione del liquido che rimane adeso alla suola, dopo di che lo posiziona sulla piastra di rame posta di fronte alla termocamera e procede all'acquisizione delle misure in maniera analoga a come fatto in precedenza. Una volta acquisite le immagini, lo scarpone viene nuovamente riposto nella vaschetta. Al termine di ogni esperimento nella vaschetta viene aggiunto nuovo liquido in modo tale da mantenerne costante il volume



Figura 5.4: suola dello scarpone immersa nella soluzione di acqua e glicole

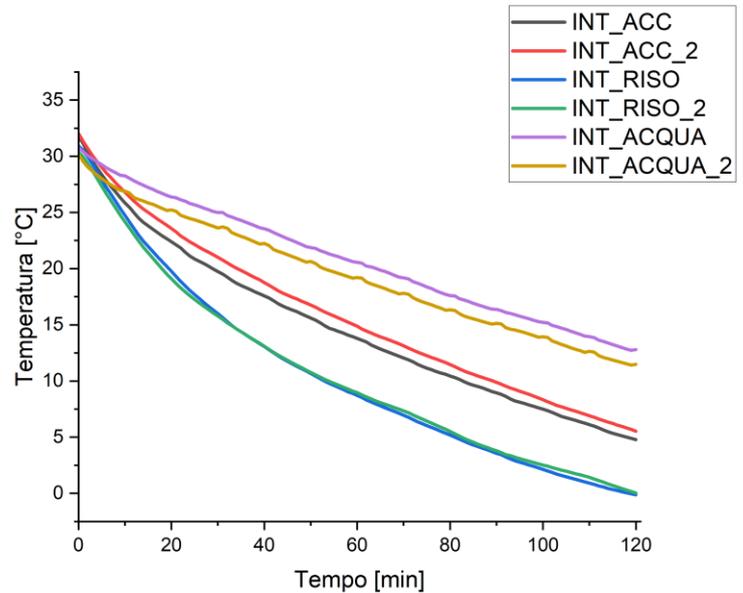
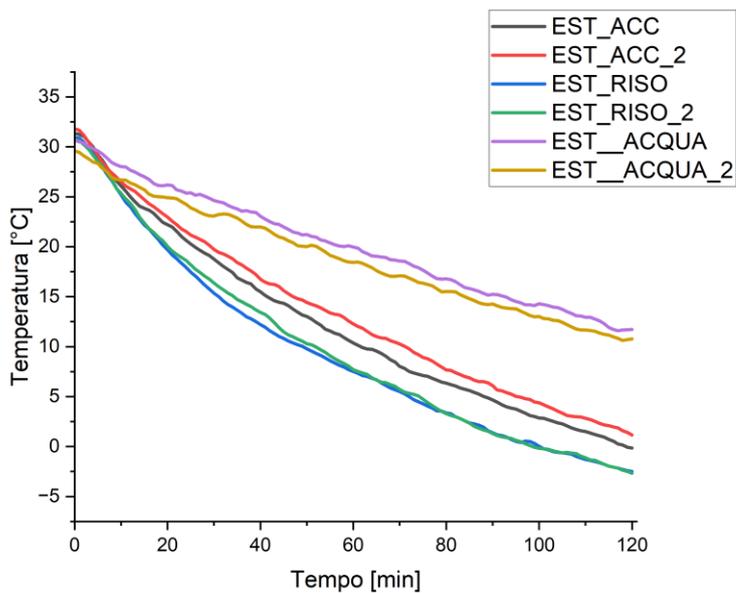
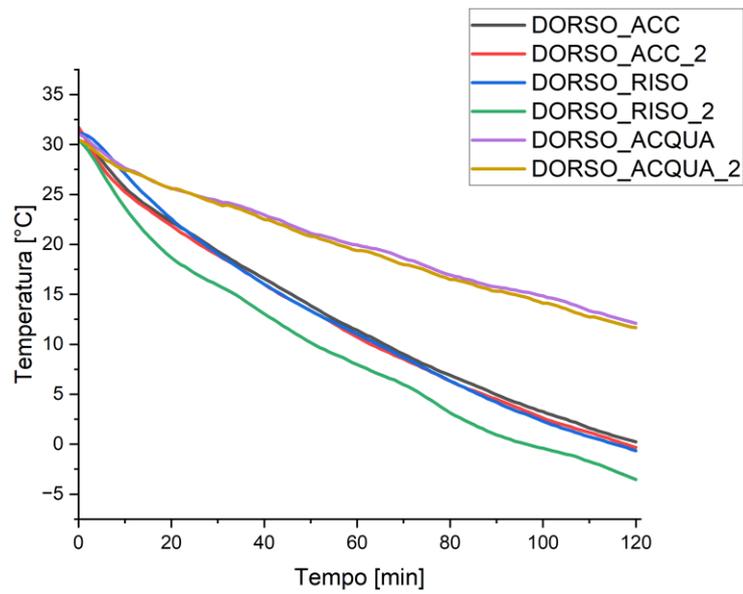
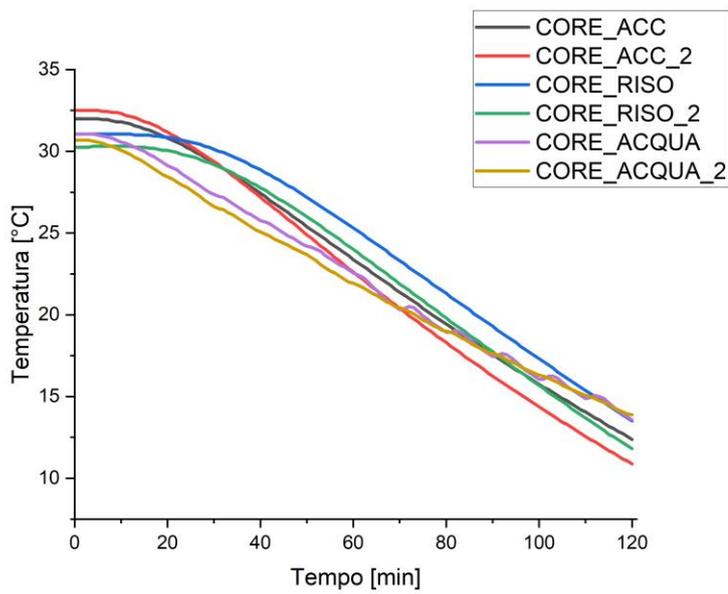
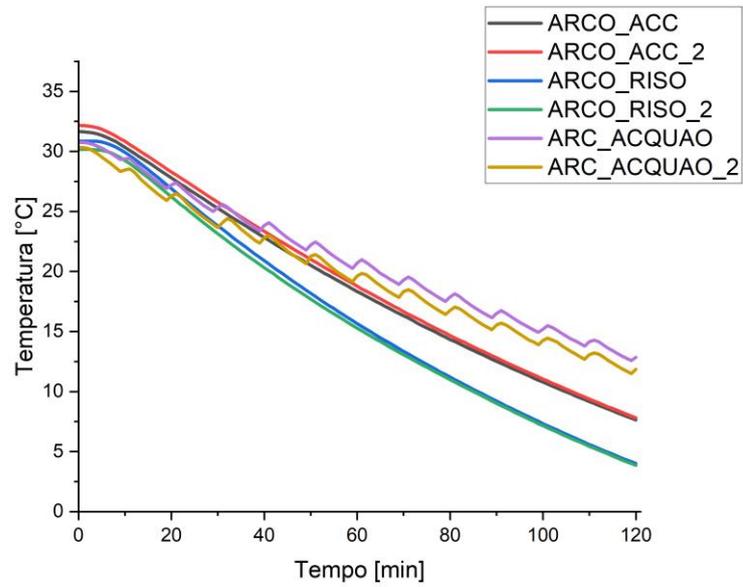
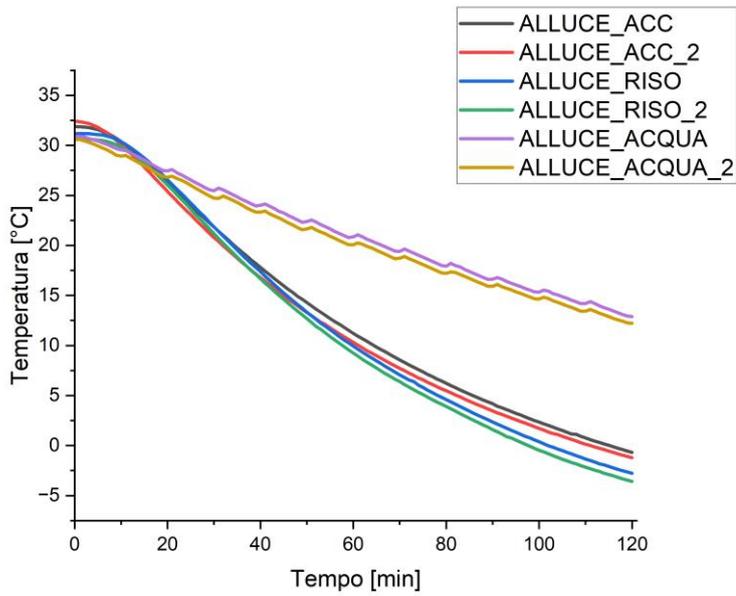


Figura 5.5: Confronto tra diversi riempimenti

I risultati delle acquisizioni della temperatura ad opera dei sensori interni sono riportati in figura 5.5. Si presentano molto simili in termini qualitativi a quelli analizzati nel test “in aria” pur essendo le temperature registrate inferiori rispetto ai test svolti in aria. Il riempimento con acqua si riconferma essere quello che in maniera minore ha la tendenza a raffreddarsi, seguito dal sistema acciaio/aria e da quello riso/aria. Anche in questo caso, tuttavia, l’andamento delle temperature nei sistemi a base di riso ed acciaio tende a non essere sempre uniforme nei vari sensori. Come nel test precedente si nota una netta differenza di temperatura tra i due riempimenti relativamente ai sensori arco, esterno ed interno, mentre per i sensori alluce, dorso e core le curve tendono ad intersecarsi e a sovrapporsi.

In tabella 5.6 sono riportate le temperature dei sensori al termine del test. Nel caso del riempimento con riso ed acciaio si nota come l’alluce raggiunga una temperatura inferiore rispetto agli altri sensori,

	Alluce	Arco	Core	Dorso	Est	Int
Acc_1	-0,68718	7,63342	12,369	0,236	-0,15838	4,79126
Acc_2	-1,22778	7,79431	10,867	-0,33	1,16	5,53137

	Alluce	Arco	Core	Dorso	Est	Int
Riso_1	-2,77432	3,99768	13,496	-0,645	-2,48022	-0,13147
Riso_2	-3,58597	3,84753	11,806	-3,54	-2,67686	0,01868

	Alluce	Arco	Core	Dorso	Est	Int
Acqua_1	12,90488	12,8457	13,558	12,106	11,71257	12,79224
Acqua_2	12,23648	11,85913	13,871	11,667	10,7723	11,49438

Tabella 5.6: Temperature sensori dopo due ore in camera climatica

confermandosi essere la zona maggiormente soggetta alla dispersione del calore. Nel caso dell’acqua invece questo sensore tende a raffreddarsi molto meno. È anche da tenere in considerazione che l’acqua permette alle temperature di uniformarsi in maniera molto maggiore rispetto agli altri due sistemi solidi (numero di Prandtl >1), la conferma la si ha notando come le differenze di temperatura dei vari sensori siano di pochi gradi nel caso dell’acqua ($0 < 2^{\circ}\text{C}$), di più di 14 per il riso e di circa 12 per l’acciaio. L’arco e soprattutto il core si confermano essere i sensori maggiormente isolati, mentre l’esterno, l’interno ed il dorso hanno valori intermedi. Di nuovo è emblematico osservare come la differenza di temperatura che si osserva tra il core e le altre zone più periferiche sia molto più contenuta con l’acqua come riempimento rispetto agli altri due sistemi. Il calore, infatti si trasporta più facilmente nell’acqua (per via della convezione o rimescolamento), pur essendo la sua diffusività termica inferiore

Mediamente le temperature finali dei sensori si attestano a valori di circa $1/2^{\circ}\text{C}$ più basse nel caso del test con il glicole, rispetto a quello precedente senza liquido. Ovviamente il meccanismo di scambio termico tra il glicole e lo scarpone è diverso rispetto che nel caso senza il liquido. Nel primo caso, infatti, si tratta di un meccanismo che coinvolge la conduzione di calore di un liquido, mentre nel secondo caso la conduzione termica dell’aria, sostanze quindi con proprietà termiche molto differenti tra di loro. Queste tipologie di confronti tra diverse condizioni ambientali verranno in questo capitolo solo accennate poiché ulteriori analisi saranno eseguite nel capitolo successivo (capitolo 6)

La ripetibilità delle misurazioni appare buona, addirittura migliore rispetto al test senza l'utilizzo del glicole, con le curve relative all'alluce e all'arco che risultano quasi perfettamente sovrapponibili.

In tabella 5.7 sono riportate le misure delle temperature registrate tramite le termografie delle 12 zone esterne dello scarpone per ciascun riempimento. Per quanto riguarda le zone da 1 a 6 anche in questo test sembrerebbe ripetersi lo schema già osservato in precedenza. Il riempimento con acqua si mantiene a temperature finali più elevate, segue il sistema acciaio/aria ed infine quello a base di riso. Si osserva anche in questo caso come le zone frontale (1), frontale interno (2) e frontale esterno (6) corrispondano alle aree a minor temperatura esterna rilevata.

La ripetibilità delle misurazioni è discreta; la discrepanza media tra le ripetizioni è di circa 1 °C di differenza. Fa eccezione la zona 1 dei test con il riempimento con acqua. È probabile che nella prima ripetizione il sacchetto contenente il liquido, non essendo particolarmente rigido, si sia spostato impedendo il contatto diretto con la parte frontale dello scarpone e portando ad una diminuzione di temperatura drastica.

Andando ad osservare gli andamenti delle temperature durante tutte le due ore di acclimatamento in camera, per quanto riguarda le zone relative alla suola (Figura 5.6), si nota molto bene come la temperatura crolli in maniera molto repentina nei primi minuti di permanenza in camera e, trascorsi i successivi 30 minuti, si raggiunge una situazione quasi stazionaria in cui la temperatura si mantiene pressoché costante. La differenza con il test precedente (Figura 5.3) è notevole. Anche in questo caso la motivazione è che l'aria asporta molto meno efficacemente il calore rispetto alla soluzione a base di glicole.

La ripetibilità delle misurazioni è discreta anche in questo caso, la differenza media tra le misurazioni si attesta anche in questo caso attorno al grado di differenza.

	acqua_1	acqua_2	acc_1	acc_2	riso_1	riso_2
Frontale (1)	-4.389	-7.189	-10.8	-11.012	-11.023	-12.781
Front_interno (2)	-4.195	-3.987	-8.09	-8.464	-8.418	-9.731
Cent_interno (3)	-2.944	-2.538	-6.294	-6.897	-7.252	-7.967
Dorso (4a)	-4.266	-3.816	-8.196	-8.494	-8.906	-9.828
Dorso (4b)	-8.571	-7.39	-10.336	-11.269	-11.239	-12.529
Cent_esterno (5)	-2.567	-2.152	-6.199	-7.327	-7.612	-8.768
Front_esterno (6)	-5.644	-4.915	-9.295	-9.776	-10.031	-11.558
Base (7)	-9.56	-8.819	-11.208	-11.575	-10.303	-11.294
Tacco (8)	-11.602	-11.098	-13.293	-13.555	-12.239	-13.207
Punta (9)	-11.308	-10.794	-12.909	-13.096	-12.123	-13.27
Punta_centro (10)	-9.555	-8.939	-12.137	-12.132	-10.993	-12.047
Tacco_centro (11)	-11.207	-10.749	-12.931	-13.271	-11.923	-12.704

Tabella 5.7: Temperatura dopo 2 ore, delle zone esterne dello scarpone evidenziate

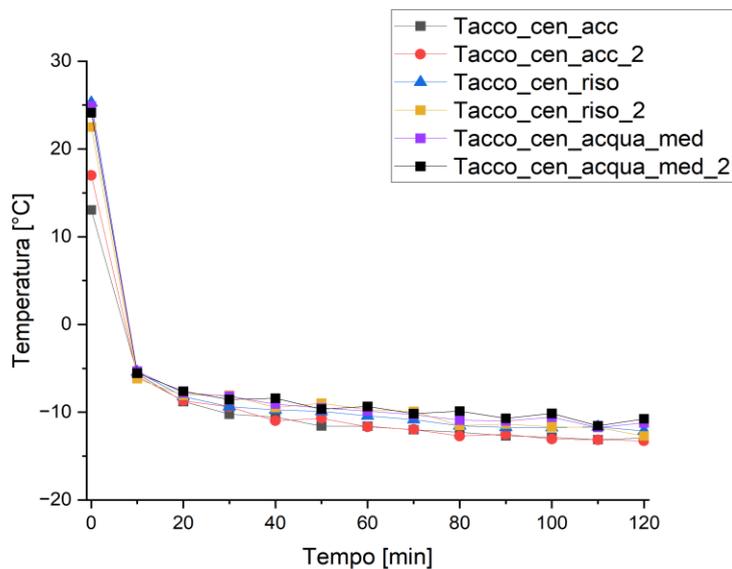
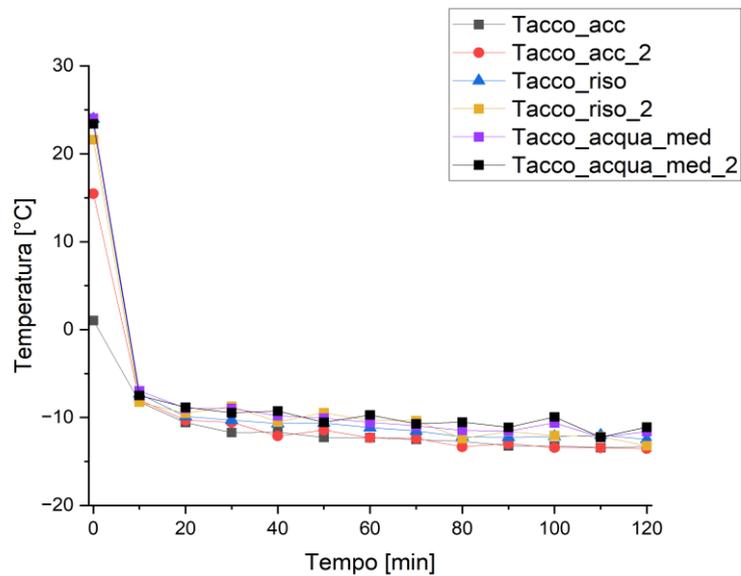
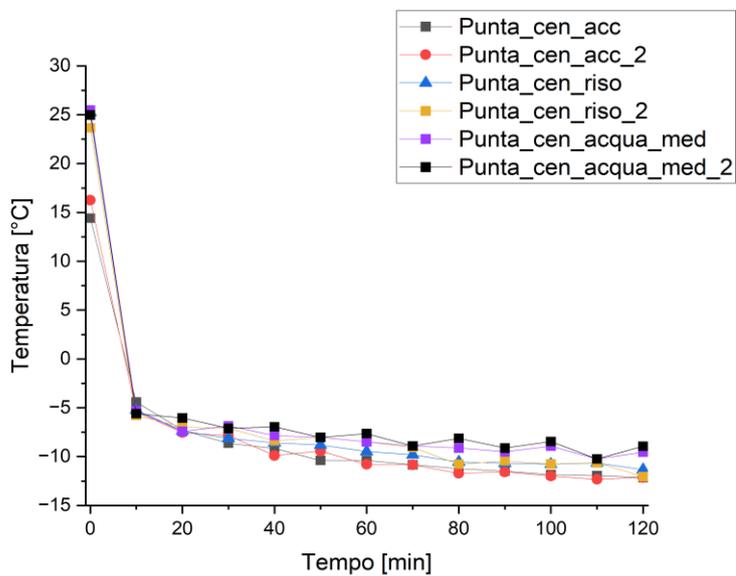
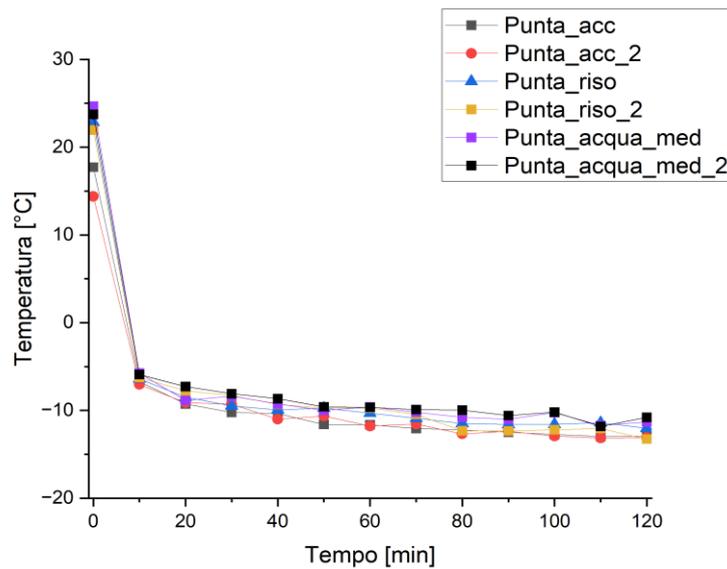
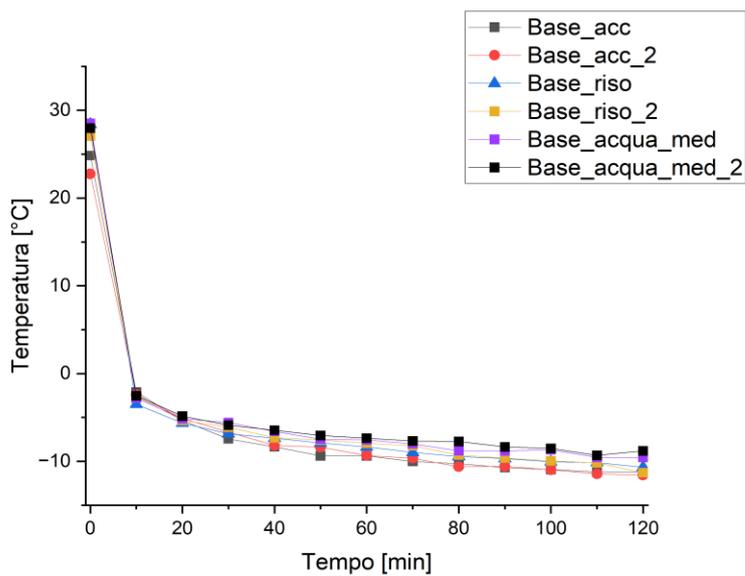


Figura 5.6: Temperature delle cinque zone della suola estrapolate dalle termografie

5.3 Test in ghiaccio con diversi riempimenti

Una volta testati gli scarponi a contatto diretto con la piastra di rame e a contatto con la soluzione a base glicole si è deciso di variare nuovamente le condizioni al contorno dello scarpone, inserendo, nella vaschetta precedentemente utilizzata per il glicole, del ghiaccio tritato. Questa scelta è motivata dal fatto che non è improbabile in alta montagna ritrovarsi a camminare su strati di neve o ghiaccio ed è quindi interessante osservare come variano le temperature in condizioni più realistiche. Anche in questo caso sono state eseguite tre coppie di test, ovvero due ripetizioni per ogni riempimento. Lo svolgimento del test è analogo a quello descritto in precedenza, con l'operatore che entra in camera climatica ogni 10 minuti per premettere l'acquisizione delle termografie ruotando lo scarpone per consentire di visualizzare tutte e 4 le prospettive. L'unica accortezza in questo test è quella, subito prima di acquisire l'immagine, di assicurarsi che non vi siano pezzetti di ghiaccio incastrati tra i tacchetti, fatto che potrebbe incidere sui risultati delle termografie relative alla suola. In figura 5.7 è mostrato il setup.



Figura 5.7: suola dello scarpone immersa nel ghiaccio tritato

I risultati delle acquisizioni della temperatura ad opera dei sensori interni sono riportati in figura 5.8.

Anche in queste acquisizioni si ripete la stessa tendenza vista in precedenza. L'acqua ha una maggiore inerzia termica e mantiene una temperatura maggiore, segue il sistema a base di acciaio ed infine quello col riso. La sovrapposizione delle curve relative ai sistemi riso e acciaio appare meno evidente in queste misurazioni ad esclusione del sensore "core", nel quale le curve si intersecano in vari punti.

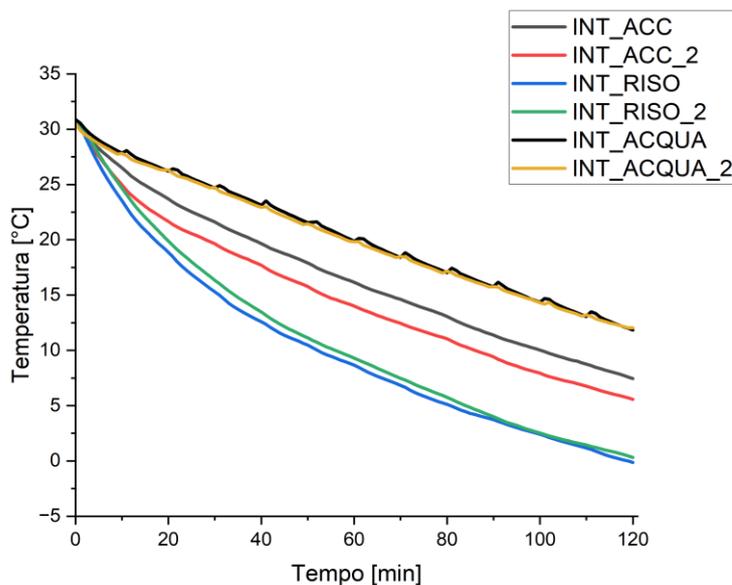
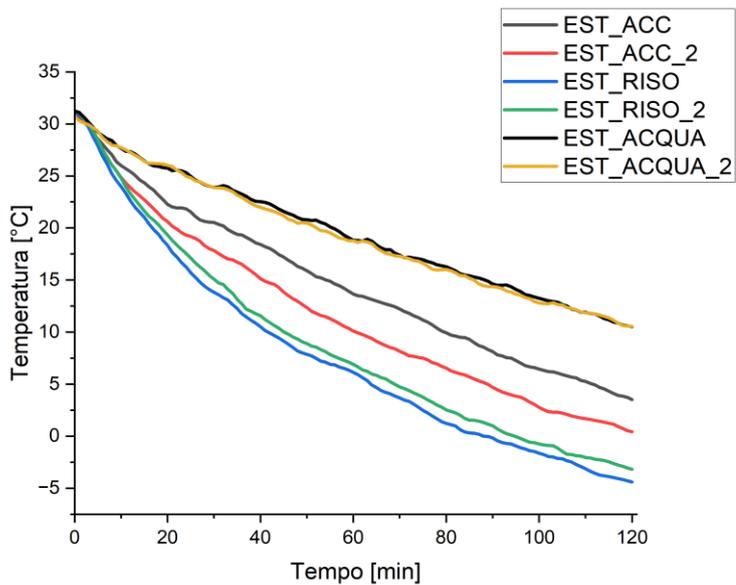
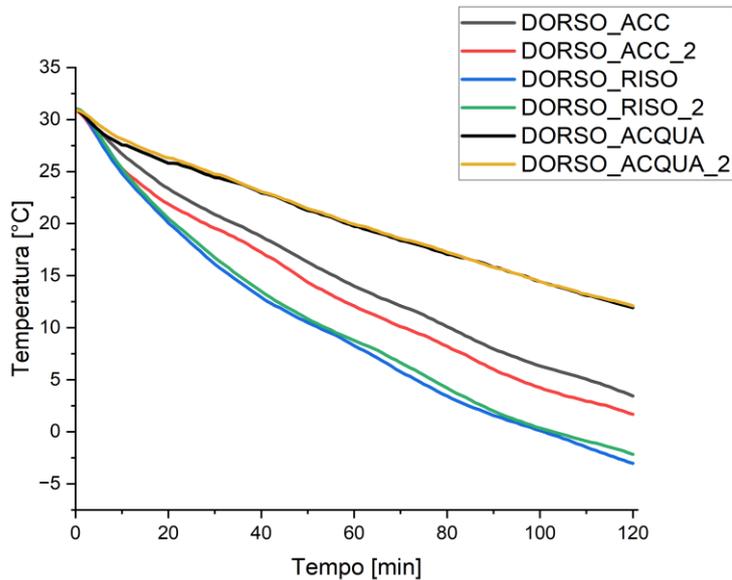
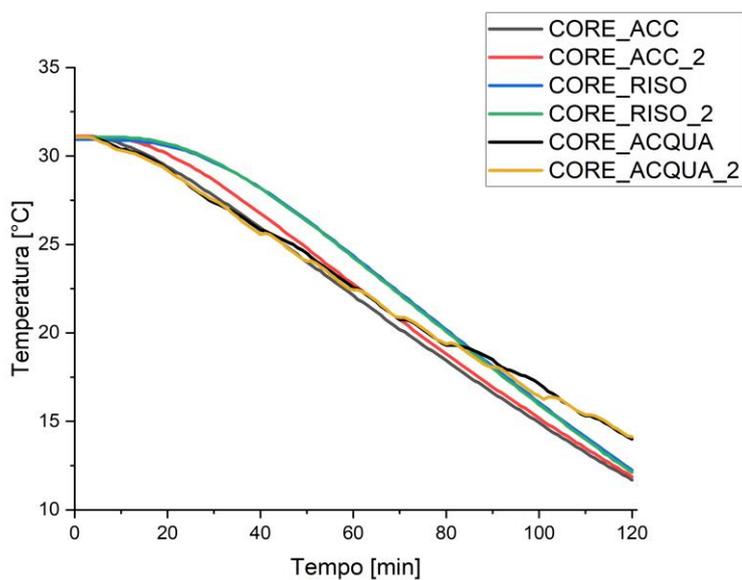
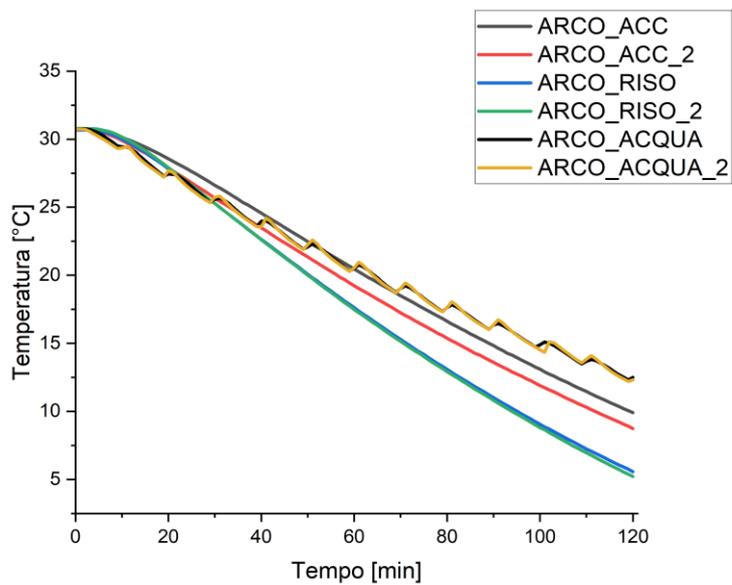
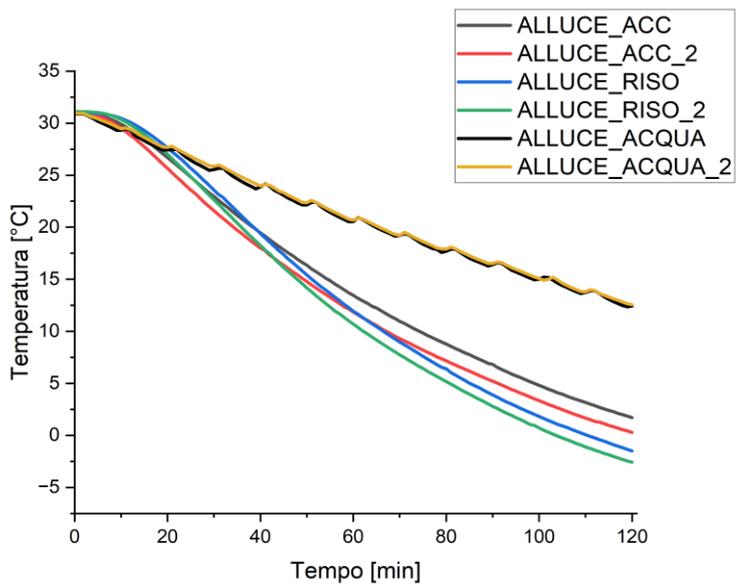


Figura 5.8: Confronto tra diversi riempimenti

La ripetibilità si conferma ottima per il riempimento con acqua con una differenza di temperatura tra le due ripetizioni molto inferiore ad 1°C, molto buona per il sistema riso/aria, con un ΔT che si aggira attorno ad 1 °C, buona per l'acciaio con una differenza di temperatura che mediamente si attesta attorno ai 2°C.

In tabella 5.8 sono riportate le misure dei sensori al termine del test. Nel caso del sistema a base di acciaio si ripete il trend che vuole l'alluce essere il sensore che più si raffredda, mentre l'arco e il core quelli meno sensibili alla differenza di temperatura. In mezzo si hanno i valori dei sensori interno esterno ed arco.

	Alluce	Arco	Core	Dorso	Est	Int
Acc_1	1,71721	9,90698	11,681	3,442	3,50431	7,44043
Acc_2	0,29483	8,73804	11,869	1,682	0,42623	5,57422

	Alluce	Arco	Core	Dorso	Est	Int
Riso_1	-1,4876	5,57422	12,244	-3,036	-4,41288	-0,13147
Riso_2	-2,57345	5,22034	12,119	-2,155	-3,18095	0,31898

	Alluce	Arco	Core	Dorso	Est	Int
Acqua_1	12,42247	12,50269	13,996	11,918	10,51705	11,83765
Acqua_2	12,55092	12,30957	14,121	12,106	10,5453	12,0415

Tabella 5.8: Temperature sensori dopo due ore in camera climatica

Diverso è il caso degli altri due riempimenti (riso e acqua) dove l'arco ed il core rimangono i due sensori con la temperatura più elevata, mentre l'alluce tende a mantenersi a temperature maggiori.

Per l'acqua, le temperature delle varie aree analizzate sono molto più simili tra loro (il ΔT tra i sensori è inferiore ai 4°C), poiché il liquido, a differenza degli altri riempimenti (dove il ΔT del riempimento con acciaio è superiore ai 10°C, mentre con il riso supera i 13°C), riesce a mantenere il sistema più uniforme.

In tabella 5.9 sono riportate le temperature delle zone esterne dello scarpone prese in esame. L'analisi dei dati fornisce un'ulteriore conferma di ciò che è stato asservato nei casi precedenti. L'acqua mantiene il primato come riempimento che meglio resiste al raffreddamento, seguito dal sistema acciaio/aria e da quello riso/aria. Anche in questo caso le tre zone frontali (1), (2), (6) e (4) si confermano le aree relative alla parte superiore della tomaia più fredde per ogni riempimento. Unica eccezione sembra essere quella relativa alla zona (1) del primo test con acqua. La motivazione potrebbe risiedere nel fatto che il sacchetto contenente acqua, non essendo eccessivamente rigido, potrebbe non essersi sufficientemente espanso fino a raggiungere la punta dello scarpone, lasciando di fatto uno strato d'aria nella parte frontale.

Per quel che riguarda le aree della suola (7-11) esse risultano mediamente più fredde delle altre zone analizzate poiché in contatto diretto col ghiaccio. La base (7) si attesta a temperature maggiori poiché lo strato di materiale isolante è molto minore, non essendoci la presenza di tacchetti, e poiché

	acqua_1	acqua_2	acc_1	acc_2	riso_1	riso_2
Frontale (1)	-2.916	-4.588	-9.783	-9.702	-11.58	-11.224
Front_interno (2)	-5.373	-5.67	-7.196	-6.348	-8.683	-9.002
Cent_interno (3)	-3.458	-3.057	-5.196	-4.288	-6.525	-6.837
Dorso (4a)	-3.214	-3.667	-5.984	-5.853	-8.744	-8.012
Dorso (4b)	-8.748	-8.55	-9.455	-8.846	-10.811	-10.03
Cent_esterno (5)	-2.985	-3.534	-5.496	-4.861	-7.712	-7.44
Front_esterno (6)	-5.529	-5.988	-7.808	-7.534	-10.229	-9.778
Base (7)	-6.712	-7.767	-7.359	-8.24	-8.75	-8.639
Tacco (8)	-11.495	-12.189	-11.499	-11.624	-11.906	-11.501
Punta (9)	-10.822	-11.878	-11.222	-11.352	-11.999	-11.722
Punta_centro (10)	-8.642	-9.715	-8.801	-9.615	-10.164	-10.34
Tacco_centro (11)	-10.75	-11.42	-10.381	-10.91	-11.335	-11.064

Tabella 5.9: Temperatura dopo 2 ore, delle zone esterne dello scarpone evidenziate

l'asportazione del calore avviene in buona parte per convezione naturale, a differenza delle altre zone dove si ha una maggiore area di contatto tra il battistrada e il ghiaccio.

La ripetibilità delle misure è buona per ciascun riempimento, dato che di media non tende a superare il grado di differenza tra le due ripetizioni.

Gli andamenti delle temperature delle cinque zone della suola selezionate sono riportati in figura 5.9. La diminuzione di temperatura non appare brusca come nel caso precedente con il glicole, le curve tendono infatti ad avere una pendenza più dolce e a raggiungere una sorta di stato stazionario solo negli ultimi minuti del test. Le temperature dei vari riempimenti sono simili tra loro segno che la tipologia di materiale inserito nello scarpone non tende a far variare significativamente la temperatura della suola. Unica eccezione in questo senso è quella relativa al primo test col riempimento a base acciaio. È probabile che la differenza di temperatura così marcata rispetto a tutte le altre prove sia dovuta alla temperatura effettiva del ghiaccio. Si tratta infatti del primo test che si è effettuato con il ghiaccio ed è possibile che durante le operazioni di frammentazione la temperatura dello stesso sia aumentata eccessivamente e non si sia lasciato sufficiente tempo per permettere un corretto acclimatamento del ghiaccio.

Anche in questo caso la ripetibilità delle misurazioni è molto buona (se si esclude per ovvie ragioni il primo test con l'acciaio) e la differenza delle temperature tra ciascuna ripetizione si attesta mediamente al di sotto di 1 °C.

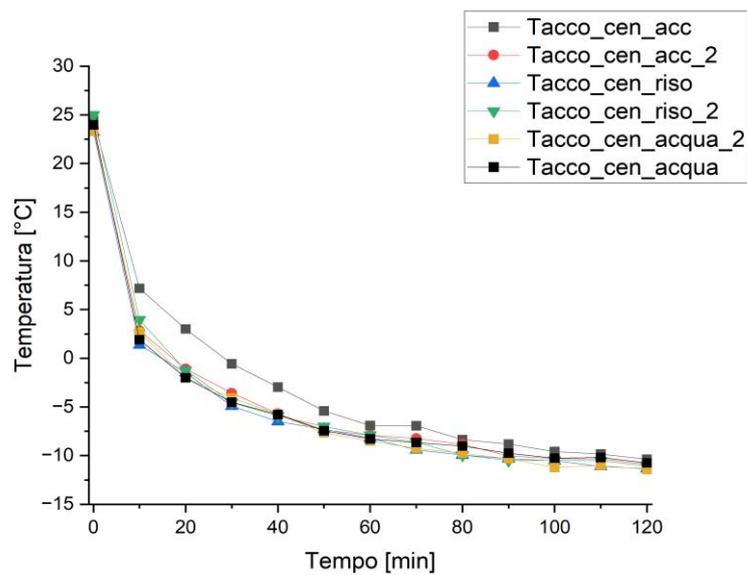
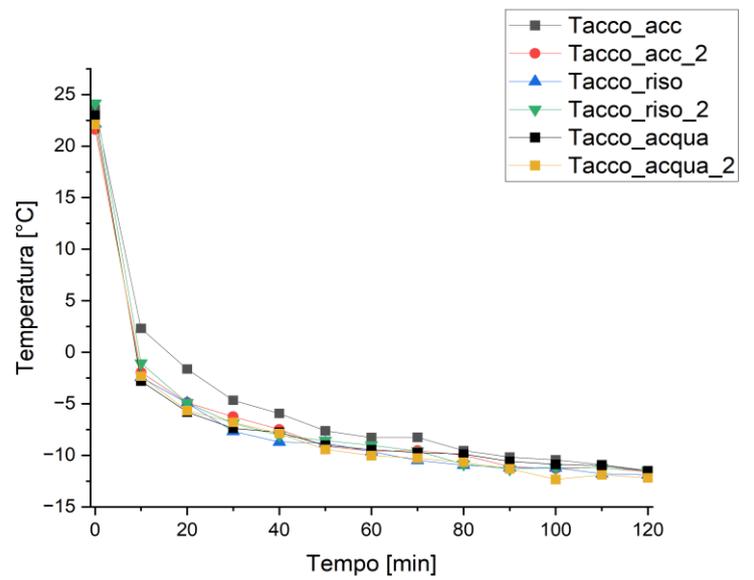
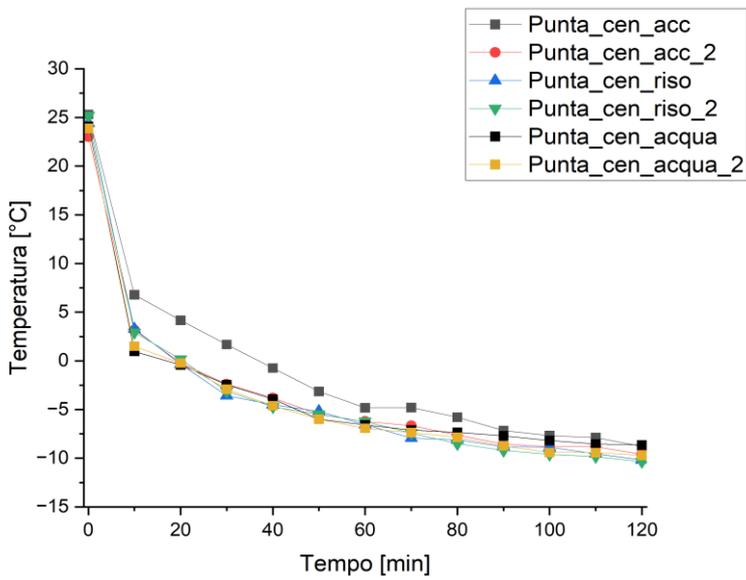
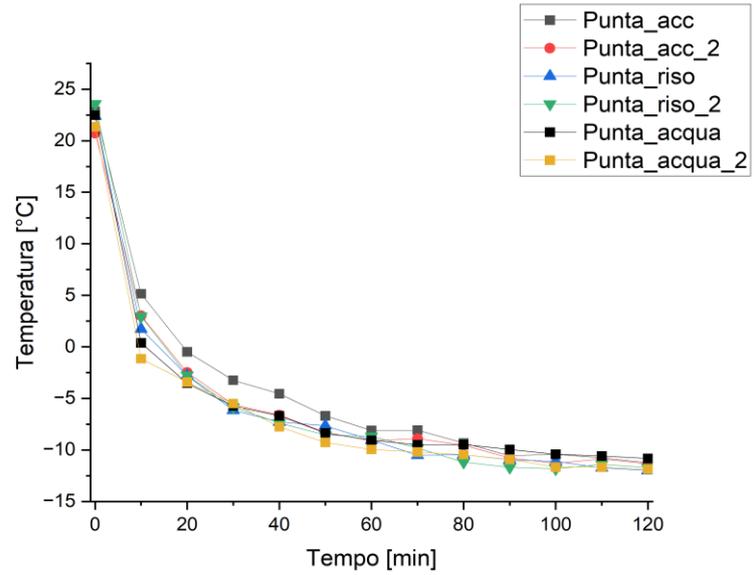
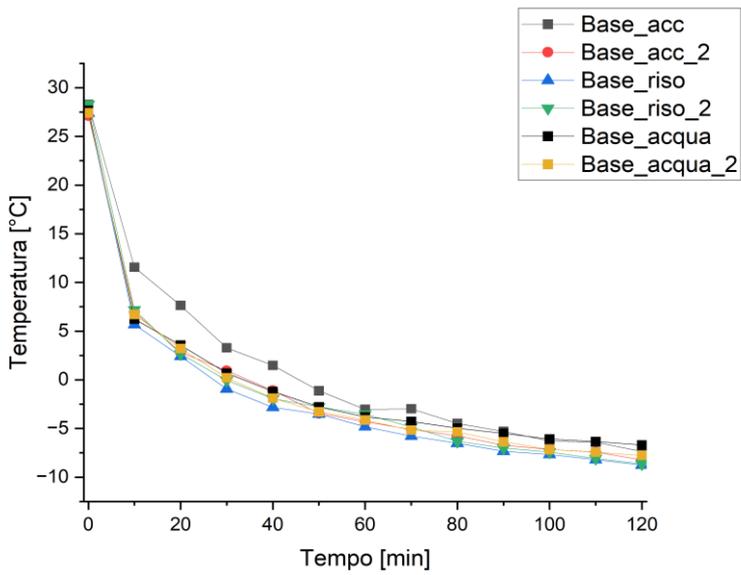


Figura 5.9: Temperature delle cinque zone della suola estrapolate dalle termografie

5.4 Conclusioni

Cercando di riassumere quello che si è osservato possiamo trarre una serie di conclusioni di carattere generale. Si è deciso di testare tre tipologie di riempimento: un sistema composto da sfere in acciaio, uno composto da chicchi di riso e uno costituito da una sacca di acqua. Per ciascuno di questi riempimenti sono state effettuate due ripetizioni andando a variare le condizioni ambientali: inizialmente è stato semplicemente posto lo scarponne su di una piastra di rame, successivamente si è immersa la suola in una vaschetta contenente una soluzione acquosa contenente glicole ed infine la si è inserita nel ghiaccio. Quello che è emerso dai test effettuati è che:

- A prescindere dalla tipologia di ambiente le temperature dei sensori interni hanno misurato temperature sensibilmente superiori quando lo scarponne è stato riempito con acqua. Per quanto riguarda gli altri due sistemi (acciaio e riso), mediamente le temperature maggiori si sono osservate con il riempimento in acciaio, anche se in molti casi le curve relative agli andamenti di temperatura di questi due riempimenti si intersecano in più punti e in alcuni casi coincidono. Questo fenomeno può essere parzialmente spiegato andando a confrontare quelli che sono i valori di diffusività termica dei tre sistemi. L'acqua, infatti, presenta un valore di diffusività che è circa un ordine di grandezza inferiore rispetto agli altri due, che invece sono molto simili tra loro. È caratterizzata quindi da maggior inerzia termica, inoltre la temperatura si omogenizza facilmente per via del trasporto convettivo.
- Le temperature misurate al termine dei test (120 minuti in camera climatica) mostrano come, nel caso del riempimento con acqua, le differenze di temperature tra i sei sensori interni siano molto piccole (2-4°C), mentre sia nel caso del riempimento con acciaio, che con il riso le differenze siano molto maggiori e rispettivamente di circa 10 e 13°C. Ovviamente l'acqua essendo un liquido, a differenza degli altri due sistemi "solidi", permette di raggiungere una migliore uniformità di temperatura.
- Nella maggior parte dei casi il sensore posizionato in corrispondenza dell'alluce raggiunge le temperature più basse per i riempimenti a base di acciaio e riso, in ogni ambiente testato, ma non nel caso dell'acqua. Il core risulta sempre il sensore che meno si raffredda, per ogni riempimento ed in ogni ambiente testato, (essendo anche il più interno, è quello maggiormente isolato) seguito dall'arco (che è posizionato in corrispondenza della base che non entra mai a contatto diretto con il suolo). Gli altri sensori raggiungono temperature intermedie per i sistemi di riso e acciaio e temperature minori nel caso dell'acqua.
- Le temperature esterne estrapolate dalle immagini termografiche (suola esclusa) mostrano come le zone frontali analizzate (frontale, frontale esterna, frontale interna) abbiano una temperatura finale minore in tutti e tre i test, per tutte e tre le tipologie di riempimento. La spiegazione è che queste aree prese in analisi si trovino tutte più vicine alla suola rispetto alle altre e dal fatto che in punta il Phantom Tech è dotato di uno strato di Primaloft doppio rispetto che nel resto dello scafo, comportando un maggior isolamento termico.
- Le temperature esterne della suola estrapolate dalle immagini termografiche (7-11) risultano mediamente più fredde rispetto a tutte le altre. Ovviamente il contatto diretto con la piastra, il glicole o il ghiaccio fa sì che l'asportazione del calore sia più rapida. La base si mantiene in ogni caso a temperature più alte poiché non entra mai in contatto diretto con il mezzo disperdente ad esclusione del caso con il glicole, dove infatti le differenze con le altre zone è molto meno marcata.
- Le curve delle variazioni di temperatura delle cinque zone della suola mostrano una buona sovrapposizione dei risultati al variare del riempimento, in ogni ambiente testato. Questo

significa che il riempimento interno non fa variare in maniera significativa l'isolamento termico della suola, che pertanto risulta buono.

- Mediamente la ripetibilità delle misure è buona.

6.

Confronto tra ambienti diversi

In questo sesto capitolo si è deciso di ultimare la serie di confronti andando ad evidenziare le differenze che si osservano quando uno stesso riempimento viene testato in ambienti diversi. Se nel capitolo precedente ci si è concentrati nell'osservare come varia il comportamento degli scarponi al variare del riempimento, mantenendo le condizioni ambientali costanti, in questo si vuole puntare l'attenzione a come variano i profili di temperatura variando le "condizioni al contorno", ma mantenendo costante il riempimento. I riempimenti utilizzati sono i medesimi descritti nel capitolo 5, così come gli ambienti. I dati che verranno analizzati sono gli stessi visti precedentemente, ma verranno analizzati in modo tale da permettere un confronto diretto tra le diverse condizioni ambientali.

6.1 Test con riempimento in acciaio in ambienti diversi

Il primo confronto riguarda il riempimento con le sferette di acciaio valutato nelle tre diverse condizioni ambientali, ovvero nel primo caso lasciando lo scarpone tal quale sulla piastra di rame (che verrà identificato come in "aria"), nel secondo immergendo la suola nella soluzione a base glicole ed infine, il terzo, inserendo lo scarpone nella vaschetta contenente ghiaccio tritato. I risultati delle temperature misurate dai sensori interni nei tre ambienti sono riportati in Figura 6.1.

Si osserva che la variabilità tra le temperature misurate nei tre ambienti differenti in ciascuna zona è molto contenuta. Il diverso contesto nel quale si trova immersa la suola sembra avere un effetto non rilevante sulle temperature interne misurate, soprattutto per quelle zone dello scarpone che si trovano in maggior prossimità con la suola ovvero l'alluce e l'arco. Per assurdo, infatti, la maggior variabilità delle misurazioni si osserva nei sensori più lontani dalla suola, ovvero il core, il dorso, l'esterno e l'interno. L'incertezza che si portano dietro le misure di questi sensori (dovuta come già detto in precedenza, alla difficoltà nel posizionamento di volta in volta nella medesima posizione all'interno dello scarpone), è sufficientemente elevata da osservare una certa variabilità nei risultati. Variabilità che rende le differenze di temperature misurate da questi sensori addirittura maggiori rispetto a quelle misurate nelle zone maggiormente vicine alla suola e che, ci si aspetterebbe risentissero in maniera maggiore della diversa condizione ambientale. A causa di tale variabilità non è possibile evidenziare un effetto della superficie di appoggio sulla temperatura della tomaia nelle succitate aree. Questo test dimostra nuovamente la bontà dell'isolamento termico della suola.

Per quanto riguarda l'analisi delle immagini termiche, in Tabella 6.1 sono presenti le temperature finali delle zone evidenziate. In generale si osserva che, quando la suola è immersa nella soluzione a base glicole, le temperature misurate raggiungano valori inferiori. Questo risulta ancora più evidente quando si analizzano le zone 7-11, che sono relative alla suola, dove lo scambio termico con i diversi materiali di appoggio è maggiore. Questo diverso comportamento non stupisce poiché i sistemi in aria e in ghiaccio hanno alcune caratteristiche in comune. La suola infatti tende ad avere solo alcuni punti di contatto con la piastra di rame e con il ghiaccio tritato, per cui lo scambio termico avverrà in parte

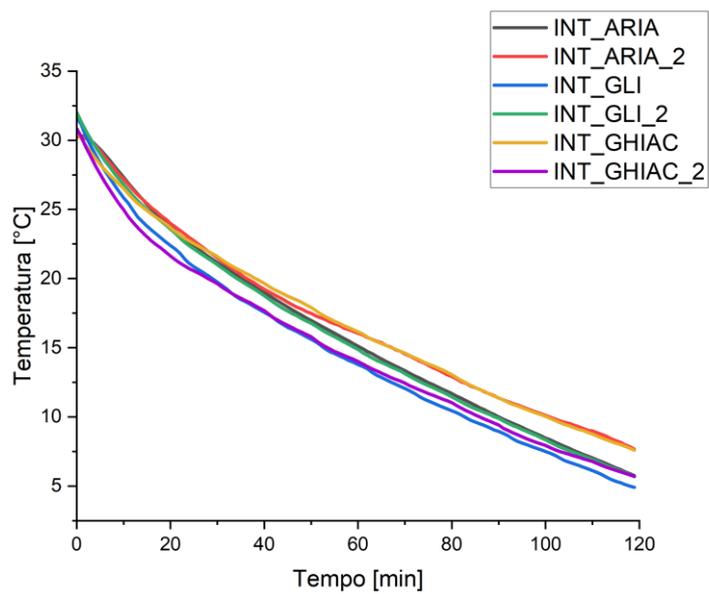
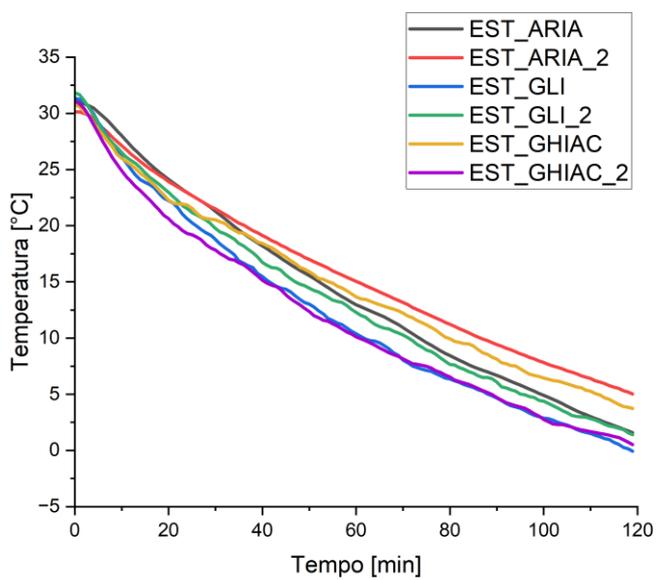
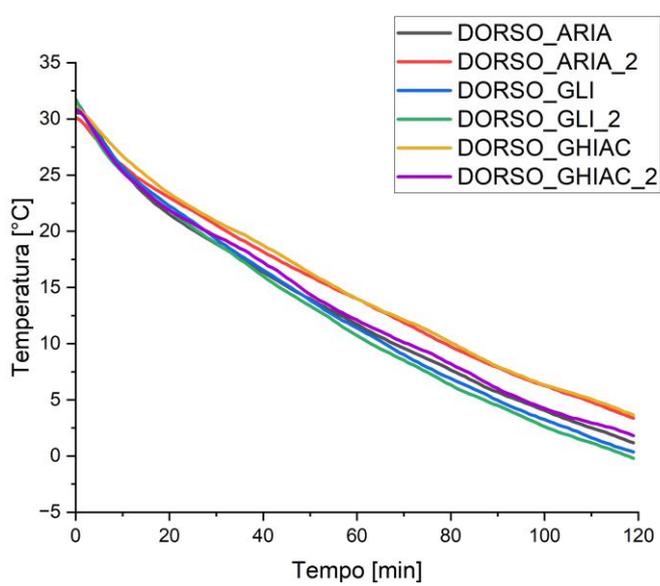
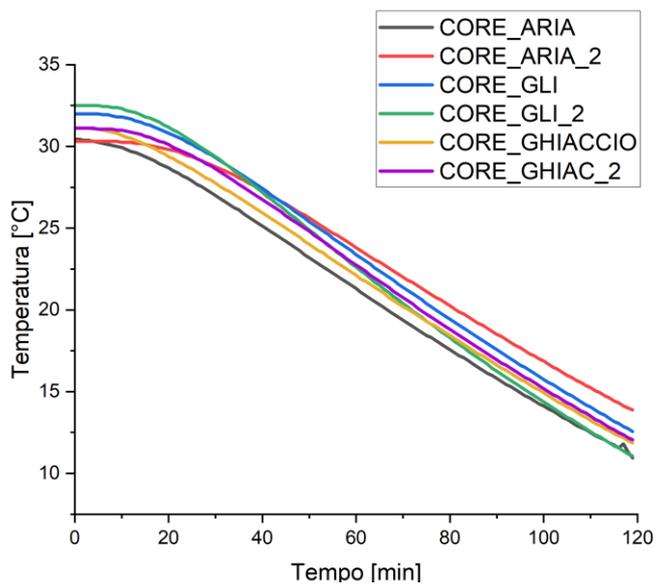
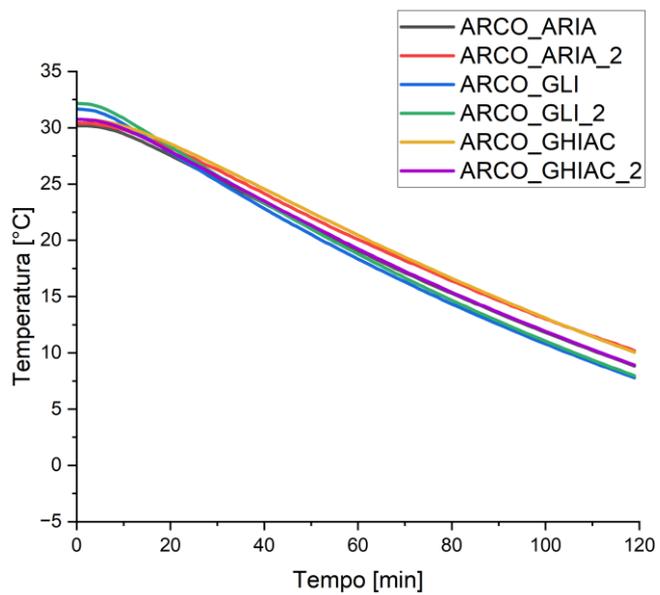
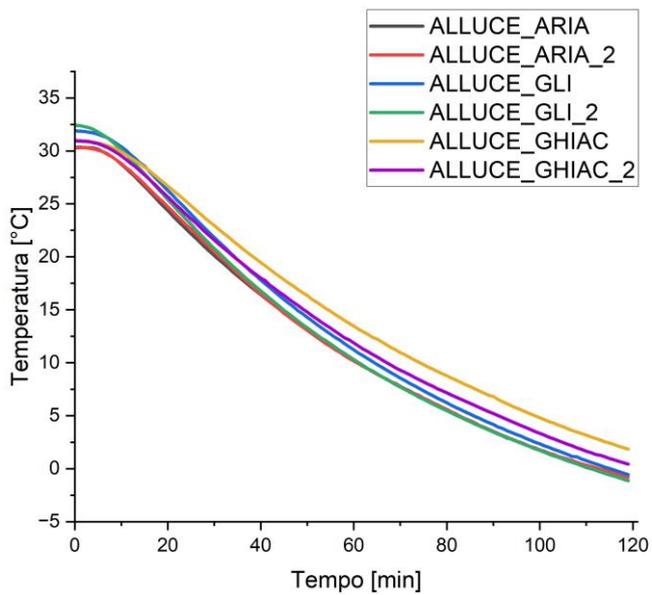


Figura 6.1: Confronto tra diversi ambienti

	aria_1	aria_2	ghiac_1	ghiac_2	glic_1	glic_2
Frontale (1)	-8.496	-9.839	-9.783	-9.702	-10.8	-11.012
Front_interno (2)	-6.932	-9.301	-7.196	-6.348	-8.09	-8.464
Cent_interno (3)	-4.493	-6.754	-5.196	-4.288	-6.294	-6.897
Dorso (4a)	-6.1	-7.075	-5.984	-5.853	-8.196	-8.494
Dorso (4b)	-7.624	-8.769	-9.455	-8.846	-10.336	-11.269
Cent_esterno (5)	-3.43	-4.659	-5.496	-4.861	-6.199	-7.327
Front_esterno (6)	-7.846	-8.577	-7.808	-7.534	-9.295	-9.776
Base (7)	-6.451	-7.201	-7.359	-8.24	-11.208	-11.575
Tacco (8)	-12.315	-12.816	-11.499	-11.624	-13.293	-13.555
Punta (9)	-10.955	-11.734	-11.222	-11.352	-12.909	-13.096
Punta_centro (10)	-9.913	-10.229	-8.801	-9.615	-12.137	-12.132
Tacco_centro (11)	-11.44	-11.913	-10.381	-10.91	-12.931	-13.271

Tabella 6.1: Temperatura dopo 2 ore, delle zone esterne dello scarpone evidenziate

per conduzione con il mezzo e in parte per convezione naturale con aria, garantendo maggiore isolamento termico. La soluzione a base glicole d'altra parte, essendo liquida, determina un contatto continuo con tutte le zone della suola consentendo un maggiore scambio termico e portando ad un raffreddamento più rapido in ogni parte della suola.

Vi è comunque una certa differenza di risultati anche tra gli ambienti aria e ghiaccio. In Figura 6.2 sono riportati gli andamenti delle temperature durante tutte e due le ore di permanenza in camera climatica, delle aree della suola (7-11) estrapolate dalle termografie. Si nota innanzitutto come le curve di temperatura relative al glicole si posizionino in ogni momento e per ogni zona analizzata nettamente al di sotto delle altre, confermando quanto detto in precedenza. Si osserva anche come per alcune aree (Base e Punta) le temperature relative al sistema in aria risultino più elevate rispetto all'ambiente con il ghiaccio. Quando lo scarpone viene lasciato tal quale sulla piastra di rame, senza utilizzo di un mezzo disperdente, la Base e la Punta non entrano mai in contatto con il terreno per cui si esclude la conduzione come mezzo di dispersione del calore. Quando la suola viene immersa nel ghiaccio invece queste zone entrano in contatto con esso, seppur parzialmente, permettendo una più efficace asportazione del calore da parte del mezzo disperdente.

Viceversa, nel caso del Tacco si nota come sono le temperature relative all'ambiente ghiaccio ad essere più elevate. Il Tacco, così come precedentemente discusso nel Capitolo 4, è la zona della suola con la maggior area di contatto con il terreno. Ne consegue che, quando lo scarpone appoggia sulla piastra di rame una buona parte della superficie del tacchetto entra a contatto con essa, mentre nel caso del ghiaccio, che non è una lastra uniforme, ma è costituito da pezzetti di geometrie irregolari, l'area di contatto sarà inferiore. Di conseguenza nel primo caso la dispersione di calore risulterà maggiore. Inoltre, la conducibilità termica del rame è maggiore rispetto a quella del ghiaccio, ed è quindi in linea con le aspettative che il ghiaccio sia un migliore isolante rispetto alla piastra di rame.

Per quanto riguarda le altre zone (Punta Centro (10) e Tacco centro (11)) la situazione è intermedia, con le curve relative agli ambienti aria e ghiaccio che si sovrappongono. Fa eccezione la prima misurazione relativa al ghiaccio, ma come già accennato nel capitolo precedente è possibile che durante le operazioni di comminazione la temperatura dello stesso sia aumentata eccessivamente e non si sia lasciato sufficiente tempo per permettere un corretto acclimatamento del ghiaccio, portando quindi ad un aumento della temperatura. La bontà di questa spiegazione verrà confermata o smentita nei successivi confronti.

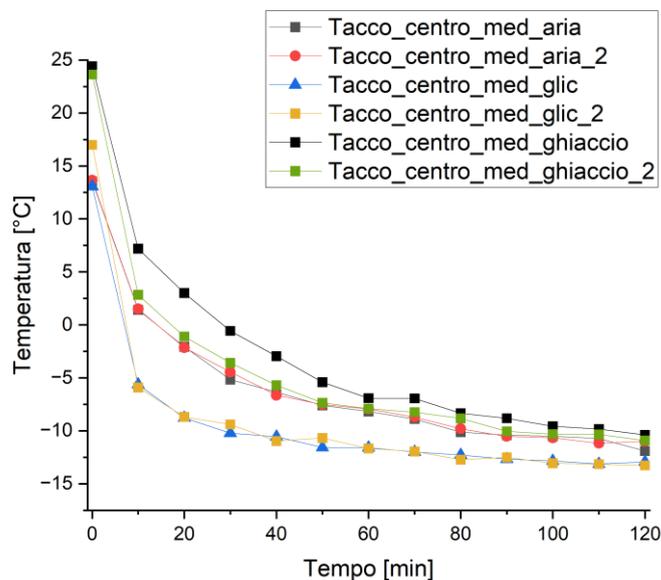
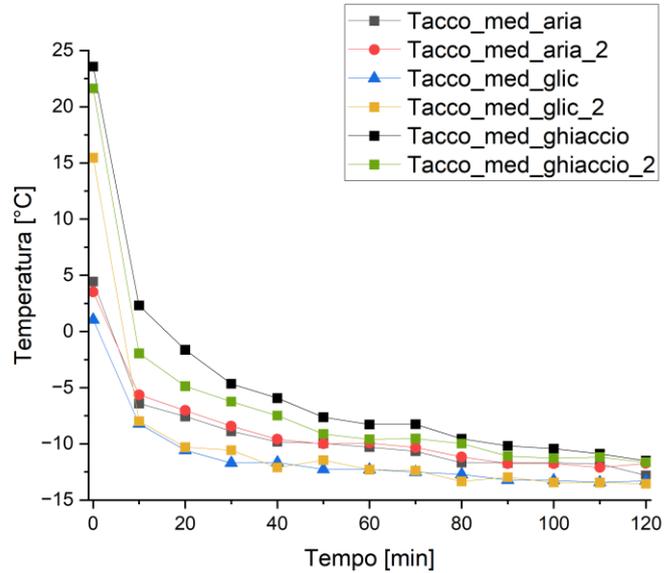
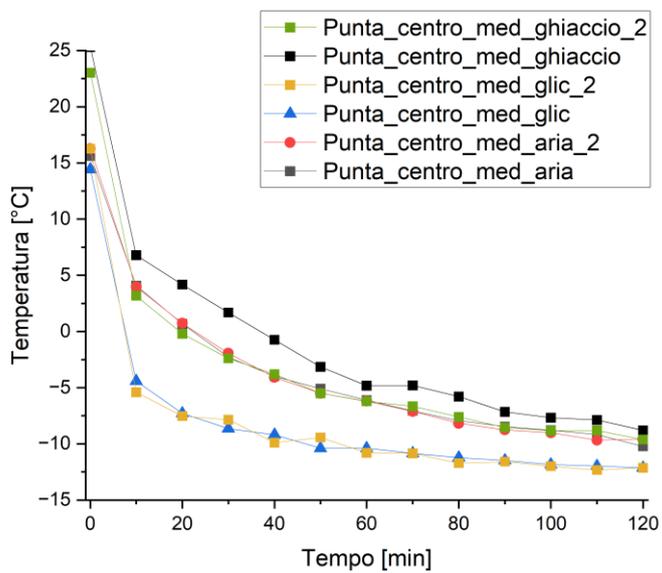
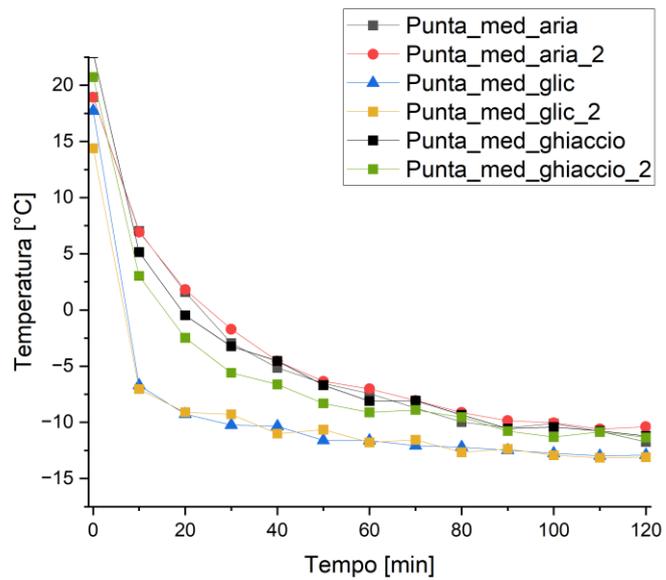
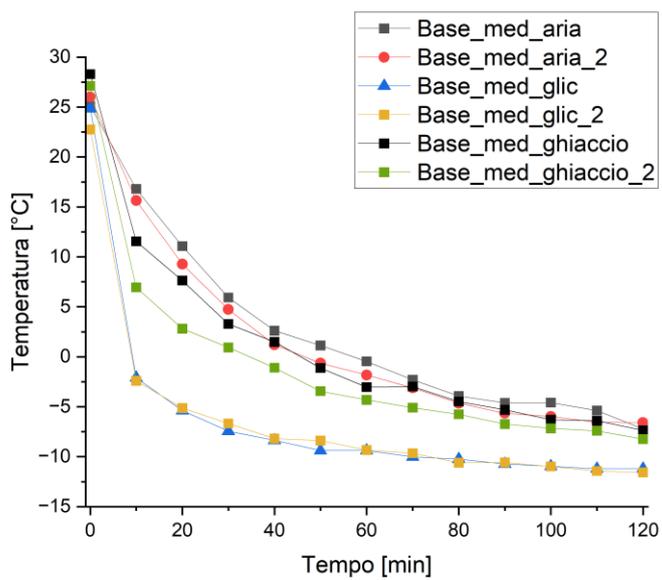


Figura 6.2: Andamento delle temperature delle cinque zone della suola estrapolate dalle termografie

6.2 Test con riempimento in riso in ambienti diversi

Il confronto tra i dati prosegue andando ad analizzare i dati relativi al riempimento a base riso, confrontandoli nei tre diversi ambienti. In Figura 6.3 sono riportati i grafici relativi alle temperature registrate dai sensori interni.

Dal confronto dei dati la situazione è del tutto analoga a quella commentata nel confronto precedente. I diversi ambienti sembrerebbero non andare a modificare in maniera marcata le temperature dei sensori interni. L'alluce e l'arco si confermano essere le due zone in cui la variabilità dei diversi ambienti è più contenuta, mentre per le restanti aree si osserva una maggior dispersione nei risultati.

Per quanto riguarda l'analisi delle immagini termiche, in Tabella 6.2 sono riportate le temperature finali delle zone evidenziate. In questo frangente non si nota un pattern ricorrente netto, come nel caso precedente soprattutto per quel che riguardano le zone della ghetta (1-6). In alcune aree è il sistema con l'aria a raffreddarsi più velocemente, in altri sembrerebbe essere quello con il glicole.

Diversa è la situazione per le altre zone evidenziate relative alla suola (7-11), dove nuovamente si nota come il sistema a base glicole tende a raggiungere temperature più basse rispetto agli altri due. Il trend viene ulteriormente confermato se si vanno a confrontare i risultati presentati in Figura 6.4 dove sono riportati gli andamenti delle temperature durante tutte e due le ore di permanenza in camera climatica, delle aree della suola estrapolate dalle termografie. Anche qui, come nel caso precedente, si nota come, quando la suola viene immersa nella soluzione a base glicole, la velocità di raffreddamento è maggiore in ogni area analizzata, rispetto agli altri due ambienti, soprattutto nei primi minuti di permanenza in camera. Col passare del tempo le differenze tra le temperature misurate tendono a ridursi e in alcune zone al termine del test arrivano a coincidere.

	aria_1	aria_2	ghiac_1	ghiac_2	glic_1	glic_2
Frontale (1)	-12.042	-12.117	-11.58	-11.224	-11.023	-12.781
Front_interno (2)	-11.126	-11.036	-8.683	-9.002	-8.418	-9.731
Cent_interno (3)	-8.371	-8.222	-6.525	-6.837	-7.252	-7.967
Dorso (4a)	-9.783	-9.786	-8.744	-8.012	-8.906	-9.828
Dorso (4b)	-10.103	-10.029	-10.811	-10.03	-11.239	-12.529
Cent_esterno (5)	-6.736	-6.721	-7.712	-7.44	-7.612	-8.768
Front_esterno (6)	-10.649	-10.619	-10.229	-9.778	-10.031	-11.558
Base (7)	-7.642	-7.364	-8.75	-8.639	-10.303	-11.294
Tacco (8)	-12.464	-12.264	-11.906	-11.501	-12.239	-13.207
Punta (9)	-11.875	-11.78	-11.999	-11.722	-12.123	-13.27
Punta_centro (10)	-10.46	-10.398	-10.164	-10.34	-10.993	-12.047
Tacco_centro (11)	-11.587	-11.402	-11.335	-11.064	-11.923	-12.704

Tabella 6.1: Temperatura dopo 2 ore, delle zone esterne dello scarpone evidenziate

Si osserva inoltre, così come nel caso precedente, che nelle aree della Base e in maniera minore della Punta, la velocità di raffreddamento del sistema in aria è più lenta rispetto a quello in ghiaccio. Per quanto riguarda il Tacco si nota una leggera differenza di temperature tra i due ambienti nei primi 30 minuti, che va tuttavia a perdersi con il passare del tempo in camera. Per quanto riguarda la Punta e il Tacco centrali invece le curve si sovrappongono e si intersecano in diversi punti, ma mediamente

rimangono sovrapponibili. Parrebbe quindi parzialmente confermato la tendenza vista nel confronto precedente, ma con differenze meno marcate.

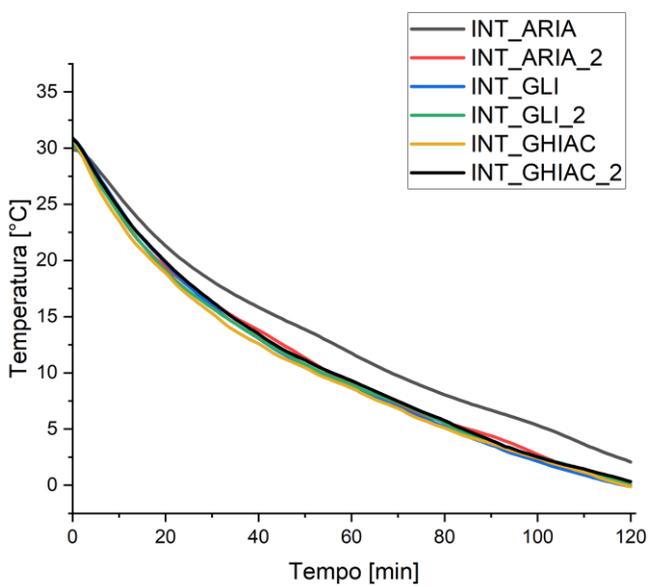
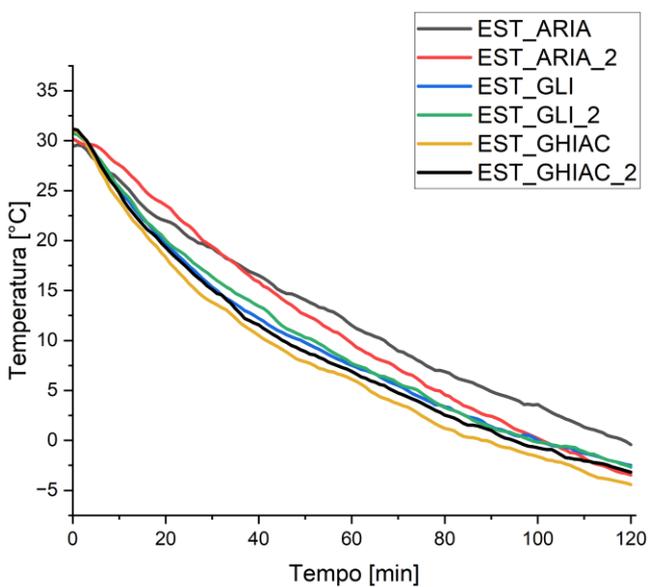
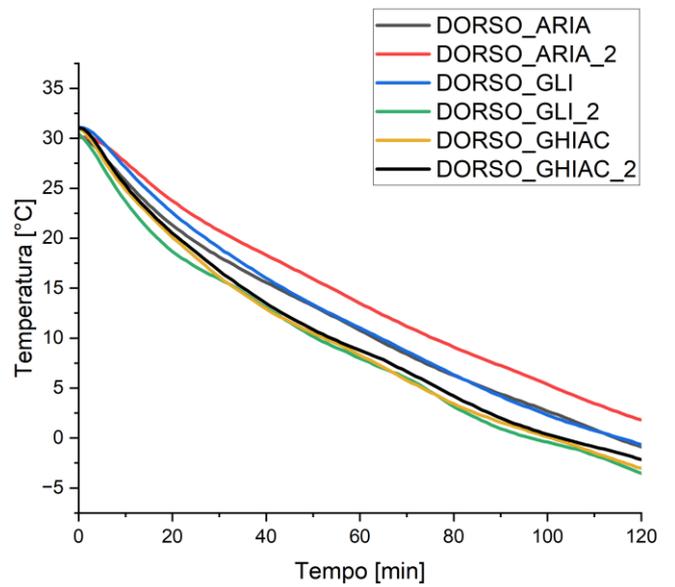
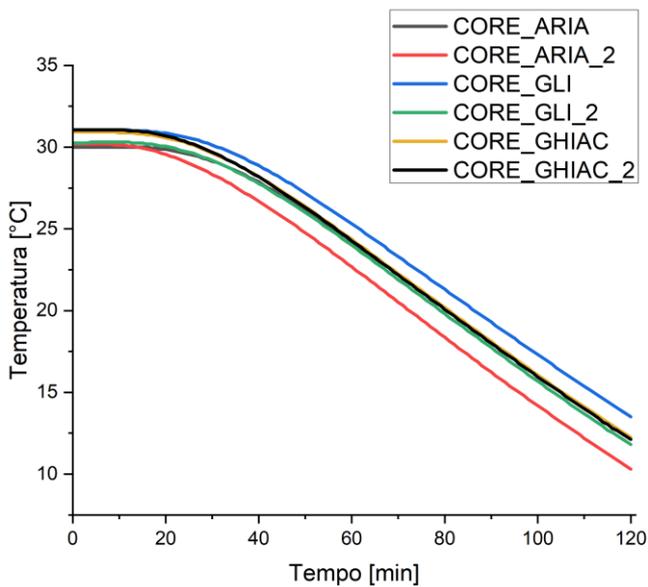
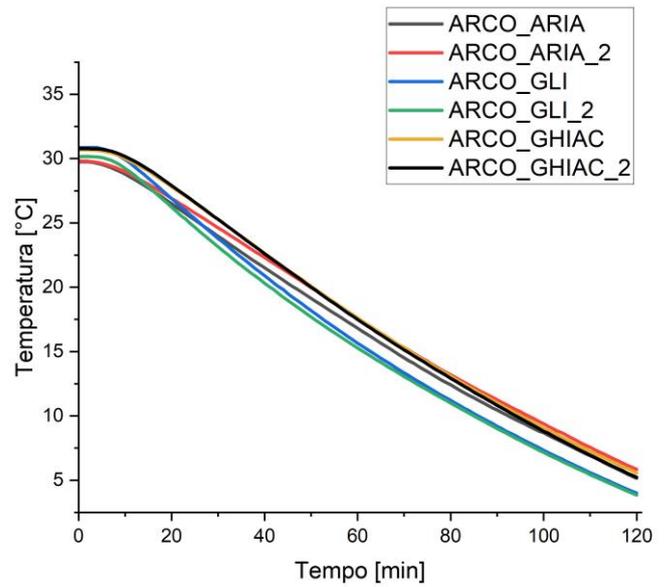
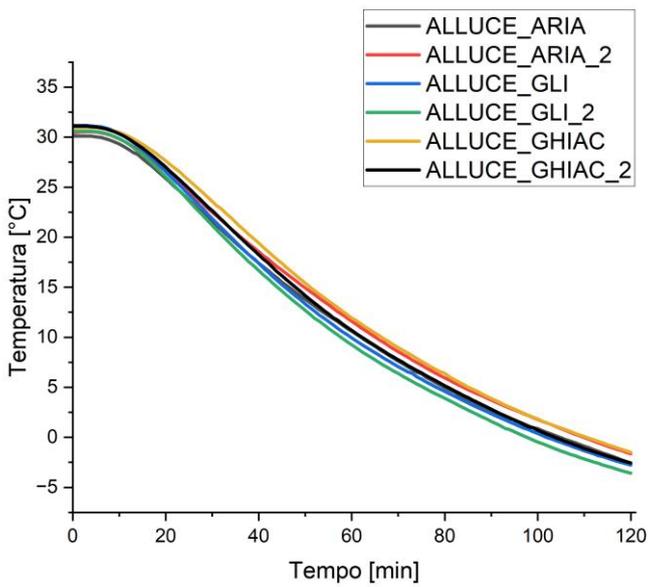


Figura 6.3: Confronto tra diversi ambienti

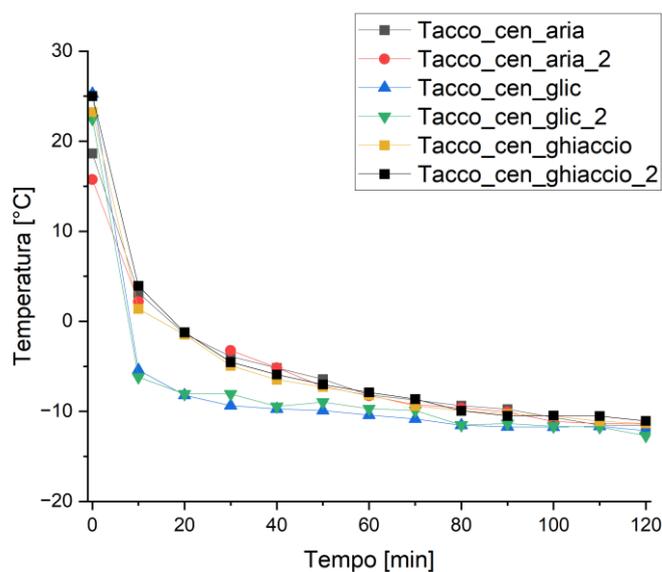
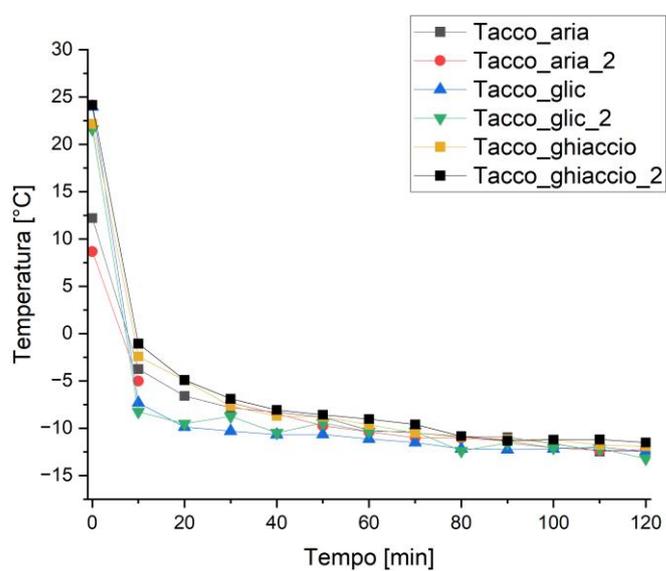
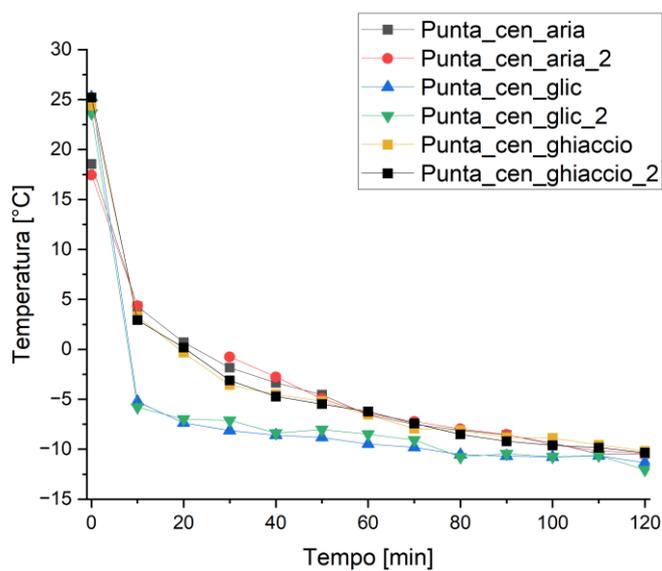
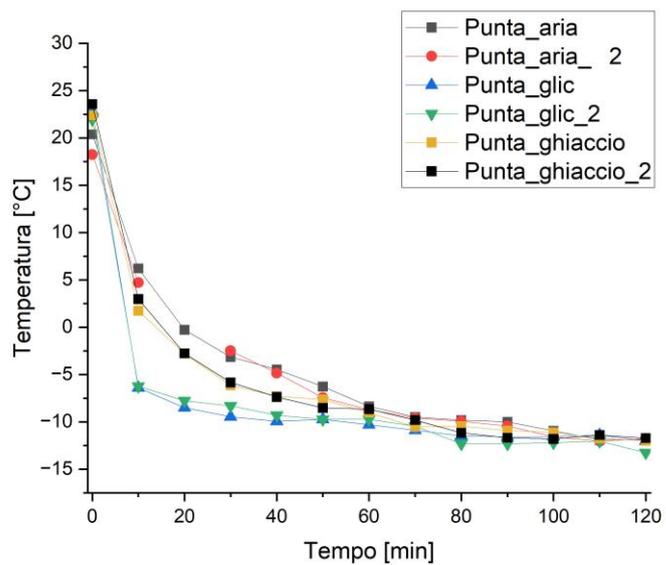
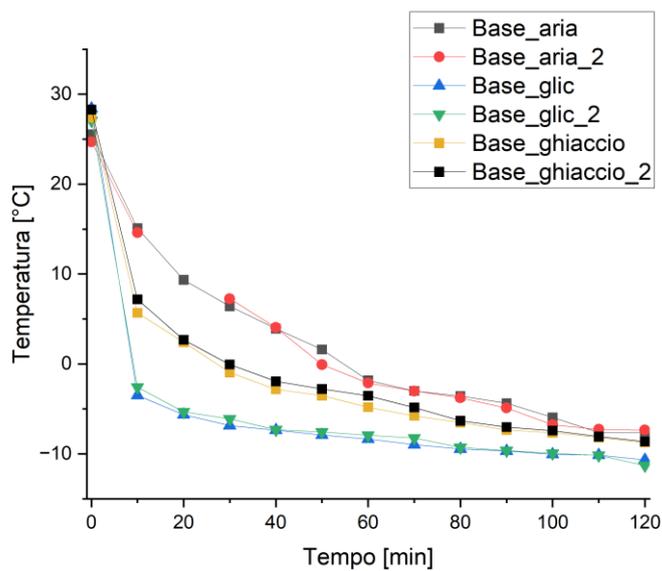


Figura 6.4: Andamento delle temperature delle cinque zone della suola estrapolate dalle termografie

6.3 Test con riempimento di acqua in ambienti diversi

Si passa infine all'ultimo confronto che vede il riempimento con l'acqua testato nei tre differenti ambienti. In Figura 6.5 sono riportati i grafici relativi alle temperature registrate dai sensori interni. Anche per quanto riguarda l'acqua valgono le stesse considerazioni fatte per gli altri due riempimenti. Le diverse condizioni ambientali esterne non sembrano far variare le temperature interne registrate in maniera rilevante. Di nuovo si osserva una variabilità nelle temperature minori per quanto riguarda i due sensori posizionati sulla suola dello scafo (Alluce e Arco). Si nota, per quanto riguarda le curve del Core e del Dorso, come le due ripetizioni in aria tendendo a dare una diminuzione di temperatura più lenta, fatto che non si ripete però nelle altre zone analizzate. In entrambi i casi le differenze rispetto agli altri ambienti è comunque contenuta e si aggira attorno ad 1°C; potrebbe trattarsi quindi semplicemente di una fluttuazione statistica dato che negli altri confronti questo comportamento sembrerebbe non ripetersi.

Nei grafici in figura 6.5 si nota in maniera ancora più evidente un fatto che era già stato trattato nel Capitolo 5, ovvero la forma a gradino che assumono le curve di raffreddamento. Questo particolare comportamento è dovuto alla movimentazione dello scarpone durante le acquisizioni delle termografie. Durante queste operazioni i sensori, per un certo lasso di tempo non si trovano più a diretto contatto con il liquido, ma con l'aria, andando così ad aumentare la temperatura misurata e andando a generare questo tipo di segnale.

Per quanto riguarda l'analisi delle immagini termiche, in Tabella 6.3 sono riportate le temperature finali delle zone evidenziate. Come nel confronto precedente, per quanto riguarda le aree relative alla ghetta, non sembra esserci un pattern ricorrente. In alcune zone è il contatto della suola con l'acqua a farle raffreddare più velocemente, in altre il glicole, in altre ancora è il ghiaccio. In generale si può affermare che è più la differenza nel riempimento a dar vita a dei pattern ricorrenti per quanto riguarda queste zone, piuttosto che i diversi ambienti in cui si trova immerso lo scarpone.

	aria_1	aria_2	ghiac_1	ghiac_2	glic_1	glic_2
Frontale (1)	-9.046	-8.626	-2.916	-4.588	-4.389	-7.189
Front_interno (2)	-3.192	-4.176	-5.373	-5.67	-4.195	-3.987
Cent_interno (3)	-1.269	-1.938	-3.458	-3.057	-2.944	-2.538
Dorso (4a)	-2.208	-2.164	-3.214	-3.667	-4.266	-3.816
Dorso (4b)	-5.009	-5.897	-8.748	-8.55	-8.571	-7.39
Cent_esterno (5)	-0.287	-0.516	-2.985	-3.534	-2.567	-2.152
Front_esterno (6)	-3.785	-3.982	-5.529	-5.988	-5.644	-4.915
Base (7)	-3.879	-5.005	-6.712	-7.767	-9.56	-8.819
Tacco (8)	-11.522	-12.267	-11.495	-12.189	-11.602	-11.098
Punta (9)	-10.753	-10.711	-10.822	-11.878	-11.308	-10.794
Punta_centro (10)	-8.068	-8.674	-8.642	-9.715	-9.555	-8.939
Tacco_centro (11)	-10.625	-11.212	-10.75	-11.42	-11.207	-10.749

Tabella 6.3: Temperatura dopo 2 ore, delle zone esterne dello scarpone evidenziate

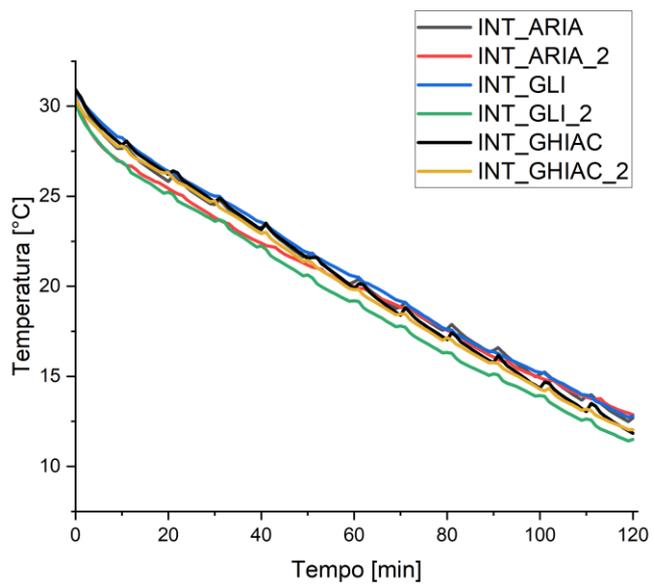
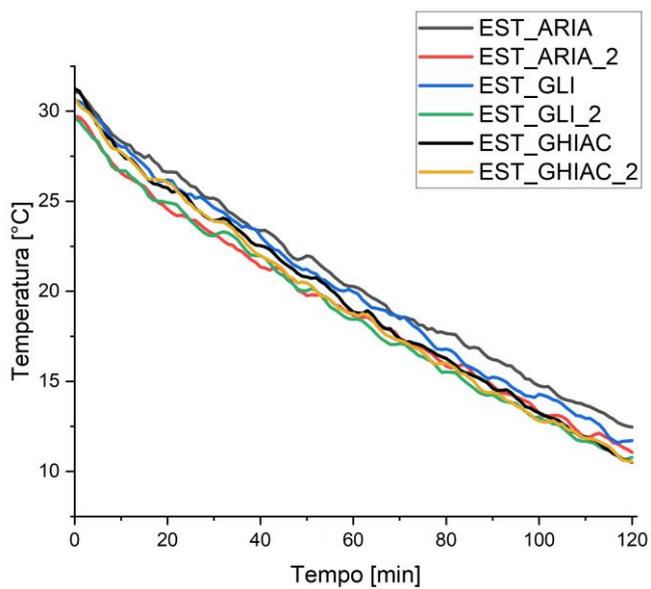
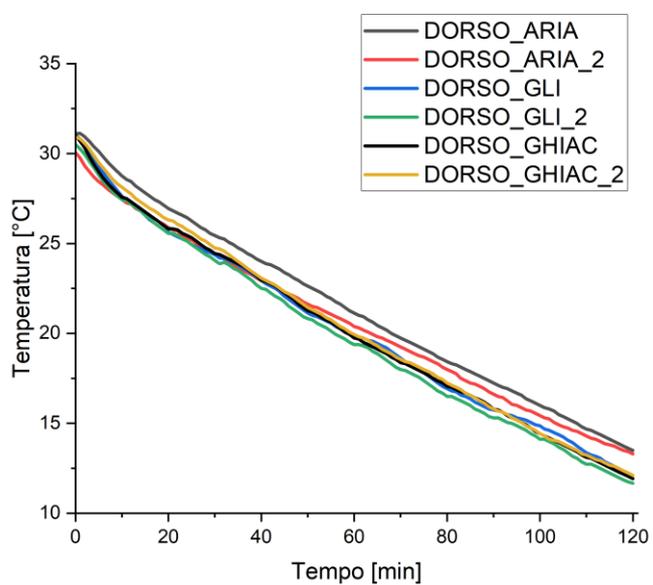
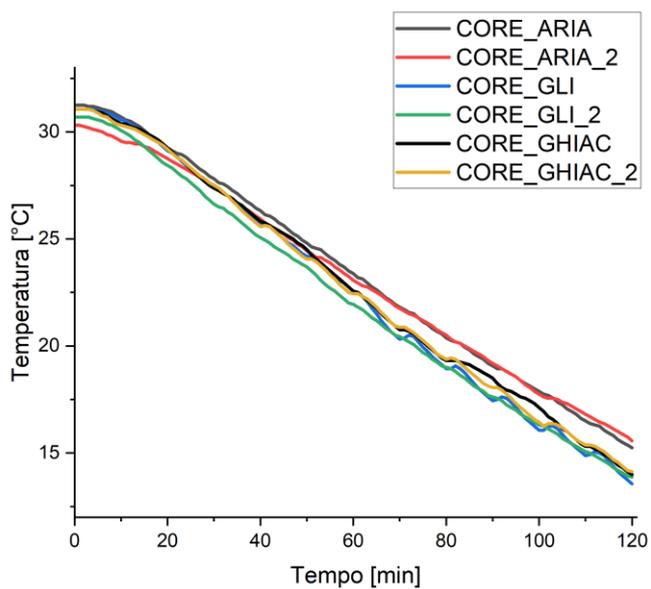
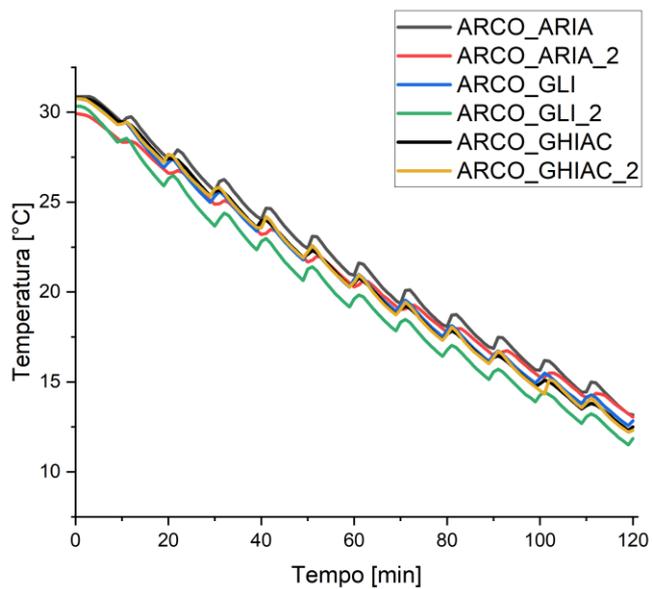
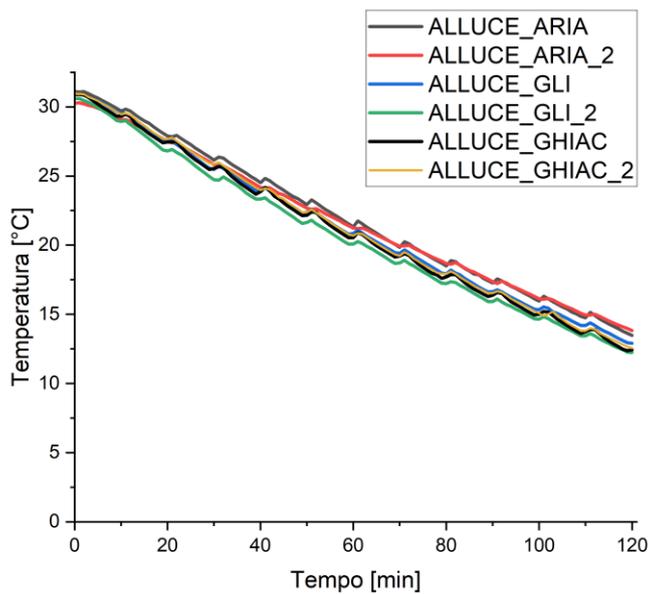


Figura 6.5: Confronto tra diversi ambienti

Le aree della suola (7-11) tendono a confermare quella che è la tendenza già osservata nei due confronti precedenti (Figura 6.6). Per ciascuna zona la velocità di raffreddamento nel caso della soluzione contenente glicole è maggiore rispetto agli altri due ambienti, soprattutto nei primi minuti.

Col passare del tempo in camera le differenze tra le temperature misurate tendono a ridursi e in alcune zone, al termine del test, arrivano a coincidere. Inoltre, anche in questo frangente la Base e la Punta mostrano come lo scarpone immerso nel ghiaccio porti ad un raffreddamento più rapido rispetto a quando esso si trova a contatto con la piastra di rame. Di nuovo, nel primo caso il ghiaccio entra a diretto contatto con queste due zone, mentre nel secondo la punta e la piastra rimangono separate. Per quanto riguarda la zona del Tacco le differenze tra il ghiaccio e l'aria che si sono osservate col riempimento in acciaio sono appena percettibili. Bisogna comunque tenere in considerazione che la suola avrà punti di contatto di volta in volta differenti quando è immersa nel ghiaccio; dunque, una certa variabilità nei risultati è assolutamente prevedibile. Infine, le aree Tacco centrale e soprattutto Punta centrale, in relazione agli ambienti ghiaccio ed aria, forniscono due curve di temperatura praticamente sovrapponibili.

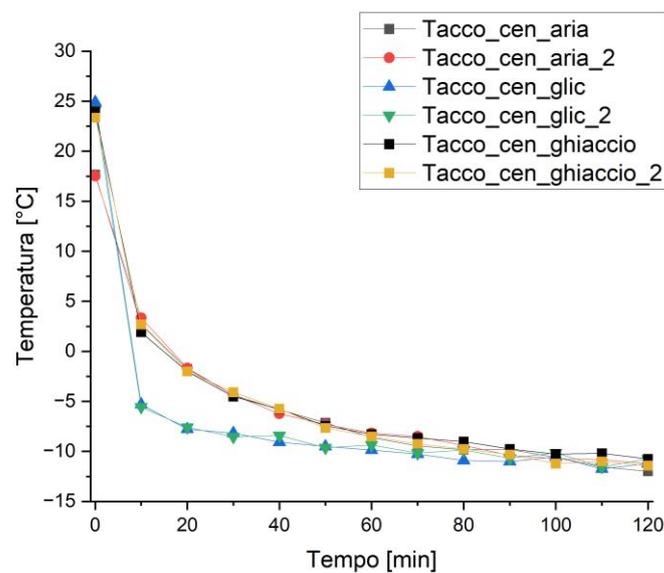
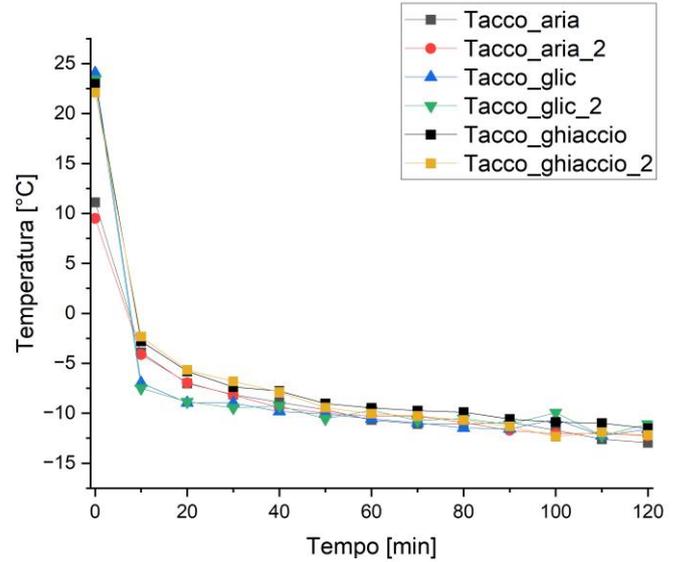
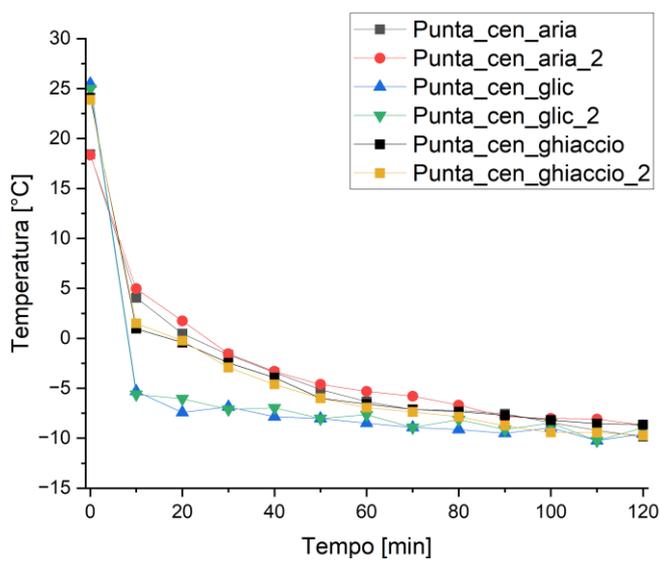
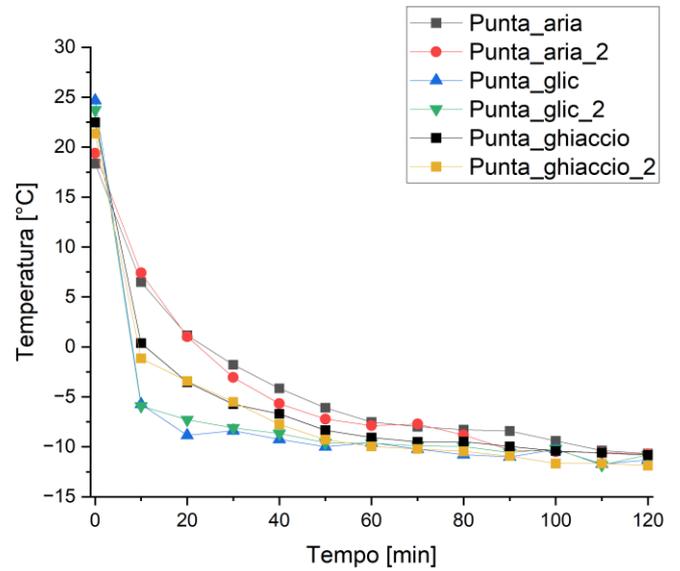
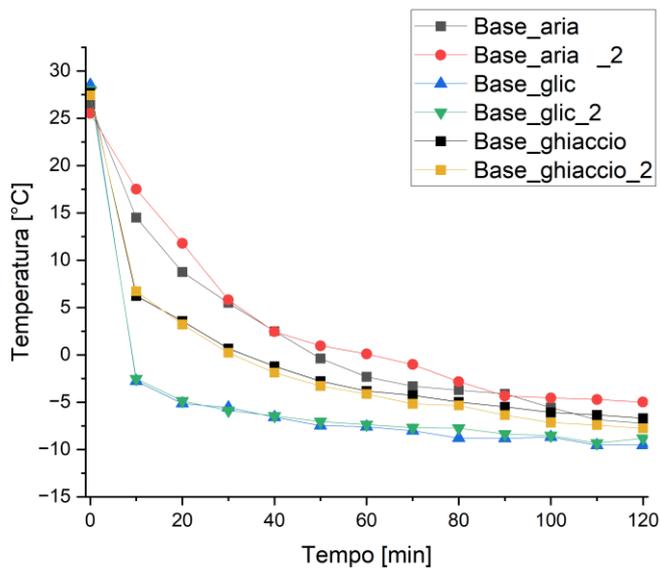


Figura 6.6: Andamento delle temperature delle cinque zone della suola estrapolate dalle termografie

6.4 Conclusioni

Nel capitolo 6 si sono affrontati una serie di confronti tra i diversi ambienti in cui è stato testato lo scarpone (aria, glicole e ghiaccio) mantenendo inalterato di volta in volta il riempimento interno. In generale quello che è emerso è stato che:

- La variabilità tra le temperature misurate dai sensori interni nei tre ambienti differenti in ciascuna zona è molto contenuta. Il diverso contesto nel quale si trova immersa la suola sembra avere un effetto trascurabile sulle temperature interne misurate, soprattutto per quelle zone dello scarpone che si trovano in maggior prossimità con la suola ovvero l'alluce e l'arco. La maggior variabilità delle misurazioni la si osserva nei sensori più lontani dalla suola, ovvero il core, il dorso, l'esterno e l'interno a causa della loro difficoltà di posizionamento.
- Per quanto riguarda l'analisi delle immagini termiche relative alla suola si osserva che quando la suola è immersa nella soluzione a base glicole, le temperature misurate raggiungano valori inferiori, mentre nel caso del ghiaccio e dell'aria le curve di temperatura hanno valori confrontabili. Questo comportamento non stupisce poiché nei sistemi in aria e in ghiaccio la suola tende ad avere solo alcuni punti di contatto con la piastra di rame e con il ghiaccio tritato, per cui lo scambio termico avverrà in parte per conduzione con il mezzo e in parte per convezione naturale. Nel caso della soluzione a base glicole d'altra parte, essendo liquida, riesce ad entrare bene a contatto con tutte le zone della suola consentendo un maggiore scambio termico e portando ad un raffreddamento più rapido.
- Vi è comunque una certa differenza di risultati anche tra gli ambienti aria e ghiaccio in alcune zone specifiche. Si osserva infatti come per alcune aree (Base e Punta) le temperature relative al sistema in aria risultino più elevate rispetto all'ambiente con il ghiaccio. Quando lo scarpone viene posizionato sulla piastra di rame, la Base e la Punta non entrano mai in contatto con il terreno per cui è la convezione naturale e irraggiamento il principale mezzo di dispersione del calore. Quando la suola viene immersa nel ghiaccio invece queste zone entrano in contatto con esso, seppur parzialmente, permettendo una più efficace asportazione del calore da parte del mezzo disperdente.
Per quanto riguarda il tacco invece la situazione è opposta. Quando lo scarpone appoggia sulla piastra di rame una buona parte della superficie del tacchetto entra a contatto con essa, mentre nel caso del ghiaccio, che non è una lastra uniforme, ma è costituito da pezzetti di geometrie irregolari, l'area di contatto sarà inferiore. Di conseguenza nel primo caso la dispersione di calore risulterà maggiore. Questo comportamento è maggiore nel caso del riempimento in acciaio, minore nel caso del riso e praticamente trascurabile con l'acqua.
- Non si è osservato invece un pattern ricorrente per quel che riguarda le temperature esterne relative alla ghetta, come invece avvenuto nel confronto fatto con i diversi materiali di riempimento nel Capitolo 5.

7.

Conclusioni

Il lavoro di tesi svolto si è focalizzato sulla valutazione dell'isolamento termico di scarponi per l'alpinismo. Il comfort termico è un parametro fondamentale per l'essere umano poiché influisce notevolmente sia sulla salute che sul benessere delle persone. Questo diventa ancora più importante quando ci si trova in condizioni ambientali estreme, come può avvenire in alta montagna.

Per questo lavoro sono stati inizialmente eseguiti una serie di test su tre tipologie di scarponi per l'alpinismo prodotti da SCARPA (il Phantom Tech, il Phantom 6000 ed il Phantom 8000), seguendo parzialmente la norma ISO 20344, che prevede il riempimento degli scarponi con sfere di acciaio inox e l'utilizzo di una camera climatica impostata ad una temperatura di -17°C .

Una volta acquisiti i dati di temperatura, questi hanno permesso sia di evidenziare come le differenti zone interne dello scarpone avessero una risposta differente al raffreddamento (Figura 7.1, a), sia come i differenti meccanismi di trasferimento del calore potessero giustificare i risultati ottenuti (conduzione e convezione naturale). Nello specifico la zona relativa all'alluce è l'area interna dello scarpone che maggiormente tende a raffreddarsi, mentre il Dorso e in particolare il Core quelle che mantengono maggiormente la temperatura iniziale. È stato inoltre possibile fornire un confronto sull'isolamento termico delle tre tipologie di calzature analizzate (Figura 7.1, b), che vede il Phantom 8000 come quello maggiormente isolante, seguito dal Phantom 6000 e dal Phantom Tech. Anche per quanto riguarda le analisi termografiche si osserva come nel caso del Phantom 8000 le temperature esterne registrate siano le più basse, seguite da quelle dal Phantom 6000 ed infine dal Phantom Tech. Infine, è stato possibile confrontare la differenza di comportamento delle due taglie testate di ciascuno scarpone (Figura 7.1, c), mostrando come generalmente la taglia più piccola abbia una velocità di raffreddamento maggiore.

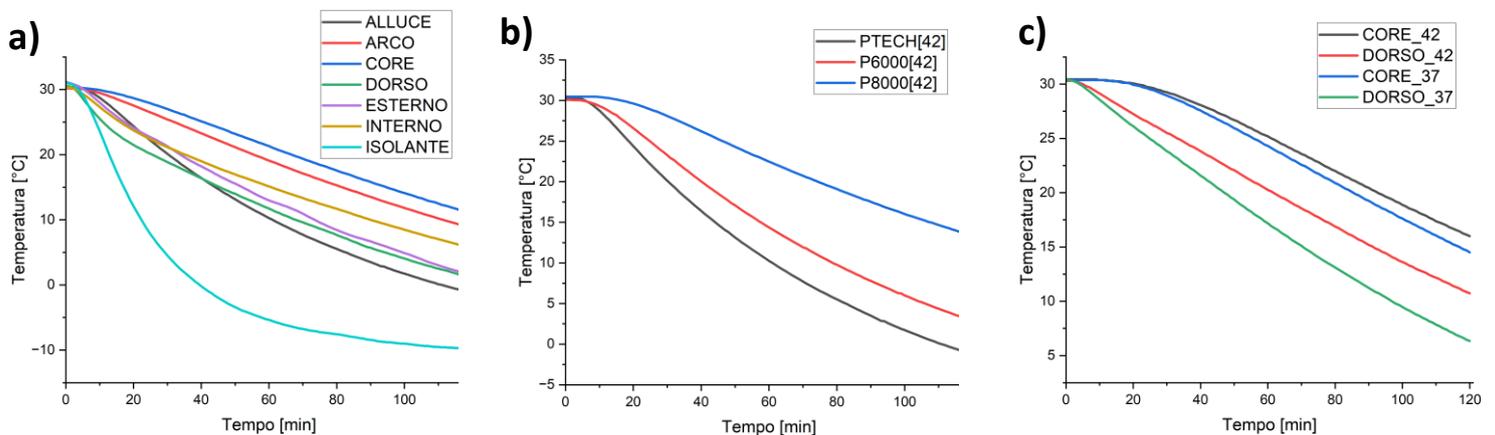


Figura 7.1: a) Confronto tra sensori, b) Confronto tra scarponi, c) Confronto tra numeri diversi

Ci si è successivamente concentrati sul comportamento termico del solo Phantom Tech numero 42, andando a variare il riempimento interno dello scarpone e le condizioni ambientali esterne. Le sferette di acciaio sono state inizialmente sostituite con del riso e successivamente con dell'acqua, mentre, per quanto riguarda l'esterno, la suola è stata dapprima lasciata tal quale sulla piastra di rame; successivamente inserita in una vaschetta contenente una soluzione a base glicole ed infine in una contenente ghiaccio tritato. Ciascun riempimento è stato testato in ognuno degli ambienti descritti e sono state effettuate due ripetizioni per studiarne le ripetibilità. I risultati hanno mostrato come il variare del riempimento tenda a modificare in maniera marcata le temperature interne misurate, con un effetto minore sul comportamento termico della suola (Figura 7.2). Viceversa, le differenti condizioni ambientali a cui viene esposta la suola tendono a modificarne le temperature registrate, ma a mantenere pressoché inalterate le condizioni interne dello scarpone (Figura 7.3).

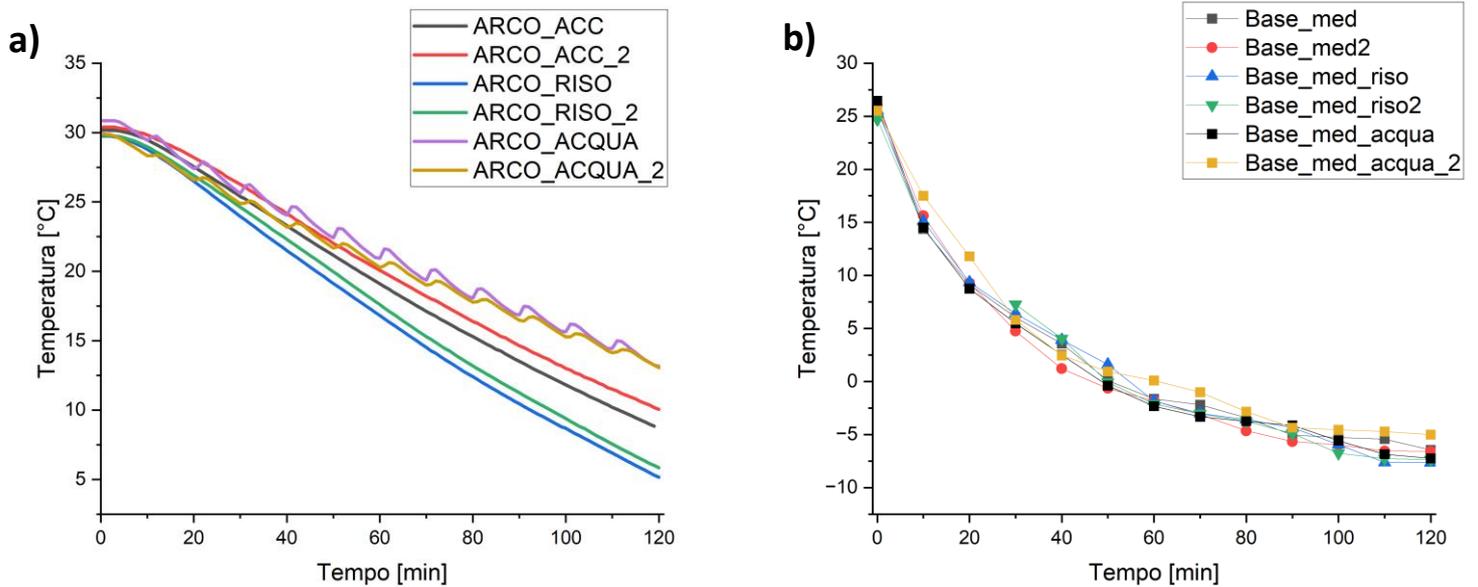


Figura 7.2: a) confronto temperature misurate nelle zone di interesse, b) confronto suola di riempimenti diversi, nello stesso ambiente

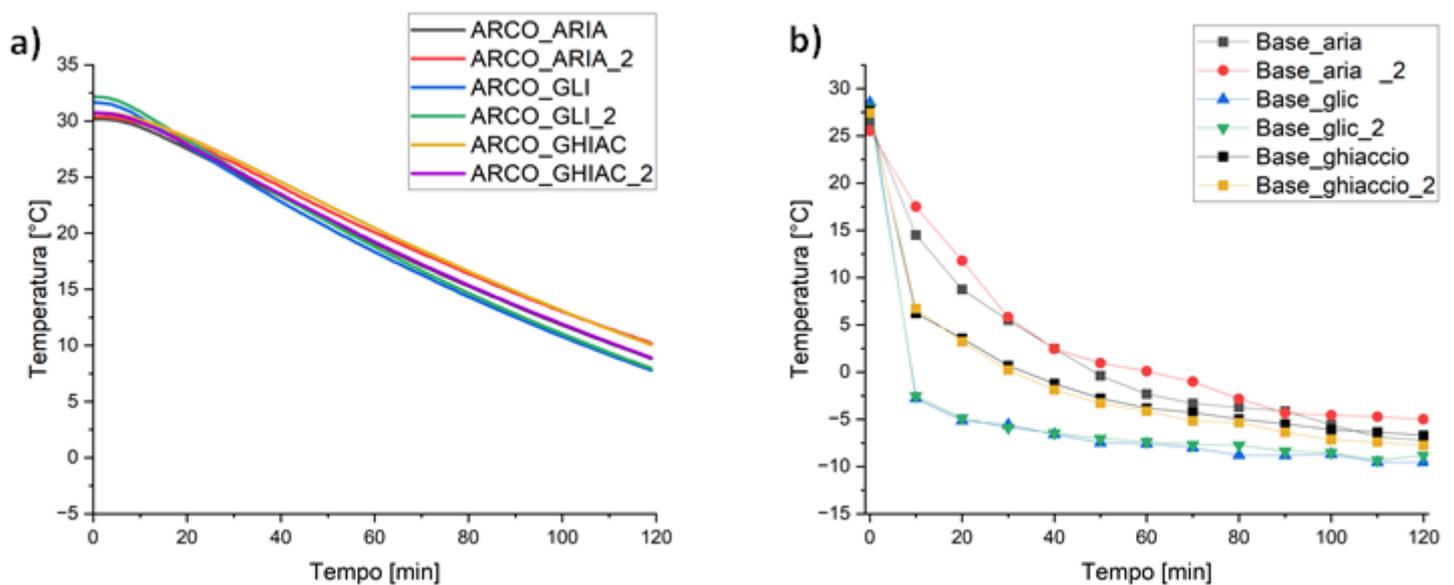


Figura 7.3: a) confronto temperature misurate nelle zone di interesse, b) confronto suola in ambienti differenti con

Una parte di questo lavoro di tesi andrà inoltre a far parte di un più ampio progetto di dottorato, che mira a stabilire con maggiore precisione e completezza l' idoneità e il livello di isolamento e comfort termico delle tre tipologie di scarponi analizzate. Attualmente, infatti, la valutazione del comfort e delle prestazioni di isolamento termico delle calzature destinate alla protezione dal freddo si limita a una valutazione secondo un criterio "pass/fail" in conformità con la norma ISO 20344. Di conseguenza campioni con caratteristiche anche molto differenti gli uni dagli altri, a seguito di un esito positivo del test, vengono considerati ugualmente validi.

Biobliografia e sitografia

Nigel A S Taylor, Christiano A Machado-Moreira, Anne M J van den Heuvel, Joanne N Caldwell – 2014 - Hands and feet: physiological insulators, radiators and evaporators

Mathew Debenham – 2021 - Cold temperatures can reduce muscle strength and speed but increase muscle activity

Anna Bogdan – 2011- Case Study Assessment of Local and General Thermal Comfort by Means of Local Skin Temperature

Enciclopedia Treccani

A.M.J. van Ooijen – 2008 - Human thermoregulation: Individual differences in cold induced thermogenesis

Hong Liu, Yuxin Wu, Danni Lei, Baizhan Li – 2018 - Gender differences in physiological and psychological responses to the thermal environment with varying clothing ensembles

L Schellen, W D van Marken Lichtenbelt, M G L C Loomans, J Toftum, M H de Wit – 2010 - Differences between young adults and elderly in thermal comfort, productivity, and thermal physiology in response to a moderate temperature drift and a steady-state condition

Nigel A.S. Taylor, Christiano A. Machado-Moreira, Anne M.J. van den Heuvel, Joanne N. Caldwell, Elizabeth A. Taylor and Michael J. Tipton² – 2009 - The roles of hands and feet in temperature regulation in hot and cold environments

J. Malchaire – 2016 -Ergonomics of the thermal environment Determination of metabolic rate

Ken Parsons – 2003 – Human thermal environments

Oxmoor house – 2009 - House Mayo Clinic Family Health Book

Istituto Superiore di Sanità – 2020 - Congelamento e ipotermia

ISO 11079 (Ergonomics of the thermal environment -Determination and interpretation of cold stress when using required clothing insulation (IREQ) and local cooling effects)

ISO 8996 (Ergonomics of the thermal environment — Determination of metabolic rate)

ISO 9866 (Ergonomics — Evaluation of thermal strain by physiological measurements)

ISO 9920 (Ergonomics of the thermal environment — Estimation of thermal insulation and water vapour resistance of a clothing ensemble)

ISO 15831 (Clothing - Physiological effects - Measurement of thermal insulation by means of a thermal manikin)

Yijun Fu, Lu Wang, Fujun Wang, Guo Ping Guan – 2015 - Influence of structures on the mechanical and absorption properties of a textile pile debridement material and its biological evaluation

Roshan Shishoo – 2015 - Textiles for Sportswear

Heather L. Paul, Kenneth R. Diller – 2003 - Comparison of Thermal Insulation Performance of Fibrous Materials for the Advanced Space Suit

John McLoughlin, Tasneem Sabir - 2017 - High-Performance Apparel. Materials, Development, and Applications

UNI 10714. Mobili imbottiti - Materiali da rivestimento di nontessuto a base di microfibre - Requisiti e metodi di prova – 1999

Department of Environmental and Occupational Health Sciences, University of Washington – 2011 - Environmental Sampling for MRSA in Fire Stations Project

SCARPA – phantom Tech HD - <https://it.scarpa.com/product/20049852/phantom-tech-hd-linea-phantom-alpinismo-invernale-black-bright-orange>.

Pu tek technology - https://www.lenziegisto.it/wp-content/uploads/2022/07/pieghevole-putek-WEB-19042021_c.pdf

H-Dry – H-Dry Technology - <https://www.hdry.com/en>

Lubizol, Engineered - Polymers (TPU) - <https://www.lubrizol.com/Engineered-Polymers/About/What-is-TPU>

Vibram - Vibram Solesystem - https://www.vibram.com/it/tecnologia/outdoor/TECH_durastep.html

ISO 20344 - 2021 - Personal protective equipment — Test methods for footwear Determination - of insulation against cold

IButton Link Thecnology - <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ds1923.pdf>)

MSR Elecronics GmbH - https://www.msr.ch/media/pdf/Datalogger_MSR147WD_Datasheet.pdf

Teledyne FLIR, FLIR A310f, <https://www.flir.it/support/products/a310-f-automation/#Overview>