

## Mestrado Integrado em Engenharia Química

# *Desenvolvimento de metodologias para a avaliação do desempenho térmico de meias através da utilização de um manequim térmico transpirável*

Tese de Mestrado

desenvolvida no âmbito da disciplina de

**Projecto de Desenvolvimento em Ambiente Empresarial**

Carla Alexandra Correia Santos

Em colaboração com:



Orientador na FEUP: **Doutor João Campos**

Orientador na empresa: **Doutor Tiago Sotto Mayor**

**Março de 2009**

---



## Agradecimentos

A realização deste projecto não teria sido possível sem a colaboração de inúmeras pessoas, às quais gostaria de deixar os meus sinceros agradecimentos.

Ao Doutor João Campos um agradecimento especial por todo o seu empenho, dedicação e prontidão na resolução dos obstáculos surgidos durante a realização da tese e pela orientação do trabalho.

Gostaria de agradecer ao Doutor Tiago Sotto Mayor pela constante dedicação e acompanhamento demonstrados no decorrer da tese e ainda pela confiança em mim depositada para a realização deste trabalho.

Ao Departamento de Engenharia Química, da faculdade de Engenharia da Universidade do Porto gostaria de expressar os meus agradecimentos pela possibilidade da realização deste projecto em ambiente empresarial.

Os meus agradecimentos ao CeNTI, na pessoa do seu director, Mestre António Vieira, pela disponibilidade de meios físicos e técnicos indispensáveis à realização dos trabalhos que suportaram este projecto. Gostaria ainda de agradecer ao Mestre Miguel Ribeiro por tudo o apoio dado durante a realização deste projecto, bem como a todas as pessoas do CeNTI pelo companheirismo demonstrado.

Agradeço ao CITEVE, em especial à Engenheira Ana Paula, por me ter facilitado o acesso ao laboratório de têxtil.

Às minhas colegas Ana Patrícia, Ana Sofia e Ana Silva pelo companheirismo e compreensão demonstradas ao longo desta experiência.

Por fim, à minha família e amigos pela compreensão e apoio dado durante os momentos atribulados que levaram à conclusão de mais uma etapa do meu percurso académico.

---

## Resumo

A procura de vestuário confortável e funcional, para as mais diversas situações, exige que se realizem vários estudos sobre as interações do vestuário com o corpo humano, de maneira a que se perceba com clareza os mecanismos envolvidos nessas interações. Assim sendo, surge este trabalho no qual se tenta reproduzir essa interação utilizando um conjunto de equipamentos que simule as transferências de calor e de massa (transpiração) do corpo humano.

De maneira a realizar as análises das peças de vestuário (meias), foram utilizados vários equipamentos de análise com sensores de temperatura e humidade relativa, como um manequim térmico, um pé térmico e um sistema de aquisição. Foram também utilizadas duas câmaras climáticas de diferentes capacidades (1 e 30m<sup>3</sup>) de maneira a condicionar as amostras em estudo.

Na realização deste trabalho foi necessário efectuar um conjunto de etapas que permitiu compreender os efeitos de transferência de calor e de massa sobre as amostras de meias (de lã, de algodão e de uma composição mista), nomeadamente na análise das suas resistências térmicas e das resistências à passagem de vapor de água. Para tal foi necessário realizar várias análises preliminares de modo a definir as condições de temperatura, humidade relativa e caudal de água, adequadas às medições a realizar.

Os objectivos principais consistiram então na avaliação das resistências térmicas e de passagem do vapor de água das várias amostras.

Após a realização deste trabalho foi possível concluir que a meia de algodão oferece menor resistência à passagem de calor e de vapor de água, e por sua vez a meia de composição mista oferece a maior resistência. Verificou-se também que o aumento do número de camadas do material utilizado fez aumentar as resistências totais de cada meia.

**Palavras Chave:**

pé térmico; isolamento térmico; resistência evaporativa; transferência de calor; transferência de massa.

---

## Abstract

The search for more functional and comfortable clothing, suited for any situation, needs that the interactions between clothing and the human body are studied, to clearly understand the mechanisms that are involved in those interactions. This work tries to reproduce that interaction by the use of some equipment that can simulate the true heat and mass transfers (sweat) from the human body.

In order to analyze the clothing (socks), some analyses equipment that had temperature and moisture sensors were used, like a thermal manikin, a thermal foot, and an data logger. It was also used two climatic chambers with different capacities (1 and 3m<sup>3</sup>) for conditioning the samples used.

In the execution of this work it was necessary to make a group of steps that allowed to understand the effects of heat and mass transfers on the socks (wool, cotton, and a mixed composition), particularly in the analyses of their thermal and water vapor resistance. For that achievement, additional analyses were necessary to determine the best conditions for the temperature, moisture and water flow, in order to obtain the desired results.

The main objectives consisted in the evaluation of the thermal and water vapor resistance from the footwear samples.

After the realization of this work, it was possible to conclude that the sock that had the lesser thermal and vapor resistance was the sock made of cotton, and the one that had the higher resistances was the one with the mixed composition. It was also verified that increasing the number of layers of socks, increases the total resistance of every sock.

**Keywords:** thermal foot; thermal insulation; evaporative resistance; heat transfer; mass transfer.

---

# Índice

Índice .....	i
Índice de Tabelas .....	iii
Índice de Figuras.....	v
Notação .....	viii
<b>1 Introdução.....</b>	<b>1</b>
1.1 Enquadramento e Apresentação do Projecto.....	1
1.2 Contributos do Trabalho.....	1
1.3 Organização da Tese .....	2
<b>2 Estado da Arte .....</b>	<b>3</b>
<b>3 Descrição Técnica e Discussão dos Resultados .....</b>	<b>7</b>
<b>3.1 Análise Preliminar .....</b>	<b>7</b>
3.1.1 Uniformização de calibrações entre equipamentos.....	7
3.1.2 Condicionamento das amostras na câmara climática de 1m <sup>3</sup> .....	12
3.1.3 Avaliação do desempenho da câmara climática de 30m <sup>3</sup> .....	16
<b>3.2 Desempenho térmico de meias.....</b>	<b>19</b>
3.2.1 Influência do posicionamento do pé térmico .....	20
3.2.2 Resistência Térmica .....	26
3.2.3 Resistência à passagem de vapor de água.....	35
<b>4 Conclusões .....</b>	<b>44</b>
<b>5 Avaliação do trabalho realizado.....</b>	<b>45</b>
5.1 Objectivos Realizados.....	45
5.2 Limitações e Trabalho Futuro .....	45
5.3 Apreciação final .....	45
Referências .....	46
<b>Anexo A Resultados da calibração .....</b>	<b>48</b>
A.1 Resultados do Ensaio 1.....	48
A.2 Resultados do Ensaio 2.....	49

<b>A.3</b>	<b>Resultados do Ensaio 3.....</b>	<b>50</b>
<b>A.4</b>	<b>Resultados do Ensaio 4.....</b>	<b>52</b>
<b>Anexo B</b>	<b>Comparação entre os diversos sensores utilizados durante a calibração .....</b>	<b>54</b>
<b>Anexo C</b>	<b>Cálculos efectuados para a determinação das áreas superficiais do TF .....</b>	<b>56</b>
<b>Anexo D</b>	<b>Fundamentos para a determinação do caudal de suor.....</b>	<b>59</b>
<b>Anexo E</b>	<b>Procedimento experimental para a determinação da resistência térmica ....</b>	<b>61</b>
<b>Anexo F</b>	<b>Procedimento experimental para a determinação da resistência evaporativa</b>	<b>62</b>
<b>Anexo G</b>	<b>Períodos de Estabilização .....</b>	<b>63</b>

# Índice de Tabelas

<i>Tabela 2.1 - Alguns marcos históricos no desenvolvimento de manequins térmicos com forma humana.</i>	4
<i>Tabela 3.1 - Descrição dos quatro ensaios realizados (variações de temperatura e de humidade relativa dentro de cada ensaio) .....</i>	8
<i>Tabela 3.2 - Diferenças obtidas entre a CC30 e o DL nos ensaios 1 e 2 .....</i>	9
<i>Tabela 3.3 - Diferenças obtidas entre o DL e o TF e o ML dos ensaios 3 e 4 .....</i>	9
<i>Tabela 3.4 - Diferenças de temperatura dos equipamentos relativamente à CC30.....</i>	10
<i>Tabela 3.5 - Variações de humidade relativa dos equipamentos relativamente à CC30.....</i>	11
<i>Tabela 3.6 - Descrição do sistema fechado usado nos ensaios efectuados.....</i>	13
<i>Tabela 3.7 - Variações de T e de HR e duração do transporte para cada ensaio .....</i>	13
<i>Tabela 3.8 - Variações de T e de HR para o mesmo tempo de transporte .....</i>	13
<i>Tabela 3.9 - Amplitudes obtidas para os valores de T e HR com e sem antecâmara .....</i>	19
<i>Tabela 3.10 - Descrição das variações efectuadas.....</i>	21
<i>Tabela 3.11 - Resistências térmicas obtidas para os ensaios realizados .....</i>	24
<i>Tabela 3.12 - Valores médios de <math>R_t</math> obtidos para cada condição experimental testada, bem como os respectivos desvios padrão e coeficientes de variação (CV).....</i>	26
<i>Tabela 3.13 - Espessuras e áreas totais obtidas para as meias em estudo .....</i>	28
<i>Tabela 3.14 - Coordenadas do equipamento .....</i>	29
<i>Tabela 3.15 - Valores médios de <math>R_t</math> obtidos para os ensaios realizados .....</i>	31
<i>Tabela 3.16 - Valores <math>R_t</math>, <math>R_{cl}</math> e <math>R_a</math> em <math>m^2 \cdot ^\circ C \cdot W^{-1}</math> e <math>f_{cl}</math> para cada meia analisada .....</i>	31
<i>Tabela 3.17 - Valores médios de <math>R_t</math> obtidos para os ensaios realizados (2 camadas).....</i>	32
<i>Tabela 3.18 - Valores <math>R_t</math>, <math>R_{cl}</math> e <math>R_a</math> em <math>m^2 \cdot ^\circ C \cdot W^{-1}</math> e <math>f_{cl}</math> para cada par analisado (2 camadas) .....</i>	33
<i>Tabela 3.19 - Comparação entre os valores médios de <math>R_{cl}</math> calculados com uma e duas camadas de material .....</i>	34
<i>Tabela 3.20 - Caudais utilizados para cada zona do pé térmico.....</i>	38
<i>Tabela 3.21 - Distribuição de caudais utilizada para o cálculo da <math>R_{et}</math> das meias analisadas .....</i>	40
<i>Tabela 3.22 - Valores médios de <math>R_{et}</math> para os ensaios realizados .....</i>	42
<i>Tabela 3.23 - Valores <math>R_{et}</math>, <math>R_{ecl}</math> e <math>R_{ea}</math> e <math>f_{cl}</math> para as meias analisadas .....</i>	42

<i>Tabela B.1 - Comparação entre os dois sensores do TF e do TM.....</i>	<i>54</i>
<i>Tabela B.2 - Variações nas temperaturas entre o sensor T1 e os restantes sensores do DL .....</i>	<i>55</i>
<i>Tabela B.3- Variações de HR entre HR1 e os restantes sensores do DL.....</i>	<i>55</i>
<i>Tabela C.1 - Áreas superficiais de cada zona térmica cedidas pelos fabricantes do TF.....</i>	<i>58</i>

# Índice de Figuras

<i>Figura 2.1 - Manequim “Walter” (esquerda) e “Newton” (direita).</i> .....	5
<i>Figura 3.1 - Esquematização da localização dos sensores dos diversos equipamentos (num compartimento na parede da CC30).</i> .....	8
<i>Figura 3.2 - Dados do ensaio 1 (com o saco térmico) para a temperatura e a humidade relativa.</i> .....	14
<i>Figura 3.3 - Dados do ensaio 2 (com o saco térmico) para a temperatura e a humidade relativa.</i> .....	15
<i>Figura 3.4 - Dados do ensaio 3 (com a arca térmica) para a temperatura e a humidade relativa.</i> .....	15
<i>Figura 3.5 - Dados do ensaio 4 (com a arca térmica) para a temperatura e a humidade relativa.</i> .....	15
<i>Figura 3.6 - Representação da antecâmara protótipo utilizada (vista frontal à esquerda e vista de topo à direita).</i> .....	16
<i>Figura 3.7 - Representação dos valores de temperatura obtidos a 25°C e 65% HR com a colocação da antecâmara (à esquerda) e sem a antecâmara (à direita).</i> .....	17
<i>Figura 3.8 - Representação dos valores de humidade relativa obtidos a 25°C e 65% HR com a colocação da antecâmara (à esquerda) e sem a antecâmara (à direita).</i> .....	17
<i>Figura 3.9 - Representação dos valores de temperatura obtidos a 22°C e 70% HR com a colocação da antecâmara (à esquerda) e sem a antecâmara (à direita).</i> .....	18
<i>Figura 3.10 - Representação dos valores de humidade relativa obtidos a 22°C e 70% HR com a colocação da antecâmara (à esquerda) e sem a antecâmara (à direita).</i> .....	18
<i>Figura 3.11 - Representação dos valores de temperatura obtidos a 34°C e 65% HR com a colocação da antecâmara (à esquerda) e sem a antecâmara (à direita).</i> .....	18
<i>Figura 3.12 - Representação dos valores de humidade relativa obtidos a 34°C e 65% HR com a colocação da antecâmara (à esquerda) e sem a antecâmara (à direita).</i> .....	19
<i>Figura 3.13 - Meias utilizadas no estudo (meia mista, de algodão e de lã, enunciadas de baixo para cima).</i> .....	20
<i>Figura 3.14 - Zonas em que se divide o pé térmico.</i> .....	23
<i>Figura 3.15 - Resistências térmicas obtidas através do método paralelo para as alturas utilizadas no ensaio 1 (durante o período de estabilização).</i> .....	24
<i>Figura 3.16 - Valores de <math>R_t</math> obtidos para os ensaios realizados.</i> .....	25
<i>Figura 3.17 - Representação esquemática da resistência total, intrínseca e da camada de ar.</i> .....	27
<i>Figura 3.18 - Representação esquemática das áreas usadas para o cálculo da área de superfície total do TF (vista lateral).</i> .....	28

<i>Figura 3.19 - Representação da instalação utilizada e do eixo considerado para a localização dos pontos. ....</i>	<i>29</i>
<i>Figura 3.20 - Evolução dos valores de <math>R_t</math> obtidos para o primeiro ensaio através do método paralelo. ....</i>	<i>30</i>
<i>Figura 3.21 - Valores médios de <math>R_{cl}</math> obtidos para as meias analisadas. ....</i>	<i>32</i>
<i>Figura 3.22 - Valores médios de <math>R_{cl}</math> obtidos para cada par analisado. ....</i>	<i>33</i>
<i>Figura 3.23 - Material utilizado para melhorar a difusão da água. ....</i>	<i>36</i>
<i>Figura 3.24 - Imagem térmica do processo de simulação da transpiração do TF com a pele difusora (à esquerda) e com o auxílio do borrifador (à direita). ....</i>	<i>37</i>
<i>Figura 3.25 - Esquematização de um corte transversal no cálculo da resistência evaporativa. ....</i>	<i>37</i>
<i>Figura 3.26 - Perdas de calor obtidas durante a estabilização da pele difusora A com a)caudal 1, b)caudal 2, c) caudal 3, d) caudal 4, e)caudal 5 e f)caudal 6. ....</i>	<i>39</i>
<i>Figura 3.27- Tempo de estabilização (à esquerda) e perdas de calor médias (à direita) em função dos caudais utilizados. ....</i>	<i>39</i>
<i>Figura 3.28 - Exemplificação das perdas de calor obtidas durante o período de estabilização. ....</i>	<i>41</i>
<i>Figura 3.29 - Valores médios de <math>R_{ecl}</math> obtidos para as meias analisadas. ....</i>	<i>43</i>
<i>Figura A.1 - Representação dos valores de T e HR obtidos pela CC30 e pelo DL no período de estabilização correspondente a 15°C e 50% HR. ....</i>	<i>48</i>
<i>Figura A.2 - Representação dos valores de T e HR obtidos pela CC30 e pelo DL no período de estabilização correspondente a 20°C e 50% HR. ....</i>	<i>48</i>
<i>Figura A.3 - Representação dos valores de T e HR obtidos pela CC30 e pelo DL no período de estabilização correspondente a 35°C e 50% HR. ....</i>	<i>49</i>
<i>Figura A.4 - Representação dos valores de T e HR obtidos pela CC30 e pelo DL no período de estabilização correspondente a 20°C e 30% HR. ....</i>	<i>49</i>
<i>Figura A.5 - Representação dos valores de T e HR obtidos pela CC30 e pelo DL no período de estabilização correspondente a 20°C e 50% HR. ....</i>	<i>50</i>
<i>Figura A.6 - Representação dos valores de T e HR obtidos pela CC30 e pelo DL no período de estabilização correspondente a 20°C e 80% HR. ....</i>	<i>50</i>
<i>Figura A.7 - Representação dos valores de temperatura obtidos pelo DL, pelo TF e pelo ML na zona de estabilização para 15°C e 50% HR. ....</i>	<i>51</i>
<i>Figura A.8 - Representação dos valores de temperatura obtidos pelo DL, pelo TF e pelo ML na zona de estabilização para 20°C e 50% HR. ....</i>	<i>51</i>

---

<i>Figura A.9 - Representação dos valores de temperatura obtidos pelo DL, pelo TF e pelo ML na zona de estabilização para 35°C e 50% HR. ....</i>	<i>51</i>
<i>Figura A.10 - Representação dos valores de temperatura obtidos pelo DL, pelo TF e pelo ML na zona de estabilização para 20°C e 30% HR. ....</i>	<i>52</i>
<i>Figura A.11 - Representação dos valores de temperatura obtidos pelo DL, pelo TF e pelo ML na zona de estabilização para 20°C e 50% HR. ....</i>	<i>52</i>
<i>Figura A.12 - Representação dos valores de temperatura obtidos pelo DL, pelo TF e pelo ML na zona de estabilização para 20°C e 80% HR. ....</i>	<i>53</i>
<i>Figura C.1 - Dimensões em metros do TF representadas em vista lateral (à esquerda) e frontal (à direita) .....</i>	<i>56</i>
<i>Figura D.1 - Representação da resistência evaporativa em função do caudal de água introduzido (cedida pelos fabricantes do pé térmico) .....</i>	<i>60</i>
<i>Figura G.1 - Representação das perdas de calor ao longo dos períodos de estabilização para a) meia mista, b) meia de lã, c) meia de algodão, d) par meia mista, e) par meia de lã e f) par meia de algodão nas medições de <math>R_t</math>.....</i>	<i>63</i>

## Notação

$A$	área superficial do pé térmico despido (corpo nu)	$m^2$
$A_{base}$	área da base do cilindro 2	$m^2$
$A_{cilindro\ 1}$	área do cilindro 1	$m^2$
$A_{cilindro\ 2}$	área do cilindro 2	$m^2$
$A_{cone\ 1}$	área do cone 1	$m^2$
$A_{cone\ 2}$	área do cone 2	$m^2$
$A_{cone\ total}$	área representativa da área superficial da base do pé térmico	$m^2$
$A_{cl}$	área superficial do pé térmico vestido	$m^2$
$a_i$	área de cada secção $i$	$m^2$
$A_{lateral}$	área lateral do cilindro 2	$m^2$
$\bar{d}_{cilindro\ 1}$	diâmetro médio do cilindro 1	$m$
$\bar{d}_{cilindro\ 2}$	diâmetro médio do cilindro 2	$m$
$d_{inferior}$	diâmetro inferior	$m$
$d_{superior}$	diâmetro superior	$m$
$f_{cl}$	factor de área	
$f_i$	factor de área da secção $i$	
$g$	geratriz do cone	$m$
$h$	altura	$m$
$H_e$	potência perdida pelo manequim	$W$
$HR$	humidade relativa	$\%$
$P_a$	pressão de vapor de água	$Pa$
$P_s$	pressão de vapor de saturação da água	$Pa$
$\dot{Q}_s$	fluxo médio de calor	$W.m^{-2}$
$r$	raio do cone	$m$
$R_a$	resistência térmica da camada de ar	$m^2.\text{°C}.W^{-1}$
$R_{cl}$	resistência térmica intrínseca do vestuário	$m^2.\text{°C}.W^{-1}$
$R_{ea}$	resistência evaporativa da camada de ar	$Pa.m^2.W^{-1}$
$R_{ecl}$	resistência evaporativa intrínseca do vestuário	$Pa.m^2.W^{-1}$
$R_{et}$	resistência total à passagem de vapor de água	$Pa.m^2.W^{-1}$
$R_t$	resistência total à passagem de calor	$m^2.\text{°C}.W^{-1}$
$T$	temperatura	$\text{°C}$
$T_0$	temperatura de operação	$\text{°C}$
$T_s$	temperatura à superfície do manequim	$\text{°C}$
$\bar{T}_{sk}$	temperatura média da pele	$\text{°C}$

## **Índices**

*i* Índice ou contador

## **Lista de Siglas**

SUAD	Simulação de Uso e Avaliação de Desempenho
ISQ	Instituto de Soldadura e Qualidade
CC30	Câmara Climática de 30m <sup>3</sup>
CC1	Câmara Climática de 1m <sup>3</sup>
DL	<i>Sistema de aquisição (“Data Logger” MSR 12)</i>
DL2	<i>Sistema de aquisição (“Data Logger” MSR145)</i>
TF	Pé Térmico ( <i>“Thermal Foot”</i> )
TM	Manequim Térmico ( <i>“Thermal manikin”</i> )
TC	Câmara Térmica ( <i>“Thermal Camera”</i> )
ISO	<i>“International Organization for Standardization”</i>
ASTM	<i>“American Society for Testing and Materials”</i>

# 1 Introdução

## 1.1 Enquadramento e Apresentação do Projecto

A maioria das pessoas apresenta no seu quotidiano grande parte da superfície corporal coberta com vestuário. Sendo o vestuário um factor importante para a qualidade de vida da sociedade, tem existido uma constante preocupação para o desenvolvimento de um vestuário confortável, seguro e adequado às actividades desejadas, reflectindo-se a sua importância em múltiplas vertentes. É neste contexto que surge o estudo do isolamento térmico e da permeabilidade à passagem de vapor de água, devido ao vestuário fornecer uma resistência térmica entre o corpo e o ambiente, necessária para a manutenção do equilíbrio térmico do corpo humano (Oliveira, 2006)

O conhecimento das características térmicas das peças de vestuário torna-se um factor decisivo, sendo a sua determinação objecto de inúmeros estudos. É neste enquadramento que surge este projecto.

Este projecto foi desenvolvido no âmbito da disciplina de Projecto de Desenvolvimento, pertencente ao curso de Mestrado Integrado em Engenharia Química da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. O seu objectivo consistiu no desenvolvimento de metodologias que avaliem o desempenho térmico de meias através da utilização de um manequim (pé) térmico transpirável, sendo desenvolvido em ambiente empresarial, nomeadamente no CeNTI (Centro de Nanotecnologia e Materiais Técnicos, Funcionais e Inteligentes).

O desempenho térmico de diferentes tipos de meias foi estudado, de maneira a conseguir obter dados comparativos entre os diferentes tipos de materiais presentes na sua composição. Para a sua realização utiliza-se um pé térmico e transpirável capaz de simular o uso de vestuário através da imposição de distribuições de temperatura à superfície do pé e da libertação de água para simular o efeito térmico do suor. Deste projecto fizeram parte as seguintes tarefas: uniformização de calibrações entre equipamentos; avaliação do condicionamento de amostras na câmara climática de 1m<sup>3</sup>; avaliação do desempenho da câmara climática de 30m<sup>3</sup> e avaliação do desempenho de amostras com o pé térmico.

## 1.2 Contributos do Trabalho

O principal benefício deste trabalho consistiu na criação de metodologias para a determinação das características térmicas do vestuário (meias), uma vez que ainda não existem normas para tal procedimento. Ao nível do equipamento utilizado, este projecto

apresentou uma forte vertente inovadora. O manequim térmico e transpirável utilizado é um forte elemento de inovação e sofisticação pelo facto de não ser actualmente um equipamento muito frequente nas empresas, devido à complexidade e custo associados.

Todo o estudo envolvido constituiu um elevado benefício para a instituição uma vez que possibilita um conhecimento mais aprofundado dos materiais analisados, possibilitando estudos futuros na área de simulação de uso e avaliação do desempenho.

### **1.3 Organização da Tese**

A presente tese encontra-se dividida em cinco capítulos.

O capítulo 1 diz respeito à Introdução, onde são apresentadas as características térmicas do vestuário, bem como o seu enquadramento na problemática actual. São aqui também apresentados os objectivos principais deste trabalho.

No Capítulo 2 descreve-se o Estado da Arte. Este capítulo descreve a situação actual dos manequins térmicos e a sua evolução. Referem-se as suas aplicações assim como alguns estudos realizados.

A Descrição Técnica e Discussão de Resultados são apresentadas no Capítulo 3. Nesta secção são descritos todos os ensaios efectuados de modo a alcançar os objectivos propostos em cada etapa. São também analisados os dados provenientes de cada ensaio e apresentam-se todos os cálculos necessários à obtenção dos resultados.

No Capítulo 4 são referidas as principais conclusões do trabalho desenvolvido, realçando os valores de isolamento térmico e respirabilidade obtidos para as amostras estudadas.

Por fim, no Capítulo 5 avalia-se o projecto, tanto nos objectivos realizados como a possibilidade de trabalhos futuros. É ainda referido o grau de satisfação da sua realização.

## 2 Estado da Arte

O presente projecto consistiu no desenvolvimento de metodologias para a avaliação do desempenho térmico de meias, através da determinação de características térmicas nomeadamente o isolamento térmico e a permeabilidade ao vapor de água.

A resistência térmica (resistência à passagem de calor) e a resistência à passagem de vapor de água podem ser obtidas através de medições efectuadas em seres humanos. Esta análise dá resultados realistas mas requer equipamentos sofisticados, bem como tempo para a realização de testes experimentais. Outro factor importante é a grande variabilidade que os valores medidos podem apresentar (Qian *et al.*, 2006a). Assim, recorre-se à utilização de manequins térmicos e transpiráveis, que permitem simular as características humanas, tanto na globalidade do corpo como em cada zona separadamente.

As medições em manequins térmicos são mais reprodutíveis do que as efectuadas nos seres humanos. No entanto, estes manequins são instrumentos complexos, delicados e dispendiosos. Para as mesmas condições de exposição, os valores de perdas de calor são obtidos pelo manequim térmico de maneira mais fiável e precisa, sendo portanto um método mais rápido, facilmente normalizado e repetitivo (Holmér, 2004).

Das características mais significativas do desempenho dos manequins térmicos salientam-se a simulação das trocas de calor do corpo humano, os fluxos de calor em todo o corpo ou em zonas localizadas, o método objectivo para a medição do isolamento térmico do vestuário (rápido, preciso e repetitivo) e o fornecimento de valores para a previsão de modelos de isolamento de roupas e perdas de resistência térmica por evaporação (Holmér, 2004). Assim, estes equipamentos são instrumentos importantíssimos no desenvolvimento de produtos.

Ao longo dos tempos tem-se observado a evolução, o desenvolvimento e a crescente procura de manequins, devido à necessidade da obtenção de resultados representativos e mais fiáveis. A sua origem remonta à década de 40 onde o primeiro manequim, construído pelo exército americano, consistia em apenas um único segmento de cobre (Endrusick, 2008). Alguns destes manequins fabricados durante vários anos continuam ainda a ser utilizados. Na Tabela 2.1 encontra-se informação mais pormenorizada sobre a construção de manequins, tais como a sua evolução ao nível do número de segmentos passíveis de controlo independente (nos dias de hoje quase todos os manequins dividem-se em 15 ou mais segmentos) (Holmér, 2004).

**Tabela 2.1 - Alguns marcos históricos no desenvolvimento de manequins térmicos com forma humana**

1	Segmento único	Cobre	Analogico	-	US 1945
2	Multisegmentos	Alumínio	Analogico	-	UK 1964
3	Manequim de Radiação	Alumínio	Analogico	-	França 1972
4	Multisegmentos	Plástico	Analogico	Capacidade de movimentação	Dinamarca 1973
5	Multisegmentos	Plástico	Analogico	Capacidade de movimentação	Alemanha 1978
6	Multisegmentos	Plástico	Digital	Capacidade de movimentação	Suécia 1980
7	Multisegmentos	Plástico	Digital	Capacidade de movimentação	Suécia 1984
8	Manequim de Incêndio	Alumínio	Digital	-	US
9	Manequim de Imersão	Alumínio	Digital	Capacidade de movimentação	Canadá 1988
10	Manequim Transpirável	Alumínio	Digital	-	Japão 1988
		Plástico	Digital	Capacidade de movimentação	Filândia 1988
		Alumínio	Digital	Capacidade de movimentação	USA 1996
11	Manequim Feminino	Plástico	Digital, modo de regulação de conforto	Capacidade de movimentação, simulação da respiração	Dinamarca 1989
12	Manequim Térmico Respirável	Plástico	Digital, modo de regulação de conforto	Capacidade de movimentação, simulação da respiração	Dinamarca 1996
13	Manequim Transpirável	Plástico	Digital, 30 zonas secas e 125 molhadas	Movimentos realistas	Suíça 2001
14	Manequim Transpirável	Metal	Digital, 126 zonas	Articulado	USA 2003
15	Manequim virtual, computacional	Numérico, modelo geométrico	Simulações de	Articulado	China 2000
			transferência de calor e		
			de massa		
					UK 2001
					Sweden 2001
					Japan 2002
16	Segmento único, manequim transpirável	Tecido respirável	Digital, aquecimento de água	Capacidade de movimentação	China 2001
17	Manequim de segmento único	Tecido impermeável	Digital, aquecimento de ar	Capacidade de movimentação	USA 2003

A introdução de técnicas de regulação digital no desenvolvimento de manequins permitiu a existência de protocolos mais flexíveis e medições mais precisas. Exemplo disso é o manequim francês (3, Tabela 2.1) que foi fabricado com o auxílio de uma técnica de arrefecimento, permitindo medições do ganho de calor. Até à data, os manequins mais desenvolvidos podem simular a transpiração humana e fornecer informação com valores aceitáveis sobre as perdas de calor por evaporação.

De um modo geral, os manequins térmicos podem ser agrupados em três gerações. A primeira geração corresponde a manequins estáticos (sem movimento) e não transpiráveis. Na segunda, são ágeis mas continuam sem ter a capacidade de simular a transpiração, tal como o manequim de cobre “Charlie” na Alemanha. Para simular a transpiração em manequins não transpiráveis, colocava-se roupa interior feita de tecidos altamente absorventes sobre os manequins e fornecia-se água. Por fim, a terceira geração de manequins consegue simular a transpiração e a locomoção humana, mas é ainda muito rara em todo o mundo (Fan *et al.*, 2002). Relativamente a esta nova geração de manequins térmicos e transpiráveis, destacam-se dois exemplos, o manequim “Walter” (equipamento utilizado para a medição das perdas de água por evaporação) capaz de simular a transpiração humana sob a forma gasosa e o manequim “Newton” (instrumento para medições da potência consumida), que simula a transpiração na forma líquida (ASTM F1291-04).

No entanto, é importante referir que esta terceira geração de manequins não consegue simular em simultâneo os dois tipos de suor produzidos durante a transpiração humana, devido à complexidade que envolve este mecanismo.

O desenvolvimento de partes individualizadas do corpo humano aquecidas, tais como cabeça, mãos e pés tem-se tornado uma necessidade de modo a que a avaliação do desempenho térmico de chapéus, luvas e calçado seja determinada com maior precisão (Scott, 2005).

No que diz respeito à determinação da resistência térmica e da permeabilidade ao vapor de água do vestuário, bem como à evolução de novos manequins, vários estudos têm sido desenvolvidos, destacando-se de seguida alguns deles. Foi desenvolvido por *Fan et al* um manequim com um novo tecido impermeável, que simula a transpiração gasosa por transferência de humidade através de uma “pele” feita a partir de um tecido transpirável. O manequim foi utilizado para medir as resistências à passagem de calor e de vapor de água de peças de vestuário, demonstrando elevada precisão e reprodutibilidade (Fan *et al.*, 2002).

Num outro estudo (Qian *et al.*, 2006b) foi utilizado o manequim com locomoção e tecido transpirável (“*Walter*”) para a medição directa da resistência térmica à superfície e a resistência à passagem de vapor de água do vestuário, em diversas condições ambientais e de movimentação simultaneamente. O “*Walter*” representa um indivíduo masculino, com o tamanho e configuração semelhante ao típico homem chinês. Este manequim atinge uma temperatura corporal de distribuição semelhante a uma pessoa real por bombeamento de água quente até atingir a temperatura corporal (37°C), desde o centro até às extremidades. Quanto à velocidade de locomoção, esta pode ser facilmente mudada ajustando a potência fornecida ao motor responsável pelo movimento (Qian *et al.*, 2006b).

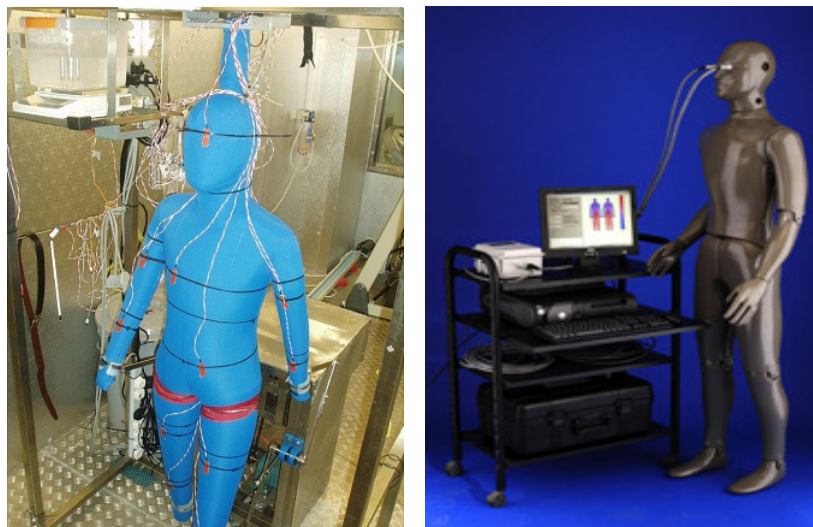


Figura 2.1 - Manequim “*Walter*” (esquerda) e “*Newton*” (direita).

Os autores do estudo anterior, através de uma intensiva investigação experimental e de um melhoramento do conhecimento dos efeitos da actividade humana e das condições ambientais, estabeleceram um modelo que consegue prever a resistência do vestuário à passagem de calor e de vapor de água, quando o manequim é exposto a correntes de ar (vento) ou a movimentações. A investigação realizada demonstrou que o isolamento térmico e a resistência à passagem de vapor de água diminuem com o aumento da velocidade do vento e da velocidade de locomoção. A análise dos valores das duas resistências, obtidos para diferentes velocidades de vento e de movimentação conduziu ao modelo criado por Qian *et al.* (2006a).

A criação de modelos que permitam prever as transferências de calor e de massa entre um manequim e o ambiente têm merecido a atenção da comunidade científica, uma vez que tais modelos ajudam à compreensão dos fenómenos envolvidos nos ensaios da resistência térmica e evaporativa (ou seja, fenómenos relevantes para o conforto térmico de indivíduos). Um novo exemplo é o estudo realizado por Kilic *et al.* (2008) no qual combinando um modelo computacional de uma sala virtual com um manequim térmico de dimensões e fisiologia reais se determinaram as transferências de calor e massa.

É importante não desviar a atenção do manequim “Newton”, visto ser um dos equipamentos utilizados na realização do projecto. Este manequim tem sido utilizado em diversos estudos, dos quais se destaca a sua utilização por parte da Agência de Protecção Ambiental (“The Environmental Protection Agency”, ETA) para analisar a exposição a partículas de aerossóis. Este estudo permitiu determinar os efeitos e os riscos que os aerossóis presentes na atmosfera podem causar nas pessoas e no ambiente (MTNW-Usa, 2004).

De forma a facilitar os estudos têm sido construídas partes individualizadas do manequim “Newton”, tais como cabeças, mãos e pé térmicos. Kuklane (1999) recorreu a um pé térmico para avaliar e melhorar o modelo térmico associado a calçado e para analisar os efeitos da transpiração no isolamento térmico.

Contudo, no estudo da resistência térmica e da resistência à passagem de vapor de água, a obtenção dos seus valores para diferentes peças de vestuário não é o único parâmetro significativo. A forma de cálculo desses valores também é muito importante. Existem três modelos (modelo global, em série e paralelo) que permitem o cálculo das resistências, concentrando-se a análise no modelo que permite a obtenção de resultados mais fiáveis e por conseguinte correctos. (Oliveira *et al.*, 2008).

## 3 Descrição Técnica e Discussão dos Resultados

Neste projecto pretendeu-se avaliar o desempenho térmico de algumas amostras de meias, nomeadamente a sua resistência à passagem de calor (resistência térmica) e à passagem de vapor de água. Esta análise requer um estudo prévio do equipamento utilizado de forma a compreender o seu funcionamento, possibilitando uma melhor aprendizagem dos conceitos envolvidos. Assim, a apresentação dos resultados é feita em duas partes. Na primeira parte é efectuado o estudo preliminar do equipamento envolvido, ficando a segunda parte reservada para o estudo do desempenho térmico, propriamente dito.

### 3.1 Análise Preliminar

Quando se efectua um estudo de grande dimensão é necessário fazer uma análise exaustiva de todos os factores que podem condicionar os resultados, de modo a detectar eventuais problemas. É neste contexto que se realiza a uniformização de calibrações entre todo o equipamento utilizado, bem como o estudo de eventuais alterações no condicionamento das meias, resultantes do seu transporte desde a câmara climática de 1m<sup>3</sup> localizada em instalações contíguas às instalações onde se encontra a câmara climática de 30m<sup>3</sup>. É nesta última câmara que se pretende realizar os ensaios experimentais. Assim sendo, uma análise do seu desempenho é igualmente necessária.

#### 3.1.1 Uniformização de calibrações entre equipamentos

Quando se pretende efectuar a calibração de um equipamento é necessário reflectir sobre o procedimento a adoptar, de forma a serem construídos ensaios credíveis e onde a presença de um eventual erro seja diminuta. Assim sendo, para esta análise realizaram-se quatro ensaios cuja descrição tanto a nível de equipamento usado, como das condições operatórias (incluindo as condições impostas em cada ensaio) se encontra na Tabela 3.1.

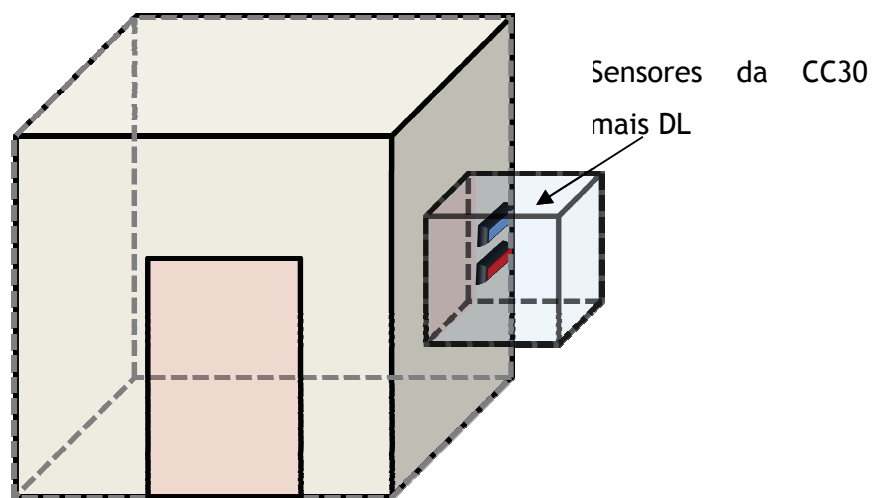
As condições operatórias escolhidas basearam-se na gama de operação de cada equipamento, de modo a que estas abrangessem, durante a calibração, os valores que são normalmente utilizados.

Na uniformização das calibrações entre diferentes equipamentos consideraram-se como padrão os valores registados pela câmara climática, uma vez que esta foi calibrada pelo Instituto de Soldadura e Qualidade (ISQ), constituindo o equipamento de referência.

*Tabela 3.1 - Descrição dos quatro ensaios realizados (variações de temperatura e de humidade relativa dentro de cada ensaio)*

Ensaio	Equipamento	Temperatura (°C)	Humidade Relativa (%)	Velocidade de ar (m/s)
1	CC30:DL	15	50	0,5
		20	50	0,5
		35	50	0,5
2	CC30:DL	20	30	0,5
		20	50	0,5
		20	80	0,5
3	DL:TF:TM	15	50	0,5
		20	50	0,5
		35	50	0,5
4	DL:TF:TM	20	30	0,5
		20	50	0,5
		20	80	0,5

Para a correcta uniformização dos resultados, os sensores de todos os equipamentos deveriam estar colocados todos no mesmo sítio durante os períodos de aquisição. Devido a dificuldades estruturais (comprimento insuficiente dos cabos que suportam os sensores de temperatura e humidade relativa do TF e do TM), apenas se conseguiram colocar em simultâneo os sensores da câmara climática (CC30) e do sistema de aquisição (“*data logger*” - DL). Estes últimos foram colocados no interior da parede lateral da CC30, onde se encontram os sensores desta, tal como representado na Figura 3.1. Como o DL é um equipamento portátil, foi posteriormente colocado no centro da câmara climática juntamente com os sensores do pé térmico (TF) e do manequim térmico (TM), efectuando a análise dos resultados (nas mesmas condições). Isto permitiu usar o DL como base e comparar a sua medição com a da CC30.



*Figura 3.1 - Esquemática da localização dos sensores dos diversos equipamentos (num compartimento na parede da CC30).*

Para a calibração do equipamento realizaram-se ensaios, ao longo dos quais foram impostas três condições ambientais. Pretendeu-se analisar a calibração dos sensores nos três patamares impostos por variações de temperatura assim como de humidade relativa, mantendo a velocidade do ar a 0,5m/s (50% da potência máxima do ventilador). Os dados obtidos para cada ensaio permitiram a elaboração de gráficos que levaram a uma análise exaustiva dos resultados (Anexo A).

De forma a melhor visualizar as diferenças entre as medições registadas pelos sensores de cada equipamento elaboraram-se as tabelas seguintes.

*Tabela 3.2 - Diferenças obtidas entre a CC30 e o DL nos ensaios 1 e 2*

Ensaio	Equipamento	Condições	$\Delta T = T_{DL} - T_{CC30}$ (°C)	$\Delta HR = HR_{DL} - HR_{CC30}$ (ptos %)
1	CC30:DL	15°C e 50% HR	0,14	3,2
		20°C e 50% HR	0,15	3,1
		35°C e 50% HR	-0,12	3,3
2	CC30:DL	20°C e 30% HR	0,12	4,8
		20°C e 50% HR	0,12	3,0
		20°C e 80% HR	0,12	0,6

*Tabela 3.3 - Diferenças obtidas entre o DL e o TF e o ML dos ensaios 3 e 4*

Ensaio	Equipamento	Condições	$\Delta T = T_{DL} - T_{TF}$ (°C)	$\Delta T = T_{DL} - T_{TM}$ (°C)	$\Delta HR = HR_{DL} - HR_{TF}$ (ptos %)	$\Delta HR = HR_{DL} - HR_{TM}$ (ptos %)
3	DL:TF:TM	15°C e 50% HR	0,08	0,16	5,0	5,3
		20°C e 50% HR	0,01	0,07	5,4	5,7
		35°C e 50% HR	-0,19	-0,10	7,2	7,6
4	DL:TF:TM	20°C e 30% HR	0,06	0,06	7,2	7,6
		20°C e 50% HR	0,05	0,05	6,3	6,4
		20°C e 80% HR	0,05	0,05	4,9	4,6

Na Tabela 3.2 apresentam-se as diferenças de temperatura e humidade relativa obtidas entre o DL e a CC30, enquanto na Tabela 3.3 se observam as variações entre o DL e o TF e entre o DL e o TM. As diferenças que apresentam um sinal negativo, tal como acontece nos ensaios onde se utilizou uma temperatura de 35°C e humidade relativa de 50% (última condição do ensaio 1 analisada), significam que ao contrário do que acontece nas restantes condições, os sensores do DL registam um valor mais baixo que os sensores dos demais equipamentos. Verifica-se que relativamente à humidade relativa, os valores registados pelo DL se mantêm aproximadamente três pontos percentuais acima dos da câmara climática, para o valor de 50% de humidade relativa e para as três temperaturas usadas. Porém, fazendo variar a humidade relativa e mantendo a temperatura constante nos 20°C, as diferenças variam também (para humidade relativa de 20%, a diferença entre os valores registados pelo

DL e pela CC30 é cerca de 5 pontos percentuais e para 80% menos de 1 ponto percentual). Relativamente à temperatura, os valores obtidos são praticamente os mesmos independentemente das condições de humidade utilizadas, estabilizada a cerca de 0,12 pontos percentuais. No que diz respeito à comparação dos resultados obtidos entre o DL, o TF e o TM verifica-se que no ensaio 3 (variação de temperatura) relativamente à temperatura, a diferença entre os valores medidos é maior (mais propriamente quando se impõe uma temperatura de 35°C e uma humidade relativa 50%). Ao nível da humidade relativa as diferenças registadas são maiores, sendo que tanto nas condições mencionadas anteriormente como nas do ensaio 4 (20°C e 30% HR) se atingem os maiores desvios percentuais.

Na Tabela 3.4 apresentam-se os desvios entre as leituras de temperatura dos vários sensores, relativamente às leituras dos sensores da câmara climática (equipamento tomado como referência). Por sua vez, os desvios relativos às leituras de humidade relativa estão apresentados na Tabela 3.5.

*Tabela 3.4 - Diferenças de temperatura dos equipamentos relativamente à CC30*

Ensaio	Condições	$\Delta T = T_{DL} - T_{CC30}$ (°C)	$\Delta T = T_{TF} - T_{CC30}$ (°C)	$\Delta T = T_{TM} - T_{CC30}$ (°C)
1	15°C e 50% HR	0,14	-	-
	20°C e 50% HR	0,15	-	-
	35°C e 50% HR	-0,12	-	-
2	20°C e 30% HR	0,12	-	-
	20°C e 50% HR	0,12	-	-
	20°C e 80% HR	0,12	-	-
3	15°C e 50% HR	-	0,23	0,20
	20°C e 50% HR	-	0,18	0,12
	35°C e 50% HR	-	-0,02	-0,11
4	20°C e 30% HR	-	0,04	0,04
	20°C e 50% HR	-	0,07	0,07
	20°C e 80% HR	-	0,10	0,10

Através da análise da Tabela 3.4 verifica-se que os desvios do DL em relação à CC30 são idênticos em todas as condições simuladas (a 35°C e 50% HR a variação é negativa, ou seja, o DL adquire valores mais baixos que os sensores da CC30). Em relação ao TF e ao TM constata-se que quando se comparam os valores registados pelos seus sensores com os da CC30, a diferença entre eles é muito semelhante em quase todas as condições. A variação mais notória observa-se no terceiro ensaio, quando se leva a CC30 a efectuar um patamar de 35°C e 50% HR ( $\Delta T = -0,02^\circ\text{C}$  e  $\Delta T = -0,11^\circ\text{C}$ ).

Um facto que sobressai quando analisamos os dados é que para as mesmas condições (20°C e 50% HR) se obtêm variações diferentes, tanto na comparação com o DL (ensaios 1 e 2) como na comparação com o TF e o TM (ensaios 3 e 4). Este facto pode ser justificado pela

realização dos ensaios em dias diferentes, ou seja, está a ser assumido que a CC30 consegue manter exactamente as mesmas condições de operação em dias sucessivos, o que pode não acontecer. No que diz respeito ao TF e ao TM, pode-se dizer que os seus sensores à temperatura de 15°C e a 50% de humidade relativa, apresentam um maior desvio relativamente à temperatura registada pela CC30. É possível afirmar que a temperaturas menores, os desvios entre os dois equipamentos são também menores. Por sua vez, os sensores do DL não apresentam tantos desvios perante as variações efectuadas. A excepção ocorre quando se utiliza uma temperatura de 35°C e 50% HR em que apesar de se manterem as mesmas condições ambientais, se observa que o DL regista valores de temperatura mais baixos que a CC30. Pode-se inferir face a estes resultados que a medição da temperatura poderá não ser afectada pela variação percentual da humidade relativa visto que as variações obtidas são muito semelhantes (da mesma ordem de grandeza) principalmente nos registos do DL.

*Tabela 3.5 - Variações de humidade relativa dos equipamentos relativamente à CC30*

Ensaio	Condições	$\Delta HR = HR_{DL} - HR_{CC30}$ (ptos %)	$\Delta HR = HR_{TF} - HR_{CC30}$ (ptos %)	$\Delta HR = HR_{TM} - HR_{CC30}$ (ptos %)
1	15°C e 50% HR	3,2	-	-
	20°C e 50% HR	3,1	-	-
	35°C e 50% HR	3,3	-	-
2	20°C e 30% HR	4,8	-	-
	20°C e 50% HR	3,0	-	-
	20°C e 80% HR	0,6	-	-
3	15°C e 50% HR	-	-2,7	-2,7
	20°C e 50% HR	-	-2,7	-3,0
	35°C e 50% HR	-	-3,9	-4,3
4	20°C e 30% HR	-	-2,0	-2,4
	20°C e 50% HR	-	-2,8	-2,9
	20°C e 80% HR	-	-4,3	-4,0

Observa-se na Tabela 3.5 que a alteração na percentagem da humidade relativa afecta os registos efectuados pelos sensores do equipamento (excepto os sensores da CC30 que estabilizam no “set-point” estabelecido, independentemente das condições aplicadas nos ensaios, vide anexo A). Ao contrário do que acontece com a medição da temperatura, com a humidade relativa não se observam variações de pontos percentuais nos ensaios em que se utilizam as mesmas condições de operação. Nas medições registadas pelo TF e pelo TM verifica-se que relativamente à humidade, esta apresenta valores inferiores aos da CC30 contrariamente ao que ocorre com a temperatura. É de referir que a 20°C e 30% HR se verifica a maior diferença percentual entre os valores do DL e da CC30, e a 20°C e 80% HR a diferença mais baixa. Estas diferenças correspondem a cerca de cinco e um pontos

percentuais, respectivamente. Porém, quando se analisam os desvios do TF e do TM acontece o oposto, sendo esses valores respectivamente de dois e quatro pontos percentuais.

Relativamente às medições de humidade relativa, o desvio entre os valores registados para os vários sensores é diferente para as três condições estudadas. Contrariamente ao que ocorre nas medições de temperatura, os desvios entre os vários sensores são dependentes da temperatura a que se faz a aquisição, como se pode verificar na Tabela 3.5 nos ensaios 1 e 3.

### **3.1.2 Condicionamento das amostras na câmara climática de 1m<sup>3</sup>**

A utilização prolongada de uma câmara climática de 30m<sup>3</sup> acarreta um grande consumo energético. Para além disso, a eventual necessidade de realizar os ensaios em condições operatórias diferentes das impostas durante os períodos de condicionamento das amostras e a necessidade de realizar vários ensaios consecutivamente tornam relevante a possibilidade de utilização de uma outra câmara climática de menores dimensões (para tarefas de condicionamento). Uma câmara climática de 1m<sup>3</sup> (CC1) pode ser utilizada para este efeito mas, o facto de a mesma não se encontrar no mesmo espaço físico (laboratório) que a câmara de 30m<sup>3</sup>, tornou necessário o estudo da influência do transporte das amostras desde as instalações da câmara climática de 1m<sup>3</sup> (CC1) até ao laboratório que continha a CC30 (de forma a analisar se o transporte das amostras põe em causa as condições de condicionamento das mesmas).

Mais uma vez tornou-se necessário efectuar uma análise prévia, de modo a identificar a melhor forma de realizar este estudo e averiguar qual o melhor sistema fechado capaz de satisfazer as necessidades. Para a sua realização usou-se uma meia de lã como amostra, o sistema de aquisição e a câmara climática de 1m<sup>3</sup> (CC1) como equipamentos e testou-se um saco térmico e uma arca térmica como sistemas fechados. Porém, os sistemas fechados não foram utilizados em simultâneo tendo sido distribuídos por ensaios, descritos na tabela seguinte. De modo a compreender o que ocorria dentro da meia e do sistema fechado, colocou-se um sensor de temperatura/humidade dentro da meia e um sensor de temperatura fora desta. Este procedimento permitiu constatar que no que diz respeito à medição da temperatura, os valores registados pelos sensores são diferentes principalmente nos ensaios em que se utiliza o saco térmico.

Tabela 3.6 - Descrição do sistema fechado usado nos ensaios efectuados

Ensaio	Sistema Fechado
1	saco térmico
2	saco térmico
3	arca térmica
4	arca térmica

Os dados registados pelo DL2 para cada ensaio permitiram analisar as variações sofridas nos valores da temperatura e da humidade relativa durante o percurso entre as duas câmaras climáticas, estando essa análise, bem como o tempo dispendido em cada ensaio, sintetizados na Tabela 3.7.

Tabela 3.7 - Variações de T e de HR e duração do transporte para cada ensaio

Sensor	Ensaio	1	2	3	4
Temperatura	$\Delta T = T_i - T_f$ (°C)	8,4	8,1	0,7	1,0
Temperatura/Humidade	$\Delta T = T_i - T_f$ (°C)	3,9	1,8	0,5	0,3
	$\Delta HR = HR_i - HR_f$ (ptos %)	5,0	7,3	2,8	1,3
	$t_{\text{percurso}}$ (s)	420,0	220,0	280,0	210,0

Observando o tempo gasto durante o percurso, verifica-se que não foi o mesmo e ressalvando esse facto para a comparação ser mais correcta, efectuou-se a análise dos resultados (dentro de cada sistema fechado) exactamente no mesmo período de tempo. Por outras palavras, a análise entre os ensaios 1 e 2 foi feita tendo por base os últimos 220 segundos de cada ensaio (uma vez que o ensaio mais rápido tinha a duração de 220 segundos). O mesmo procedimento se aplica em relação aos ensaios 3 e 4, onde a duração do ensaio mais rápido foi 210 segundos, estando expostos na tabela seguinte as respectivas variações.

Tabela 3.8 - Variações de T e de HR para o mesmo tempo de transporte

Sensor	Temperatura	Temperatura/Humidade		
Ensaio	$\Delta T = T_i - T_f$ (°C)	$\Delta T = T_i - T_f$ (°C)	$\Delta HR = HR_i - HR_f$ (ptos %)	$\Delta t_{\text{percurso}}$ (s)
1	7,8	3,3	2,9	220,0
2	8,1	1,8	7,3	
3	0,7	0,5	2,4	210,0
4	1,0	0,3	1,3	

Na tabela anterior é visível que a arca térmica é o sistema fechado mais eficaz (os ensaios em que tal sistema é utilizado apresentam as variações mais baixas) para a manutenção do condicionamento das amostras.

Nos ensaios com o saco térmico o percurso entre as duas câmaras climáticas foi efectuado pelo exterior em dias distintos, e por conseguinte com condições ambientais diferentes. Isto provocou uma alteração dos resultados como se pode visualizar na Tabela 3.8, onde o sensor de temperatura/humidade no segundo ensaio apresentou uma menor variação entre o valor de temperatura medido antes da abertura da porta da CC1 e o valor imediatamente após à chegada ao laboratório SUAD. Em relação à humidade relativa verifica-se o oposto (a diferença entre o valor inicial e o final é maior em cerca de quatro pontos percentuais).

Um dado que sobressai quando se analisam os resultados para os ensaios 1 e 2 é a acentuada diferença registada pelos sensores na medição da temperatura. A colocação do sensor fora da meia permite detectar o fraco isolamento do saco térmico. Relativamente à humidade relativa, a diferença entre o valor dentro da CC1 e o valor aquando da chegada ao laboratório onde está a CC30, é muito acentuada no segundo ensaio.

Relativamente aos ensaios realizados com a arca térmica, a diferença entre os valores registados já não é tão notória, sendo a maior diferença nos valores da humidade relativa (0,9 pontos percentuais). É visível que este sistema funciona melhor para o condicionamento de amostras durante o seu transporte, pois apresenta variações de temperatura muito baixas (diferença máxima é 1°C). Quanto à reprodutibilidade dos ensaios pode-se assumir que é alta uma vez que os desvios padrão obtidos entre os ensaios 3 e 4 são pequenos (o maior desvio padrão ocorre na humidade que é de 0,8 pontos percentuais).

Para além da análise quantitativa expressa na Tabela 3.8, os dados registados pelo DL2 permitiram a construção de gráficos revelando assim, de forma analítica o que ocorreu durante o percurso. As figuras seguintes demonstram os resultados obtidos.

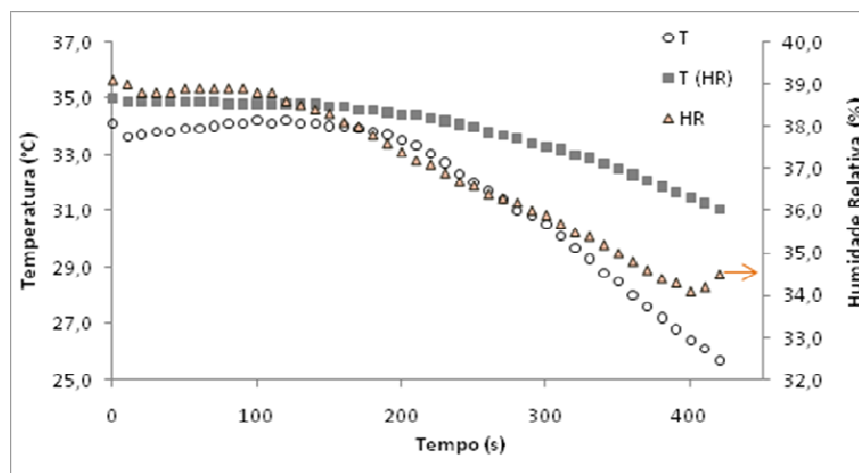


Figura 3.2 - Dados do ensaio 1 (com o saco térmico) para a temperatura e a humidade relativa.

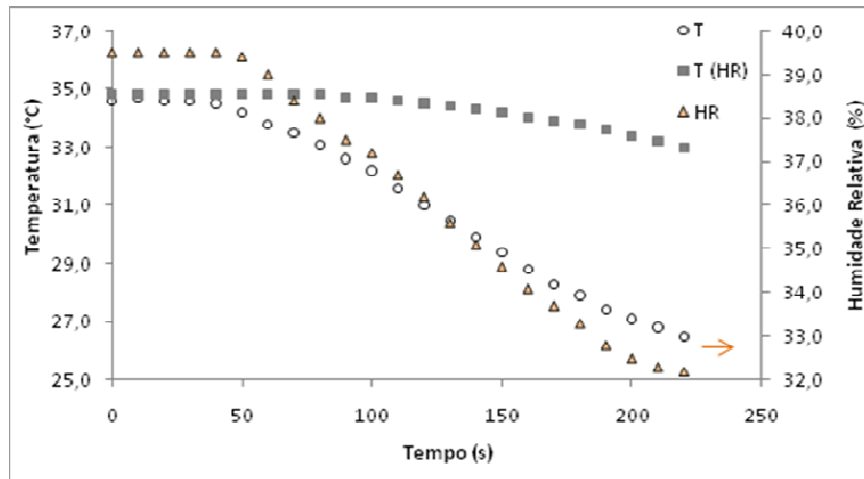


Figura 3.3 - Dados do ensaio 2 (com o saco térmico) para a temperatura e a humidade relativa.

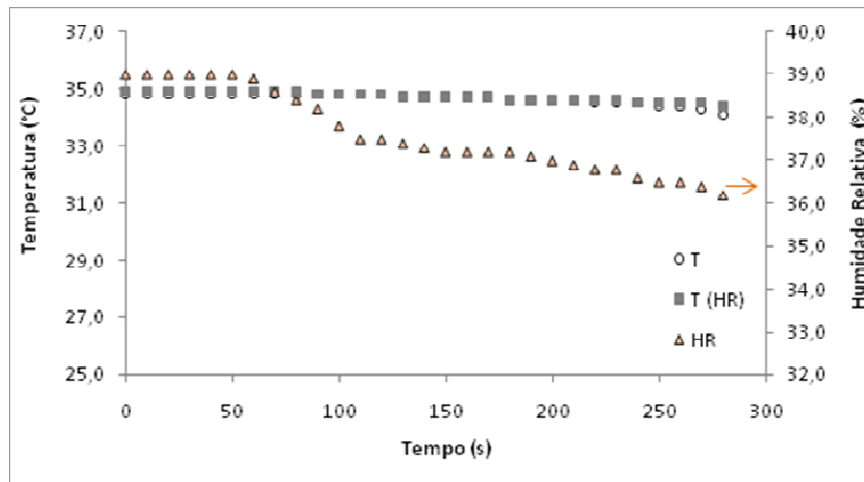


Figura 3.4 - Dados do ensaio 3 (com a arca térmica) para a temperatura e a humidade relativa.

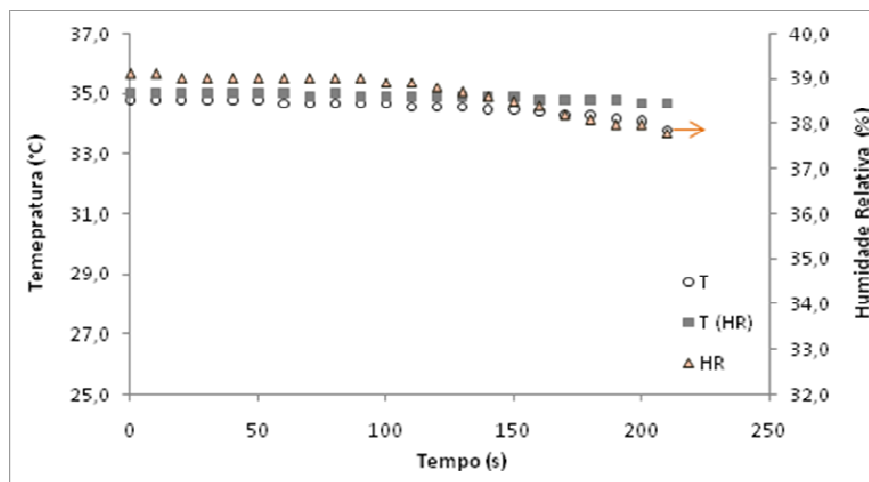
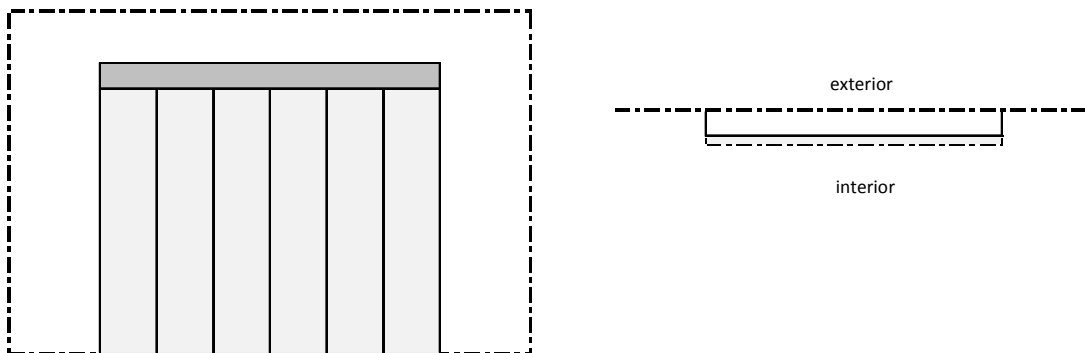


Figura 3.5 - Dados do ensaio 4 (com a arca térmica) para a temperatura e a humidade relativa.

### 3.1.3 Avaliação do desempenho da câmara climática de 30m<sup>3</sup>

O conhecimento mais pormenorizado da câmara climática do CeNTI (CC30) constituiu uma etapa importante deste projecto. Os ensaios foram realizados no seu interior e portanto qualquer alteração no seu funcionamento altera os resultados. Da experiência de ensaios realizados anteriormente com a CC30 observou-se que quando as condições ambientais no seu interior (temperatura e humidade relativa) são diferentes das do exterior, a abertura da porta da câmara climática provoca uma perturbação nas condições ambientais no seu interior.

Deste modo, foi projectada uma antecâmara de modo a diminuir o impacto da abertura da porta da câmara climática nas condições ambientais desta. A antecâmara foi construída através da introdução de uma cortina de plástico dividida em tiras na zona posterior à porta, criando um volume fechado e minimizando as perdas de calor e de massa no interior. Relativamente às tiras, estas estavam sobrepostas de maneira a não se mexerem devido à ventilação no interior da câmara climática e à corrente proveniente da abertura da respectiva porta. Na figura seguinte encontra-se uma representação da antecâmara utilizada.



*Figura 3.6 - Representação da antecâmara protótipo utilizada (vista frontal à esquerda e vista de topo à direita).*

O procedimento experimental adoptado consistiu na entrada e saída da câmara climática com e sem antecâmara para diferentes condições ambientais. No primeiro teste colocou-se a CC30 a operar a uma temperatura de 25°C, 65% de humidade relativa e a 50% da potência máxima do ventilador, obtendo-se as variações expressas nas figuras seguintes.

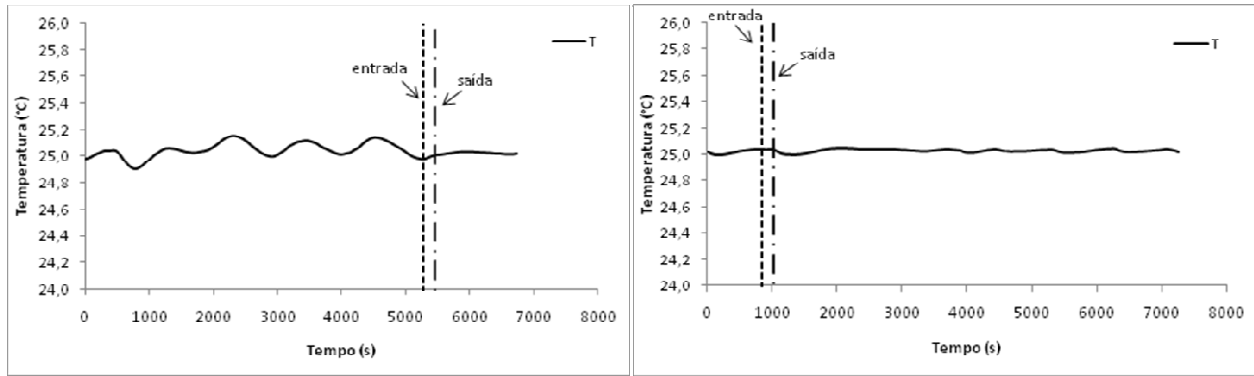


Figura 3.7 - Representação dos valores de temperatura obtidos a 25°C e 65% HR com a colocação da antecâmara (à esquerda) e sem a antecâmara (à direita).

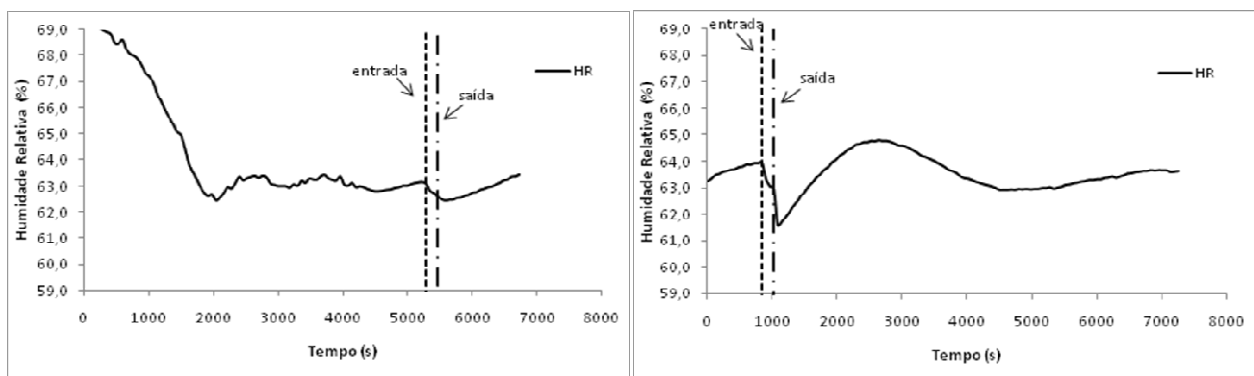


Figura 3.8 - Representação dos valores de humidade relativa obtidos a 25°C e 65% HR com a colocação da antecâmara (à esquerda) e sem a antecâmara (à direita).

Tal como se pode observar na Figura 3.7 ao nível da temperatura não foi notória a influência da abertura da porta da câmara climática. Na ausência da antecâmara a variação da temperatura foi inferior a 0,1°C. Os mesmos resultados foram obtidos após a colocação da antecâmara. Relativamente à humidade relativa, notou-se uma diferença entre os valores lidos com e sem a antecâmara, sendo que na ausência da antecâmara se observaram oscilações de aproximadamente três pontos percentuais (enquanto que com a antecâmara estas foram inferiores a um ponto percentual). Porém, esta alteração das condições ambientais não é significativa quando comparada com as oscilações consideradas aceitáveis de acordo com a norma ISO 15831 (2004) (dois pontos percentuais para a humidade relativa e zero vírgula dois graus centígrados para a temperatura). Logo para estas condições de operação a utilização de uma antecâmara não se justifica.

Um novo ensaio foi realizado, operando-se a 22°C, 70% HR e 50% da potência máxima do ventilador. Tal como no ensaio anterior, a utilização da antecâmara, não resultou em grandes alterações nos valores de temperatura e humidade relativa registados aquando das aberturas da porta da câmara climática (vide Figura 3.9 e Figura 3.10).

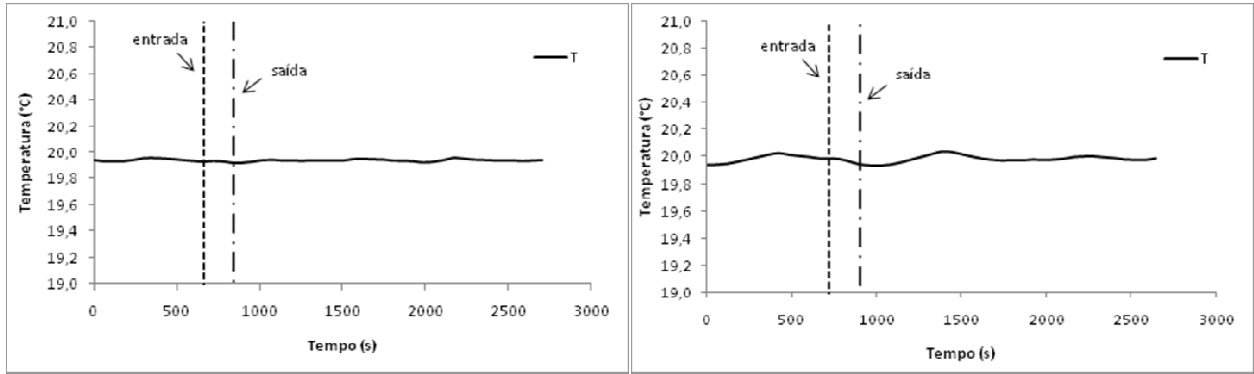


Figura 3.9 - Representação dos valores de temperatura obtidos a 22°C e 70% HR com a colocação da antecâmara (à esquerda) e sem a antecâmara (à direita).

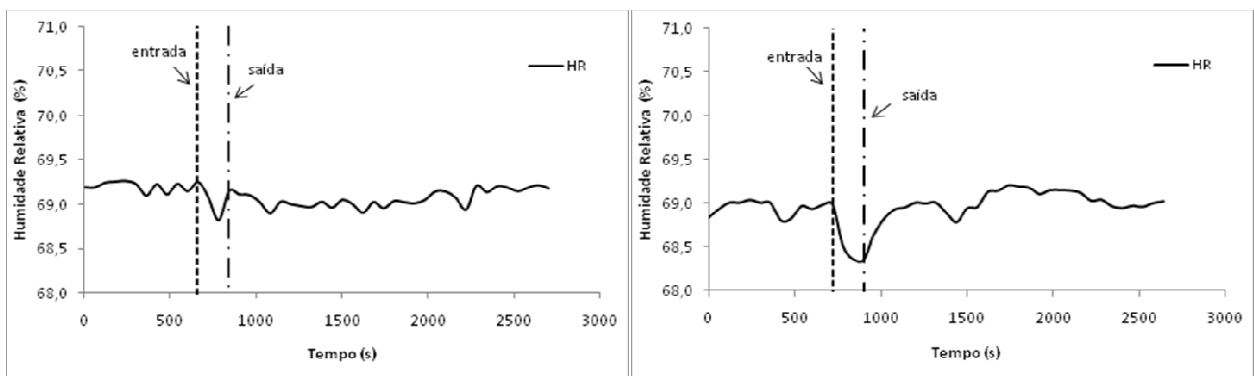


Figura 3.10 - Representação dos valores de humidade relativa obtidos a 22°C e 70% HR com a colocação da antecâmara (à esquerda) e sem a antecâmara (à direita).

Foi efectuado um terceiro ensaio onde se elevou a temperatura no interior da câmara climática para 34°C, mantendo a humidade relativa a 65% e a velocidade do ar a 50% da potência máxima do ventilador. Este ensaio foi realizado com o intuito de observar a influência do aumento da temperatura (por comparação com o primeiro ensaio realizado).

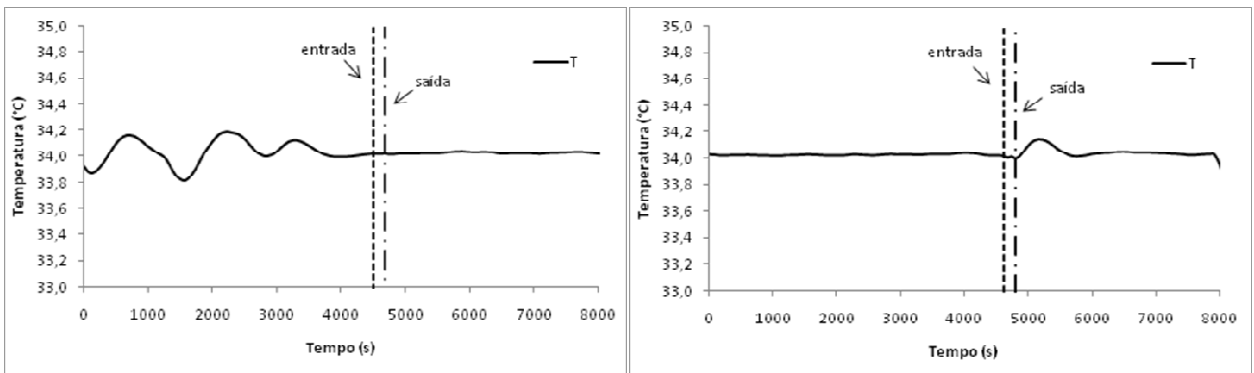


Figura 3.11 - Representação dos valores de temperatura obtidos a 34°C e 65% HR com a colocação da antecâmara (à esquerda) e sem a antecâmara (à direita).

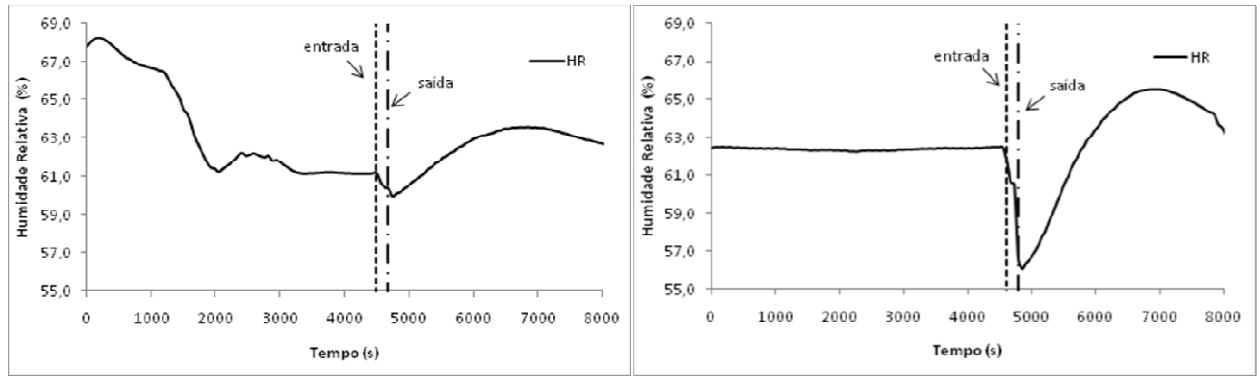


Figura 3.12 - Representação dos valores de humidade relativa obtidos a 34°C e 65% HR com a colocação da antecâmara (à esquerda) e sem a antecâmara (à direita).

A análise das duas figuras anteriores, permite concluir que, para as condições de operação em causa, a presença da antecâmara resulta na atenuação das oscilações de temperatura e humidade relativa registadas no interior da câmara após a entrada/saída da mesma.

Para melhor identificar as diferenças existentes antes e após a colocação da antecâmara elaborou-se a seguinte tabela, em que são apresentadas as amplitudes máximas entre os extremos obtidos para a temperatura e a humidade relativa, aquando a saída da câmara climática, para cada uma das condições operatórias testadas.

Tabela 3.9 - Amplitudes obtidas para os valores de T e HR com e sem antecâmara

Condições Operatórias	25°C e 65% HR		22°C e 70% HR		34°C e 65% HR	
	T(°C)	HR(pts %)	T(°C)	HR(pts %)	T(°C)	HR(pts %)
com antecâmara	0,02	0,91	0,04	0,31	0,03	3,63
sem antecâmara	0,05	3,21	0,10	0,56	0,13	9,48

Na Tabela 3.9 estão representadas, em percentagens, as variações máximas obtidas (amplitudes), para cada uma das condições avaliadas relativamente à temperatura e humidade relativa. Tal como já se tinha comprovado pela análise gráfica, a presença da antecâmara só é necessária quando se opera a valores de temperatura e humidade relativa elevados (quando comparados com os valores existentes no exterior da câmara).

### 3.2 Desempenho térmico de meias

Conforme já referido, neste projecto pretendeu-se determinar as características térmicas (resistência à passagem de calor e de vapor de água) de diferentes tipos de meias. Para esta análise foi necessário estudar a influência que alguns parâmetros, tais como o procedimento

de colocação da meia, número de camadas e caudal de “suor”, tinham sobre os valores das resistências a determinar.

Foram estudados três tipos de meias (indicadas na Figura 3.13) de composições distintas (um par de meias de lã, um par de meias de algodão e um par de meias cuja composição possuía lã, poliamida e *elastano*, passando estas a ser designadas por meias mistas). Em primeiro lugar analisou-se a influência do posicionamento do pé térmico (em relação à estrutura de suporte) nas medições feitas com o equipamento.



*Figura 3.13 - Meias utilizadas no estudo (meia mista, de algodão e de lã, enunciadas de baixo para cima).*

### **3.2.1 Influência do posicionamento do pé térmico**

Antes de iniciar os ensaios para a determinação das características térmicas das meias em estudo, foi necessário definir quais as condições operatórias a utilizar. Após uma pesquisa em normas já existentes para o vestuário, a escolha teve por base a norma ISO 15831 (2004), a qual refere que a superfície do pé térmico deve estar a 34°C e a câmara climática a operar a uma temperatura de 20°C, 50% de humidade relativa e com uma velocidade de ar de 0,4m/s.

O passo seguinte consistiu no estudo da influência do posicionamento do pé térmico na determinação da resistência à passagem de calor. Para tal, realizaram-se três ensaios onde se alteraram as alturas do TF bem como a sua rotação em relação ao eixo vertical, de modo a observar os valores da resistência que tais alterações provocavam. A descrição das condições experimentais utilizadas em cada ensaio, ou seja, as alturas testadas (cujo valor corresponde à distância entre o TF e a mesa de suporte) e respectiva rotação (em relação ao plano vertical que atravessa o pé longitudinalmente) encontra-se na tabela abaixo.

Tabela 3.10 - Descrição das variações efectuadas

Ensaio	Altura (cm)	Rotação
1	5,0	0°
	10,0	0°
	16,5	0°
2	5,0	0°
	10,0	0°
	16,5	0°
	16,5	30° para a esquerda
	16,5	15° para a esquerda
	16,5	15° para a direita
3	16,5	30° para a esquerda
	16,5	15° para a esquerda
	16,5	15° para a direita

A resistência à passagem de calor através de vestuário tem sido alvo de diversos estudos, nomeadamente no que toca à sua forma de cálculo (Oliveira *et al.*, 2008; Havenith, 2005; Oliveira, 2006). Até à data definiram-se três modelos para a calcular, denominando-se de modelo global, em série e paralelo, os quais permitem obter diferentes valores consoante o modo de operação do manequim. O método global (método convencional) tem por base um cálculo global que define a resistência térmica,  $R_t$ , equivalente para o corpo todo, de acordo com a seguinte expressão,

$$R_t = \frac{\bar{T}_{sk} - T_0}{\dot{Q}_s}, \quad (3.1)$$

onde  $T_0$  é a temperatura de operação (temperatura ambiente no interior da câmara climática),  $\bar{T}_{sk}$  é a temperatura média da pele e  $\dot{Q}_s$  é o fluxo médio de calor. No entanto, quando se aplica este método a um manequim dividido em partes, o cálculo é feito tendo em conta a área ponderada de cada segmento, ou seja,

$$R_t = \frac{\sum_i (f_i \times \bar{T}_{sk,i}) - T_0}{\sum_i (f_i \times \dot{Q}_{s,i})}, \quad (3.2)$$

sendo  $f_i$  o factor de área da secção  $i$ , determinado pela razão entre a área superficial da zona  $i$  e a área total do manequim  $\left( f_i = \frac{a_i}{A} \right)$ .

O método em série utiliza a temperatura média da pele e o fluxo médio de calor de cada segmento, obtendo-se o valor da resistência térmica total pelo somatório das resistências locais obtidas separadamente,

$$R_t = \sum_i \left( f_i \frac{\bar{T}_{sk,i} - T_0}{\dot{Q}_{s,i}} \right) = \sum_i (f_i \times R_{t,i}), \quad (3.3)$$

em que

$$R_{t,i} = \frac{\bar{T}_{sk,i} - T_0}{\dot{Q}_{s,i}}. \quad (3.4)$$

No método paralelo calcula-se a resistência equivalente de acordo com o modelo paralelo, obtendo  $R_t$  a partir da seguinte equação

$$\frac{1}{R_t} = \sum_i f_i \times \left( \frac{\dot{Q}_{s,i}}{\bar{T}_{sk,i} - T_0} \right) = \sum_i f_i \times \frac{1}{R_{t,i}}. \quad (3.5)$$

É importante notar que os métodos em série e paralelo referidos anteriormente, estão relacionados com a forma de associação das resistências relativas às várias zonas térmicas do manequim (e não à forma das resistências de cada zona em particular).

Os três métodos mencionados para o cálculo da resistência térmica apresentam-se interligados pelas condições operatórias aplicadas. Quando o manequim térmico opera a temperatura constante (o que implica que os fluxos de calor em cada zona sejam diferentes devido ao facto das correspondentes resistências convectivas serem também diferentes) a expressão relativa ao método global reduz-se a

$$R_t = \frac{\sum_i (f_i \times \bar{T}_{sk,i}) - T_0}{\sum_i (f_i \times \dot{Q}_{s,i})} = \frac{\bar{T}_{sk,i} - T_0}{\sum_i (f_i \times \dot{Q}_{s,i})}, \quad (3.6)$$

ou, a

$$\frac{1}{R_t} = \frac{\sum_i (f_i \times \dot{Q}_{s,i})}{\bar{T}_{sk,i} - T_0} = \sum_i f_i \times \left( \frac{\dot{Q}_{s,i}}{\bar{T}_{sk,i} - T_0} \right) = \sum_i f_i \times \frac{1}{R_{t,i}}, \quad (3.7)$$

conduzindo a um somatório do inverso das resistências locais tal como acontece no modelo paralelo. Por sua vez, quando se utiliza um fluxo de calor constante como controlo dos vários segmentos, a equação (3.2) converte-se a

$$R_t = \frac{\sum_i (f_i \times \bar{T}_{sk,i}) - T_0}{\sum_i (f_i \times \dot{Q}_{s,i})} = \frac{\sum_i (f_i \times \bar{T}_{sk,i}) - T_0}{\dot{Q}_s} = \sum_i \left( f_i \frac{\bar{T}_{sk,i} - T_0}{\dot{Q}_{s,i}} \right) = \sum_i (f_i \times R_{t,i}), \quad (3.8)$$

o que representa o somatório das resistências locais de acordo com o método em série.

No decorrer dos ensaios realizados neste projecto, a temperatura superficial do manequim foi mantida constante (de acordo com as recomendações da norma ISO 15831), o que na sequência do exposto anteriormente, implica que o método de cálculo preferencial seja o paralelo. Mas como esta norma também permite a utilização do método em série existem vários laboratórios que recorrem a este método para o cálculo da resistência térmica. Assim, para ter uma noção do erro introduzido pela utilização do método em série calculou-se a resistência térmica através da equação deste método (apresentando ambos os resultados).

O pé térmico utilizado neste projecto possui nove zonas distintas as quais se apresentam representadas na Figura 3.14. A determinação da resistência térmica é então efectuada com base nos valores de temperatura e de fluxo de calor obtidos para cada uma destas zonas. Porém, é importante referir que as zonas dez e onze (“*back guard*” e “*front guard*”) não são incluídas nos cálculos, uma vez que as mesmas não são cobertas pelas meias durante o teste. Estas zonas ao manterem a temperatura igual à das zonas adjacentes obrigam a que as perdas de calor das zonas 1 e 2, ocorram apenas por condução através da meia.

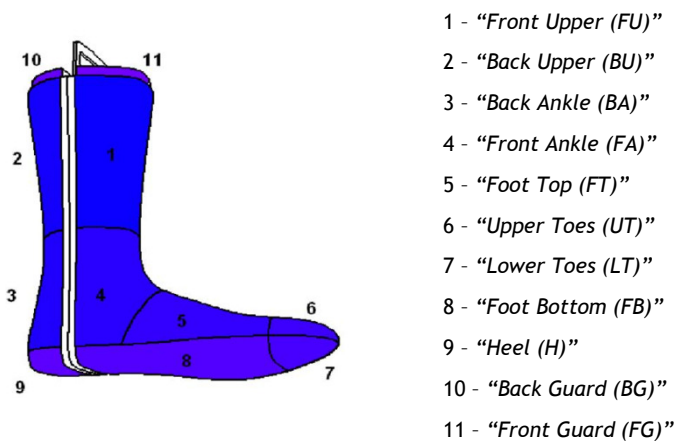


Figura 3.14 - Zonas em que se divide o pé térmico.

Prosseguindo com a análise da influência do posicionamento do pé térmico, calcularam-se as resistências térmicas ao longo do período de estabilização em cada uma das condições referidas na Tabela 3.10. A figura seguinte, onde estão representados os valores da resistência térmica calculada a partir do método paralelo para as condições do ensaio 1 (diferentes alturas), demonstra essa evolução.

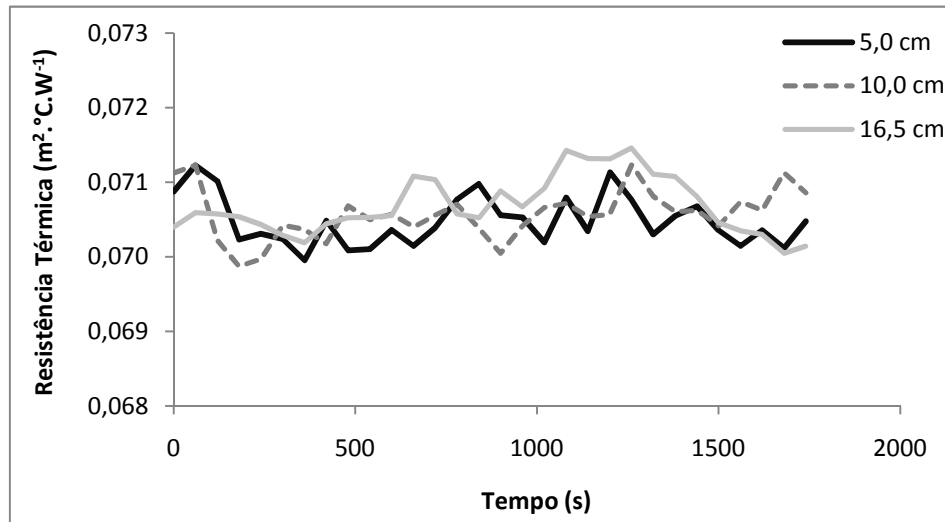


Figura 3.15 - Resistências térmicas obtidas através do método paralelo para as alturas utilizadas no ensaio 1 (durante o período de estabilização).

A representação das resistências térmicas durante o período de estabilização revelou a diminuta variação da resistência térmica ao longo do tempo. Na figura anterior, exemplificase essa variação para o ensaio 1. Este facto indica que a resistência térmica é adequadamente representada pelo seu valor médio. Os valores médios das resistências térmicas para as condições estudadas nos três ensaios encontram-se expressos na Tabela 3.11 e na Figura 3.16, onde  $R_{t\_MP}$  e  $R_{t\_MS}$  simbolizam a resistência térmica obtida usando o modelo paralelo e o modelo em série, respectivamente.

Tabela 3.11 - Resistências térmicas obtidas para os ensaios realizados

Ensaio	Variações	$R_{t\_MP}$ ( $m^2 \cdot ^\circ C \cdot W^{-1}$ )	$R_{t\_MS}$ ( $m^2 \cdot ^\circ C \cdot W^{-1}$ )
1	5,0	0,0707	0,0748
	10,0	0,0707	0,0748
	16,5	0,0707	0,0744
2	5,0	0,0682	0,0721
	10,0	0,0689	0,0730
	16,5	0,0692	0,0732
	30° para a esquerda	0,0681	0,0707
	15° para a esquerda	0,0686	0,0722
	15° para a direita	0,0697	0,0737
3	30° para a esquerda	0,0663	0,0687
	15° para a esquerda	0,0689	0,0722
	15° para a direita	0,0695	0,0734

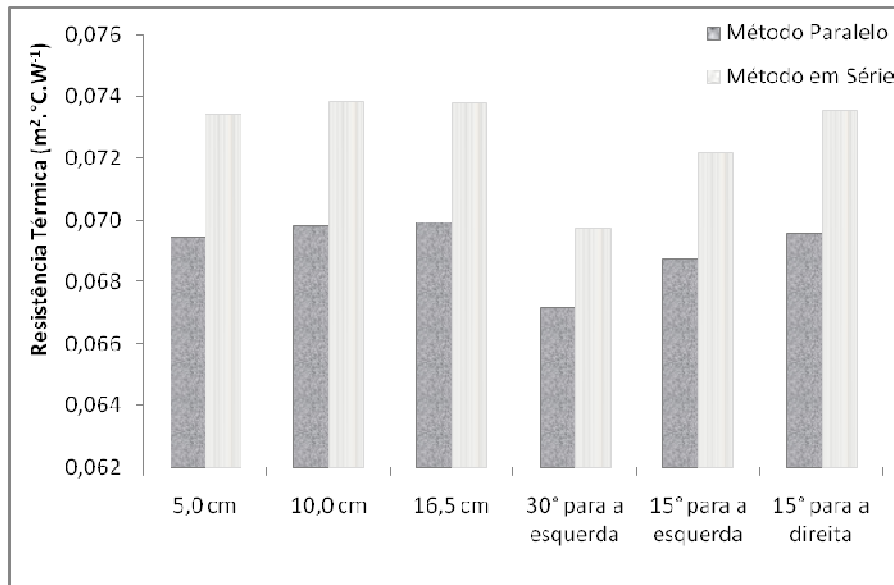


Figura 3.16 - Valores de  $R_t$  obtidos para os ensaios realizados.

A análise dos dados acima apresentados permite constatar que os valores de resistência à passagem de calor obtidos através do modelo paralelo são inferiores aos obtidos com o modelo em série. Tal constatação é coerente com a observação de vários investigadores (Oliveira *et al.*, 2008). Analisando os resultados dos três ensaios, pode-se observar que a altura da colocação do TF tem pouca influência na determinação da resistência térmica, pois o máximo das variações relativas para as resistências obtidas não ultrapassa os 2%.

No que diz respeito à rotação do pé térmico em torno do seu eixo vertical, verifica-se que apesar de ligeira, influencia a determinação da  $R_t$ . Como para esta análise se colocou o pé térmico na altura máxima, ou seja, a 16,5 cm da base, compararam-se os resultados da rotação com os dos ensaios em que se analisou a altura máxima, servindo esta como controlo (rotação: 0°). Deste modo, verifica-se que o maior desvio no valor da resistência à passagem de calor ocorre quando o TF é colocado num plano vertical com uma rotação de 30° em relação ao plano vertical que o atravessa longitudinalmente.

Na Tabela 3.12 estão descritas as resistências médias utilizadas para várias alturas e rotações, bem como os valores dos desvios padrão e dos coeficientes de variação (razão entre o desvios padrão e a média), importantes na análise de resultados.

*Tabela 3.12 - Valores médios de  $R_t$  obtidos para cada condição experimental testada, bem como os respectivos desvios padrão e coeficientes de variação (CV)*

Variações	$R_{t\_MP}$ ( $m^2 \cdot ^\circ C \cdot W^{-1}$ )	CV $R_{t\_MP}$ (%)	$R_{t\_MS}$ ( $m^2 \cdot ^\circ C \cdot W^{-1}$ )	CV $R_{t\_MS}$ (%)
5,0 cm	0,069 ± 0,002	2,57	0,073 ± 0,002	2,51
10,0 cm	0,070 ± 0,001	1,76	0,074 ± 0,001	1,72
16,5 cm	0,070 ± 0,001	1,54	0,074 ± 0,001	1,15
30° para a esquerda	0,067 ± 0,001	1,86	0,070 ± 0,001	2,03
15° para a esquerda	0,0687 ± 0,0002	0,23	0,07218 ± 0,00001	0,01
15° para a direita	0,0696 ± 0,0001	0,19	0,0735 ± 0,0002	0,21

Como se observa na tabela anterior, os desvios padrão (e os correspondentes coeficientes de variação) entre as duas medições feitas para cada ensaio são bastante reduzidos (CV máximo de 2,6%). Este facto é indicador da reprodutibilidade do procedimento experimental seguido.

### 3.2.2 Resistência Térmica

Após a análise da influência do posicionamento do pé térmico avaliou-se o efeito do “acto de calçar” e do número de camadas de material, na resistência térmica.

Quando se fala em resistência térmica de uma peça de vestuário assume-se que esta é um conjunto de resistências, cujo valor total resulta do seu somatório (Havenith, 2005;). No entanto, é importante ter presente a definição de cada uma das resistências envolvidas. Quando se coloca uma peça de vestuário sobre um corpo, existe sempre uma camada de ar que fica retida entre o corpo e o vestuário. O somatório entre a resistência dessa camada e da do vestuário constitui a resistência intrínseca do mesmo,  $R_{cl}$ . Existe também uma outra resistência, designada por resistência da camada de ar,  $R_a$ , cujo valor tal como o seu nome indica, é o resultado do isolamento provocado pela camada de ar que se encontra em torno do vestuário. A Figura 3.17, a seguir representada, permite uma melhor compreensão destes conceitos.

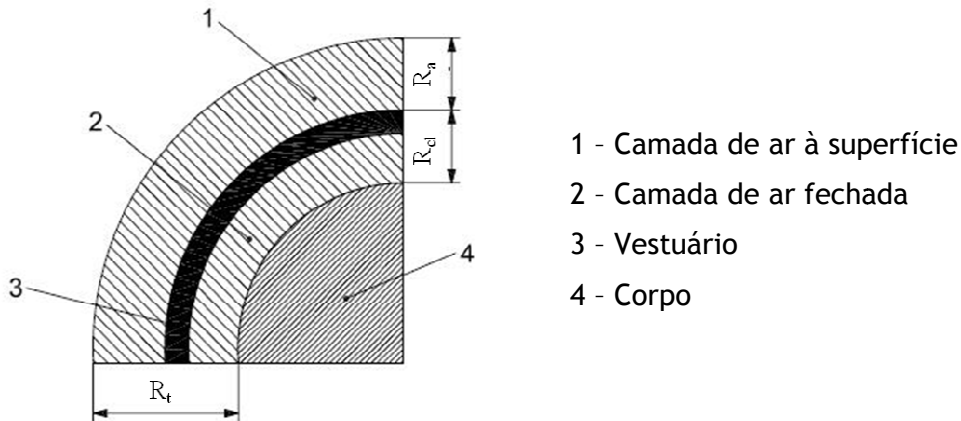


Figura 3.17 - Representação esquemática da resistência total, intrínseca e da camada de ar.

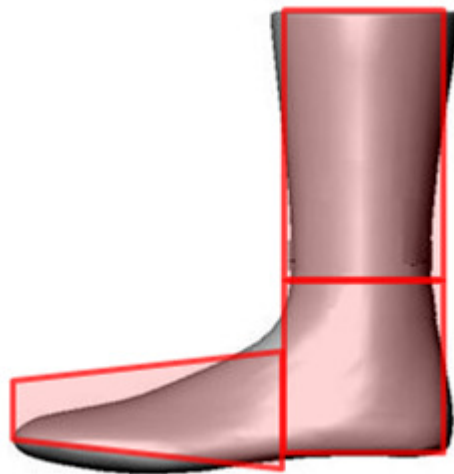
Os valores da resistência da camada de ar são obtidos através da realização de ensaios com o pé térmico despido, ou seja, quando não se coloca nenhuma peça de vestuário a cobrir o pé, pelo que a resistência térmica total é apenas constituída pela resistência da camada de ar em torno do TF. Por seu lado, o cálculo da resistência intrínseca é feito a partir da seguinte equação

$$R_t = R_{cl} + \frac{R_a}{f_{cl}} \quad (3.9)$$

onde surge um novo parâmetro, o  $f_{cl}$ , designado por factor de área (Havenith, 2005). A área de superfície do pé térmico coberto varia de acordo com o material que é analisado. Deste modo, é conveniente introduzir um parâmetro que avalie a razão entre as áreas de superfície do pé térmico quando este se encontra despido e coberto. Este factor é então determinado pela equação seguinte

$$f_{cl} = \frac{A_{cl}}{A} \quad (3.10)$$

sendo  $A_{cl}$  a área de superfície do manequim vestido e  $A$  a área de superfície do manequim despido. A área de superfície do manequim pode ser obtida através de técnicas fotográficas ou de técnicas de digitalização tridimensionais (Havenith, 2005). Porém devido à inexistência destas técnicas na empresa, calculou-se a área de superfície do pé através da aproximação deste a geometrias conhecidas, ou seja, a área de superfície do pé térmico obteve-se a partir do somatório da área de dois cilindros e de um tronco de cone, com bases paralelas. Na figura seguinte encontra-se em vista lateral, uma representação do pé térmico descrito pelas geometrias utilizadas.



*Figura 3.18 - Representação esquemática das áreas usadas para o cálculo da área de superfície total do TF (vista lateral).*

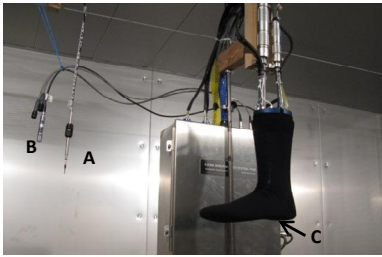
Com base nestas geometrias obteve-se um valor de  $0,1129\text{m}^2$  para a área superficial do pé térmico (o cálculo destas áreas, bem como as áreas superficiais fornecidas pelos fabricantes do TF encontram-se no Anexo C), valor que difere apenas 12% da estimativa da área superficial fornecida pelos fabricantes do equipamento ( $0,1010\text{m}^2$ ). Na tabela seguinte apresentam-se as espessuras de cada meia, as áreas superficiais resultantes, bem como os incrementos deste parâmetro em relação à situação inicial (pé despido).

*Tabela 3.13 - Espessuras e áreas totais obtidas para as meias em estudo*

Material	Branco	Meia mista	Meia de lã	Meia de algodão
Espessura (mm)	0,00	2,10	0,84	1,11
Área total ( $\text{m}^2$ )	0,113	0,119	0,115	0,116
$\Delta A (\%) = A_{\text{meia}} - A_{\text{branco}}$	-	5,37	2,22	2,91

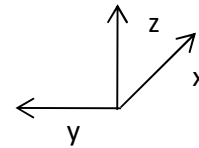
Após a compreensão dos conceitos subjacentes a esta análise procedeu-se à realização dos ensaios para avaliar os parâmetros em estudo. Para estes ensaios adoptou-se a instalação experimental apresentada na Figura 3.19. Esta instalação foi construída tendo em conta a manutenção das condições ambientais, ou seja, durante a realização dos ensaios os valores registados pelos sensores deviam ser sempre os mesmos (uma vez que a câmara climática apresentou uma dificuldade em termos da regulação da velocidade do ar). A localização do pé térmico e dos sensores utilizados efectuou-se com base num eixo tridimensional cuja origem

se situa no interior da câmara climática, no canto inferior direito mais próximo da porta. As coordenadas dessa localização encontram-se na Tabela 3.14.



- A - Anemómetro
- B - Sensores de T e HR do TF
- C - Zona considerada para a localização do TF

- x - Distância da porta aos pontos
- y - Distância da parede lateral direita aos pontos
- z - Distância do chão aos pontos



*Figura 3.19 - Representação da instalação utilizada e do eixo considerado para a localização dos pontos.*

*Tabela 3.14 - Coordenadas do equipamento*

Ponto	Coordenadas (m)		
	x	y	z
A	1,51	2,41	1,67
B	1,74	2,51	1,78
C	1,51	1,91	1,63

### Influência do “acto de calçar”

Para a análise da influência do “acto de calçar” realizaram-se ensaios que consistiam na colocação das meias no pé térmico. Estas foram colocadas o melhor possível (evitando grandes camadas de ar entre a meia e o TF) de maneira a que durante os ensaios realizados cada meia ocupasse sempre a mesma posição. Foi ainda averiguada a existência de alguma diferença entre as meias do mesmo par, efectuando a distinção entre meias do pé esquerdo e meias do pé direito. Assim, nos dois primeiros ensaios testaram-se as meias referentes ao lado esquerdo, ficando o terceiro e o quarto ensaio com as meias relativas ao outro lado.

Com base nos valores de temperatura e de fluxo de calor calcularam-se as resistências térmicas para os diferentes tipos de meias, utilizando tanto o método paralelo como o método em série. É importante ter em mente que, como referido anteriormente, apenas a

abordagem com base no método paralelo é coerente com o modo de operação usado (temperatura constante). Neste sentido, a apresentação dos resultados obtidos com o método em série visa permitir a aferição dos erros que podem resultar da aplicação de um método de cálculo desadequado. Daí apenas se expressarem na Figura 3.20 os valores da resistência térmica calculados com o método paralelo ao longo do tempo, resultantes do primeiro ensaio.

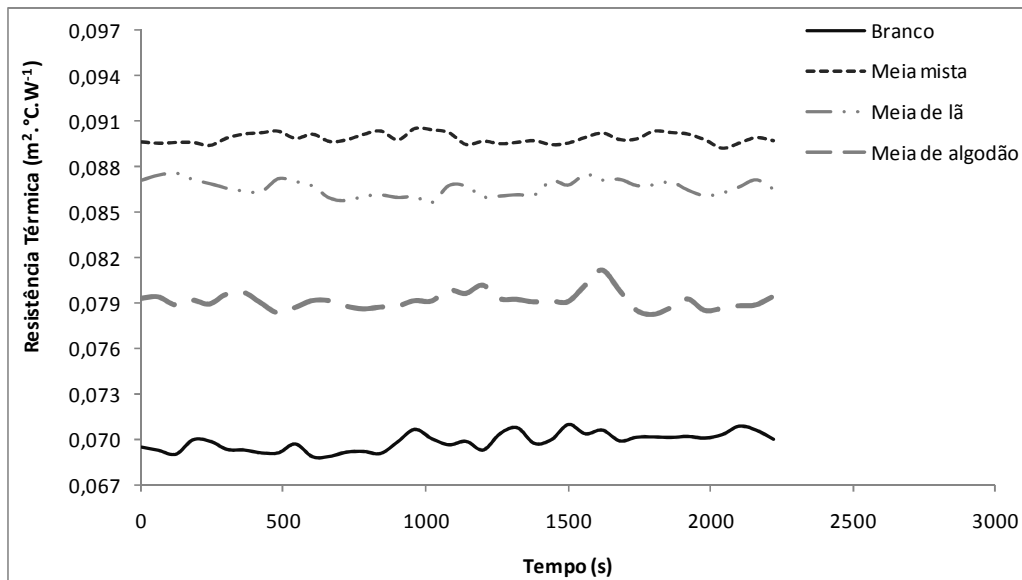


Figura 3.20 - Evolução dos valores de  $R_t$  obtidos para o primeiro ensaio através do método paralelo.

A análise da Figura 3.20 permite concluir que a resistência térmica para cada uma das meias testadas foi bastante constante ao longo do ensaio. Tal facto indica que este parâmetro pode ser representado pelo seu valor médio. Na Tabela 3.15 encontram-se os valores médios da resistência à passagem de calor calculados para cada uma das meias analisadas, bem como os seus respectivos desvios padrão e coeficientes de variação. Encontra-se ainda representado

o desvio máximo relativo  $\left(\frac{máx - mín}{máx}\right)$  obtido entre os ensaios realizados com a mesma meia.

Observando os valores obtidos para as meias do mesmo par, conclui-se que não existiu uma alteração significativa na resistência térmica, uma vez que os valores calculados foram muito semelhantes entre os ensaios com o mesmo tipo de meias. Portanto, assumiu-se que a diferença entre as meias do mesmo material é desprezável.

Tabela 3.15 - Valores médios de  $R_t$  obtidos para os ensaios realizados

Material	$R_{t\_MP}$	$CV_{R_{t\_MP}}$	Desvio máximo	$R_{t\_MS}$	$CV_{R_{t\_MS}}$	Desvio máximo
	( $m^2 \cdot ^\circ C \cdot W^{-1}$ )	(%)	(%)	( $m^2 \cdot ^\circ C \cdot W^{-1}$ )	(%)	(%)
Meia mista (esquerda)	0,0894 ± 0,0001	0,16	0,23	0,0917 ± 0,0002	0,26	0,37
Meia mista (direita)	0,0893 ± 0,0003	0,34	0,48	0,0917 ± 0,0004	0,41	0,57
Meia de lã (esquerda)	0,0869 ± 0,0006	0,75	1,05	0,0885 ± 0,0005	0,56	0,79
Meia de lã (direita)	0,0865 ± 0,0003	0,31	0,44	0,0881 ± 0,0003	0,37	0,53
Meia de algodão (esquerda)	0,0796 ± 0,0003	0,38	0,53	0,0814 ± 0,0003	0,37	0,52
Meia de algodão (direita)	0,0803 ± 0,0002	0,22	0,31	0,0821 ± 0,0001	0,13	0,18

Porém, esta resistência não corresponde ao valor da resistência intrínseca,  $R_{cl}$ , mas sim ao valor da resistência térmica total,  $R_t$ . Neste contexto elaborou-se a Tabela 3.16, que apresenta o factor de área,  $f_{cl}$ , calculado de acordo com a equação 3.10 e os valores das áreas de superfície (vide Tabela 3.13).

Tabela 3.16 - Valores  $R_t$ ,  $R_{cl}$  e  $R_a$  em  $m^2 \cdot ^\circ C \cdot W^{-1}$  e  $f_{cl}$  para cada meia analisada

Material	$f_{cl}$	Modelo Paralelo			Modelo em Série		
		$R_a$	$R_t$	$R_{cl}$	$R_a$	$R_t$	$R_{cl}$
Meia mista (esquerda)	1,0567		0,0894	0,0230		0,0917	0,0234
Meia mista (direita)	1,0567		0,0893	0,0230		0,0917	0,0234
Meia de lã (esquerda)	1,0227	0,0701	0,0869	0,0184	0,0722	0,0885	0,0180
Meia de lã (direita)	1,0227		0,0865	0,0180		0,0881	0,0176
Meia de algodão (esquerda)	1,0300		0,0796	0,0116		0,0814	0,0120
Meia de algodão (direita)	1,0300		0,0803	0,0123		0,0821	0,0120

A resistência intrínseca permite verificar qual a resistência térmica associada a cada meia, sendo agora possível efectuar uma comparação entre os valores obtidos para as diferentes meias. Pela observação da Tabela 3.16 verifica-se que a meia mista é a que oferece maior resistência à passagem de calor, em oposição à meia de algodão cuja resistência é a menor. Tal como seria de esperar quando o pé térmico está despido perde mais calor porque a meia oferece uma maior resistência à passagem de calor (isto é visível comparando os valores da resistência da camada de ar, onde o pé está despido (coluna  $R_a$  da Tabela 3.16), com os valores da resistência intrínseca). Para melhor visualizar as diferenças entre o isolamento de cada meia estuda construiu-se a seguinte figura.

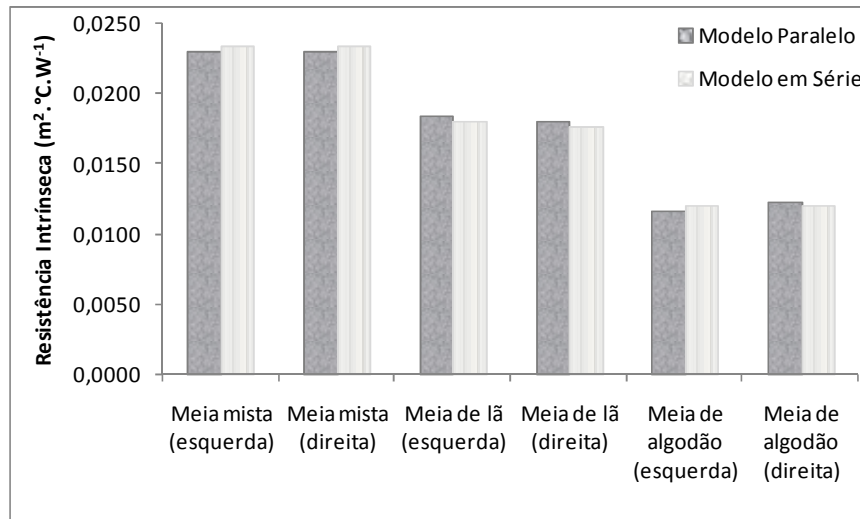


Figura 3.21 - Valores médios de  $R_{cl}$  obtidos para as meias analisadas.

Influência do número de camadas

Para avaliar o efeito que o número de camadas do mesmo material produz na resistência à passagem de calor total, procedeu-se à realização de dois ensaios onde se colocaram os dois pares da mesma meia em simultâneo no pé térmico.

Utilizando a metodologia do estudo anterior, efectuaram-se dois ensaios com cada par de meias de modo a obter os parâmetros necessários para o cálculo da resistência à passagem de calor (utilizando as fórmulas de cálculo fornecidas pelos métodos paralelos e em série). Os valores médios de  $R_i$  calculados encontram-se na Tabela 3.17, tal como os desvios padrão e coeficientes de variação associados a cada par de meia. Com base nos valores do desvio padrão e no desvio máximo relativo obtido para os dois ensaios realizados com o mesmo par, é possível dizer que o procedimento experimental adoptado é reprodutível.

Tabela 3.17 - Valores médios de  $R_i$  obtidos para os ensaios realizados (2 camadas)

Material	$R_{t\_MP}$ (m <sup>2</sup> .°C.W <sup>-1</sup> )	CV <sub>R<sub>t</sub>_MP</sub> (%)	Desvio máximo (%)	$R_{t\_MS}$ (m <sup>2</sup> .°C.W <sup>-1</sup> )	CV <sub>R<sub>t</sub>_MS</sub> (%)	Desvio máximo (%)
Par meia mista	0,0985 ± 0,0002	0,17	0,24	0,10215 ± 0,00001	0,01	0,02
Par meia de lã	0,10237 ± 0,00002	0,02	0,03	0,10403 ± 0,00005	0,05	0,07
Par meia de algodão	0,0901 ± 0,0003	0,28	0,40	0,0918 ± 0,0002	0,18	0,26

A resistência da camada de ar foi obtida com os ensaios realizados com o pé despido e o factor de área para a situação de dupla camada foi estimado como anteriormente (por analogia geométrica), mas considerando os correspondentes incrementos na espessura do

material. Por último, estes dados levaram ao cálculo da resistência intrínseca associada a cada par de meias (duas camadas), estando esses valores expressos na Figura 3.22 e na seguinte tabela.

Tabela 3.18 - Valores  $R_t$ ,  $R_{cl}$  e  $R_a$  em  $m^2 \cdot ^\circ C \cdot W^{-1}$  e  $f_{cl}$  para cada par analisado (2 camadas)

Material	$f_{cl}$	Modelo Paralelo			Modelo em Série		
		$R_a$	$R_t$	$R_{cl}$	$R_a$	$R_t$	$R_{cl}$
Par meia mista	1,1136		0,0985	0,0359		0,1021	0,0377
Par meia de lã	1,0454	0,0697	0,1024	0,0357	0,0717	0,1040	0,0354
Par meia de algodão	1,0600		0,0901	0,0244		0,0918	0,0241

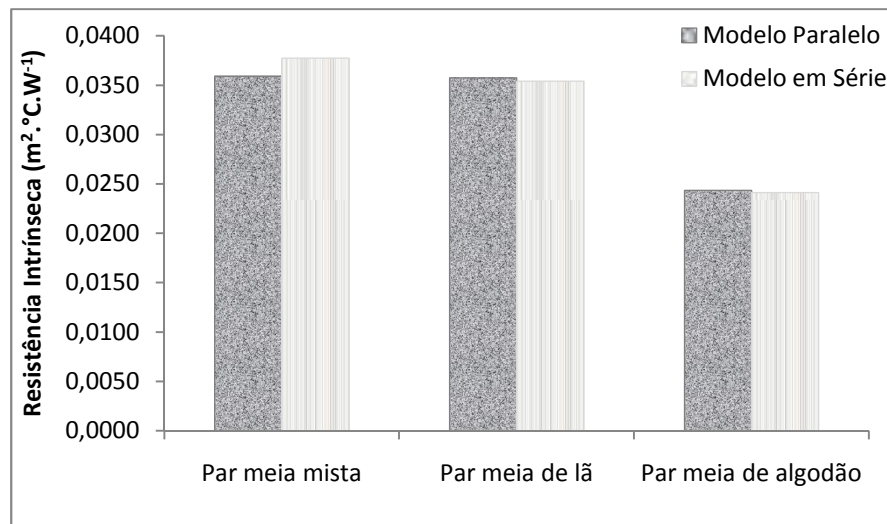


Figura 3.22 - Valores médios de  $R_{cl}$  obtidos para cada par analisado.

Quando ordenados consoante os valores de  $R_{cl}$  obtidos, as meias testadas mantêm a posição relativa ( $R_{cl}^{algodão} < R_{cl}^{lã} < R_{cl}^{mista}$ ). No entanto, é notória a diminuição da diferença entre os valores de  $R_{cl}$  para as meias de composição mista e as meias de lã (de  $0,0046 m^2 \cdot ^\circ C \cdot W^{-1}$ , para ensaios com uma camada, para  $0,0002 m^2 \cdot ^\circ C \cdot W^{-1}$ , para ensaios com duas camadas).

Pela análise da Tabela 3.18 é visível que com o aumento do número de camadas do material usado a resistência intrínseca também aumenta. Na tabela seguinte encontram-se os valores de  $R_{cl}$  resultantes da soma dos valores medidos para as duas meias do mesmo material

(valores obtidos através do modelo paralelo), bem como a razão entre esses valores e os valores de  $R_{cl}$  obtidos com duas camadas de material.

*Tabela 3.19 - Comparação entre os valores médios de  $R_{cl}$  calculados com uma e duas camadas de material*

<b>Material</b>	<b><math>R_{cl}</math> esquerda + <math>R_{cl}</math> direita</b>	<b><math>R_{cl}</math> 2 camadas / (<math>R_{cl}</math> esquerda + <math>R_{cl}</math> direita)</b>
Meia mista	0,0460	0,7807
Meia de lã	0,0364	0,9817
Meia de algodão	0,0239	1,0191

Relativamente à duplicação do número de camadas do material utilizado verificou-se, tal como era esperado, um aumento do valor associado à resistência intrínseca (quanto maior a espessura do material usado maior será a sua resistência oferecida à passagem de calor). Contudo, a análise da Tabela 3.19 permite verificar que a soma dos valores de  $R_{cl}$  das duas meias do mesmo material, calculados para os ensaios em que se analisou a resistência de uma camada do material não é igual ao correspondente valor calculado com as duas camadas. Para a meia mista observa-se que a razão entre os dois valores de  $R_{cl}$  referidos é menor que um, ou seja, que o valor de  $R_{cl}$  obtido com as duas camadas é menor do que a soma do valor obtido para cada meia mista. Este facto pode ser justificado pelas dimensões da meia mista, pois verificou-se que esta ficava demasiadamente esticada quando colocada no pé térmico. Na meia de algodão a razão entre os valores referidos é superior a um. Ao contrário do que acontece com a meia mista, esta meia de algodão era maior que o TF, o que poderá ter originado a presença de camadas de ar maior.

Pode-se verificar que o aumento do número de camadas de um determinado material não significa que a resistência intrínseca do vestuário vai aumentar na mesma proporção, ou seja, esta propriedade está intimamente ligada à composição do material sobre o qual é feito o estudo, pois a espessura de cada meia individual não é constante no aumento do número de camadas, devido à variação causada na área superficial. Além disso, a espessura da meia pode também variar, devido à elasticidade do material, podendo o valor da resistência do material baixar devido a esse facto.

### 3.2.3 Resistência à passagem de vapor de água

A respirabilidade de uma peça de vestuário, ou seja, a capacidade desta funcionar como uma membrana permeável ao suor, é um factor determinante no seu desempenho térmico. Este parâmetro também conhecido por resistência à passagem de vapor ou resistência evaporativa,  $R_{et}$ , pode ser, à imagem da resistência térmica, obtido através de medições com manequins térmicos. Nestas, obtêm-se valores de  $R_{et}$  através das perdas de calor de um manequim em que existe água em evaporação. Os valores de  $R_{et}$  podem ser calculados através de,

$$R_{et} = \frac{(P_s - P_a) A}{H_e - (T_s - T_0) A / R_t} \quad (3.11)$$

onde  $P_s$  é a pressão de vapor de saturação de água à temperatura da superfície de transpiração do manequim ( $T_s$ ),  $P_a$  a pressão de vapor da água à temperatura do ar longe do manequim ( $T_0$ ),  $A$  a área de superfície do manequim,  $H_e$  a potência perdida pelo manequim e  $R_t$  a resistência térmica total do vestuário (ASTM F2370-05). A equação anterior reduz-se, no caso de experiências isotérmicas (em que  $T_s = T_0$ ), a

$$R_{et} = \frac{(P_s - P_a) A}{H_e} \quad (3.12)$$

Tal como acontece com a resistência térmica, a resistência total evaporativa é composta pelo somatório da resistência evaporativa da camada de ar,  $R_{ea}$ , e da resistência à passagem de vapor de água intrínseca do vestuário,  $R_{ecl}$ . Seguindo uma abordagem semelhante à adoptada para a resistência térmica, é possível calcular a resistência evaporativa através de

$$R_{et} = R_{ecl} + \frac{R_{ea}}{f_{cl}} \quad (3.13)$$

ou, depois de uma simples transformação algébrica, por

$$R_{ecl} = R_{et} - \frac{R_{ea}}{f_{cl}} \quad (3.14)$$

O que se pretendia nesta fase do projecto era analisar a influência do caudal de “suor” na determinação da resistência à passagem de vapor de água, de forma a encontrar o caudal em função dos diferentes tipos de amostras a analisar.

Tal como nas medições realizadas para a determinação da resistência térmica, foi necessário efectuar uma pesquisa em normas já existentes de modo a definir as condições operatórias a utilizar. A norma ASTM F2370-05 sugere que os ensaios devem ser realizados em condições isotérmicas, operando a uma temperatura de 35°C, 40% da humidade relativa e com uma velocidade de ar de 0,4m/s. No entanto, por uma questão de coerência em relação às condições experimentais adoptadas aquando das medições da resistência térmica, decidiu-se trabalhar a uma temperatura de 34°C (manequim e ambiente) com 50% da humidade relativa. A realização destes ensaios requereu a utilização de um material sobre a superfície do pé térmico de forma a promover a difusão da água por toda a superfície. Este material designado por pele difusora (“skin”) é apresentado na Figura 3.23 (a laranja).



*Figura 3.23 - Material utilizado para melhorar a difusão da água.*

A primeira fase deste estudo consistiu na observação da difusão da água através da pele difusora, de maneira a descobrir como e quanto tempo esta levava a ficar totalmente molhada. Para tal, colocou-se a pele difusora no pé térmico e ligou-se o sistema simulador de suor, cujo caudal inicial de água utilizado foi determinado com base nos dados disponibilizados pelos fabricantes do pé térmico (*vide* anexo D). Com o auxílio de uma câmara de infravermelhos (ou câmara térmica, “*Thermal Camera*” - TC) acompanhou-se a evolução da distribuição da água no pé (devido ao facto da emissividade da pele difusora ser diferente consoante esta se encontra seca ou molhada). Os termogramas obtidos com a câmara de infravermelhos permitiram observar que era necessário aguardar períodos de tempo consideráveis (várias horas) para se ter a pele difusora com água razoavelmente distribuída.

Para resolver este problema decidiu-se molhar a pele difusora (com a ajuda de um borrifador) após a sua colocação no TF. Notou-se que com o mesmo caudal de água introduzido ( $400 \text{ cm}^3 \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ ) a pele difusora não só ficou completamente molhada como também o tempo necessário para tal tarefa foi menor. Esta metodologia foi então, adoptada nos ensaios seguintes.

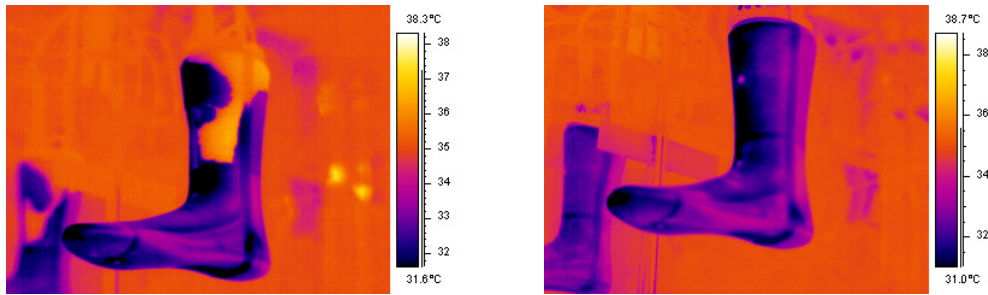


Figura 3.24 - Imagem térmica do processo de simulação da transpiração do TF com a pele difusora (à esquerda) e com o auxílio do borrifador (à direita).

A determinação da resistência intrínseca das meias à passagem de vapor de água exige a compreensão do efeito da evaporação. É necessário garantir que a evaporação da água ocorre à superfície da pele difusora e não à superfície da meia (é importante ter água em quantidade suficiente para a evaporação mas a sua presença em excesso leva a resultados de  $R_{et}$  incorrectos). A acumulação de água à superfície da meia, e consequente evaporação de água nessa interface, altera os valores da resistência evaporativa pois, nesta situação, o valor da resistência obtido não contabiliza a resistência que a meia oferece à passagem do vapor de água.

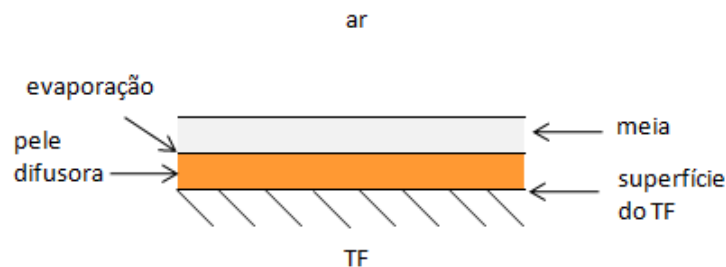


Figura 3.25 - Esquemática de um corte transversal no cálculo da resistência evaporativa.

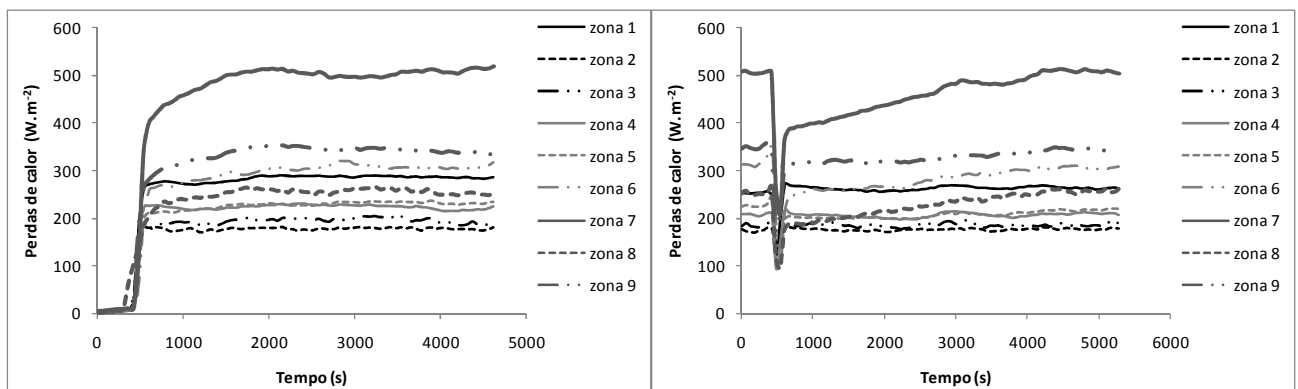
No sentido de determinar a distribuição de caudais ideal analisaram-se os valores da resistência evaporativa obtidos apenas com a pele difusora colocada no pé térmico (ou seja, a resistência evaporativa da camada de ar,  $R_{ea}$ ). Utilizando como ponto de partida o valor médio da resistência obtida em ensaios preliminares ( $R_{et}=12 \text{ Pa}\cdot\text{m}^2\cdot\text{W}^{-1}$ ) recorreu-se a um gráfico do caudal de suor versus resistência à passagem de vapor de água fornecido pelos fabricantes do TF (apresentado no anexo D) para obter o valor do caudal a utilizar ( $370\text{cm}^3\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$ ). Foram realizados ensaios com as duas peles difusoras existentes (pele difusora A e B), determinando-se as perdas de calor médias obtidas para cada distribuição de caudal testada. As peles difusoras utilizadas são idênticas e compostas pelo mesmo material.

Verificou-se que a água acumulava nas zonas inferiores do pé térmico e para o evitar foi-se reduzindo o caudal nestas zonas, originando uma distribuição de água heterogénea, como apresentado na Tabela 3.20. Nesta tabela são também apresentados os valores de caudal total ( $\text{cm}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ ) fornecidos em cada ensaio.

Tabela 3.20 - Caudais utilizados para cada zona do pé térmico

zona térmica	área ( $\text{m}^2$ )	Caudal ( $\text{cm}^3 \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ )					
		1	2	3	4	5	6
1	0,018	370	370	370	370	370	370
2	0,019	370	370	370	370	370	370
3	0,012	370	340	310	310	310	310
4	0,013	370	340	310	310	310	310
5	0,012	370	340	310	310	310	310
6	0,004	370	340	310	280	250	210
7	0,003	370	340	310	280	250	210
8	0,016	370	340	310	280	250	210
9	0,004	370	340	310	280	250	210
<b>Caudal total (<math>\text{cm}^3 \cdot \text{h}^{-1}</math>)</b>		<b>37,36</b>	<b>35,45</b>	<b>33,55</b>	<b>32,74</b>	<b>31,94</b>	<b>30,86</b>

Na Figura 3.26 estão representadas as perdas de calor resultantes do período de estabilização com os diferentes caudais utilizados para a pele difusora A. A análise dos resultados obtidos nesta série de ensaios revelou alguns aspectos úteis para a compreensão dos fenómenos em jogo, tais como o facto das perdas de calor, obtidas nas zonas inferiores, para cada caudal só estabilizarem quando atingem um determinado patamar, e o facto de se ter observado, através das imagens térmicas, que quando esse patamar é atingido ocorre a formação de gotas de água nas zonas inferiores do pé térmico. Estas duas observações parecem indicar que a estabilização das perdas de calor do TF tem lugar quando estabiliza o teor de humidade (quantidade de água) da pele difusora.



a)

b)

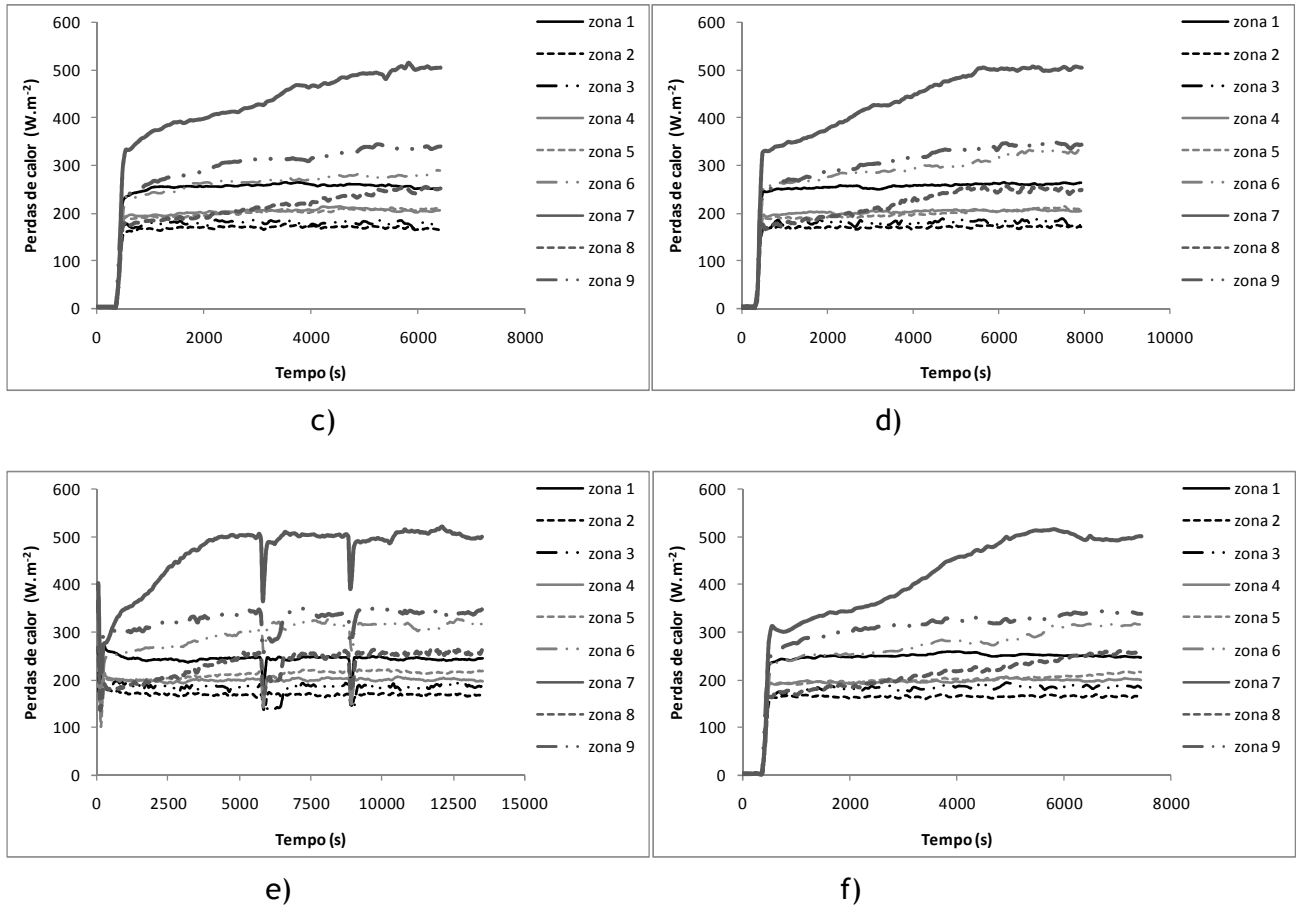


Figura 3.26 - Perdas de calor obtidas durante a estabilização da pele difusora A com a)caudal 1, b)caudal 2, c) caudal 3, d) caudal 4, e)caudal 5 e f)caudal 6.

De forma a melhor compreender o fenómeno da passagem de vapor através das meias colocaram-se os caudais testados em função das perdas de calor médias (valor médio de todas as zonas do pé térmico) obtidas, bem como em função dos tempos necessários à sua estabilização. Na Figura 3.27 estão representados esses valores, obtidos para as duas peles difusoras utilizadas.

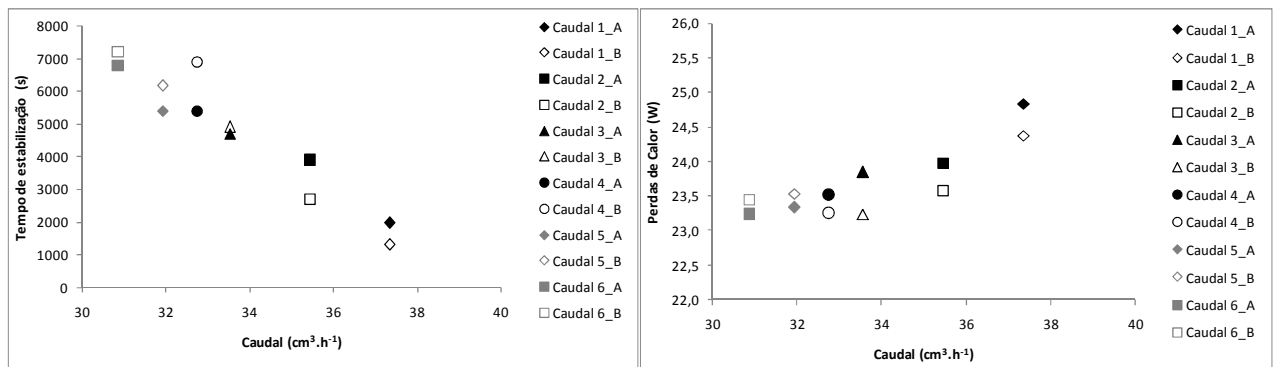


Figura 3.27- Tempo de estabilização (à esquerda) e perdas de calor médias (à direita) em função dos caudais utilizados.

A análise da figura anterior permite concluir que o tempo necessário à estabilização das perdas de calor aumenta com a diminuição do caudal de água. Tal variação é coerente com a interpretação avançada anteriormente, de que a estabilização das perdas de calor tem lugar quando estabiliza o teor de humidade na meia difusora. A Figura 3.27 permite igualmente concluir que as perdas de calor diminuem, de forma aproximadamente assintótica, com o caudal de água fornecido (gráfico da direita). De acordo com esta representação, os três últimos caudais (ensaios 4, 5 e 6) resultam em perdas de calor médias, e correspondentes valores de  $R_{ea}$ , muito semelhantes. Este facto, juntamente com a observação de que para estes caudais não ocorre formação de gotas de água nas zonas inferiores do pé térmico, serviu de base à escolha dos caudais do ensaio 6 como ponto de partida para os ensaios seguintes (já com meias).

Assim, prosseguiu-se o estudo com a colocação das meias em estudo. Nesta fase, iniciou-se o estudo com a última distribuição de caudal utilizada na pele difusora (caudal 6) mas tal como seria de esperar foi preciso diminuir esse valor uma vez que a meia constitui uma resistência adicional à passagem de vapor de água. Verificou-se que a água passava para a meia ficando acumulada nesta. Esta situação deve ser evitada pois a evaporação deixa de ocorrer na interface pele difusora/meia e passa a ocorrer à superfície da meia. Por esta razão não foi utilizada a mesma distribuição de caudais para as três meias em estudo, tal como é visível na seguinte tabela.

Tabela 3.21 - Distribuição de caudais utilizada para o cálculo da  $R_{et}$  das meias analisadas

zona térmica	Caudal ( $\text{cm}^3 \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ )		
	Meia mista	Meia lã	Meia algodão
1	370	370	370
2	370	370	370
3	310	260	260
4	310	260	260
5	260	260	260
6	20	10	10
7	20	5	5
8	50	50	50
9	20	20	20
<b>Caudal total (<math>\text{cm}^3 \cdot \text{h}^{-1}</math>)</b>	25,62	24,31	24,31

Optou-se por uma distribuição desigual, reduzindo muito o caudal fornecido às zonas inferiores do pé térmico (uma vez que nestas zonas ocorria acumulação de água devido ao efeito da gravidade, tal como já se tinha observado nos ensaios anteriormente realizados).

Neste estudo utilizaram-se as duas meias de cada par e efectuaram-se dois ensaios com cada uma (exceptuando as meias mista e de algodão do lado esquerdo, onde se realizaram três ensaios). Assim, obtiveram-se resultados que possibilitaram a comparação entre cada par, bem como as diferenças inerentes à composição de cada meia estudada.

Durante a realização destes ensaios observou-se uma certa dificuldade na estabilização das perdas de calor das várias zonas do pé térmico, em especial, as zonas 7 e 9 que apresentavam, nalguns casos, uma maior oscilação. Contudo, nas situações em que essas oscilações estavam presentes (mas não de uma forma muito acentuada) recorreu-se ao valor médio das perdas de calor, isto é, considerou-se o período de estabilização quando a média não variava acentuadamente. Na Figura 3.28 estão representadas as perdas de calor das várias zonas do pé térmico obtidas para um ensaio realizado com a meia mista do lado direito (à esquerda), demonstrando a sua evolução ao longo do tempo. Verifica-se que praticamente em todas as zonas o valor das perdas se mantém constante, exceptuando as zonas 7 e 9. No entanto, quando se observa o valor médio das perdas de calor totais, conclui-se que as oscilações destas zonas não influenciam o resultado (devido às áreas destas zonas serem pequenas comparativamente com a área total do pé térmico).

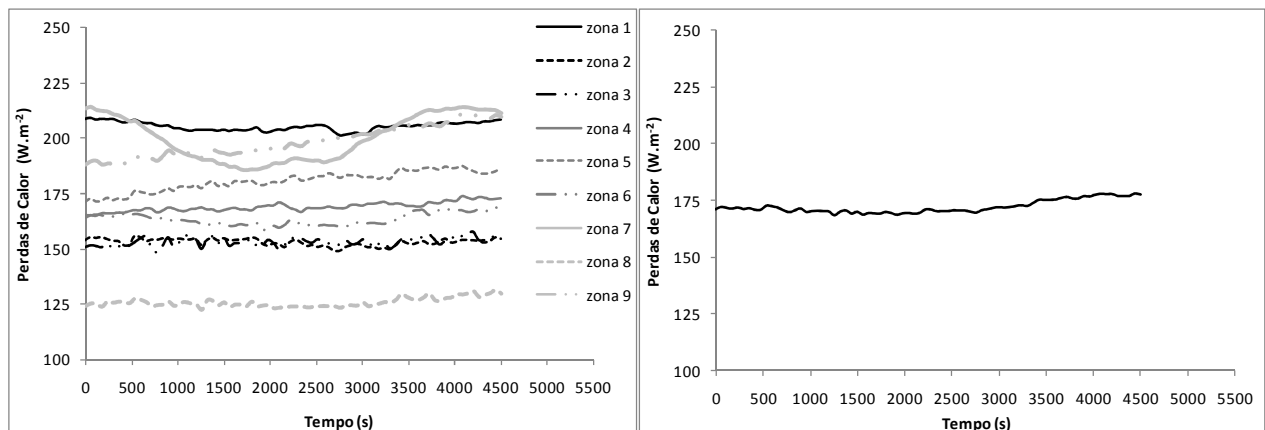


Figura 3.28 - Exemplificação das perdas de calor obtidas durante o período de estabilização.

Analogamente ao que se verificou com os cálculos da resistência térmica, o procedimento experimental adoptado para a determinação da resistência evaporativa revelou ser reprodutível. Esta análise é feita com base nos valores dos desvios padrão e dos coeficientes de variação obtidos para os ensaios realizados com as meias, apresentados na Tabela 3.22. Nesta tabela estão também representados os desvios máximos obtidos para os ensaios realizados com cada meia. Verifica-se que os maiores desvios ocorrem na meia mista esquerda e meia de algodão esquerda. Este facto pode ser justificado devido a nestas duas meias se ter realizado mais um ensaio (três ensaios).

Tabela 3.22 - Valores médios de  $R_{et}$  para os ensaios realizados

Material	$R_{et\_MP}$ (Pa.m <sup>2</sup> .W <sup>-1</sup> )	CV <sub>Ret_MP</sub> (%)	Desvio máximo (%)
Meia mista (esquerda)	16,1 ± 0,5	3,19	6,15
Meia mista (direita)	17,27 ± 0,09	0,54	0,76
Meia de lã (esquerda)	16,2 ± 0,2	1,05	1,47
Meia de lã (direita)	15,7 ± 0,3	1,80	2,51
Meia de algodão (esquerda)	14,7 ± 0,5	3,73	7,19
Meia de algodão (direita)	14,8 ± 0,2	1,27	1,78

Após a realização dos ensaios que permitiram a medição da resistência total à passagem de vapor de água procedeu-se à determinação da resistência intrínseca das meias (aplicando a equação 3.13). Para tal utilizaram-se os valores do factor de área, já calculados para a determinação da resistência térmica intrínseca, e a resistência evaporativa da camada de ar obtida através da realização de ensaios apenas com a pele difusora e o caudal 6 (caudal considerado desejado para a evaporação ocorrer à superfície, sem excesso de água). Os resultados obtidos encontram-se nas tabela e figura seguintes.

Tabela 3.23 - Valores  $R_{et}$ ,  $R_{ecl}$  e  $R_{ea}$  e  $f_{cl}$  para as meias analisadas

Material	$f_{cl}$	$R_{ea}$ (Pa.m <sup>2</sup> .W <sup>-1</sup> )	$R_{et}$ (Pa.m <sup>2</sup> .W <sup>-1</sup> )	$R_{ecl}$ (Pa.m <sup>2</sup> .W <sup>-1</sup> )
Meia mista (esquerda)	1,057	12,068	16,103	4,683
Meia mista (direita)			17,272	5,851
Meia de lã (esquerda)	1,023		16,221	4,420
Meia de lã (direita)			15,748	3,948
Meia de algodão (esquerda)	1,030		14,677	2,960
Meia de algodão (direita)			14,842	3,125

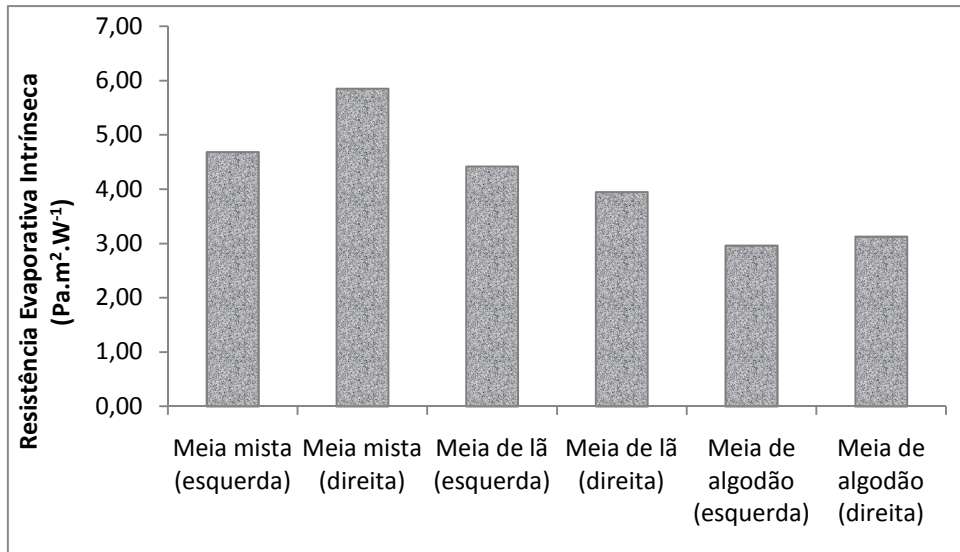


Figura 3.29 - Valores médios de  $R_{ecl}$  obtidos para as meias analisadas.

Analisando a tabela anterior pode-se verificar que de forma análoga ao observado relativamente à resistência térmica, a resistência evaporativa intrínseca é maior para a meia mista e menor para a meia de algodão. No entanto, existe alguma diferença entre os resultados obtidos para as meias do mesmo par. Isto pode ser explicado, pela reduzida quantidade de ensaios (fruto da limitação temporal) que não permitiu obter resultados com grande precisão.

## 4 Conclusões

O presente trabalho permitiu verificar as diferenças nos valores registados pelos diversos sensores utilizados no decorrer dos ensaios efectuados, evitando os erros resultantes das calibrações dos vários equipamentos efectuadas por instituições distintas.

Com a realização deste trabalho verificou-se que em caso de necessidade a utilização de uma câmara climática de menores dimensões (CC1) para o condicionamento de amostras constitui uma opção viável tanto do ponto de vista técnico, como económico.

Quanto à câmara climática de 30m<sup>3</sup> foi importante realizar uma análise prévia do seu desempenho, nomeadamente as alterações nos valores de temperatura e humidade relativa, provocadas pela abertura da sua porta. Neste contexto estudou-se a hipótese da colocação de uma antecâmara, observando que tal só tem utilidade quando se opera a temperaturas e humidades muito afastadas das existentes no exterior da câmara.

Passando para a análise da resistência térmica verificou-se que a composição da peça de vestuário influencia o isolamento térmico. Dos três tipos de meias analisadas verificou-se que a meia mista oferece maior resistência à passagem de calor.

O estudo da resistência evaporativa revelou as dificuldades subjacentes a este tipo de medições. Pretendeu-se medir a resistência que as meias oferecem à passagem de vapor de água, no entanto, surgiram obstáculos na sua determinação. A quantidade de água necessária para a simulação da transpiração levantou algumas questões, revelando a dificuldade de ter a evaporação da água a ocorrer apenas à superfície da pele difusora.

## 5 Avaliação do trabalho realizado

### 5.1 Objectivos Realizados

A elaboração desta tese teve como objectivos a uniformização da calibração entre o equipamento, a avaliação do condicionamento de amostras na câmara climática de 1m<sup>3</sup> e do desempenho da câmara climática de 30m<sup>3</sup> e por último, a avaliação do desempenho térmico de meias.

Foram verificados os diferentes valores registados pelos sensores de temperatura e humidade dos diversos equipamentos utilizados, uniformizando-os com base nas medições da câmara climática de 30m<sup>3</sup>. Relativamente ao condicionamento na CC1 constatou-se a sua viabilidade para futuros testes, bem como a necessidade da colocação de uma antecâmara na CC30 quando se pretender trabalhar em condições operatórias afastadas das do exterior da câmara. Quanto ao desempenho térmico, avaliaram-se as resistências térmicas e evaporativas das meias em estudo.

### 5.2 Limitações e Trabalho Futuro

Um trabalho que envolve conceitos tão específicos como o isolamento térmico e a respirabilidade de peças de vestuário exige uma análise exaustiva. As limitações temporais não permitiram analisar mais peças de vestuário, o que impediu uma maior compreensão acerca da relação entre a composição dos têxteis e as suas características térmicas. Relativamente à resistência à passagem de vapor de água, muito ainda falta ser feito, como por exemplo a realização de mais ensaios necessários à validação dos resultados. Será adequado alargar esta análise a mais vestuário, tal como a calçado, possibilitando um melhor conhecimento das suas características térmicas. Espera-se que este trabalho permita desenvolver vestuário capaz de satisfazer as diferentes necessidades dos seus utilizadores.

### 5.3 Apreciação final

Este trabalho possibilitou uma maior aprendizagem ao nível do conhecimento sobre os mecanismos envolvidos na transferência de calor e de massa, bem como o contacto com novas tecnologias e o desafio na realização e no cumprimento dos objectivos propostos.

Do ponto de vista da valorização pessoal, salienta-se a oportunidade de ter integrado a rotina de uma empresa e as amizades e o companheirismo nesta criados. Sem dúvida, esta etapa do meu percurso académico constituiu uma experiência muito enriquecedora e marcante quer a nível profissional, quer a nível pessoal.

## Referências

- ASTM F 1291-04. Standard test method for measuring the thermal insulation of clothing using a heated manikin.
- ASTM F 2370-05. Standard test method for measuring the evaporative resistance of clothing using a sweating manikin.
- ISO International Standard 15831 (2004) Clothing - Physiological effects - Measurement of thermal insulation by means of a thermal manikin.
- Endrusick, T.L., Stroschein, L.A., Gonzalez, R.R., Thermal manikin history, URL:[http://www.mtnw-usa.com/thermalsystems/mainSubpages/manikin\\_history.php](http://www.mtnw-usa.com/thermalsystems/mainSubpages/manikin_history.php), acessado em Outubro de 2008.
- Fan, J., Chen, Y.S., Measurement of clothing thermal insulation and moisture vapour resistance using a novel perspiring fabric thermal manikin. *Institute of Physics Publishing*, **13**, 1115-1123 (2002).
- Havenith, G., Clothing heat exchange models for research and application. Proceedings of 11<sup>th</sup> International Conference on Environmental Ergonomics, Ystad, Sweden, 66-73 (2005).
- Holmér, I., Thermal manikin history and applications. *European Journal Applied Physiology*, **92**, 614-618 (2004).
- Kilic, M., Sevilgen, G., Modelling airflow transfer and moisture transport around a standing human body by computational fluid dynamics. *International communications in heat and mass transfer*, **35**, 9, 1159-1164 (2008).
- Kuklane, K. Footwear for cold environments - Thermal properties, performance and testing, Tese de Doutorado, Universidade da Tecnologia de Luleå (1999)
- MTNW-Usa, Measurement Technology NeWs, Newsletter 2004  
URL:[http://www.mtnw-usa.com/thermalsystems/pdf/thermal\\_newsletter2.pdf](http://www.mtnw-usa.com/thermalsystems/pdf/thermal_newsletter2.pdf),  
acessado em Fevereiro de 2009

- Oliveira, A.V.M., Gaspar, A.R., Quintela, D.A., Measurements of clothing insulation with a thermal manikin operating under the thermal comfort regulation mode: comparative analysis of the calculation methods. *European Journal Applied Physiology*, 104, 679-688 (2008).
- Oliveira, Study of cold thermal environments: experimental developments and assessment of working conditions. Tese de Doutoramento, Faculdade de Ciência e Tecnologia, Universidade de Coimbra, Coimbra, Portugal (2006)
- Qian, X., Fan, J., Interactions of the surface heat and moisture transfer from the human body under varying climatic conditions and walking speeds. *Applied Ergonomics*, 37, 685-693 (2006).
- Qian, X., Fan, J., Prediction of clothing thermal insulation and moisture vapour resistance of the clothed body walking in wind. *Annual Occupational Hygiene*, 50,8, 833-842 (2006).
- Scott, Richard A. Textiles for Protection. Woodhead Publishing, cap. 9.2 (2005)

## Anexo A Resultados da calibração

### A.1 Resultados do Ensaio 1

Neste ensaio, como é visível na Tabela 3.1, usaram-se os sensores da CC30 e do DL, fazendo variar a temperatura entre 15, 20 e 35°C com a humidade relativa a 50% e a ventilação de ar a 50% da potência máxima do ventilador. Os resultados obtidos encontram-se representados nas figuras seguintes (Figura A.1 - Figura A.3), onde apenas estão representados os períodos de estabilização.

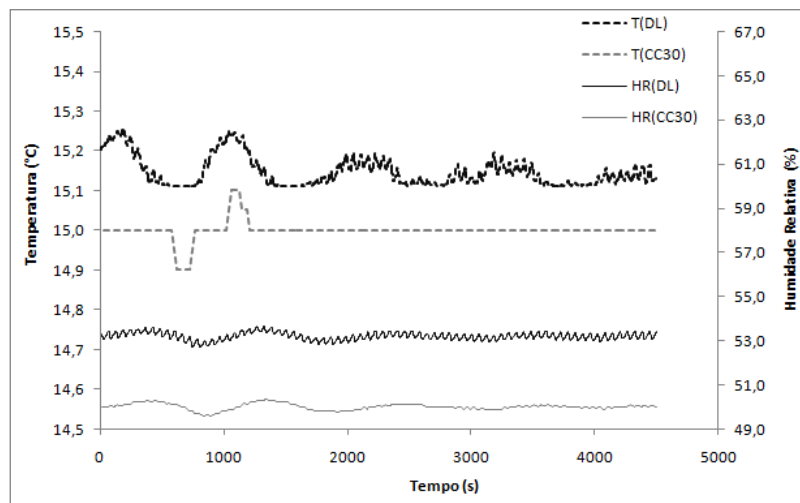


Figura A.1 - Representação dos valores de T e HR obtidos pela CC30 e pelo DL no período de estabilização correspondente a 15°C e 50% HR.

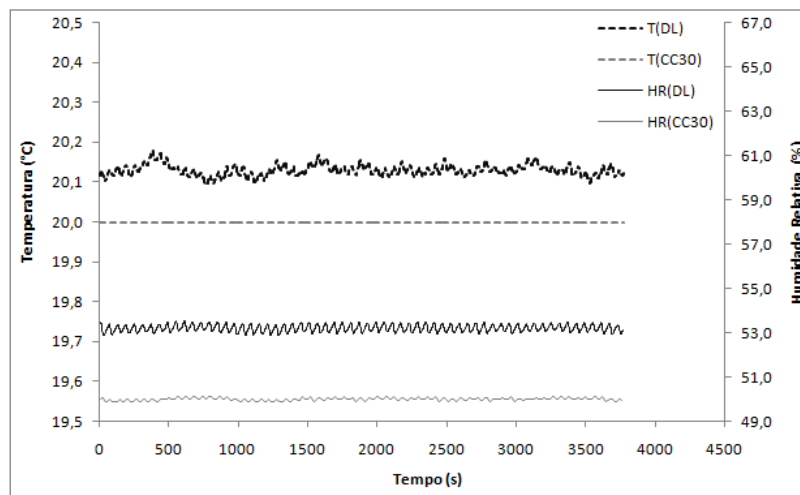


Figura A.2 - Representação dos valores de T e HR obtidos pela CC30 e pelo DL no período de estabilização correspondente a 20°C e 50% HR.

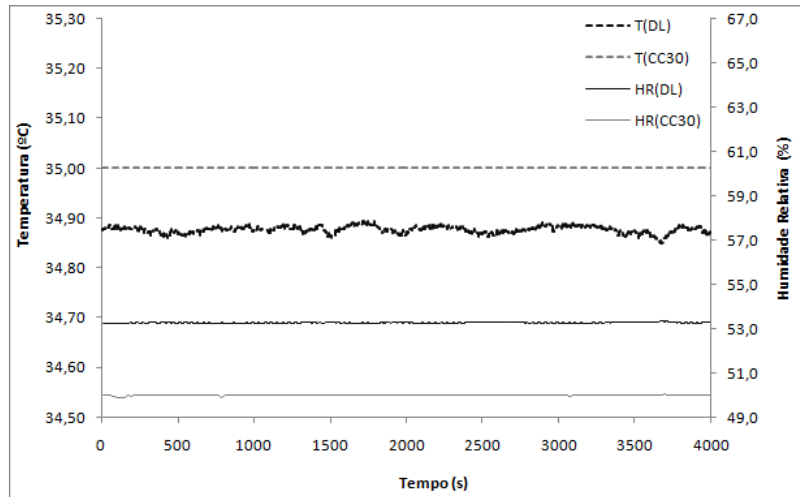


Figura A.3 - Representação dos valores de T e HR obtidos pela CC30 e pelo DL no período de estabilização correspondente a 35°C e 50% HR.

## A.2 Resultados do Ensaio 2

Com o intuito de avaliar a resposta dos sensores a alterações de umidade realizou-se um segundo ensaio, no qual se introduziram diferentes valores de umidade relativa (30, 50 e 80%), mantendo constante a temperatura (20°C) e a velocidade do ar (50%).

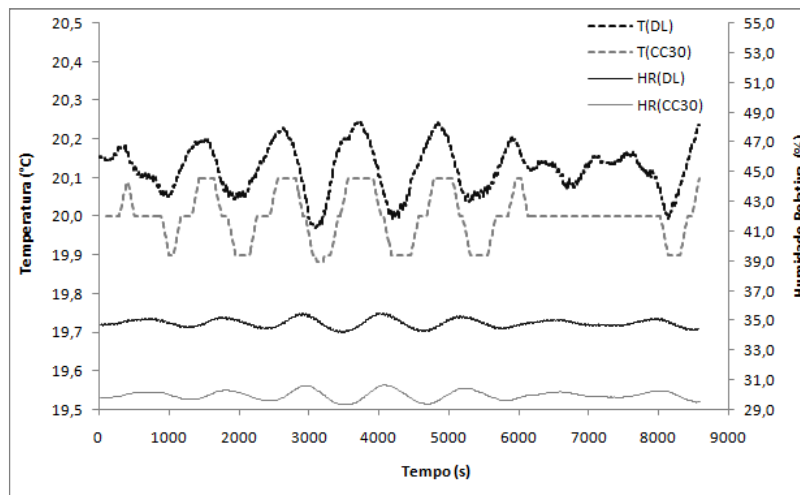


Figura A.4 - Representação dos valores de T e HR obtidos pela CC30 e pelo DL no período de estabilização correspondente a 20°C e 30% HR.

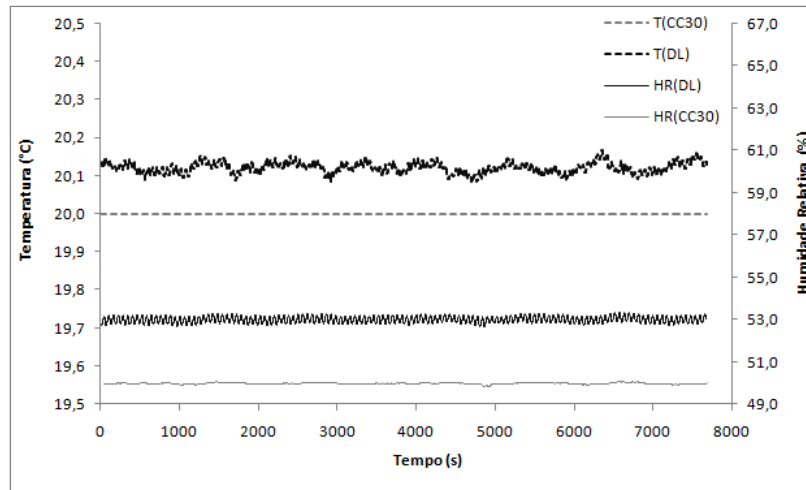


Figura A.5 - Representação dos valores de T e HR obtidos pela CC30 e pelo DL no período de estabilização correspondente a 20°C e 50% HR.

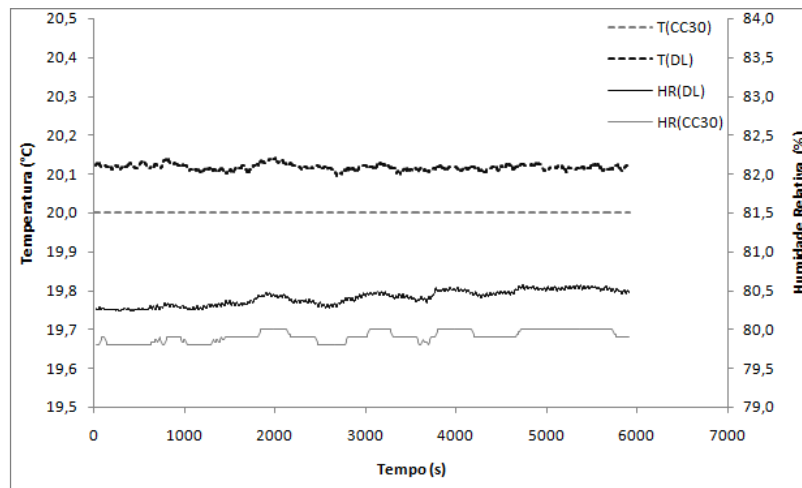


Figura A.6 - Representação dos valores de T e HR obtidos pela CC30 e pelo DL no período de estabilização correspondente a 20°C e 80% HR.

### A.3 Resultados do Ensaio 3

De acordo com a Tabela 3.1, neste ensaio colocaram-se em simultâneo os sensores do DL, do TF e do ML, introduzindo as mesmas condições usadas no ensaio 1. Os valores registados por cada sensor encontram-se representados nas seguintes figuras:

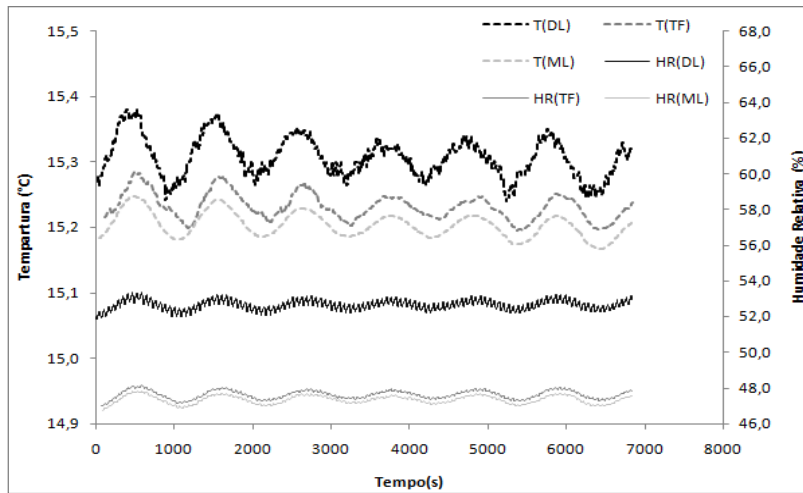


Figura A.7 - Representação dos valores de temperatura obtidos pelo DL, pelo TF e pelo ML na zona de estabilização para 15°C e 50% HR.

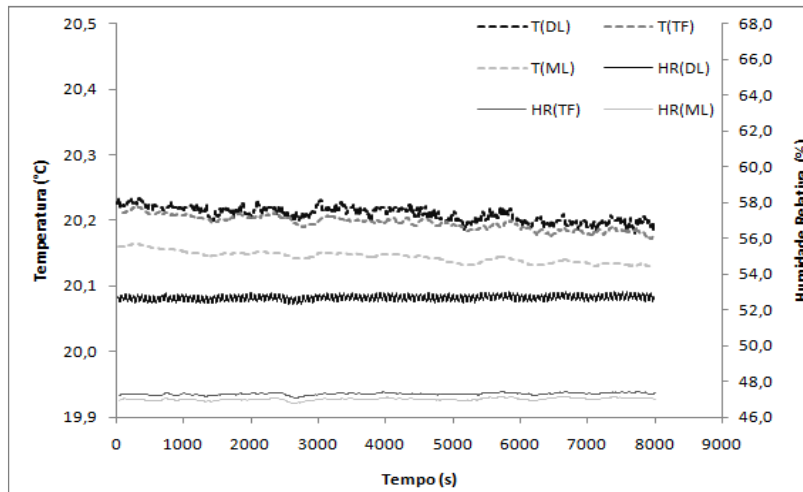


Figura A.8 - Representação dos valores de temperatura obtidos pelo DL, pelo TF e pelo ML na zona de estabilização para 20°C e 50% HR.

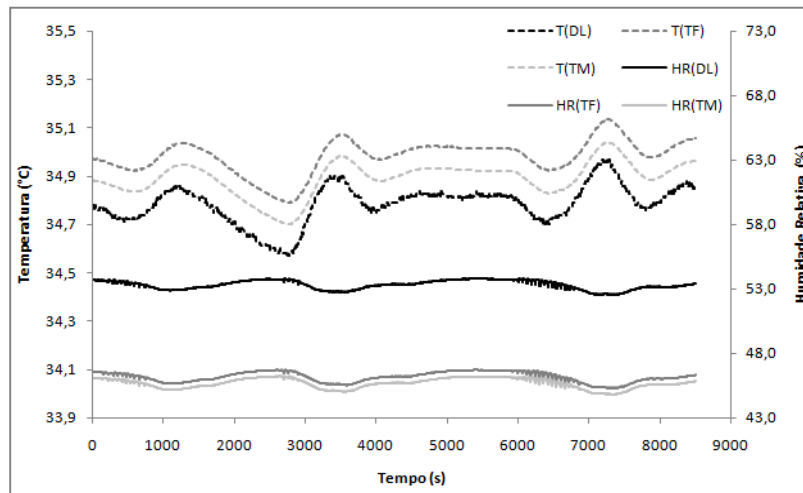


Figura A.9 - Representação dos valores de temperatura obtidos pelo DL, pelo TF e pelo ML na zona de estabilização para 35°C e 50% HR.

## A.4 Resultados do Ensaio 4

Neste último ensaio efectuaram-se as variações na humidade (30,50 e 80%) mantendo a temperatura a 20°C e 50% o valor referente à ventilação de ar.

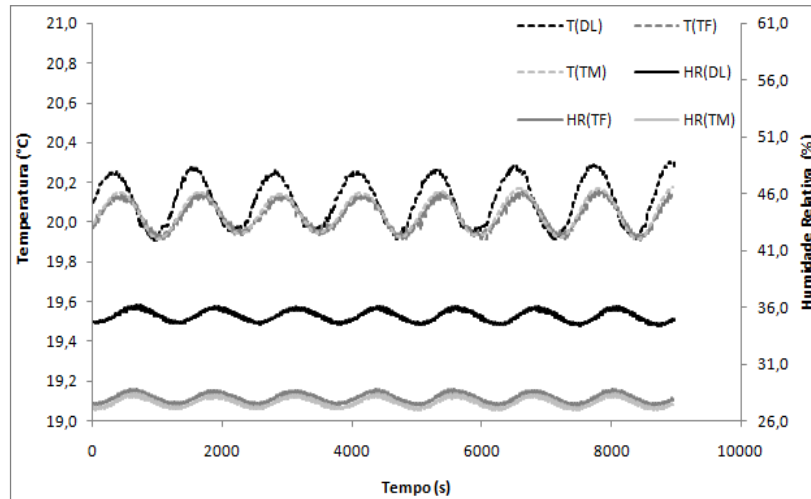


Figura A.10 - Representação dos valores de temperatura obtidos pelo DL, pelo TF e pelo ML na zona de estabilização para 20°C e 30% HR.

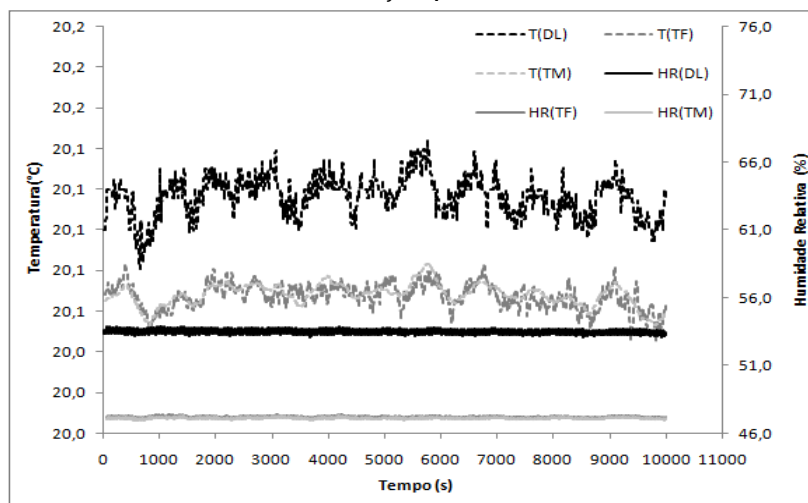


Figura A.11 - Representação dos valores de temperatura obtidos pelo DL, pelo TF e pelo ML na zona de estabilização para 20°C e 50% HR.

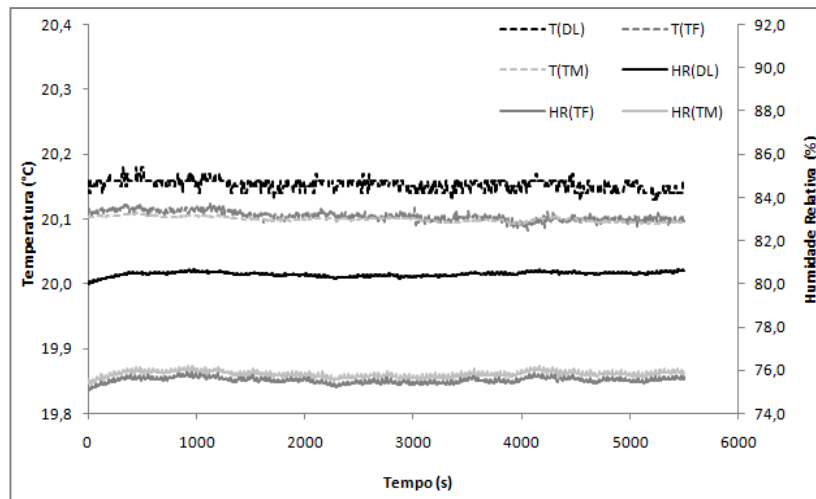


Figura A.12 - Representação dos valores de temperatura obtidos pelo DL, pelo TF e pelo ML na zona de estabilização para 20°C e 80% HR.

## Anexo B Comparação entre os diversos sensores utilizados durante a calibração

Nesta secção serão avaliadas as diferenças existentes entre os diversos sensores de cada equipamento usado.

O TF e o TM possuem dois sensores responsáveis pela medição da temperatura, contudo a Tabela 3.3 e a Tabela 3.4 foram feitas tendo por base o primeiro sensor de cada equipamento. É portanto conveniente verificar se tal análise não introduz um elevado erro devido ao facto de não serem contabilizados os valores registados pelo segundo sensor. A tabela seguinte compila os dados obtidos.

*Tabela B.1 - Comparação entre os dois sensores do TF e do TM*

Condições	Equipamento	$\Delta T=T1-T2$ (°C)	$\Delta T=T1_{TF}-T1_{TM}$ (°C)	$\Delta T=T2_{TF}-T2_{TM}$ (°C)
15°C	TF	0,100	0,029	-0,014
	TM	0,057		
20°C	TF	0,098	0,052	0,011
	TM	0,056		
35°C	TF	0,071	0,092	0,085
	TM	0,064		
30% HR	TF	0,018	-0,005	0,011
	TM	0,033		
50% HR	TF	0,022	-0,001	0,011
	TM	0,034		
80% HR	TF	0,023	0,005	0,018
	TM	0,035		

Pela análise da Tabela B.1 verifica-se que a diferença entre os valores registados por cada sensor não é muito grande (o desvio máximo é de 0,1°C). Quando se compara a diferença existente entre os respectivos sensores de cada equipamento, ou seja, o primeiro do TF com o primeiro do TM e o mesmo para os segundos, o valor obtido é também reduzido. Pode-se concluir então, que a análise efectuada com base em apenas um sensor não introduz um erro significativo.

Com o intuito de analisar as diferenças existentes entre os vários sensores do DL, nos ensaios 3 e 4 usaram-se todos os seus sensores (cinco sensores de humidade/temperatura e nove sensores de temperatura), colocando-os todos juntos, permitindo deste modo, obter essas diferenças. Assim, nas Tabelas B.2 e B.3 observamos os desvios de cada sensor em

relação à temperatura e humidade relativa, respectivamente, tendo como referência o primeiro sensor.

*Tabela B.2 - Variações nas temperaturas entre o sensor T1 e os restantes sensores do DL*

Condição	15°C	20°C	35°C	30% HR	50% HR	80% HR
Sensor	$\Delta T=T-T1$	$\Delta T=T-T1$	$\Delta T=T-T1$	$\Delta T=T-T1$	$\Delta T=T-T1$	$\Delta T=T-T1$
T2	-0,171	-0,112	-0,075	-0,065	-0,064	-0,061
T3	-0,183	-0,135	-0,057	-0,082	-0,080	-0,074
T4	-0,032	-0,010	0,031	0,022	0,034	0,033
T5	-0,182	-0,144	-0,155	-0,088	-0,086	-0,070
T55	-0,208	-0,262	-0,309	-0,239	-0,246	-0,224
T56	-0,222	-0,209	-0,080	-0,155	-0,148	-0,152
T57	-0,279	-0,311	-0,286	-0,241	-0,246	-0,227
T92	0,153	0,162	0,317	0,236	0,250	0,234
T93	-0,019	-0,006	0,148	0,069	0,063	0,096
T94	0,204	0,194	0,269	0,216	0,225	0,218
T95	0,041	0,052	0,223	0,108	0,125	0,098
T96	0,019	0,046	0,236	0,110	0,131	0,128
T97	0,160	0,163	0,232	0,185	0,192	0,171

A Tabela B.2 permite distinguir os desvios à temperatura entre um sensor de temperatura (“T1”) do DL e os restantes sensores com capacidade para registar tal propriedade. Constatase que as maiores diferenças estão entre os nove sensores de temperatura, mais propriamente entre o T55, T57, T92 e T94.

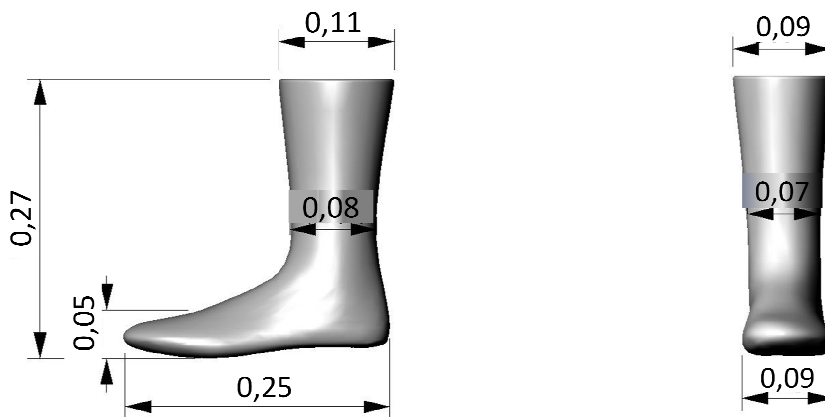
Com base na Tabela B.3, verifica-se que no que diz respeito à humidade relativa, o maior desvio existe entre o segundo sensor de humidade (HR2) e o primeiro (HR1), analisando o seu comportamento em todas as condições estabelecidas.

*Tabela B.3- Variações de HR entre HR1 e os restantes sensores do DL*

Condição	15°C	20°C	35°C	30% HR	50% HR	80% HR
Sensor	$\Delta HR=HR-HR1$	$\Delta HR=HR-HR1$	$\Delta HR=HR-HR1$	$\Delta HR=HR-HR1$	$\Delta HR=HR-HR1$	$\Delta HR=HR-HR1$
HR2	-0,16	-0,18	-0,25	-0,31	-0,31	-0,30
HR3	0,02	0,01	-0,07	-0,20	-0,21	-0,25
HR4	0,24	0,26	0,36	0,01	-0,04	-0,13
HR5	0,12	0,13	0,17	-0,10	-0,22	-0,42

## Anexo C Cálculos efectuados para a determinação das áreas superficiais do TF

O cálculo da área superficial do pé térmico foi efectuado recorrendo a aproximações geométricas. Para o seu cálculo utilizaram-se dois cilindros (cilindro 1 e cilindro 2) e um tronco de cone. A determinação da área do tronco de cone considerou um cone cujo vértice ficava cerca de 0,1m à frente do pé (cone 1) ao qual foi retirado o excesso de área pela subtracção de um cone compreendido nessa região (cone 2). As dimensões do TF utilizadas encontram-se representadas na *Figura C.1*.



*Figura C.1 - Dimensões em metros do TF representadas em vista lateral (à esquerda) e frontal (à direita)*

Como se pode ver pelas imagens representadas na figura anterior, o pé não apresenta a mesma largura, ou seja, a parte superior (perna) apresenta-se como uma forma de tronco de cone oval. Contudo, aproximou-se essa forma a um tronco de cone cilíndrico, e posteriormente a um cilindro cujas bases resultam da média das duas dimensões.

Para o cálculo da área do cilindro 1:

$$d_{Superior} = \frac{0,11+0,09}{2}; \quad d_{Inferior} = \frac{0,08+0,07}{2}; \quad \bar{d}_{cilindro1} = \frac{d_{Superior} + d_{Inferior}}{2} \quad (C.1)$$

$$h = 0,27 - 2 \times 0,05 \quad (C.2)$$

$$A_{cilindro1} = 2 \times \pi \times h \times (\bar{d}/2) \quad (C.3)$$

Para o cálculo da área do cilindro 2:

$$d_{Superior} = \frac{0,08+0,09}{2}; \quad d_{Inferior} = \frac{0,11+0,09}{2}; \quad \bar{d}_{cilindro\ 2} = \frac{d_{Superior} + d_{Inferior}}{2} \quad (C.4)$$

$$h = 2 \times 0,05 \quad (C.5)$$

$$A_{lateral} = 2 \times \pi \times h \times (\bar{d}/2); \quad A_{base} = \pi \times (\bar{d}/2) \quad (C.6)$$

$$A_{cilindro\ 2} = A_{lateral} + A_{base} \quad (C.7)$$

Para o cálculo da área do tronco de cone:

- para o cone 1:

$$h = 0,25 - \bar{d}_{cilindro\ 2} + \underline{0,1} \quad (C.8)$$

$$r = \frac{0,09}{2} \quad (C.9)$$

$$g = \sqrt{r^2 + h^2} \quad (C.10)$$

$$A_{cone\ 1} = \pi \times r \times g \quad (C.11)$$

- para o cone 2 (os algarismos sublinhados representam os valores extrapolados para o acréscimo efectuado no pé):

$$h = \underline{0,1}; \quad r = \underline{0,02} \quad (C.12)$$

$$g = \sqrt{r^2 + h^2} \quad (C.13)$$

$$A_{cone\ 2} = \pi \times r \times g \quad (C.14)$$

$$A_{cone\ total} = A_{cone\ 1} - A_{cone\ 2} \quad (C.15)$$

A área total do pé térmico é então obtida pela seguinte expressão:

$$A = A_{cilindro\ 1} + A_{cilindro\ 2} + A_{cone\ total} \quad (C.16)$$

Na tabela seguinte encontram-se os valores das áreas superficiais de cada zona do pé térmico determinados pelos seus fabricantes.

Tabela C.1 - *Áreas superficiais de cada zona térmica cedidas pelos fabricantes do TF*

Zonas do TF	Áreas (m <sup>2</sup> )
1	0,018
2	0,019
3	0,012
4	0,013
5	0,012
6	0,004
7	0,003
8	0,016
9	0,004

## Anexo D Fundamentos para a determinação do caudal de suor

A determinação do caudal de água a colocar através do sistema de simulação de suor do pé térmico é feita com base em princípios termodinâmicos. Expressa-se a Equação 3.12 em função do fluxo de calor

$$\frac{H_e}{A} = \frac{(P_s - P_a)}{R_{et}} \quad (\text{D.1})$$

Assumindo que toda a energia fornecida ao sistema é utilizada para a passagem da água do estado líquido ao estado de vapor, o fluxo de calor é calculado através de

$$\frac{H_e}{A} = Q \frac{\lambda}{3600} \quad (\text{D.2})$$

onde,  $Q$  representa o caudal de água ( $\text{g}\cdot\text{m}^2\cdot\text{h}^{-1}$ ) e  $\lambda$  o calor latente necessário para ocorrer evaporação ( $\text{J}\cdot\text{g}^{-1}$ ). Tal consideração é feita porque na realização dos ensaios trabalhou-se em condições isotérmicas. Assim, substituindo na Equação D.1

$$Q = \frac{(P_s - P_a) \times \lambda}{R_{et} \times 3600} \quad (\text{D.3})$$

obtem-se a expressão que relaciona o caudal de água que é necessário fornecer com a resistência evaporativa, permitindo a leitura no gráfico representado na Figura D.1. Contudo, como as pressões de saturação e o calor latente dependem da temperatura e da humidade relativa (Equação D.4 a D.6), o seu cálculo depende das condições de operação utilizadas.

$$P_s = 0,133322 \times 10 \times \exp\left(A - \frac{B}{C + T}\right) \quad (\text{D.4})$$

$$P_a = HR \times 0,133322 \times 10 \times \exp\left(A - \frac{B}{C + T}\right) \quad (\text{D.5})$$

$$\lambda = 2501,8 - 2,374 \times \bar{T}_{sk} \quad (\text{D.6})$$

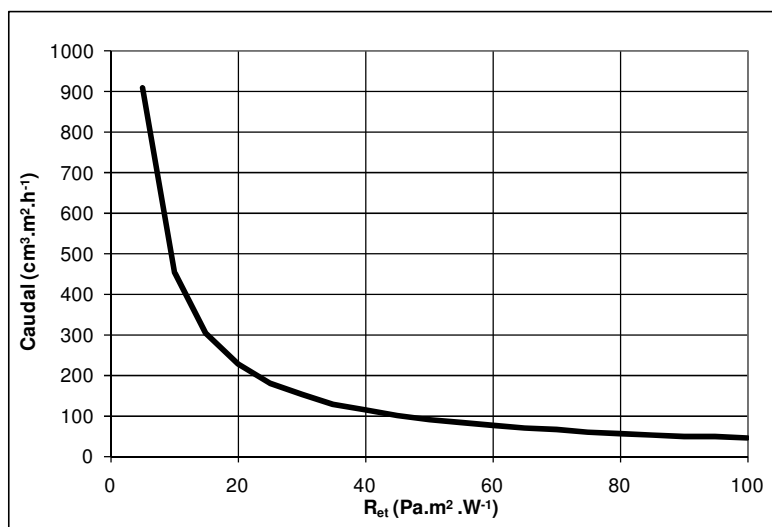


Figura D.1 - Representação da resistência evaporativa em função do caudal de água introduzido (cedida pelos fabricantes do pé térmico)

## Anexo E Procedimento experimental para a determinação da resistência térmica

### ➤ Material utilizado:

Pé térmico; câmara climática; anemómetro; material a analisar (meias).

O pé térmico serve de suporte para o material a estudar, como também através das suas características permite determinar o valor da resistência à passagem de calor. Por possuir sensores de temperatura e humidade, permite monitorizar as condições ambientais no interior da CC30. Com o auxílio do anemómetro consegue-se monitorizar as variações da velocidade do ar e a câmara climática é fundamental para manter as condições ambientais necessárias para a realização do teste.

### ➤ Condições operatórias:

$$T_0 = 20^\circ C ; \bar{T}_{sk} = 34^\circ C ; HR = 50\% \text{ e } v_{ar} = 0,4m/s$$

### ➤ Passos a desenvolver:

As amostras devem ficar a condicionar durante um período de 12 horas, a uma temperatura de 20°C, 50% de humidade relativa e com velocidade do ar a 0,4m/s;

Realizar o ensaio de controlo, ou seja, adquirir os dados apenas com o TF despido;

Colocar uma meia, seguindo-se um período de estabilização das condições ambientais (aproximadamente uma hora); a aquisição dos dados em estado estacionário deve ser feita pelo menos durante trinta minutos;

Colocar a meia sempre do mesmo modo, para evitar erros oriundos de camadas de ar resultantes da má colocação da meia;

Para a análise do número de camadas colocar no TF as duas meias do mesmo par, tendo o cuidado de colocar em primeiro lugar sempre a mesma meia;

A reprodutibilidade dos ensaios é considerada válida quando a diferença entre os valores não ultrapassa os quatro por cento, sendo necessário, neste caso, apenas a realização dos ensaios em duplicado (ISO 15831, 2004).

### ➤ Apresentação de resultados:

Quanto aos resultados, estes devem explicitar de forma clara e concisa as principais conclusões.

## Anexo F Procedimento experimental para a determinação da resistência evaporativa

➤ Material utilizado:

Pé térmico; câmara climática; anemómetro; material a analisar (meias).

➤ Condições operatórias:

$$T_0 = 34^\circ C; \bar{T}_{sk} = 34^\circ C; HR = 50\% \text{ e } v_{ar} = 0,4m/s$$

➤ Passos a desenvolver:

As amostras devem ficar a condicionar durante um período de 12 horas, a uma temperatura de 34°C, 50% de humidade relativa e com velocidade do ar a 0,4m/s;

Colocar a pele difusora no pé térmico, ligar o sistema de simulação de suor, introduzir os valores da distribuição de caudal desejada, borrifar a pele difusora com água e colocar uma das meias em estudo (a escolha do caudal de água a utilizar deve ser feita com cuidado para evitar excessos de água à superfície da meia, garantindo que a evaporação ocorre apenas na interface pele difusora/meia);

Realizar os ensaios consecutivamente, colocando uma nova meia no pé térmico logo após a aquisição dos dados em estado estacionário da meia anterior (pelo menos durante trinta minutos);

➤ Apresentação de resultados:

Quanto aos resultados, estes devem explicitar de forma clara e concisa as principais conclusões.

## Anexo G Períodos de Estabilização

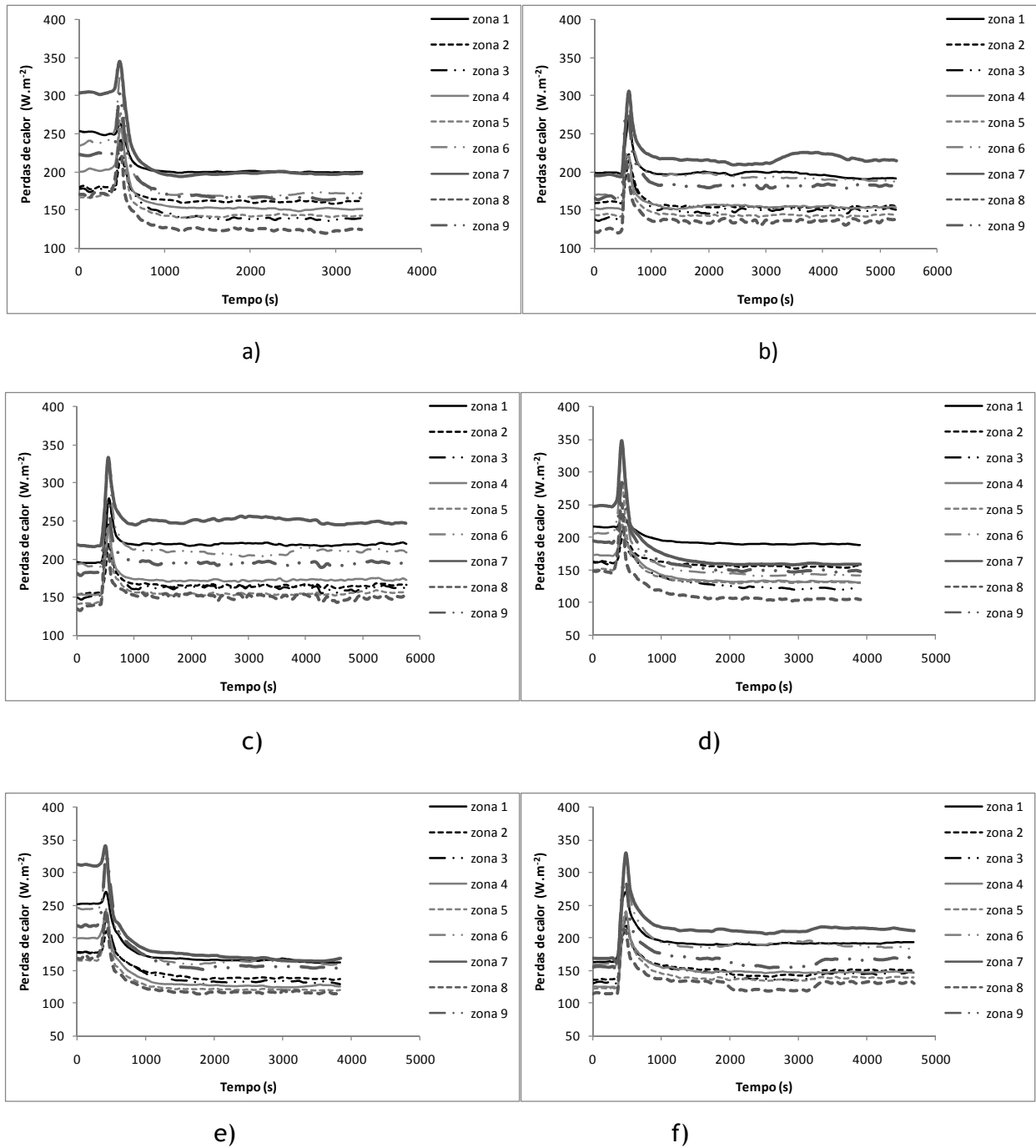


Figura G.1 - Representação das perdas de calor ao longo dos períodos de estabilização para a) meia mista, b) meia de lã, c) meia de algodão, d) par meia mista, e) par meia de lã e f) par meia de algodão nas medições de  $R_t$ .