



FCTUC FACULDADE DE CIÊNCIAS  
E TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE DE COIMBRA

DEPARTAMENTO DE  
ENGENHARIA MECÂNICA

# **Técnicas de Arrefecimento do Corpo Humano**

## **Validação de um Modelo Termofisiológico**

Dissertação apresentada para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia do Ambiente na Especialidade de Tecnologia e Gestão do Ambiente

**Autor**

**Teresa Mafalda Lima Anjo**

**Orientador**

**Professor Doutor António Manuel Mendes Raimundo**

**Júri**

**Presidente** Professor Doutor Divo Augusto Alegria Quintela  
Professor Auxiliar da Universidade de Coimbra

**Vogais** Professor Doutor Avelino Virgílio F. Monteiro de Oliveira  
Professor no Instituto Superior de Engenharia, Instituto  
Politécnico de Coimbra

Professor Doutor António Manuel Mendes Raimundo  
Professor Auxiliar da Universidade de Coimbra

---

**Coimbra, Fevereiro, 2015**



“Os trabalhos escolares são provas para o carácter, não para a inteligência. Quer se trate de ortografia, de poesia ou de cálculo, está sempre em causa aprender a querer”.

Alain, em *Les Idées et les Âges*, 1927.

Aos meus pais.



## **Agradecimentos**

O trabalho que aqui se apresenta só foi possível graças à colaboração e apoio de algumas pessoas, às quais não posso deixar de prestar o meu reconhecimento.

Em primeiro lugar, agradeço ao meu orientador Professor Doutor António Manuel Mendes Raimundo (DEM-FCTUC), pela excelente e cuidada orientação. Também pela sua dedicação, conhecimento transmitido, disponibilidade constante, incentivo e boa disposição concedidos durante a realização desta dissertação, o meu sincero agradecimento.

Ao Professor Doutor Divo Quintela, pela sugestão do tema e pela disponibilidade para prestar todos os esclarecimentos necessários.

Aos meus Pais e irmãs, que sempre contribuíram para a concretização dos meus objetivos, o muito obrigado pelo apoio incondicional e confiança depositada.

A todos os meus amigos e colegas pelo apoio, companheirismo, amizade e todos os momentos bem passados ao longo da minha vida Académica.



## Resumo

Existem várias atividades que expõem o corpo humano a níveis de exposição ao calor muito elevados (indústria, militares, desportistas, bombeiros, etc.). Esta exposição pode levar a aumentos da temperatura profunda do corpo para valores superiores a 39°C, o que pode ter consequências graves, ou mesmo fatais, que importa prevenir e controlar. A experiência mostra que é necessário recorrer a métodos eficientes que arrefeçam o corpo humano de modo eficaz e em tempo útil, atenuando assim os efeitos nefastos relacionados com temperaturas corporais acima de determinados limites.

A fim de estabelecer linhas de orientação para critérios de segurança, é importante ter conhecimento da reação termofisiológica do corpo humano perante condições ambientais extremas, nomeadamente sob o ponto de vista térmico. De entre as várias metodologias disponíveis para o efeito, o recurso a programas de simulação do comportamento termofisiológico do corpo humano afigura-se como a mais adequada. Este tipo de abordagem revela-se assim de particular importância quer para a otimização da eficiência na execução deste tipo de atividades quer para a mitigação do risco de colapso.

O presente trabalho é dedicado a testar a aplicabilidade e validar um *software* de simulação do comportamento termofisiológico do corpo humano, o programa *HuTheReg* (*Human Thermal Regulation*), focando-se numa das atividades em que o corpo humano é submetido a níveis de exposição ao calor muito elevados, o combate a incêndios de alta intensidade. A principal ênfase será dada à identificação e análise da eficácia de técnicas de arrefecimento corporal capazes de atenuar o risco de stresse térmico por hipertermia. São consideradas situações envolvendo diferentes níveis de intensidade de atividade, tempos de exposição, tipo de vestuário e técnicas alternativas de recuperação da temperatura corporal.

A validação é efetuada por comparação das previsões do programa com resultados experimentais existentes na bibliografia científica. Como ferramentas auxiliares na avaliação do nível de conformidade entre os resultados experimentais retirados da bibliografia e os previstos pelo *software* utilizaram-se as funções estatísticas média aritmética das diferenças relativas (e respetivo desvio padrão), desvio quadrático médio e o

coeficiente de correlação de Pearson. Adicionalmente foi ainda efetuada uma avaliação com recurso a gráficos. Em termos de validação obtiveram-se quase sempre bons e muito bons resultados. Mesmo quando foram detetadas diferenças não é garantido que a falha se deve à falta de capacidade de previsão do programa *HuTheReg*. Isto porque não foi encontrado nenhum artigo científico em que a informação necessária à validação fosse completa, tendo sido necessário arbitrar os dados em falta a partir da informação disponível.

Dentro da gama de situações analisadas não foram encontradas limitações à aplicabilidade do *software* a situações de elevada exposição ao calor. Demonstra-se assim a sua utilidade e a sua aplicabilidade na previsão do comportamento termofisiológico de bombeiros em situação de combate a incêndios.

**Palavras-chave:** Stresse Térmico, Modelo Termofisiológico, Técnicas de Arrefecimento Corporal, Validação do Modelo.

## Abstract

There are several activities that expose the human body to very high levels of heat (industry, military, athletes, firefighters, etc.). This exposure may lead to increases in deep body temperature to values greater than 39°C, this may have serious consequences, or even fatal, that is important prevent and control. Experience shows that it is necessary to use efficient methods to cool the human body effectively and on time, thereby mitigating the adverse effects related to body temperatures above certain limits.

In order to establish the guidelines for safety criteria, it is important to have knowledge of the physiological response of the human body before such extreme environmental conditions, especially under the thermal point of view. Among the various methods available for this purpose, the use of simulation programs of the thermophysiological behavior of the human body appears to be the most appropriate. This approach thus appears of particular importance both for the optimization of efficiency in the execution of such activities or to mitigate the risk of collapse

The proposed study is dedicated to test the applicability and validate a *software* that simulates of the human body thermophysiological response, the *HuTheReg* program, (*Human Thermal Regulation*), focusing on one of the activities in which the human body is subjected to levels of exposure to very high heat, fighting wildfires.

The main emphasis will be given to the identification and analysis of the effectiveness of the cooling techniques able to mitigate the risk of heat stress by hyperthermia of the body. Are considered situations involving different activity levels of intensity, exposure time, type of clothing and alternative techniques for recovery of body temperature.

The validation of the *software* is performed by comparing the program projections with experimental results in the scientific literature. As auxiliary tools, in assessing the level of compliance between the experimental results taken from the literature and those provided by the software, were used statistical functions, as the arithmetic mean of the relative differences (and its standard deviation), the root-mean-square deviation and the Pearson's correlation coefficient. Additionally it was also performed an evaluation using

graphics. In terms of validation it was obtained always good and very good results. Even when differences were detected is not guaranteed that the failure is due to lack of *HuTheReg* program predictability. This because in no scientific article was found all the necessary information for the validation, it was necessary to arbitrate the missing data from the available information.

Within the range of situations analyzed were not found limitations on the applicability of software to situations of high exposure to heat. Is therefore demonstrated its usefulness and applicability in thermophysiological behavior prediction of firefighters in fire-fighting situation.

**Keywords:** Heat Stress, Thermophysiological Model, Body Cooling Techniques, Model Validation.

## Índice

Índice de Figuras .....	xi
Índice de Tabelas .....	xiii
Simbologia e Siglas .....	xv
Simbologia.....	xv
Siglas .....	xviii
1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1. Estrutura.....	1
1.2. Enquadramento .....	2
1.3. Revisão Bibliográfica .....	3
1.3.1. Stresse térmico.....	3
1.3.2. Técnicas de arrefecimento e estratégias de recuperação .....	5
1.4. Objetivos.....	10
2. O PROGRAMA <i>HuTheReg</i> .....	11
2.1. Descrição Geral.....	11
2.2. Algoritmo de Cálculo.....	12
2.3. Componente Passiva do Modelo Termofisiológico.....	14
2.4. Trocas de Calor entre o Corpo Humano e o Exterior .....	15
2.4.1. Trocas de calor sensível pela superfície da pele.....	16
2.4.2. Trocas de calor latente pela superfície da pele .....	18
2.5. Componente Ativa do Modelo Termofisiológico.....	18
2.6. Incremento de Tempo e Convergência .....	20
3. MATERIAL E MÉTODOS.....	21
3.1. Causas de Stresse Térmico no Combate a Incêndios.....	21
3.1.1. Fatores internos .....	21
3.1.2. Fatores externos.....	22
3.2. Estratégias de Arrefecimento Testadas .....	23
3.3. Casos em Análise – Descrição e Protocolos.....	24
3.4. Validação Estatística do Modelo .....	37
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	41
4.1. Arrefecimento Apenas Durante a Fase de Recuperação.....	42
4.1.1. Arrefecimento passivo – AP.....	42
4.1.2. Arrefecimento por imersão das mãos e antebraços em água fria – AAF .....	47
4.1.3. Arrefecimento corporal vestindo coletes de gelo – ACG.....	52
4.1.4. Arrefecimento corporal recorrendo a ventiladores – ApV .....	54
4.1.5. Comparação estatística e discussão .....	56
4.2. Arrefecimento Durante as Fases de Combate e de Recuperação – ACGfCR.....	59
4.3. Conclusões Prévias .....	60
5. CONCLUSÕES .....	63
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	65



## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 - Técnica de arrefecimento corporal por convecção forçada de ar aplicada num bombeiro (adaptado de McLellan <i>et al.</i> , 2005). .....	8
Figura 1.2 - Técnica de arrefecimento corporal por imersão das mãos e antebraços em água (adaptado de McLellan <i>et al.</i> , 2005).....	9
Figura 1.3 - Exemplos de coletes de arrefecimento (adaptado de Judge, 2003). .....	10
Figura 2.1 - Descrição dos segmentos do corpo humano (adaptado de Abreu, 2013). .....	14
Figura 4.1 - Valores medidos (pontos) e previstos (linhas) obtidos para as temperaturas $T_p$ e $T_{sk}$ no caso 1, em que a recuperação é efetuada com recurso ao arrefecimento passivo. ....	42
Figura 4.2 - Valores medidos (pontos) e previstos (linhas) obtidos para as temperaturas $T_{re}$ e $T_{sk}$ no caso 2, em que a recuperação é efetuada com recurso ao arrefecimento passivo. ....	43
Figura 4.3 - Valores medidos (pontos) e previstos (linhas) obtidos para a temperatura timpânica ( $T_{tym}$ ) e calor perdido ( $Q_{lost}$ ) no caso 3, em que a recuperação é efetuada com recurso ao arrefecimento passivo. ....	43
Figura 4.4 - Valores medidos (pontos) e previstos (linhas) obtidos para as temperaturas $T_p$ e $T_{sk}$ no caso 4, em que a recuperação é efetuada com recurso ao arrefecimento passivo. ....	44
Figura 4.5 - Valores medidos (pontos) e previstos (linhas) obtidos para a $T_p$ no caso 5, em que a recuperação é efetuada com recurso ao arrefecimento passivo. ....	44
Figura 4.6 - Valores medidos (pontos) e previstos (linhas) obtidos para a $T_p$ no caso 6, em que a recuperação é efetuada com recurso ao arrefecimento passivo. ....	45
Figura 4.7 - Valores medidos (pontos) e previstos (linhas) obtidos para as temperaturas $T_{re}$ e $T_{tym}$ no caso 7, em que a recuperação é efetuada com recurso ao arrefecimento passivo. ....	45
Figura 4.8 - Valores medidos (pontos) e previstos (linhas) obtidos para a temperatura da pele do peito, braços e coxas no caso 7, em que a recuperação é efetuada com recurso ao arrefecimento passivo. ....	46
Figura 4.9 - Valores medidos (pontos) e previstos (linhas) obtidos para as temperaturas $T_{re}$ e $T_{sk}$ no caso 8, em que a recuperação é efetuada com recurso ao arrefecimento passivo. ....	46
Figura 4.10 - Valores medidos (pontos) e previstos (linhas) obtidos para as temperaturas $T_{re}$ e $T_{sk}$ no caso 2, em que o arrefecimento é efetuado por imersão das mãos e dos antebraços em água a 17,4°C. ....	48
Figura 4.11 - Valores medidos (pontos) e previstos (linhas) obtidos para a temperatura timpânica ( $T_{tym}$ ) e calor perdido ( $Q_{lost}$ ) no caso 3, em que o arrefecimento é	

efetuado por imersão das mãos (a) e imersão das mãos e dos antebraços (b), em água a 20°C. ....	49
Figura 4.12 - Valores medidos (pontos) e previstos (linhas) obtidos para a temperatura timpânica ( $T_{tym}$ ) e calor perdido ( $Q_{lost}$ ) no caso 3, em que o arrefecimento é efetuado por imersão das mãos (a) e imersão das mãos e dos antebraços (b), em água a 10°C. ....	50
Figura 4.13 - Valores medidos (pontos) e previstos (linhas) obtidos para a $T_p$ no caso 5, em que o arrefecimento é efetuado por imersão dos antebraços em água a 20,9°C...	51
Figura 4.14 - Valores medidos (pontos) e previstos (linhas) obtidos para a $T_p$ no caso 6, em que o arrefecimento é efetuado por imersão das mãos e dos antebraços em água a 14,3°C. ....	51
Figura 4.15 - Valores medidos (pontos) e previstos (linhas) obtidos para as temperaturas $T_p$ e $T_{sk}$ no caso 4, em que a fase de recuperação consistiu na aplicação de duas técnicas de arrefecimento em simultâneo: ACG e AAF a uma temperatura ~19°C. ....	52
Figura 4.16 - Valores medidos (pontos) e previstos (linhas) obtidos para a $T_p$ no caso 5, em que na fase de recuperação os indivíduos vestiam coletes de gelo como técnica de arrefecimento corporal. ....	53
Figura 4.17 - Valores medidos (pontos) e previstos (linhas) obtidos para $T_p$ no caso 6, em que a técnica de arrefecimento corporal aplicada aos indivíduos durante a fase de recuperação consistiu na utilização de coletes de gelo. ....	53
Figura 4.18 - Valores medidos (pontos) e previstos (linhas) obtidos para a $T_p$ no caso 6, em que a recuperação é efetuada com recurso a ventiladores. ....	54
Figura 4.19 - Valores medidos (pontos) e previstos (linhas) obtidos para as temperaturas $T_{re}$ e $T_{tym}$ no caso 7, em que a recuperação é efetuada com recurso a ventiladores. ....	55
Figura 4.20 - Valores medidos (pontos) e previstos (linhas) obtidos para a temperatura da pele: do peito, braços e coxas no caso 7, em que a recuperação é efetuada com recurso a ventiladores.....	55
Figura 4.21 - Valores medidos (pontos) e previstos (linhas) obtidos para as temperaturas $T_{re}$ e $T_{sk}$ no caso 8, em que o arrefecimento corporal (uso de coletes de gelo) foi aplicado durante as fases de exercício e de recuperação.....	59

## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 3.1 – Tabela resumo dos casos em análise .....	37
Tabela 4.1 – Análise comparativa dos resultados obtidos em termos de temperaturas.....	57
Tabela 4.2 - Análise comparativa dos resultados obtidos em termos de calor total perdido ( $Q_{lost}$ ) para as diferentes situações analisadas no caso 3 (AP e AAF com água a 10 e 20°C).....	58
Tabela 4.3 – Análise comparativa dos resultados obtidos para a $T_{re}$ e $T_{sk}$ , no caso apresentado – Arrefecimento corporal com coletes de gelo durante as fases de combate e recuperação. ....	59



## SIMBOLOGIA E SIGLAS

### Simbologia

Símbolo	Significado	Unidades
$A_{sk}(i)$	Área da pele do segmento $i$ do corpo humano	[m <sup>2</sup> ]
$B_i$	Troca de calor entre todas as camadas locais e o compartimento sanguíneo central	[W]
$B_f$	Porcentagem de gordura corporal	[%]
$Cond1_i$	Perda de calor por condução para o vestuário	[W]
$Cond2_i$	Perda de calor por condução por contato direto com superfícies externas	[W]
$Conv_i$	Transferência de calor por convecção	[W]
$cp_b$	Calor específico do sangue	[J/hg.°C]
$cp_{clo}$	Calor específico do vestuário	[J/hg.°C]
$cp_i$	Calor específico do corpo humano	[J/hg.°C]
$DQM$	Desvio quadrático médio das diferenças relativas	-
$E_{sk}$	Perda de calor por evaporação do suor na pele	[W/m <sup>2</sup> ]
$F_{correção}$	Fator de correção do isolamento do vestuário devida ao movimento do corpo	-
$F_{cl}(i)$	Fator de correção da área do vestuário	-
$F_{pcl}$	Fator de permeabilidade ao vapor do vestuário	-
$h$	Altura dos indivíduos	[m]
$h_{conv}$	Coefficiente de transferência de calor por convecção	[W/m <sup>2</sup> .°C]
$h_{rad}$	Coefficiente de transferência de calor por radiação	[W/m <sup>2</sup> .°C]
$HR$	Humidade relativa	[%]
$I_a$	Resistência térmica entre a superfície exterior do vestuário e o ar ambiente	[clo]
$I_{cl}$	Resistência térmica intrínseca do vestuário (não inclui o $I_a$ )	[clo]

---

$I_{clo, corrigido}$	Resistência térmica corrigida do vestuário	[clo]
$I_{cl, global}$	Valor global da resistência térmica intrínseca do vestuário	[clo]
$M$	Intensidade da atividade realizada pelo indivíduo	[met]
$M_t$	Taxa metabólica de geração de calor	[W/m <sup>2</sup> ]
$m_b$	Massa de sangue	[kg]
$m_{clo}$	Massa do vestuário	[kg]
$m_i$	Massa do nodo do corpo humano	[kg]
$MB_i$	Metabolismo basal no nodo	[W]
$p_a$	Pressão parcial de vapor no ar ambiente	[Pa]
$p_{sk}$	Pressão parcial de vapor na superfície da pele	[Pa]
$Persp_i$	Perda de calor por perspiração	[W]
$\dot{Q}_a$	Energia acumulada	[W]
$\dot{Q}_e$	Energia que entra	[W]
$\dot{Q}_s$	Calor transferido por condução no nodo	[W]
$Q_{lost}$	Perda total de calor	[W/m <sup>2</sup> ]
$Rad1_i$	Transferência de calor por radiação infravermelha com ambientes e temperatura conhecida	[W]
$Rad2_i$	Transferência de calor por fluxo radiativo de uma fonte específica	[W]
$R_e$	Resistência ao vapor do vestuário	[m <sup>2</sup> .Pa/W]
$Resp_i$	Perda de calor pela respiração	[W]
$Sh_i$	Produção de calor por realização de tremuras	[W]
$Sw_i$	Perda de calor por transpiração	[W]
$t$	Tempo	[°C]
$T$	Temperatura	[°C]
$T(i,j)$	Temperatura do nodo $i,j$	[s]
$T_{ar}$	Temperatura do ar ambiente (ou de outro fluido)	[°C]
$T_{blood}$	Temperatura do sangue	[°C]
$T_{clo}$	Temperatura média do vestuário	[°C]

---

---

$T_{Clo}^p$	Temperatura média do vestuário no instante passado ( $t = p$ )	[°C]
$T_{Clo}^N$	Temperatura média do vestuário no instante presente ( $t = N = p + \Delta t$ )	[°C]
$T_{dif}(i, j)$	Diferença entre a temperatura atual e a temperatura objetivo (a de equilíbrio térmico)	[°C]
$T_{evo,blood}(i, j)$	Taxa de evolução de temperatura do sangue	[°C/h]
$T_{evo}(i, j)$	Taxa de evolução de temperatura no nodo $i, j$	[°C/h]
$T_{evo,max}$	Taxa máxima de evolução de temperatura	[°C/h]
$T_{hip}$	Temperatura do hipotálamo	[°C]
$T_{mr}$	Temperatura média radiante	[°C]
$T_p$	Temperatura profunda do corpo	[°C]
$T_{re}$	Temperatura rectal	[°C]
$T_{set}(i, j)$	Temperatura objetivo (de equilíbrio térmico) do nodo $i, j$	[°C]
$T_{sk}$	Temperatura média da pele	[°C]
$T_{tym}$	Temperatura timpânica	[°C]
$TR_{sens}(i, j)$	Sensibilidade dinâmica do recetor térmico	[h]
$T_{CloExt}^a$	Temperatura da superfície exterior do vestuário na iteração anterior do instante $N$	[°C]
$T_{CloExt}^N$	Temperatura da superfície exterior do vestuário na iteração do instante $N$	[°C]
$U_{cl}$	Condutância térmica do vestuário	[W/m <sup>2</sup> ]
$v_a$	Velocidade do ar (pessoa parada)	[m/s]
$V_{adm}$	Variação de temperatura máxima admissível	[°C]
$v_{ar}$	Velocidade do ar relativamente à pessoa	[m/s]
$We_i$	Produção de calor por realização de trabalho externo	[W]
$W_{i,2}$	Produção interna de calor por tremores musculares	[W]
$w$	Massa corporal dos indivíduos	[kg]
$x_i$	Valores medidos	-
$\bar{x}$	Média aritmética dos valores medidos	-
$y_i$	Valores previstos	-

---

$\bar{y}$	Média aritmética dos valores previstos	-
$\delta$	Média das diferenças relativas entre valores medidos e previstos	
$\Delta t$	Intervalo de tempo	[s]
$\varepsilon$	Emissividade do vestuário ou superfície exterior da pele	-
$\sigma$	Desvio padrão das diferenças relativas entre valores medidos experimentalmente e previstos pelo programa	-

## Siglas

<b>Sigla</b>	<b>Significado</b>
AAF	Arrefecimento por imersão de mãos e antebraços em água fria apenas durante a fase de recuperação
ACG	Arrefecimento corporal vestindo coletes de gelo apenas durante a fase de recuperação
ACGfCR	Arrefecimento corporal vestindo coletes de gelo durante as fases de combate e recuperação
AP	Arrefecimento passivo apenas durante a fase de recuperação
ApV	Arrefecimento corporal com recurso a ventiladores apenas durante a fase de recuperação
EPI	Equipamento de proteção individual
FCTUC	Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra
ISO	International Organization for Standardization
M&A	Mãos e antebraços
NASA	National Aeronautics and Space Administrations
OMS	Organização Mundial de Saúde
VPI	Vestuário de Proteção Individual

# 1. INTRODUÇÃO

A presente dissertação surge no seguimento dos trabalhos de investigação que têm vindo a ser realizados no Departamento de Engenharia Mecânica (DEM) da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra (FCTUC) no que respeita ao estudo do comportamento térmico e fisiológico do corpo humano em resposta a situações de exposição a ambientes térmicos extremos.

## 1.1. Estrutura

Este trabalho encontra-se estruturado em 5 capítulos.

No primeiro Capítulo, com vista a uma familiarização com os assuntos que se pretendem analisar, é feito um enquadramento ao tema, faz-se uma revisão bibliográfica focada na área da termorregulação do corpo humano, do stresse térmico hipertérmico e das técnicas de arrefecimento corporal, e apresentam-se os objetivos a atingir.

O segundo Capítulo é dedicado à descrição do funcionamento e potencialidades do programa *HuTheReg* e de alguns dos algoritmos em que se baseia, nomeadamente o modelo de termorregulação do corpo humano.

No terceiro Capítulo é efetuada uma descrição das causas que provocam stresse térmico hipertérmico nos bombeiros no decorrer das operações de combate a incêndios de alta intensidade. São apresentadas as técnicas de arrefecimento corporal consideradas. Detalham-se ainda as fases que compõem o protocolo seguido em cada um dos 8 casos em análise. Este capítulo termina com a descrição dos parâmetros estatísticos utilizados para efetuar a análise comparativa entre os resultados experimentais retirados da bibliografia e os previstos pelo programa.

No Capítulo 4 são expostos e discutidos os resultados obtidos com as simulações realizadas através do *HuTheReg* nas diversas situações apresentadas e para as várias técnicas de arrefecimento em estudo, os quais são também comparados com os dados de referência retirados da bibliografia científica.

Por fim, no Capítulo 5 são apresentadas as principais conclusões que foram possíveis alcançar com o desenvolvimento deste trabalho.

## 1.2. Enquadramento

Hoje em dia são diversos os ambientes (quer internos quer externos) em que o corpo humano é submetido a níveis de exposição ao calor muito elevados, seja em atividades desportivas ou em determinados ambientes laborais. Uma das atividades em que isto frequentemente acontece é o combate a incêndios por bombeiros (Mendes, 2009).

É sabido que indivíduos que se exercitem ou trabalhem em ambientes muito quentes enfrentam desafios fisiológicos que podem comprometer o seu organismo, podendo ser vítimas de lesões térmicas graves que em casos extremos podem levar à morte. Isto porque a capacidade de resposta do corpo humano é limitada face a ambientes com temperaturas extremas (Carter *et al.*, 2007). Deste modo, assuntos relacionados com o comportamento térmico e fisiológico do corpo humano, avaliação do stresse térmico e do risco de colapso em situações de exposição a ambientes térmicos extremos têm sido alvo constante de investigação.

Desde que as condições térmicas exteriores se mantenham dentro de determinados limites, o ser humano tem a capacidade de manter a temperatura profunda do corpo ( $T_p$ ) em níveis estáveis, ou seja, é um ser homeotérmico (Magalhães *et al.*, 2001). Assim, quando o corpo é exposto a situações térmicas que levem as temperaturas em sectores do corpo humano a exceder uma determinada gama de valores, o organismo aciona ações termorreguladoras que permitem manter em equilíbrio o calor interno (McLellan & Selkirk, 2004). Este equilíbrio térmico é realizado através do sistema de termorregulação do corpo humano, constituído por um pequeno órgão localizado no cérebro, designado de hipotálamo e responsável por manter a  $T_p$  no intervalo  $36,7 \pm 0,3^\circ\text{C}$  através da informação fornecida pelos termo-recetores (nervos que funcionam como sensores térmicos) (Oliveira, 2006; Quintela, 2007).

O sistema de termorregulação humano tem como função assegurar o equilíbrio térmico. No entanto, este pode falhar e a regulação da  $T_p$  poderá estar temporariamente comprometida, resultando em hipotermia ( $T_p < 35^\circ\text{C}$ ) no caso de ocorrer uma dissipação excessiva de calor no arrefecimento do corpo, ou hipertermia ( $T_p > 39^\circ\text{C}$ ) no caso de a dissipação de calor ser insuficiente levando ao sobreaquecimento do mesmo. Em casos extremos em que a  $T_p$  desça mais do que  $10^\circ\text{C}$  abaixo da sua temperatura de equilíbrio ou ultrapasse  $5^\circ\text{C}$  este valor, pode ocorrer a morte (Taylor, 2006). É assim fundamental aplicar em tempo útil técnicas de recuperação do equilíbrio térmico corporal. No caso em

que o corpo se encontra sob stresse hipertérmico, torna-se necessário recorrer a técnicas de arrefecimento corporal e estratégias de recuperação, passivas ou ativas, por forma a atenuar os efeitos nefastos diretamente associados à  $T_p$  acima de determinados limites.

### **1.3. Revisão Bibliográfica**

#### **1.3.1. Stresse térmico**

Segundo a Organização Mundial de Saúde (OMS) o stresse térmico define-se como a quantidade de calor que tem de ser dissipada ou produzida pelo corpo humano, por forma a manter o corpo em equilíbrio térmico (OMS, 1969). Quando o sistema de termorregulação não consegue suportar a sobrecarga térmica imposta ao corpo humano, o sistema fica descompensado e o indivíduo começa a sofrer de stresse térmico. Neste sentido, o stresse térmico é caracterizado pelo estado físico e psicológico a que um indivíduo é submetido quando exposto a condições térmicas extremas (Camargo & Furlan, 2011).

Existe uma grande diversidade de áreas de trabalho onde as atividades são realizadas em ambientes cujas condições de temperatura se encontram inadequadas. Operações que possam causar um aumento de temperatura profunda do corpo têm um elevado potencial de risco de ocorrência de stresse hipertérmico. O combate a incêndios é um exemplo de tarefa que submete o corpo humano a níveis de exposição ao calor muito elevados, sendo os bombeiros, por essa razão, frequentemente vítimas de stresse térmico.

Estudos realizados na Finlândia, relatados por Ilmarinen & Makinen (1992), indicaram que em atividades de combate a incêndios a temperatura profunda do corpo dos bombeiros pode atingir os 41,4°C. Por sua vez Keiser (2007) argumenta que quando a temperatura profunda do corpo humano ultrapassa os 39°C existe um elevado risco de aparecimento de patologias associadas ao excesso de calor.

Por norma a temperatura rectal ( $T_{re}$ ) é a utilizada para representar a temperatura profunda do corpo humano e, deste modo, como indicador do risco de lesões associadas ao calor. No entanto, a temperatura do sangue ao atingir o hipotálamo aciona um estímulo que permite ao sistema eferente responder através de mecanismos de termorregulação tais como, os tremores, a sudção e a atividade vasomotora (Magalhães *et al.*, 2001). Dado que a temperatura do hipotálamo está associada às patologias sentidas pelo indivíduo, pode-se assim esperar uma melhor relação entre a temperatura do hipotálamo e os vários estados

fisiológicos e sensoriais (Raimundo & Figueiredo, 2009). A partir de uma pesquisa bibliográfica exaustiva sobre relatos de comportamentos termofisiológicos do corpo humano em função da temperatura profunda, Raimundo & Figueiredo (2009) sugerem como adequado o uso de uma escala baseada na temperatura do hipotálamo ( $T_{hip}$ ). Estes autores sugerem que valores de  $T_{hip}$  iguais ou inferiores a 34°C levam normalmente o indivíduo à introversão e à produção de tremores violentos. Atingidas  $T_{hip}$  iguais ou menores que 30°C existe uma grande probabilidade de ocorrer o golpe-de-calor que leva o indivíduo a parar de tremer e a desmaiar. Para valores de  $T_{hip}$  iguais ou menores a 28°C pode ocorrer fibrilação ventricular. O culminar de todos estes sintomas ocorre para  $T_{hip}$  iguais ou inferiores a 25°C, em que, por norma, o indivíduo sofre falência por hipotermia. Para  $T_{hip}$  entre os 34°C e os 39°C a termorregulação normal está assegurada. Quando a  $T_{hip}$  ultrapassa os 39°C ocorre normalmente introversão (desorientação e incapacidade para tomar decisões) e uma transpiração violenta. Para valores de  $T_{hip}$  iguais ou superiores a 41°C é provável o golpe-de-calor (caracterizado pela interrupção da transpiração e pelo desmaio do indivíduo). Ao atingir-se 42°C de  $T_{hip}$  os danos cerebrais podem ser irreversíveis. Aos 44°C da  $T_{hip}$  a morte é praticamente inevitável.

O modo como cada indivíduo reage ao excesso de calor depende de vários fatores, nomeadamente a idade, o peso, o nível de treino, a aclimatação, a desidratação, o metabolismo, o uso de medicamentos e álcool e determinadas condições médicas específicas (Berry, 2013). Assim, o stresse térmico ocorre devido a fatores internos, que incluem o calor metabólico e as diferenças individuais, e fatores externos, tais como o ambiente externo envolvente e o tipo de vestuário utilizado pelo indivíduo (Sharkey, 1999; McLellan & Selkirk, 2005; Keiser, 2007). Tendo em conta que os bombeiros estão expostos ao stresse de uma forma regular, é importante que eles possuam certas características físicas e psicológicas, nomeadamente a nível de capacidade aeróbia e anaeróbia em combinação com a força muscular e composição corporal (Barr *et al.*, 2010), hidratação e aclimatação ao calor (Carter, 1996; Sharkey, 1999), que permitam executar as tarefas associadas com supressão de incêndios de forma rápida e eficaz.

Um bom nível de aptidão aeróbia é uma das melhores formas de prevenção de stresse térmico, pois trabalhadores em boa forma física adaptam-se duas vezes mais rápido ao calor do que um bombeiro que não esteja nessas condições (Sharkey, 1999). Estudos realizados descrevem que durante o combate a incêndios com uso de vestuário de proteção

individual, existem correlações significativas entre a percentagem de gordura corporal e o desempenho, a elevada taxa metabólica e a frequência cardíaca (Barr *et al.*, 2010). Foi ainda demonstrado que indivíduos em boas condições físicas começam a transpirar mais cedo, apresentam um ritmo cardíaco mais baixo e uma temperatura corporal mais baixa (Sharkey, 1999).

A exposição contínua de um indivíduo a um ambiente cujas condições térmicas são adversas às que está habituado faz com que o organismo sofra alterações fisiológicas para se adaptar ao ambiente (Camargo & Furlan, 2011). Este fenómeno é designado por aclimação, sendo um fator crucial no combate ao stresse térmico. Assim, um bombeiro aclimatado consegue ter o seu organismo adaptado ao ambiente em que trabalha, a sudação inicia-se a uma temperatura profunda do corpo mais baixa (aumentando a produção de suor), o que permite combater o stresse térmico de forma mais eficaz (Oliveira, 1998; Sharkey & Gaskill, 2009).

Segundo Barr *et al.* (2010), a hidratação é uma questão de segurança de grande importância para os bombeiros, pois trabalhar em ambientes de calor extremo resulta num aumento abundante de sudação e, conseqüentemente, em desidratação. Neste sentido, a hidratação e a reposição de líquidos, devem ser efetuadas antes, durante e após o trabalho, de forma a manter as taxas de suor para a promoção do arrefecimento evaporativo, e preservar o volume sanguíneo fazendo com que o coração continue a espalhar o sangue quente por toda a pele, ajudando assim na transferência de calor do corpo para o exterior (McLellan & Selkirk, 2005; Sharkey & Gaskill, 2009).

### **1.3.2. Técnicas de arrefecimento e estratégias de recuperação**

A fim de atender às exigências da atividade de combate a incêndios, pode haver a necessidade de aplicar estratégias de recuperação e técnicas de arrefecimento corporal como forma de atenuação do stresse térmico (Barr *et al.*, 2010). O objetivo de uma estratégia de recuperação é permitir a recuperação física do indivíduo e restaurar o equilíbrio termofisiológico no menor tempo possível salvaguardando desta forma a saúde e a segurança e, ao mesmo tempo, permitir otimizar a eficiência na execução de tarefas futuras.

Existem casos (como por exemplo, em eventos desportivos) onde a refrigeração do corpo ocorre muitas vezes antes das provas com o intuito de aumentar a performance dos

indivíduos aquando a realização destas. No entanto, esta estratégia nem sempre é aplicável aos bombeiros dada a imprevisibilidade associada à execução das tarefas desempenhadas por estes. Como consequência, a refrigeração só pode ser administrada durante e/ou após a atividade, sendo a última hipótese de extrema importância quando são realizadas, repetidamente, atividades de combate a incêndio. Ao serem usadas no local onde decorre a atividade, estas técnicas devem ser de fácil e rápida aplicação e possuir eficácia na atenuação do stresse térmico num curto período de tempo (Barr *et al.*, 2010).

As estratégias de recuperação são assim aplicadas com recurso a técnicas externas de arrefecimento corporal, as quais podem ser por trocas de calor ou por ingestão de alimentos frios/gelados. Contudo, o arrefecimento corporal por ingestão de alimentos congelados ou de água fria têm uma eficácia residual devido ao volume limitado que o estomago humano possui (Abreu, 2013).

As técnicas de arrefecimento corporal por trocas externas de calor podem ser passivas ou ativas. Destas últimas são considerados mais importantes os sistemas de arrefecimento através de movimento forçado do ar, os sistemas de arrefecimento através de imersão de uma ou mais partes do corpo em água fria, com recurso a ventiladores e os sistemas de arrefecimento através de coletes de arrefecimento contendo gelo ou de coletes contendo materiais em mudança de fase. Segundo Giesbrecht *et al.* (2007), a eficácia de qualquer procedimento externo de arrefecimento está dependente de fatores como:

- A percentagem de área do corpo que é arrefecida diretamente;
- A quantidade de fluxo sanguíneo que chega perto da pele (elevando-se este em situações de hipertermia);
- O gradiente de temperatura entre a pele e o meio de refrigeração.

- **Estratégia de recuperação passiva**

A refrigeração passiva é um método simples, prático e económico. Consiste na remoção do equipamento individual de respiração do bombeiro e de algum do equipamento de proteção. Nesta situação, o bombeiro deverá ter acesso a uma zona mais fresca e sombreada e possibilidade de beber água para reidratação. Estudos realizados com base neste método concluem que a refrigeração passiva é uma estratégia de recuperação ineficaz na atenuação do stresse térmico, pois não permite atingir em tempo útil o estado térmico de equilíbrio ou um estado próximo deste (Barr *et al.*, 2010). No entanto, segundo estes

autores, se a recuperação for feita num clima mais temperado (aproximadamente 15°C), é notória a diminuição da temperatura profunda do corpo. Este resultado sugere que o arrefecimento passivo só pode ser benéfico em condições onde a temperatura exterior é fresca, possivelmente nos meses de Inverno e não deve ser empregue em climas quentes durante os meses de Verão (Barr *et al.*, 2010). Nestes casos deverá optar-se por utilizar estratégias de recuperação ativas, as quais serão abordadas seguidamente.

- **Arrefecimento corporal através do movimento forçado do ar**

As técnicas de arrefecimento corporal através do movimento forçado de ar baseiam-se essencialmente no uso de ventiladores que fazem deslocar o ar (ver Figura 1.1), promovendo um arrefecimento no indivíduo por evaporação do suor e por transferência convectiva de calor sensível a partir da pele. No entanto, para que a eficiência desta técnica seja maximizada é necessário que a temperatura do ar seja inferior à temperatura da pele (Judge, 2003; Barr *et al.* 2010). Estudos efetuados mostram que o uso de ventiladores como uma forma de arrefecimento constitui um método eficiente na redução do stresse fisiológico do bombeiro, reduzindo significativamente a frequência cardíaca e a temperatura profunda do corpo após um período de trabalho com a duração de 10 minutos (Barr *et al.*, 2010).

Foram também publicados estudos em que analisam a utilização de um ventilador de nebulização capaz de pulverizar gotículas de água sobre o indivíduo, que se encontrava sentado a uma distância de 1,5 metros do ventilador. Este método provou ser eficaz, pois proporcionou um decréscimo do estado térmico e da tensão cardiovascular, o que proporcionou um aumento do tempo de trabalho durante a exposição ao calor em 25% quando comparado com a estratégia de recuperação passiva. Contudo, este método apesar de eficiente acarreta uma desvantagem, pois existe a possibilidade de na fase seguinte de exposição ao calor haver um acréscimo adicional da temperatura corporal devido a um maior teor de humidade no vestuário de proteção (Selkirk *et al.*, 2004; Barr *et al.*, 2010).



**Figura 1.1 - Técnica de arrefecimento corporal por convecção forçada de ar aplicada num bombeiro (adaptado de McLellan *et al.*, 2005).**

- **Arrefecimento corporal por imersão de água**

Os sistemas de arrefecimento por imersão em água (ver Figura 1.2) têm uma grande eficiência quando aplicados em zonas do corpo onde existe maior concentração de anastomoses arteriovenosas, como é o exemplo das mãos, antebraços e pés (Magalhães *et al.*, 2001; Barr *et al.*, 2010). Em situações em que o indivíduo se encontra em hipertermia, existe uma maior necessidade de dissipação de calor para que este regresse ao equilíbrio térmico, o que faz com que as anastomoses arteriovenosas se dilatam ao máximo, permitindo maior fluxo sanguíneo e, simultaneamente, aumento de dissipação de calor (Barr *et al.*, 2010). Por forma a aplicar este método procede-se à imersão das mãos e antebraços do indivíduo num recipiente com água fria.

Estudos realizados comprovam que a imersão simultânea das mãos e dos antebraços trás benefícios no arrefecimento, pois os antebraços têm uma proporção da área corporal aproximadamente de 7% do total enquanto as mãos representam 5% (Giesbrecht *et al.*, 2007). Contudo, para que este método seja eficaz na redução da temperatura do corpo é necessário que o fluxo sanguíneo se mantenha. A maioria dos estudos realizados concluíram que para um indivíduo que esteja em estado de hipertermia, e para que a vasodilatação não seja comprometida, a temperatura da água deve estar entre os 10°C e os 20°C (House *et al.*, 1997; Selkirk *et al.*, 2004; Barr *et al.*, 2010). No entanto, as maiores taxas de arrefecimento ocorrem quando a temperatura da água se encontra a 10°C (Giesbrecht *et al.*, 2007; Barr *et al.*, 2010). Este método de arrefecimento do corpo humano é simples e fácil de aplicar dada a acessibilidade da água da rede que geralmente está a

uma temperatura entre 15°C a 20°C, o que permite que esta técnica seja uma das mais utilizadas na atualidade.



**Figura 1.2 - Técnica de arrefecimento corporal por imersão das mãos e antebraços em água (adaptado de McLellan *et al.*, 2005).**

- **Arrefecimento corporal com coletes de arrefecimento**

Esta técnica de arrefecimento corporal consiste na utilização de coletes de arrefecimento que podem conter blocos de gelo ou um material de mudança de fase (ver Figura 1.3). Têm sido usados tradicionalmente durante 10 minutos antes da prática do exercício, na tentativa de reduzir o nível de tensão cardiovascular e do estado térmico do indivíduo e, deste modo, aumentar a capacidade de realização de tarefas durante a exposição ao calor (Barr *et al.*, 2009).

O uso de coletes de arrefecimento podem fazer com que o seu próprio benefício seja algo limitado devido ao aumento da taxa metabólica imposta pelo peso extra (Barr *et al.*, 2009). Neste sentido, os coletes de arrefecimento trazem algumas desvantagens relativamente a outras técnicas de arrefecimento, pois adicionam mais volume e peso para o indivíduo que tem de o transportar o que conseqüentemente reduz a sua mobilidade, requerem habituação (Barr *et al.*, 2009; Honeywell, 2009), não controlam a taxa de arrefecimento e podem causar inicialmente vasoconstrição e diminuir o efeito de arrefecimento (Honeywell, 2009). Todavia, outros estudos relatam que vestir um colete durante os 40 minutos que precedem o início da atividade demonstra ter benefícios fisiológicos para os bombeiros, apresentando uma redução de cerca 0,7°C na temperatura profunda do corpo, após 30 minutos de trabalho de intensidade moderada no calor (Barr *et al.*, 2009).



Figura 1.3 - Exemplos de coletes de arrefecimento (adaptado de Judge, 2003).

## 1.4. Objetivos

Pretende-se com este trabalho testar a aplicabilidade e validar um *software* de simulação do comportamento termofisiológico do corpo humano, o programa *HuTheReg*, em termos da sua capacidade de previsão do comportamento termofisiológico humano em situações de stresse térmico hipertérmico. Para o efeito selecionou-se como situação alvo o caso de bombeiros em combate a incêndios de alta intensidade térmica. São incluídas as fases de combate ao incêndio propriamente ditas e as fases de recuperação física e térmica. Neste sentido são consideradas várias técnicas alternativas de arrefecimento corporal.

A validação do modelo é efetuada por comparação das previsões do programa com resultados experimentais existentes na bibliografia científica para situações de combate a incêndios ou que de algum modo possam ser consideradas equivalentes. São consideradas situações envolvendo diferentes níveis de atividade (repouso, trabalho moderado e exercício intenso); tempos de exposição ao incêndio (fase de combate), tempos de recuperação, tipos de vestuário utilizado e técnicas de arrefecimento corporal.

Como ferramentas auxiliares na avaliação do nível de conformidade entre os resultados experimentais retirados da bibliografia e os previstos pelo programa utilizaram-se as funções estatísticas média aritmética das diferenças relativas (e respetivo desvio padrão), desvio quadrático médio e o coeficiente de correlação de Pearson. Adicionalmente é ainda efetuada uma avaliação com recurso a gráficos.

## 2. O PROGRAMA *HuTheReg*

O programa *HuTheReg* (*Human Thermal Regulation*) simula o comportamento termofisiológico do corpo humano, foi desenvolvido pelo Prof. António Raimundo do DEM-FCTUC e faz a simulação numérica da resposta térmica transiente das pessoas com recurso a um modelo de termorregulação do corpo humano baseado no desenvolvido por Stolwijk para a NASA, que se destinava a prever o comportamento termofisiológico dos astronautas. É este o *software* que, neste trabalho, se testa a aplicabilidade e se faz a validação em termos da sua capacidade de previsão do comportamento termofisiológico humano em situações de stresse térmico hipertérmico.

### 2.1. Descrição Geral

O programa *HuTheReg* está preparado para que cada simulação possa envolver até 20 cenários sucessivos diferentes, designados por “fases”. Cada “fase” é caracterizada por um ambiente térmico específico e por determinadas especificidades em termos de atividade da pessoa, do vestuário que usa, dos alimentos que ingere e do modo como troca calor com a envolvente. É assumido que a transição de uma fase para a seguinte ocorre de um modo instantâneo, o que poderá não ser muito realista.

A introdução de dados é efetuada através de um conjunto de ficheiros, que o programa lê sempre que necessário. Todos estes ficheiros têm o mesmo “nome base”, distinguindo-se pela “extensão”. O primeiro ficheiro de dados a ser lido (\*.p00) contém a informação geral sobre a simulação a efetuar e sobre a pessoa (altura, peso, etc.). Seguem-se um ficheiro por cada uma das “fases” a considerar (\*.p01, \*.p02, ..., \*.p20), não sendo, obviamente, necessário preparar ficheiros de dados para as fases que não existem.

Nos ficheiros de dados relativos a cada uma das fases tem de constar informação suficiente para que a mesma possa ser simulada, nomeadamente: (i) caracterização do ambiente térmico (fluido envolvente que pode ser ar ou água, temperatura do fluido envolvente, temperatura média radiante das superfícies envolventes, humidade relativa do ar ambiente, velocidade do fluido, radiação térmica incidente de uma fonte específica, etc.); (ii) descrição da atividade desenvolvida pela pessoa nessa fase (atividade metabólica,

postura, orientação face às fontes térmicas, ingestão de alimentos, etc.); (iii) caracterização do vestuário (que cobre cada um dos 22 segmentos do corpo humano (peso, calor específico, resistência térmica intrínseca, coeficiente de permeabilidade ao vapor, emissividade da superfície exterior) ou então caracterização da superfície da pele dos segmentos nus; e (iv) seleção dos algoritmos de determinação dos coeficientes de transmissão de calor por convecção e por radiação entre a pessoa e o ambiente (estão disponíveis 5 alternativos para cada um dos casos).

No decurso da simulação de cada caso, o programa gera 4 ficheiros de resultados, os quais partilham o mesmo “nome base” com os ficheiros de dados. Cada um dos ficheiros de resultados é identificado pela sua extensão, a qual são: \*.res, \*.tsk, \*.grl, \*.flx.

O ficheiro com a extensão “res” contem as informações gerais sobre o cálculo e pode ser aberto com Notepad, Wordpad ou Word. Neste ficheiro são gravados os dados, resultados globais e específicos nos instantes previamente selecionados, controlo da evolução do cálculo e mensagens de erro.

Os ficheiros com as extensões “tsk”, “grl” e “flx” são para abrir com programas do tipo Microsoft Excel, com os quais se pode proceder à análise de resultados através da realização de gráficos e da eventual análise estatística. O ficheiro de extensão “tsk” contem a evolução temporal das temperaturas da pele, ou seja a temperatura média, a máxima e a mínima e ainda a temperatura da pele de cada uma das partes do corpo, da face aos pés. O ficheiro de extensão “grl” contem as temperaturas internas do corpo, tal como a temperatura rectal, temperatura média do corpo, temperatura do sangue, do hipotálamo, etc, e ainda outros parâmetros, como por exemplo a temperatura do vestuário. Por fim, o ficheiro de extensão “flx” apresenta os fluxos de calor do corpo humano, tais como o calor perdido por perspiração, suor e respiração, o calor produzido por tremuras musculares, o calor acumulado, etc.

## 2.2. Algoritmo de Cálculo

O programa *HuTheReg* é composto por sete módulos para o cálculo de: (i) resposta termofisiológica do corpo humano; (ii) transporte de calor e água através do vestuário; (iii) transferência de calor por condução, convecção, radiação e troca de massa entre a superfície exterior do vestuário (ou pele) e o meio ambiente; (iv) função respiratória e

cardiovascular; (v) quantificação e análise do conforto térmico sentido pela pessoa ou estimativa do stresse térmico (hipertérmico ou hipotérmico); (vi) início e evolução de lesões cutâneas (dor e queimadura); (vii) deteção de reações específicas no interior do corpo humano (introversão, colapso térmico, danos cerebrais permanentes e morte) (Raimundo & Figueiredo, 2009). Deste modo, através da introdução de parâmetros relacionados com o corpo humano e com o ambiente envolvente (adequados à situação em estudo), o programa desenvolve previsões que são fundamentais na análise de resposta do corpo humano a um determinado ambiente térmico.

O módulo de simulação da resposta termofisiológica do corpo humano implementado no programa *HuTheReg* é baseado no modelo desenvolvido por Stolwijk (1971), melhorado com fundamento na literatura científica recente relacionada com esta temática. O programa considera o corpo humano dividido em 22 segmentos (ver Figura 2.1). Cada segmento é composto por quatro camadas (núcleo, músculo, gordura e pele) perfazendo assim 88 nodos. O nodo nº 89 é o compartimento sanguíneo central. A informação de cada nodo chega ao sistema de controlo através de corrente sanguínea e de impulsos nervosos emitidos pelos sensores térmicos contidos na pele e nos órgãos corporais profundos, sendo que depois este traduz essa informação em comandos.

Este modelo foi concebido para um indivíduo médio com 1,72 m de altura, 74,43 kg de massa corporal, e 14,5% de gordura corporal (1,869 m<sup>2</sup> de área de pele). Para indivíduos com dados antropométricos diferentes, os coeficientes necessários são recalculados de forma automática pelo programa em função do seu peso corporal e da sua área da pele (Raimundo & Figueiredo, 2006).

Como qualquer outro modelo de termorregulação humana, o algoritmo de cálculo assenta em duas componentes, uma passiva e outra ativa das quais se faz uma breve descrição nas Secções seguintes deste Capítulo.



Figura 2.1 - Descrição dos segmentos do corpo humano (adaptado de Abreu, 2013).

### 2.3. Componente Passiva do Modelo Termofisiológico

A evolução da temperatura ( $T$ ) ao longo do tempo ( $t$ ), em cada nodo ( $i$ ) do corpo humano (exceto o sangue), pode ser obtida através da seguinte equação genérica (Raimundo & Figueiredo, 2009):

$$m_i c p_i \frac{\partial T_i}{\partial t} = \sum_{j=1}^{88} Q_{j,i} + MB_i + Wi_i + We_i + Sh_i - B_i - Resp_i - Persp_i - Sw_i - Cond1_i - Cond2_i - Conv_i - Rad1_i - Rad2_i \quad (2.1)$$

onde  $m_i$  e  $cp_i$  são a massa e o calor específico de cada nodo, respetivamente. O termo ( $Q_{j,i}$ ) representa o calor transferido por condução através dos tecidos no interior de cada segmento, individualmente. A taxa de produção de calor é expressa pelo resultado do metabolismo basal ( $MB_i$ ) do trabalho interno ( $Wi_i$ ), do trabalho externo ou movimento ( $We_i$ ) e dos tremores ( $Sh_i$ ), este último a ocorrer apenas na camada do músculo. A troca de calor entre o compartimento sanguíneo central e todas as camadas locais é contabilizada através do termo ( $B_i$ ). A perda de calor por respiração ( $Resp_i$ ) é composta por uma parte sensível e por uma parte latente ocorrendo apenas ao nível dos componentes que constituem o trato respiratório. A repartição destas perdas é efetuada seguindo os coeficientes propostos por Fiala *et al.* (1999), em que são imputados 20% ao nodo correspondente ao núcleo da face, 25% aos músculos da face, 25% à banda muscular do pescoço e 30% ao núcleo do peito (pulmões). O calor perdido por evaporação tem duas componentes, a perspiração ( $Persp_i$ ) e a transpiração ( $Sw_i$ ), ambas em função do estado térmico do indivíduo, das propriedades do vestuário e da pressão parcial de vapor de água na superfície da pele e no ar ambiente. Na superfície da pele, o calor é perdido por

condução para o vestuário ( $Cond1_i$ ) e por contacto direto dos segmentos despídos com superfícies externas ( $Cond2_i$ ). Ainda para os segmentos despídos, a transferência de calor pode ocorrer por convecção com o ar ambiente ( $Conv_i$ ), por radiação infravermelha com ambientes de temperatura conhecida ( $Rad1_i$ ) e por um fluxo de radiação incidente de fonte específica ( $Rad2_i$ ). Para as partes cobertas com vestuário, os termos  $Cond2_i$ ,  $Conv_i$ ,  $Rad1_i$  e  $Rad2_i$  não são tidos em consideração na camada da pele, mas sim na face externa do vestuário correspondente.

O balanço térmico no compartimento sanguíneo central é representado pela seguinte expressão (Raimundo & Figueiredo, 2009):

$$m_b c p_b \frac{\partial T_b}{\partial t} = \sum_{i=1}^{88} B_i \quad (2.2)$$

em que,  $m_b$  e  $c p_b$  são respetivamente, a massa e o calor específico do sangue que circula no corpo humano.

A capacidade térmica de cada nodo é calculada a partir do calor específico do tecido constituinte de cada nodo. A quantidade de sangue existente no compartimento sanguíneo central é assumida como tendo o valor de 2,5 litros. Segundo Tanabe *et al.* (2002) e para um indivíduo com características individuais de referência o calor específico individual assumido para cada tecido é de 0,580 Wh/(kg°C) para os ossos, 0,696 Wh/(kg°C) para a gordura corporal e 1,044 Wh/(kg°C) para outros tecidos.

## 2.4. Trocas de Calor entre o Corpo Humano e o Exterior

As permutas de calor entre o corpo humano e o exterior processam-se envolvendo três mecanismos distintos, a saber, as trocas de calor sensível pela superfície da pele, as trocas de calor latente pela superfície da pele e as trocas de calor (sensível e latente) pela respiração. Cada um destes processos é modelado através de um algoritmo adequado.

O transporte de calor e de humidade através do vestuário é contabilizado utilizando os modelos descritos por Havenith *et al.* (2002) e na norma ISO 9920 (2007). Estes modelos são aplicados a cada um dos 22 segmentos em que supostamente é considerado dividido o corpo humano. Isto requer que sejam fornecidos ao programa, em cada “fase”, as características do vestuário em cada um dos 22 segmentos, nomeadamente em termos de do isolamento térmico intrínseco ( $I_{cl}$ ), massa ( $m_{clo}$ ), calor específico ( $c p_{clo}$ ), permeabilidade ao vapor ( $F_{pcl}$ ) e emissividade radiativa ( $\epsilon$ ). Cada segmento é considerado completamente

vestido ou nu. De modo a considerar a redução de isolamento térmico devida ao movimento do corpo humano, o valor de cada  $I_{cl}$  é ajustado de acordo com o nível de atividade física da pessoa usando para isso as relações propostas por Oliveira *et al.* (2011).

### 2.4.1. Trocas de calor sensível pela superfície da pele

Para determinar as trocas de calor sensível que ocorrem entre a superfície da pele e o exterior é necessário recorrer a um cálculo iterativo, pois o modelo no qual se baseia o programa *HuTheReg* considera o corpo humano despido e, como tal, não é diretamente aplicável à simulação do corpo humano contendo vestuário. Para ultrapassar esta limitação, o programa assume que nos segmentos nus quer a temperatura da face exterior do vestuário ( $T_{CloExt}$ ) quer a temperatura média do mesmo ( $T_{Clo}$ ) são iguais à temperatura da pele ( $T_{sk}$ ). No caso dos segmentos cobertos por vestuário, o programa recorre a um processo iterativo para calcular as temperaturas  $T_{Clo}$  e  $T_{CloExt}$  (Abreu, 2013). O processo baseia-se num balanço térmico ao volume de vestuário que cobre cada segmento do corpo representado pela seguinte equação:

$$\dot{Q}_e - \dot{Q}_s = \dot{Q}_a \quad (2.3)$$

onde  $Q_e$  representa o fluxo de calor que entra,  $Q_s$  o fluxo de calor que sai e  $Q_a$  o fluxo de calor acumulado.

Conhecida a temperatura média do vestuário num determinado instante  $t = p$ , designada por  $T_{Clo}^p$ , essa temperatura passado um intervalo de tempo  $\Delta t$  (num instante  $t = N = p + \Delta t$ ), representada por  $T_{Clo}^N$ , vem:

$$T_{Clo}^N = \frac{\dot{Q}_e \Delta t - \dot{Q}_s \Delta t}{m_{Clo} cp_{Clo}} + T_{Clo}^p \quad (2.4)$$

O facto dos fluxos de calor  $Q_e$  e  $Q_s$ , presentes na equação anterior, serem dependentes do valor da temperatura na face exterior do vestuário no instante  $N$  ( $T_{CloExt}^N$ ), leva a que seja necessário recorrer a um processo iterativo em cada instante de tempo. Para que o processo não divirja, a temperatura na face exterior do vestuário é assim determinada em duas etapas de modo a ser possível impor uma restrição de sub-relaxação:

$$T_{CloExt}^N = 2 T_{Clo}^N + T_{sk}^N \quad (2.5)$$

$$T_{CloExt}^N = 0,1 T_{CloExt}^n + 0,9 T_{CloExt}^a \quad (2.6)$$

em que  $T_{CloExt}^a$  é o valor de  $T_{CloExt}^N$  na iteração anterior.

Considera-se que o processo converge quando todos os 22 segmentos em que supostamente se dividiu o corpo humano se verifica a seguinte condição:

$$\text{Variação} = |T_{CloExt}^N - T_{CloExt}^a| \leq 10^{-6} \quad (2.7)$$

Após o processo convergir, torna-se possível calcular as trocas de calor sensíveis através das seguintes expressões:

$$\dot{Q}_s = A_i(i) F_{cl}(i) U_{cl} (T_{CloExt}^N - T_{op}^N) \quad (2.8)$$

$$U_{cl} = \frac{1}{I_{cl,corrigido} + I_a} \quad (2.9)$$

$$I_{cl,corrigido} = I_{cl} F_{correção} \quad (2.10)$$

$$I_a = \frac{1}{h_{conv} + h_{rad}} \quad (2.11)$$

em que  $h_{conv}$  e  $h_{rad}$  são os coeficientes de transmissão de calor por convecção e por radiação respetivamente, os quais são calculados pelo programa.

No casos em que a transmissão de calor ocorre por convecção natural, para determinar este coeficiente recorre-se às expressões propostas por Quintela *et al.* (2004), as quais foram obtidas experimentalmente com recurso ao manequim Maria. No caso de convecção forçada o programa utiliza as equações propostas por Havenith *et al.* (2002) sendo também as assumidas na norma ISO 7730 (2005):

$$h_{conv} = I_{cl} \sqrt{v_{ar}} \quad (2.12)$$

$$v_{ar} = v_a + 0,0052(M_t - 58) \quad (2.13)$$

em que  $v_a$  representa a velocidade do ar relativamente à pessoa parada e  $M_t$  é a taxa metabólica.

As áreas efetivas de radiação térmica e os fatores de absorção de Gebhart, necessários para o cálculo das componentes radiativas em cada segmento do corpo humano (termo  $Rad_1$  da equação 2.1), são determinadas pelo programa *HuTheReg* com recurso a quatro conjuntos de relações pré-estabelecidas, um válido para pessoas de pé, outro para pessoas sentadas, outro para deitadas em posição supina e outro para deitadas em posição ventral. Estas expressões foram obtidas utilizando um programa implementado por Raimundo *et al.* (2004).

### 2.4.2. Trocas de calor latente pela superfície da pele

As trocas de calor latente que ocorrem entre a pele e o ar ambiente são provocadas pela evaporação da transpiração e da perspiração acumuladas na superfície da pele. A resistência à passagem de vapor através do vestuário ( $R_e$ ) é utilizada no cálculo da perda de calor por evaporação ( $E_{sk}$ ). Segundo Havenith *et al.* (2002) esta é proporcional à diferença das pressões parciais de vapor na superfície da pele ( $p_{sk}$ ) e a do ar ambiente ( $p_a$ ), vindo:

$$E_{sk} = \frac{(p_{sk} - p_a)}{R_e} \quad (2.12)$$

sendo  $R_e$  obtido pela seguinte equação (Havenith *et al.*, 2002):

$$R_e = \frac{1000}{16,7 h_{conv} F_{pcl}} = 60 \left( \frac{1}{h_{conv}} + 0,344 I_{cl} \right) \quad (2.15)$$

onde  $F_{pcl}$  é o fator de eficiência de permeabilidade do vestuário à passagem de vapor,  $I_{cl}$  é o isolamento térmico intrínseco do vestuário e  $h_{conv}$  é o coeficiente de transmissão de calor por convecção.

## 2.5. Componente Ativa do Modelo Termofisiológico

O sistema sensorial ao frio e ao calor é a parte do sistema nervoso responsável pelo processamento das informações sensoriais que controlam a termorregulação do corpo humano. Este sistema é constituído pelo hipotálamo e pelos termo-recetores: recetores cutâneos térmicos e recetores existentes nos órgãos corporais profundos.

O hipotálamo contém neurónios sensíveis ao frio e ao calor, sendo os primeiros mais abundantes que os segundos (Magalhães *et al.*, 2001). A estimulação térmica destes neurónios é provocada por variações da temperatura do sangue que perfunde essa área, e traduz-se por um aumento dos impulsos emitidos.

O grau de estimulação (impulsos/segundo) dos diferentes recetores térmicos permite ao ser humano ter uma gradação de sensações térmicas. A rapidez com que se instala a temperatura é também um fator que influencia o grau de estimulação, pelo que a persistência da exposição a uma determinada temperatura (adaptação) proporciona uma menor estimulação dos recetores térmicos (Magalhães *et al.*, 2001; Camargo & Furlan, 2011).

Os recetores existentes em órgãos corporais profundos estão presentes ao nível da medula espinal, vísceras abdominais, à volta e no interior dos grandes vasos situados no

abdómen e tórax, apresentando uma sensibilidade mais acentuada para baixas temperaturas profundas do corpo humano (Magalhães *et al.*, 2001).

Os sinais provenientes de todos os tipos de termo-recetores são transmitidos ao sistema de controlo central. O cálculo matemático destes sinais é efetuado considerando que cada um dos nodos do modelo tem uma temperatura para a qual tende (temperatura objetivo) e que não é mais do que a temperatura de equilíbrio térmico da secção do corpo que ele representa. Assim, para cada um deles é calculado o sinal de erro, que é dado pela diferença da temperatura a que o nodo se encontra e a sua temperatura objetivo. A diferença  $T_{dif}(i,j)$  entre a temperatura atual  $T(i,j)$  e a temperatura objetivo  $T_{set}(i,j)$  em cada nodo é obtida pela seguinte equação (Tanabe *et al.*, 2002; Rossa & Cardoso, 2004):

$$T_{dif}(i,j) = [T(i,j) - T_{set}(i,j)] + TR_{sens}(i,j) + T_{evo}(i,j) \quad (2.13)$$

em que  $TR_{sens}(i,j)$  é a sensibilidade dinâmica do recetor térmico e  $T_{evo}(i,j)$  é a taxa de evolução de temperatura em cada nodo. Segundo Tanabe *et al.* (2002) a análise quantitativa de  $TR_{sens}(i,j)$  não é muito clara sendo considerada nula.

Os sinais de erro com valor positivo são interpretados como um sinal de calor e os sinais de erro negativos são interpretados como sendo um sinal de frio.

Após a integração global dos sinais de frio e de calor, o sistema de controlo emite informações aos diversos órgãos ou aos sistemas eferentes que vão desencadear o tipo de resposta a estimular: promoção de ganho ou de perda de calor (Magalhães *et al.*, 2001).

A resposta termofisiológica do corpo humano ao frio e ao calor é obtida através de mecanismos que atuam para fazer face às solicitações térmicas provenientes do sistema sensorial. Numa situação de calor, em que existe a necessidade de arrefecer o corpo humano, a resposta termofisiológica é a vasodilatação e o aumento da perda de calor por transpiração. Numa situação de frio, em que é necessário manter ou elevar a temperatura corporal, a resposta termofisiológica é a vasoconstrição e a produção de calor por tremores (Camargo & Furlan, 2011).

A vasodilatação consiste na dilatação dos vasos sanguíneos, o que faz com que os capilares se aproximem da superfície cutânea e, conseqüentemente, o sangue circule mais próximo da superfície da pele, proporcionando uma maior perda de calor para o exterior. Por sua vez, a transpiração permite a perda de calor através da evaporação do suor presente na superfície da pele.

A vasoconstrição ocorre quando os capilares se contraem, o que obriga o sangue a circular mais afastado da superfície da pele, dificultando assim a perda de calor para o exterior. Os tremores são outro mecanismo de produção interna de calor, sendo definidos como movimentos musculares involuntários que através das contrações musculares geram calor.

## 2.6. Incremento de Tempo e Convergência

Para a realização do cálculo de evolução da temperatura em cada nodo ao longo do tempo é necessário considerar um incremento de tempo. Para calcular este intervalo de tempo ( $\Delta t$ ) o programa *HuTheReg* analisa os 88 nodos em que o corpo está supostamente dividido e verifica em qual deles se registou a maior evolução térmica no  $\Delta t$  anterior. Para que não haja instabilidade no cálculo é conveniente assegurar que, em cada ciclo de cálculos, a temperatura não ultrapasse uma variação admissível ( $V_{adm}$ ). A precisão dos cálculos está diretamente relacionada com a  $V_{adm}$  imposta e será tanto maior quanto menor for o valor considerado para esta, sendo que uma  $V_{adm}$  mais pequena implica um maior tempo de cálculo.

O cálculo do valor de  $\Delta t$  a aplicar no próximo “passo de tempo” é o que resulta da seguinte expressão (Rossa & Cardoso, 2004):

$$\Delta t = \left\lfloor \frac{V_{adm}}{T_{evo,max}} \right\rfloor \quad (2.14)$$

em que  $T_{evo,max}$  representa a variação máxima de temperatura entre todos os nodos do modelo no instante temporal anterior e  $V_{adm}$  é a correspondente variação máxima admissível, que no programa é imposta igual a  $10^{-4} \text{C/s}$ . Adicionalmente, caso resulte  $\Delta t > 0,01$  segundos o programa rejeita este valor e assume que  $\Delta t = 0,01$  segundos de forma a manter o cálculo estável.

As novas temperaturas são então calculadas através das seguintes expressões (Rossa & Cardoso, 2004):

$$T(i,j) = T(i,j) + T_{evo}(i,j) \Delta t \quad (2.15)$$

$$T_{blood} = T_{blood} + T_{evo,blood}(i,j) \Delta t \quad (2.16)$$

### 3. MATERIAL E MÉTODOS

#### 3.1. Causas de Stresse Térmico no Combate a Incêndios

Os bombeiros em operações de combate a incêndios ficam sujeitos a stresse térmico devido a fatores internos e externos, os quais serão descritos seguidamente.

##### 3.1.1. Fatores internos

Os fatores internos que contribuem para o stresse hipertérmico dos bombeiros em ação de combate a incêndios incluem o calor metabólico gerado (McLellan & Selkirk, 2005) e as características individuais (Sharkey, 1999).

Os bombeiros em operações de extinção de incêndios apresentam um metabolismo próximo dos 500 W ( $\approx 278 \text{ W/m}^2$ ), o que corresponde a uma taxa metabólica muito alta (Austin, 2008). Nesta situação, o calor metabólico gerado pelos músculos contribui em cerca de 70 % para a carga térmica corporal (Sharkey, 1999), tendo o corpo a necessidade de libertar este calor produzido de forma a impedir o aumento da temperatura profunda do corpo (Honeywell, 2009).

Existem diferenças individuais na aptidão física, na aclimação, na desidratação e na tolerância à exposição térmica (Sharkey, 1999). O excesso de massa corporal condiciona o indivíduo quanto à tolerância ao calor, à taxa de sudorese e ao ritmo cardíaco, o que leva ao aumento da produção de calor metabólico. Também algumas doenças, o uso de medicamentos e o consumo de drogas e/ou álcool podem condicionar a resposta do organismo em ambientes térmicos quentes e em níveis de intensidade de trabalho severos (Judge, 2003; Eglin, 2006; Berry, 2013). Segundo Carter (1996), a capacidade física de um bombeiro é um dos requisitos fundamentais para que este tenha uma melhor tolerância ao calor durante o trabalho em ambientes quentes e húmidos. Neste sentido, à semelhança do que acontece por exemplo nos Estados Unidos da América através do “*Pack Test*”, os bombeiros deveriam ser submetidos a exames médicos e testes de aptidão física, de forma a avaliarem as suas capacidades para exercerem este tipo de atividade.

A aclimação, por sua vez, é um processo de adaptação do organismo a um determinado ambiente térmico e permite aumentar o seu período de exposição. Este

processo é lento e progressivo, sendo necessário pelo menos três semanas de exposição do indivíduo ao calor para que a aclimatação seja completamente estabelecida (Judge, 2003). A aclimatação permite que a sudorese se inicie a uma temperatura profunda do corpo mais baixa, aumentando a produção de suor, melhorando a distribuição sanguínea e diminuindo a frequência cardíaca, a temperatura superficial da pele e a temperatura profunda do corpo (Sharkey, 1999). Um indivíduo aclimatado perde por sudorese aproximadamente 1,5 litros/hora de suor, enquanto para um indivíduo não aclimatado essa taxa é de apenas 0,7 litros/hora (Judge, 2003).

### 3.1.2. Fatores externos

O ambiente térmico externo proporcionado por um incêndio é um fator externo que origina situações de stresse térmico, contribuindo em cerca de 30% para a carga térmica corporal (Sharkey, 1999). As situações de elevada tensão térmica que os bombeiros enfrentam provêm da radiação térmica que incide neles, do fumo, da convecção dos gases quentes, da condução de calor devido ao contacto com superfícies quentes (Lawson & Vettori, 2002), da temperatura do ar e da humidade relativa do ar demasiado elevada (Keiser, 2007). O fluxo de calor incidente num bombeiro resulta fundamentalmente da radiação emitida pelas chamas, apresentando normalmente valores baixos [5-10 kW/m<sup>2</sup>]. No entanto, em situações extremas, este fluxo de radiação térmica incidente pode atingir os 200 kW/m<sup>2</sup>, como por exemplo no caso de incêndios industriais (Keiser, 2007). Se a humidade relativa for elevada, a evaporação do suor produzido diminui, o que dificulta a ação do mecanismo de termorregulação do corpo humano (Judge, 2003).

Outro fator externo de grande influência na ocorrência de stresse térmico nos bombeiros é o equipamento de proteção individual (EPI), composto pelo vestuário de proteção individual (VPI) e um conjunto de apetrechos considerados essenciais para a segurança do bombeiro (McLellan & Selkirk, 2005; Mendes, 2009).

Raimundo & Figueiredo (2006, 2009) e Mendes (2009) relatam que o VPI usado pelos bombeiros Portugueses no combate a incêndios florestais inclui o capacete com viseira de protecção, a cogula (gorro de protecção da cara e do pescoço), uma *t-shirt*, um casaco do tipo dólmen, luvas, cueca, calças, meias e botas. Quando completamente vestido, este VPI apresenta valores globais de  $I_{cl} = 2,45$  clo para o isolamento intrínseco,  $\epsilon = 0,88$  para a emissividade e  $F_{pcl} = 0,22$  de índice de permeabilidade ao vapor (Raimundo &

Figueiredo, 2006 e 2009). O VPI de combate a incêndios em edifícios e em instalações industriais é basicamente constituído pelas mesmas peças de vestuário mas com valores bem mais elevados de isolamento térmico.

Apesar dos progressos tecnológicos na fabricação de vestuários de proteção individual de combate a incêndios, os VPI atualmente utilizados pelos bombeiros são pesados e limitados relativamente à permeabilidade ao vapor, embora apresentem bons coeficientes de resistência á condução de calor (Chou *et al.*, 2008; Mendes, 2009; Hostler *et al.*, 2010). O bom nível de isolamento térmico deste tipo de vestuário permite proteger o bombeiro da radiação direta vinda do fogo, mas também reduz a dissipação do calor produzido pelo próprio corpo (Keiser, 2007; Raimundo & Figueiredo, 2009).

Equipamentos de proteção individual (EPI) com valores elevados de massa, de volume e de rigidez promovem maiores valores de produção de calor metabólico (Austin, 2008) potenciando assim um aumento da temperatura profunda do corpo, o que posteriormente se pode traduzir em situações de stresse térmico (Keiser, 2007; Raimundo & Figueiredo, 2009).

### 3.2. Estratégias de Arrefecimento Testadas

Para validar o programa em teste e, simultaneamente, analisar algumas técnicas de arrefecimento corporal em situações de combate a incêndios de alta intensidade térmica, foram efetuadas simulações em que as estratégias de arrefecimento são aplicadas em permanência (ou seja, durante as fases de combate e as de recuperação), e em que são aplicadas apenas durante a fase de recuperação.

Analisaram-se quatro estratégias alternativas de arrefecimento corporal: (i) Arrefecimento passivo; (ii) Arrefecimento por imersão das mãos e antebraços em água fria; (iii) Arrefecimento através de ventiladores; e (iv) Arrefecimento por recurso a coletes de gelo. Por limitações de aplicabilidade, as três primeiras estratégias foram aplicadas apenas durante as fases de recuperação. Já o recurso a coletes de gelo foi analisado em ambas as situações, ou seja, quer no caso de este ser vestido apenas nas fases de recuperação ou quer o de ser utilizado em permanência.

### 3.3. Casos em Análise – Descrição e Protocolos

Os protocolos adotados nos casos em análise submetem os bombeiros a várias etapas (fases sob a perspectiva do programa *HuTheReg*) que numericamente correspondem aos diferentes tipos de atividade dos bombeiros (antes, durante e após o combate ao incêndio). Cada fase é genericamente caracterizada por um nível de atividade, um vestuário, um ambiente térmico envolvente e uma ingestão de água.

É óbvio que todos os indivíduos que participam num dado estudo experimental têm forçosamente de iniciar os ensaios no mesmo estado termofisiológico, caso contrário a informação obtida seria de utilidade duvidosa. Por norma é selecionado para este estado a situação de termo-neutralidade (ou de equilíbrio térmico), mas pode ser utilizada outra desde que considerada “mais realista”. Por sua vez, e de modo a garantir que a “pessoa virtual” do programa parta no mesmo estado termofisiológico que as “pessoas reais” envolvidas nos ensaios experimentais, há necessidade de assumir nas simulações esta “fase de uniformização”. No entanto, a maioria da bibliografia científica de onde são retirados os valores experimentais não detalha a “fase de uniformização”, ou descreve-a de um modo incompleto. Nestes casos é necessário arbitrar os dados omissos a partir da melhor informação disponível.

Nas situações em que no relato dos ensaios experimentais não existe qualquer informação sobre a “fase de uniformização”, assume-se que ela existiu e que a mesma se destinou a atingir uma situação termofisiológica próxima da neutralidade térmica. Deste modo, começando com a hipótese de termo-neutralidade iniciou-se um processo de tentativa e erro até conseguir que a “pessoa virtual” do programa parta de um estado termofisiológico próximo das “pessoas reais” envolvidas nos ensaios experimentais.

De entre as variadíssimas alternativas para atingir o estado de neutralidade térmica, na execução deste trabalho considerou-se a seguinte: duração de 120 minutos; pessoa com atividade metabólica baixa ( $M = 0,8$  met) e pessoa integralmente nua ( $I_{cl} = 0$  clo); não existe radiação incidente; temperatura ambiente envolvente ( $T_{ar}$ ) e média radiante ( $T_{mr}$ ) de 29°C; velocidade do ar  $v_{ar} = 0,1$  m/s e a humidade relativa  $HR = 50\%$ .

Os estudos experimentais sobre termorregulação humana, existentes na bibliografia científica, raramente apresentam uma descrição suficientemente detalhada dos ensaios realizados, impedindo que essa informação possa ser utilizada na validação de modelos matemáticos. Assim, para a realização deste trabalho houve necessidade de colmatar a

informação em falta introduzindo valores “estimados”, sendo estes o mais realistas possível tendo em conta a informação disponível.

A falta de informação relativa ao vestuário é a mais frequente. Por norma a bibliografia apresenta apenas uma descrição genérica das várias peças de roupa vestidas e/ou um “valor global” da sua resistência térmica intrínseca ( $I_{cl,global}$ ) para todo o corpo. Uma vez que a utilização do programa *HuTheReg* requer, para cada “fase”, o conhecimento das características do vestuário em cada um dos segmentos do corpo humano, nomeadamente em termos do isolamento térmico intrínseco ( $I_{cl}$ ), da massa ( $m_{clo}$ ), do calor específico ( $cp_{clo}$ ), da permeabilidade ao vapor ( $F_{pcl}$ ) e da emissividade radiativa ( $\varepsilon$ ), foi então necessário efetuar uma afetação de vestuário para os 22 segmentos do corpo e especificar as correspondentes propriedades termofísicas.

Para afetação do isolamento térmico do vestuário pelos 22 segmentos em que supostamente o programa *HuTheReg* divide o corpo humano teve-se em consideração o exposto em Raimundo & Figueiredo (2009) e nas normas ISO 9920 (2007). Para o peso da roupa ( $m_{clo}$ ) assumiram-se os valores sugeridos em Abreu (2013). Para as restantes propriedades teve-se como referência os valores apresentados em Raimundo & Figueiredo (2009), ou seja:  $cp_{clo} = 1000 \text{ J/ (kg}\cdot\text{°C)}$ ,  $F_{pcl} = 1$  para segmentos nus,  $F_{pcl} = 0$  para segmentos vestidos com roupa impermeável,  $F_{pcl} = 0,10$  para o calçado,  $\varepsilon = 0,90$  para a face exterior da roupa e  $\varepsilon = 0,93$  para a pele humana.

Segue-se uma descrição mais pormenorizada do protocolo e das medições efetuadas para cada um dos casos analisados.

- **Caso 1 – Kim et al., 2013**

Este estudo teve como objetivo avaliar a resposta termofisiológica de 6 bombeiros (homens com uma altura  $h = 1,8 \pm 0,1 \text{ m}$ , uma massa corporal  $w = 90,6 \pm 12,2 \text{ kg}$  e uma média de percentagens de gordura corporal  $B_f$  desconhecida, tendo-se assumido nas simulações  $B_f = 20\%$ ), equipados com VPI com  $I_{cl,global} = 1,6 \text{ clo}$  (admitindo-se nas simulações  $F_{pc} = 0,28$  e  $\varepsilon = 0,84$ ) e equipamento individual de respiração, enquanto realizavam exercício numa passarela rolante sob condições ambientais quentes ( $T_{ar} = T_{mr} = 35\text{°C}$ ;  $HR = 50\%$  e  $v_{ar} = 0,15 \text{ m/s}$ ).

O protocolo consistiu em oito ciclos, dos quais um de uniformização termofisiológica, um de pré-aquecimento, três de exercício e três de recuperação. O tempo total do protocolo foi de 75 minutos.

A fase de uniformização termofisiológica não se encontra descrita no artigo de Kim *et al.* (2013). Como tal considerou-se a seguinte: duração de 120 minutos; pessoa com atividade metabólica baixa ( $M = 0,8$  met) e pessoa inteiramente nua ( $I_{cl} = 0$  clo); não existe radiação incidente; temperatura ambiente envolvente ( $T_{ar}$ ) e média radiante ( $T_{mr}$ ) de  $28^{\circ}\text{C}$ ; velocidade do ar  $v_{ar} = 0,1$  m/s e a humidade relativa  $HR = 50\%$ .

Durante a fase de pré-aquecimento os bombeiros foram hidratados por administração de uma quantidade controlada de água (5 mL/kg de massa corporal). Este ciclo consistia em 2 minutos de aquecimento: indivíduos equipados com VPI completo a caminhar a uma velocidade de 3,2 km/h na passadeira com 0% de inclinação, antes do início das principais fases de exercício, em ambiente térmico quente caracterizado por  $T_{ar} = T_{mr} = 35^{\circ}\text{C}$ ;  $HR = 50\%$  e  $v_{ar} = 0,15$  m/s (tendo-se assumido nas simulações  $T$  (água ingerida) =  $21^{\circ}\text{C}$  e  $M = 3$  met).

Os três ciclos de 15 minutos de exercício consistiam em caminhar sobre uma passadeira com 7,5% de inclinação a uma velocidade de 5 km/h (tendo sido assumido nas simulações  $M = 5$  met). Contudo, os períodos de exercício tiveram a duração até que ocorresse uma das seguintes situações: exaustão,  $T_p \geq 38,5^{\circ}\text{C}$  ou que a frequência cardíaca atingisse 90% do valor máximo.

Os períodos de exercício são separados por um período de descanso de 10 minutos em que os indivíduos, expostos às mesmas condições ambientais, permaneciam sentados (tendo-se admitido nas simulações  $M = 0,8$  met). Como medida de segurança para promover a dissipação de calor no ambiente quente, os casacos dos indivíduos foram abertos durante a primeira e a segunda fase de descanso e completamente removidos na fase final (tendo-se assumido nas simulações para a primeira e segunda fase de descanso  $I_{cl,global} = 1,25$  clo,  $F_{pcl} = 0,37$  e  $\varepsilon = 0,87$ , e para a fase final  $I_{cl,global} = 1,05$  clo,  $F_{pcl} = 0,45$  e  $\varepsilon = 0,88$ ).

Na publicação de Kim *et al.* (2013) é dado especial destaque à evolução da temperatura profunda do corpo ( $T_p$ ) e da temperatura média da pele ( $T_{sk}$ ), como tal serão estas as variáveis a utilizar para efeitos de validação do programa.

- **Caso 2 – Selkirk *et al.*, 2004**

Este caso contou com a participação de 15 bombeiros profissionais (todos homens,  $h = 1,81 \pm 1,8$  m,  $w = 86,9 \pm 2,1$  kg e  $B_f=17,5\%$ ). Este estudo teve como objetivo verificar a eficácia de técnicas de arrefecimento ativo e de arrefecimento passivo na redução da tensão térmica em situações de trabalho num ambiente térmico quente ( $T_{ar} = T_{mr} = 35^\circ\text{C}$ ;  $HR = 50\%$  e  $v_{ar} < 0,1\text{m/s}$ ) e em que é necessário usar um VPI com  $I_{cl,global} = 1,55$  clo (admitindo-se nas simulações  $F_{pcl} = 0,28$  e  $\varepsilon = 0,84$ ).

O protocolo consistiu em sete ciclos, dos quais um de uniformização termofisiológica, um de pré-aquecimento, três de exercício e dois de recuperação. O tempo total do protocolo foi de 180 minutos.

A fase de uniformização termofisiológica não se encontra descrita no artigo de Selkirk *et al.* (2004). Como tal considerou-se a seguinte: duração de 120 minutos; pessoa com atividade metabólica baixa ( $M = 0,8$  met) e pessoa integralmente nua ( $I_{cl} = 0$  clo); não existe radiação incidente; temperatura ambiente envolvente ( $T_{ar}$ ) e média radiante ( $T_{mr}$ ) de  $27^\circ\text{C}$ ; velocidade do ar  $v_{ar} = 0,1$  m/s e a humidade relativa  $HR = 50\%$ .

Uma vez que a fase de pré-aquecimento também não é descrita com detalhe neste artigo, assumiram-se os seguintes dados: duração de 10 minutos; pessoa com atividade metabólica baixa ( $M = 1,0$  met) e pessoa vestida ( $I_{cl} = 1,45$  clo,  $F_{pcl} = 0,35$  e  $\varepsilon = 0,90$ ); não existe radiação incidente; temperatura ambiente envolvente ( $T_{ar}$ ) e média radiante ( $T_{mr}$ ) de  $22^\circ\text{C}$ ; velocidade do ar  $v_{ar} = 0,2$  m/s e a humidade relativa  $HR = 50\%$ .

Cada ciclo de trabalho consistiu numa fase de exercício de 20 minutos em que os indivíduos caminhavam numa passadeira a uma velocidade de 4,5 km/h e 0% de inclinação (tendo-se assumido  $M = 2,8$  met), seguida de uma fase de simulação de mudança da garrafa do equipamento de respiração, com a duração de 10 minutos. Esta fase é composta por dois períodos: um de 6 minutos de trabalho leve (caminhar sobre a passadeira a uma velocidade de 2,5 km/h e 0% de inclinação, assumindo-se  $M = 1,6$  met nas simulações) e um de 4 minutos de descanso em pé (tendo sido admitido nas simulações  $M = 1,2$  met). Concluídos estes 10 minutos, segue-se outra fase de exercício de 20 minutos. Durante os ciclos de trabalho os bombeiros estão vestidos com o VPI completo.

Após a segunda fase de trabalho de 20 minutos, segue-se uma fase de repouso de 30 minutos. Os indivíduos, expostos às mesmas condições ambientais quentes, retiram o capacete de proteção, cogula, luvas, casaco, o equipamento individual de respiração e

permanecem sentados (tendo-se assumido nas simulações os seguintes valores:  $I_{cl,global} = 0,76$  clo,  $F_{pcl} = 0,56$ ,  $\varepsilon = 0,90$  e  $M = 0,8$  met). Nesta fase foram aplicadas as seguintes estratégias de arrefecimento: arrefecimento passivo (AP) e imersão de mãos e antebraços em água fria (AAF) a uma temperatura de 17,4°C. O protocolo teve a duração até que ocorresse uma das seguintes situações: exaustão,  $T_{re} \geq 39,5^\circ$  ou que a frequência cardíaca atingisse 95% do valor máximo.

No decorrer do protocolo, os participantes ingeriram uma quantidade controlada de água (5 mL/kg de massa corporal) a uma temperatura de 15°C antes do início do ensaio, aos 25 minutos de cada fase de 30 minutos de trabalho e no início de cada fase de repouso.

Na publicação de Selkirk *et al.* (2004) apenas aparecem suficientemente detalhados os resultados que obtiveram para a temperatura rectal ( $T_{re}$ ) e para a temperatura média da pele ( $T_{sk}$ ), como tal serão estas as variáveis a utilizar para efeitos de validação do programa.

- **Caso 3 – Giesbrecht *et al.*, 2007**

Neste estudo, 6 bombeiros do género masculino ( $h = 1,80 \pm 0,04$  m,  $w = 78 \pm 9$  kg e  $B_f = 19\%$ ), equipados com VPI e equipamento individual de respiração, foram submetidos a um protocolo que incluía três fases de trabalho (de 20 minutos cada), três fases de recuperação (de 20 minutos cada) e cinco períodos (de 2 minutos cada um) de transição entres as fases anteriores. Ou seja, para além do período de uniformização inicial, o protocolo de ensaio tinha uma duração total de 130 minutos repartidos por: 1ª fase de exercício, período de transição, 1ª fase de recuperação, período de transição, 2ª fase de exercício, período de transição, 2ª fase de recuperação, período de transição, 3ª fase de exercício, período de transição, 3ª fase de recuperação.

Durante o ensaio os bombeiros ingeriram água a 21°C, 250 mL antes da 1ª fase de exercício e 350 mL após cada período de exercício.

Este estudo apresenta pouca informação sobre as características do VPI. É feita apenas uma descrição genérica das várias peças de roupa. Com base na informação dada assumiu-se que os bombeiros usavam um VPI com  $I_{cl,global} = 2,40$  clo (admitindo-se nas simulações  $F_{pcl} = 0,23$  e  $\varepsilon = 0,86$ ).

A fase de uniformização termofisiológica não se encontra descrita no artigo de Giesbrecht *et al.* (2007). Como tal considerou-se a seguinte: duração de 120 minutos;

peessoa com atividade metabólica baixa ( $M = 0,8$  met) e pessoa integralmente nua ( $I_{cl} = 0$  clo); não existe radiação incidente; temperatura ambiente envolvente ( $T_{ar}$ ) e média radiante ( $T_{mr}$ ) de  $29^{\circ}\text{C}$ ; velocidade do ar  $v_{ar} = 0,1$  m/s e a humidade relativa  $HR = 50\%$ .

Cada fase de exercício dura 20 minutos (prática de *step*, admitindo-se nas simulações  $M = 4,5$  met) e decorre no interior de uma câmara climática com  $T_{ar} = T_{mr} = 40^{\circ}\text{C}$ ,  $HR = 40\%$  e  $v_{ar}$  desconhecida (tendo-se admitido nas simulações  $v_{ar} = 0,2$  m/s).

Os períodos de recuperação são de 20 minutos e ocorrem no interior de um laboratório com  $T_{ar} = T_{mr} = 21^{\circ}\text{C}$ ,  $HR$  e  $v_{ar}$  desconhecidas (assumindo-se nas simulações  $HR = 60\%$  e  $v_{ar} = 0,3$  m/s).

Para permitir que os indivíduos se vestissem/despissem e movimentassem entre a câmara climática e o laboratório, foram aplicados períodos de transição de 2 minutos no fim de cada fase de exercício e de recuperação (arbitrando-se nas simulações, para estas fases,  $I_{cl,global} = 1,67$  clo,  $F_{pcl} = 0,40$ ,  $\epsilon = 0,89$  e  $M = 1,2$  met).

Durante os períodos de recuperação, os indivíduos retiraram o equipamento individual de respiração, capacete, cogula, luvas, casaco e permaneceram sentados (admitindo-se nas simulações os seguintes valores:  $I_{cl,global} = 0,93$  clo,  $F_{pcl} = 0,56$ ,  $\epsilon = 0,91$  e  $M = 1,0$  met) num ambiente relativamente fresco ( $T_{ar} = T_{mr} = 21^{\circ}\text{C}$ ), onde foram aplicadas ou a técnica de arrefecimento passivo (AP) ou uma de quatro alternativas de arrefecimento por imersão de mãos e antebraços em água fria (AAF): (i) mãos e antebraços em água a  $20^{\circ}\text{C}$ ; (ii) mãos e antebraços em água a  $10^{\circ}\text{C}$ ; (iii) mãos em água a  $20^{\circ}\text{C}$ ; e (iv) mãos em água a  $10^{\circ}\text{C}$ .

Na publicação de Giesbrecht *et al.* (2007) apenas aparece informação utilizável na validação em curso da temperatura timpânica ( $T_{ Tym}$ ) e da perda total de calor pelo corpo humano ( $Q_{lost}$ ). Logo são estas as variáveis a utilizar para efeitos de validação do programa.

- **Caso 4 – Barr *et al.*, 2009**

Barr *et al.* (2009) pretendiam com o seu estudo analisar em laboratório a eficácia de algumas técnicas de arrefecimento na redução do stresse térmico de bombeiros em combate a incêndios. Para o efeito utilizaram 9 bombeiros do género masculino ( $h = 1,75$  m,  $w = 85,7$  kg e  $B_f = 20\%$ ), vestidos com roupa de proteção individual de combate a incêndios, que foram submetidos a um protocolo que incluía duas fases de

exercício (de 20 minutos cada uma) e uma fase de recuperação de 15 minutos. Ou seja, para além do período de uniformização inicial, o protocolo de ensaio tinha uma duração total de 55 minutos repartidos por: 1ª fase de exercício, fase de recuperação, 2ª fase de exercício.

Durante o ensaio os bombeiros ingeriram água por duas vezes, 100 mL a uma temperatura de 11°C antes da 1ª fase de exercício e 5 mL/kg (de massa corporal) a uma temperatura de ~19°C no início da fase de recuperação.

Relativamente às características do VPI apenas é dada a informação que os bombeiros usavam vestuário de proteção para combate a incêndios estruturais. Com base nessa informação, assumiu-se que o VPI teria um  $I_{cl,global} = 2,44$  clo,  $F_{pcl} = 0,22$  e  $\varepsilon = 0,84$ .

A fase de uniformização termofisiológica não se encontra descrita no artigo de Barr *et al.* (2009). Como tal considerou-se a seguinte: duração de 120 minutos; pessoa com atividade metabólica baixa ( $M = 0,8$  met) e pessoa integralmente nua ( $I_{cl} = 0$  clo); não existe radiação incidente; temperatura ambiente envolvente ( $T_{ar}$ ) e média radiante ( $T_{mr}$ ) de 29°C; velocidade do ar  $v_{ar} = 0,1$  m/s e a humidade relativa  $HR = 50\%$ .

As fases de exercício consistiram em colocar os bombeiros no interior de uma câmara climática com um ambiente térmico muito quente e seco, caracterizado por  $T_{ar} = T_{mr} = 49,6^\circ\text{C}$ ,  $HR = 13\%$  e  $v_{ar}$  desconhecida (tendo-se assumido nas simulações  $v_{ar} = 0,2$  m/s), onde caminharam a uma velocidade de 5 km/h sobre uma passadeira com uma inclinação de 7,5% (assumindo-se nas simulações  $M = 5$  met). Nestas fases os bombeiros usaram o VPI completo.

A fase de recuperação decorreu no interior de um espaço termicamente moderado,  $T_{ar} = T_{mr} = 21^\circ\text{C}$  e  $HR$  e  $v_{ar}$  desconhecidas, onde descansaram sentados (tendo-se admitido nas simulações  $HR = 60\%$ ,  $v_{ar} = 0,5$  m/s e  $M = 0,8$  met). Nesta fase os bombeiros retiraram o capacete, a cogula, o casaco, as luvas e o equipamento individual de respiração (tendo-se assumido nas simulações  $I_{cl,global} = 1,58$  clo,  $F_{pcl} = 0,41$  e  $\varepsilon = 0,89$ ). Foram testadas duas técnicas de arrefecimento corporal, aplicadas apenas durante a fase de recuperação: (i) arrefecimento passivo (AP) em que os indivíduos se limitaram a permanecer sentados; e (ii) AP reforçado com o vestir de um colete de gelo (ACG) e simultaneamente a imersão das mãos e antebraços (AAF) em água a 19°C.

Apenas a temperatura profunda do corpo humano ( $T_p$ ) e a temperatura média da pele ( $T_{sk}$ ) aparecem detalhadas na publicação Barr *et al.* (2009), como tal só é viável utilizar estas duas variáveis no teste e validação do programa.

- **Caso 5 – Colburn *et al.*, 2011**

Este estudo teve como objetivo verificar a eficácia de técnicas de arrefecimento ativo e de arrefecimento passivo na redução do stress térmico de bombeiros em combate a incêndios estruturais. Para tal contou com a participação de 25 bombeiros (23 homens e 2 mulheres,  $h = 1,77 \pm 0,65$  m,  $w = 95,7 \pm 22,2$  kg e  $B_f = 19 \pm 6,8\%$ ), equipados com VPI e equipamento individual de respiração que foram submetidos a um protocolo que incluía uma fase de exercício (de 20 minutos) e uma fase de recuperação (de 30 minutos). Ou seja, para além do período de uniformização inicial e do pré-aquecimento, o protocolo de ensaio tinha uma duração total de 50 minutos.

Durante o ensaio os bombeiros ingeriram água por duas vezes, 100 mL a uma temperatura de 11°C antes da fase de exercício e 500 mL a temperatura ambiente no início da fase de recuperação (assumindo-se nas simulações  $T = 21^\circ\text{C}$ ).

Neste estudo existe falta de informação relativa ao VPI usado pelos bombeiros. É feita apenas uma descrição genérica das várias peças de roupa vestidas. Com base na informação existente assumiu-se que os bombeiros usavam um VPI com  $I_{cl,global} = 2,46$  clo,  $F_{pcl} = 0,21$  e  $\varepsilon = 0,84$ .

A fase de uniformização termofisiológica não se encontra descrita no artigo de Colburn *et al.* (2011). Como tal considerou-se a seguinte: duração de 120 minutos; pessoa com atividade metabólica baixa ( $M = 0,8$  met) e pessoa integralmente nua ( $I_{cl} = 0$  clo); não existe radiação incidente; temperatura ambiente envolvente ( $T_{ar}$ ) e média radiante ( $T_{mr}$ ) de 32°C; velocidade do ar  $v_{ar} = 0,1$  m/s e a humidade relativa  $HR = 50\%$ .

A fase de pré-aquecimento não é descrita com detalhe neste artigo, tendo-se assumido os seguintes dados: duração de 10 minutos; pessoa com nível de atividade médio ( $M = 1,5$  met) e pessoa vestida ( $I_{cl} = 0,80$  clo,  $F_{pcl} = 0,48$  e  $\varepsilon = 0,91$ ); não existe radiação incidente; temperatura ambiente envolvente ( $T_{ar}$ ) e média radiante ( $T_{mr}$ ) de 27°C; velocidade do ar  $v_{ar} = 0,3$  m/s e a humidade relativa  $HR = 60\%$ .

A fase de exercício consistiu em colocar os bombeiros no interior de um edifício com um ambiente térmico muito quente e seco, com  $T_{ar}$ ,  $HR$  e  $v_{ar}$  desconhecidas (tendo-se

assumido nas simulações  $T_{ar} = T_{mr} = 50^{\circ}\text{C}$ ,  $HR = 13\%$  e  $v_{ar} = 0,2$  m/s), onde combateram um incêndio simulado (assumindo-se nas simulações  $M = 3$  met). Nestas fases os bombeiros usaram o VPI completo.

Na fase de recuperação os bombeiros retiraram o capacete, cogula, luvas, casaco, equipamento individual de respiração, desapertaram as calças e permaneceram sentados (admitindo-se nas simulações os seguintes valores:  $I_{cl,global} = 1,60$  clo,  $F_{pcl} = 0,33$ ,  $\varepsilon = 0,88$  e  $M = 0,8$  met). Foram testadas três técnicas de arrefecimento corporal, aplicadas apenas durante a fase de recuperação: (i) arrefecimento passivo (AP) em que os indivíduos se limitaram a permanecer sentados no interior de um reboque médico com ar condicionado, caracterizado por  $T_{ar} = T_{mr} = 22,2^{\circ}\text{C}$ ,  $HR$  e  $v_{ar}$  desconhecidas (admitindo-se nas simulações  $HR = 60\%$  e  $v_{ar} = 0,3$  m/s); (ii) imersão de mãos e antebraços em água fria (AAF) a uma temperatura de  $20,9^{\circ}\text{C}$ ; e (iii) AP reforçado com o vestir de um colete de gelo (ACG). A aplicação das técnicas de arrefecimento (ii) e (iii) decorreu no interior de um espaço termicamente moderado,  $T_{ar} = T_{mr} = 22,5^{\circ}\text{C}$ ,  $HR = 47,2\%$  e  $v_{ar}$  desconhecida (tendo-se admitido nas simulações  $v_{ar} = 0,5$  m/s).

Na publicação de Colburn *et al.* (2011) apenas aparece informação utilizável na validação em curso da temperatura profunda do corpo humano ( $T_p$ ), como tal será esta a variável a utilizar para efeitos de validação do programa.

- **Caso 6 – Hostler *et al.*, 2010**

Neste estudo, 18 indivíduos (14 homens e 4 mulheres com  $h = 1,76 \pm 0,55$  m,  $w = 80,2 \pm 12,2$  kg e  $B_f = 14,7 \pm 7,0\%$ ), equipados com VPI e equipamento individual de respiração, foram submetidos a um protocolo que incluía duas fases de trabalho (de 50 minutos cada), duas fases de recuperação (de 20 minutos cada) e quatro períodos (de 5 minutos cada um) de transição entre as fases anteriores. Ou seja, para além dos períodos de uniformização inicial e de estabilização, o protocolo de ensaio tinha uma duração total de 160 minutos repartidos por: 1ª fase de exercício, período de transição, 1ª fase de recuperação, período de transição, 2ª fase de exercício, período de transição, 2ª fase de recuperação, período de transição.

No decorrer do ensaio os participantes ingeriram água por duas vezes, 400-600 mL de água uma hora antes do início do ensaio e 500 mL no início de cada fase de recuperação (tendo-se admitido nas simulações  $T$  (água ingerida) =  $21^{\circ}\text{C}$ ).

Relativamente à caracterização do VPI, este estudo apresenta apenas uma descrição genérica das várias peças de roupa que o constituem. Com base na informação dada assumiu-se que os bombeiros usavam um VPI com  $I_{cl,global} = 2,45$  clo,  $F_{pcl} = 0,24$  e  $\varepsilon = 0,84$ .

A fase de uniformização termofisiológica não se encontra descrita no artigo de Hostler *et al.* (2010). Como tal considerou-se a seguinte: duração de 120 minutos; pessoa com atividade metabólica baixa ( $M = 0,8$  met) e pessoa integralmente nua ( $I_{cl} = 0$  clo); não existe radiação incidente; temperatura ambiente envolvente ( $T_{ar}$ ) e média radiante ( $T_{mr}$ ) de  $27^{\circ}\text{C}$ ; velocidade do ar  $v_{ar} = 0,1$  m/s e a humidade relativa  $HR = 50\%$ .

Uma vez que a fase de estabilização também não é descrita neste artigo, assumiram-se os seguintes dados: duração de 30 minutos; pessoa com atividade metabólica baixa ( $M = 1,0$  met) e pessoa vestida ( $I_{cl} = 0,80$  clo,  $F_{pcl} = 0,48$  e  $\varepsilon = 0,91$ ); não existe radiação incidente; temperatura ambiente envolvente ( $T_{ar}$ ) e média radiante ( $T_{mr}$ ) de  $22^{\circ}\text{C}$ ; velocidade do ar  $v_{ar} = 0,3$  m/s e a humidade relativa  $HR = 50\%$ .

A fase de exercício decorreu no interior de uma câmara climática com  $T_{ar} = T_{mr} = 35,1^{\circ}\text{C}$ ,  $HR$  e  $v_{ar}$  desconhecidas (admitindo-se nas simulações  $HR = 50\%$  e  $v_{ar} = 0,1$  m/s). Cada ciclo de trabalho consistiu numa fase de exercício de 20 minutos em que os indivíduos caminhavam numa passadeira a uma velocidade de  $4,5$  km/h e  $2,5\%$  de inclinação (tendo-se assumido  $M = 3,2$  met), seguida de uma fase de simulação de mudança da garrafa do equipamento de respiração, com a duração de 10 minutos. Esta fase é composta por dois períodos: um de 6 minutos de trabalho leve (caminhar sobre a passadeira a uma velocidade de  $2,5$  km/h e  $0\%$  de inclinação, assumindo-se  $M = 1,6$  met nas simulações) e um de 4 minutos de descanso em pé (tendo sido admitido nas simulações  $M = 1,2$  met). Concluídos estes 10 minutos, segue-se outra fase de exercício de 20 minutos.

Após a segunda fase de trabalho de 20 minutos, segue-se uma fase de repouso de 20 minutos. Nestas fases os indivíduos usaram o VPI completo.

Para permitir que os indivíduos se vestissem/despissem e movimentassem entre a câmara climática e a sala de recuperação, foram aplicados períodos de transição de 5 minutos no fim de cada ciclo de trabalho e de recuperação (assumindo-se nas simulações os seguintes valores:  $I_{cl,global} = 1,99$  clo,  $F_{pcl} = 0,32$ ,  $\varepsilon = 0,87$  e  $M = 1,2$  met).

A fase de recuperação decorreu no interior de um espaço termicamente moderado,  $T_{ar} = T_{mr} = 24^{\circ}\text{C}$  e  $HR$  e  $v_{ar}$  desconhecidas, onde descansaram sentados (tendo-se admitido

nas simulações  $HR = 50\%$ ,  $v_{ar} = 0,2$  m/s e  $M = 0.8$  met). Nesta fase os bombeiros retiraram o capacete, a cogula, o casaco, as luvas e o equipamento individual de respiração (assumindo-se nas simulações  $I_{cl,global} = 1,58$  clo,  $F_{pcl} = 0,41$  e  $\varepsilon = 0,89$ ). Foram testadas quatro técnicas de arrefecimento corporal, aplicadas apenas durante a fase de recuperação: (i) arrefecimento passivo (AP); (ii) imersão de mãos e antebraços em água fria (AAF) a uma temperatura de  $14,3^{\circ}\text{C}$ ; (iii) arrefecimento corporal recorrendo a um ventilador (ApV) em que a velocidade do vento atingiu cerca de  $7,2$  km/h; e (iv) AP reforçado com o vestir de um colete de gelo (ACG).

Apenas a temperatura profunda do corpo humano ( $T_p$ ) aparece detalhada na publicação Hostler *et al.* (2010), como tal como tal só é viável utilizar esta a variável para efeitos de validação do programa.

- **Caso 7 – Carter *et al.*, 1999**

Este estudo contou com a participação de 12 bombeiros profissionais (todos homens,  $h = 1,79 \pm 0.62$  m,  $w = 81,6 \pm 7$  kg e  $B_f$  desconhecida, tendo-se assumido nas simulações  $B_f = 20\%$ ), equipados com VPI e equipamento individual de respiração, foram submetidos a um protocolo que incluía duas fases de trabalho (de 10 minutos cada) e duas fases de recuperação (de 10 minutos cada). Ou seja, para além dos períodos de uniformização inicial e de pré-aquecimento, o protocolo de ensaio tinha uma duração total de 40 minutos repartidos por: 1ª fase de exercício, 1ª fase de recuperação, 2ª fase de exercício, 2ª fase de recuperação.

Durante o ensaio os bombeiros ingeriram 500 mL de água no início de cada fase de recuperação (tendo-se admitido nas simulações  $T$  (água ingerida) =  $21^{\circ}\text{C}$ ).

Relativamente à caracterização do VPI, este estudo apresenta apenas uma descrição genérica das várias peças de roupa que o constituem. Com base na informação dada assumiu-se que os bombeiros usavam um VPI com  $I_{cl,global} = 2,46$  clo,  $F_{pcl} = 0,21$  e  $\varepsilon = 0,86$ ).

A fase de uniformização termofisiológica não se encontra descrita no artigo de Carter *et al.* (1999). Como tal considerou-se a seguinte: duração de 120 minutos; pessoa com atividade metabólica baixa ( $M = 0,8$  met) e pessoa inteiramente nua ( $I_{cl} = 0$  clo); não existe radiação incidente; temperatura ambiente envolvente ( $T_{ar}$ ) e média radiante ( $T_{mr}$ ) de  $29^{\circ}\text{C}$ ; velocidade do ar  $v_{ar} = 0,1$  m/s e a humidade relativa  $HR = 50\%$ .

A fase de pré-aquecimento também não é descrita com detalhe neste artigo, tendo-se assumido os seguintes dados: duração de 30 minutos; pessoa com atividade metabólica moderada ( $M = 1,2$  met) e pessoa vestida ( $I_{cl} = 1,54$  clo,  $F_{pcl} = 0,56$  e  $\varepsilon = 0,91$ ); não existe radiação incidente; temperatura ambiente envolvente ( $T_{ar}$ ) e média radiante ( $T_{mr}$ ) de  $35^{\circ}\text{C}$ ; velocidade do ar  $v_{ar} = 0,3$  m/s e a humidade relativa  $HR = 60\%$ .

Cada fase de exercício dura 10 minutos (prática de *step*, admitindo-se nas simulações  $M = 4,5$  met) e decorre no interior de uma câmara climática com  $T_{ar} = T_{mr} = 40^{\circ}\text{C}$ ,  $HR = 70\%$  e  $v_{ar}$  desconhecida (tendo-se admitido nas simulações  $v_{ar} = 0,2$  m/s). Nesta fase os bombeiros usaram o VPI completo.

Os períodos de recuperação são de 10 minutos em que os indivíduos, expostos às mesmas condições ambientais quentes, retiram o capacete de proteção, cogula, luvas e permanecem sentados ( $M = 0,8$  met). Nesta fase foram aplicadas as seguintes estratégias de arrefecimento: (i) arrefecimento passivo (AP) em que os indivíduos permaneceram com o equipamento de respiração e apenas desapertaram o casaco enquanto descansavam (admitindo-se nas simulações  $I_{cl,global} = 2,12$  clo,  $F_{pcl} = 0,31$  e  $\varepsilon = 0,88$ ); e (ii) arrefecimento corporal recorrendo a um ventilador (ApV) em que os indivíduos retiraram o equipamento de respiração, despiram o casaco (admitindo-se nas simulações  $I_{cl,global} = 1,12$  clo,  $F_{pcl} = 0,41$  e  $\varepsilon = 0,89$ ), e permaneceram sentados em frente ao ventilador.

Na publicação de Carter *et al.* (1999) é dado especial destaque à evolução da temperatura rectal ( $T_{re}$ ) e da temperatura timpânica ( $T_{tym}$ ), como tal serão estas as variáveis a utilizar para efeitos de validação do programa.

- **Caso 8 – Chou *et al.*, 2008**

Chou *et al.* (2009) pretendiam com o seu estudo analisar em laboratório a eficácia da técnica de arrefecimento corporal: porte de um colete de gelo quer durante as fases de exercício quer durante as fases de recuperação (ACGfCR). Para o efeito utilizaram 8 indivíduos (todos homens,  $h = 1,68 \pm 0,44$  m,  $w = 62,5 \pm 9,2$  kg e  $B_f$  desconhecida, tendo-se assumido nas simulações  $B_f = 16\%$ ), vestidos com roupa de proteção individual de combate a incêndios ( $I_{cl,global} = 2,54$  clo, assumindo-se nas simulações  $F_{pcl} = 0,21$  e  $\varepsilon = 0,84$ ), que foram submetidos a um protocolo que incluía duas fases de pré-aquecimento (de 10 minutos cada uma), uma fase de exercício de 30 minutos e uma fase de recuperação de 10 minutos. Ou seja, para além do período de uniformização inicial, o protocolo de

ensaio tinha uma duração total de 60 minutos repartidos por: 1ª fase de pré-aquecimento, 2ª fase de pré-aquecimento, 1ª fase de exercício, 1ª fase de recuperação.

A fase de uniformização termofisiológica não se encontra descrita no artigo de Chou *et al.* (2008). Como tal considerou-se a seguinte: duração de 120 minutos; pessoa com atividade metabólica baixa ( $M = 0,8$  met) e pessoa inteiramente nua ( $I_{cl} = 0$  clo); não existe radiação incidente; temperatura ambiente envolvente ( $T_{ar}$ ) e média radiante ( $T_{mr}$ ) de 30°C; velocidade do ar  $v_{ar} = 0,1$  m/s e a humidade relativa  $HR = 50\%$ .

A primeira fase de pré-aquecimento consistiu em colocar os indivíduos no interior de uma câmara climática com  $T_{ar} = T_{mr} = 25^{\circ}\text{C}$ ,  $HR = 50\%$  e  $v_{ar}$  desconhecida (tendo-se assumido nas simulações  $v_{ar} = 0,3$  m/s), onde permaneceram por um período de 10 minutos (assumindo-se nas simulações  $M = 1,0$  met).

Concluído esse período, os indivíduos foram transferidos para a sala de ensaio com um ambiente térmico quente, caracterizado por  $T_{ar} = T_{mr} = 30^{\circ}\text{C}$ ;  $HR = 50\%$  e  $v_{ar}$  desconhecida (assumindo-se nas simulações  $v_{ar} = 0,2$  m/s), onde realizaram as seguintes fases do protocolo: (i) 2ª fase de pré-aquecimento onde descansaram por mais 10 minutos ( $M = 1,0$  met); (ii) fase de exercício em que os indivíduos realizaram exercício numa bicicleta ergométrica (tendo-se assumido nas simulações  $M = 3$  met); e (iii) fase de recuperação em que os indivíduos se limitaram a permanecer sentados (assumindo-se nas simulações  $M = 0,8$  met). Nas fases de pré-aquecimento e de exercício os indivíduos estavam vestidos com VPI, colete de gelo e equipamento individual de respiração (tendo sido assumido nas simulações  $I_{cl,global} = 2,54$  clo,  $F_{pcl} = 0,28$  e  $\varepsilon = 0,90$ ). Na fase de recuperação os indivíduos usaram o VPI completo e o colete de gelo (admitindo-se nas simulações  $I_{cl,global} = 2,18$  clo,  $F_{pcl} = 0,37$  e  $\varepsilon = 0,89$ ).

Na publicação de Chou *et al.* (2009) apenas aparecem suficientemente detalhados os resultados que obtiveram para a temperatura rectal ( $T_{re}$ ) e para a temperatura média da pele ( $T_{sk}$ ), como tal serão estas as variáveis a utilizar para efeitos de validação do programa.

- **Síntese dos casos considerados**

De modo a facilitar a apresentação e a análise de resultados apresenta-se na Tabela 3.1 uma síntese das situações consideradas para efeitos de verificação de aplicabilidade e validação do programa *HuTheReg*. Cada situação é identificada pela técnica de arrefecimento corporal testada e pelo número representativo do caso em apreço. As técnicas de

arrefecimento consideradas são então: AP – Arrefecimento passivo durante o período de recuperação; AAF – Situação anterior reforçada com a imersão das mãos e antebraços em água fria (água entre 10 e 20°C); ACG – Arrefecimento passivo reforçado com o porte de um colete de gelo apenas durante o período de recuperação; ApV – Arrefecimento ativo com recurso a ventiladores durante o período de recuperação; e ACGfCR – Porte de um colete de gelo quer durante as fases de combate ao incêndio quer durante as fases de recuperação.

**Tabela 3.1 – Tabela resumo dos casos em análise**

Técnicas de arrefecimento corporal testadas						
Autor	Ref.	AP	AAF	ACG	ApV	ACGfCR
Kim <i>et al.</i> , 2013	1	AP1				
Selkirk <i>et al.</i> , 2004	2	AP2	AAF2			
Giesbrecht <i>et al.</i> , 2007	3	AP3	AAF3			
Barr <i>et al.</i> , 2009	4	AP4	AAF4	ACG4		
Colburn <i>et al.</i> , 2011	5	AP5	AAF5	ACG5		
Hostler <i>et al.</i> , 2010	6	AP6	AAF6	ACG6	ApV6	
Carter <i>et al.</i> , 1999	7	AP7			ApV7	
Chou <i>et al.</i> , 2008	8	AP8				ACGfCR8

### 3.4. Validação Estatística do Modelo

De forma a avaliar o nível de conformidade entre os resultados experimentais retirados da bibliografia e os previstos pelo programa *HuTheReg* utilizaram-se como parâmetros de análise comparativa as funções estatísticas: média aritmética das diferenças relativas ( $\delta$ ) e respetivo desvio padrão ( $\sigma$ ), o desvio quadrático médio ( $DQM$ ) e o coeficiente de correlação de Pearson ( $r$ ).

Considere-se um conjunto de  $n$  medições experimentais de valor  $x_i$  e um outro conjunto de  $n$  previsões do programa *HuTheReg* de valor  $y_i$ . Se os dois conjuntos anteriores poderem ser considerados como emparelhados, ou seja, se os dados de cada par  $(x_i, y_i)$  forem obtidos exatamente para as mesmas condições, a média das diferenças relativas  $(x_i - y_i)$  é dada por:

$$\delta = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)}{n} \quad (3.1)$$

que no caso de resultar um valor positivo indica que globalmente os resultados experimentais têm um valor superior aos previstos pelo programa e vice-versa.

Para avaliar a dispersão dos valores obtidos para as diferenças relativas ( $x_i - y_i$ ) recorre-se ao seu desvio padrão, obtido através da expressão

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n [(x_i - y_i) - \delta]^2}{n - 1}} \quad (3.2)$$

em que no caso de resultar um valor nulo para  $\sigma$  não existe dispersão, ou seja, todas as diferenças relativas têm o mesmo valor. Por outro lado, valores elevados são indicativos de elevada dispersão.

De modo a reforçar a segurança da análise, recorre-se também ao desvio quadrático médio, definido como

$$DQM = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2}{n}} \quad (3.3)$$

Genericamente quanto menor for o valor de  $DQM$  mais próximos estão os valores previstos dos experimentais e vice-versa.

Para analisar a relação existente, entre a evolução temporal dos valores previstos pelo programa a evolução temporal dos correspondentes valores experimentais, recorre-se ao coeficiente de correlação de Pearson, definido como

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n [(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})]}{\sqrt{\sum_{i=1}^n [(x_i - \bar{x})^2] \sum_{i=1}^n [(y_i - \bar{y})^2]}} \quad (3.4)$$

em que  $\bar{x}$  representa a média dos valores ( $x_i$ ) medidos experimentalmente e  $\bar{y}$  representa a média dos valores ( $y_i$ ) previstos pelo programa.

O coeficiente de Pearson pode assumir valores entre -1 e +1. Valores positivos significam “evoluções no mesmo sentido” e valores negativos significam “evoluções em sentido divergente”. Particularizando,  $r = +1$  corresponderá à situação ideal, em que ambos os resultados evoluem paralelamente. Por sua vez,  $r = -1$  significará uma divergência completa dos resultados em termos de evolução temporal. Já para outros valores, que não os dois extremos, não existe um critério universalmente aceite para a relação entre o valor do coeficiente de Pearson e o nível de qualidade da correlação entre as séries de valores em

---

comparação. Por exemplo, segundo Cohen (1988):  $0,10 \leq r < 0,30 \rightarrow$  correlação fraca;  $0,30 \leq r < 0,50 \rightarrow$  moderada; e  $0,50 \leq r < 1,0 \rightarrow$  forte. Por outro lado Dancey & Reidy (2006) sugerem:  $0,10 \leq r < 0,40 \rightarrow$  correlação fraca;  $0,40 \leq r < 0,70 \rightarrow$  moderada; e  $0,70 \leq r < 1,0 \rightarrow$  forte.

Neste trabalho adotou-se a seguinte escala de correlação:  $r < 0,0 \rightarrow$  divergência;  $0,0 \leq r < 0,20 \rightarrow$  não existe correlação;  $0,20 \leq r < 0,40 \rightarrow$  correlação muito fraca;  $0,40 \leq r < 0,60 \rightarrow$  fraca;  $0,60 \leq r < 0,80 \rightarrow$  moderada;  $0,80 \leq r < 0,90 \rightarrow$  forte;  $0,90 \leq r < 0,95 \rightarrow$  muito forte; e  $0,95 \leq r < 1,0 \rightarrow$  excelente.



## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Este capítulo destina-se, essencialmente, a avaliar a aplicabilidade e fiabilidade do programa *HuTheReg* em simular o comportamento termofisiológico do corpo humano durante o processo de aquecimento e de arrefecimento em situações de elevado stress térmico, como o que acontece numa situação de um bombeiro em combate em um incêndio de alta intensidade.

A análise e discussão que se segue são baseadas na representação gráfica dos resultados previstos pelo programa e dos correspondentes experimentais, retirados da bibliografia científica. Para avaliar a precisão dos resultados numéricos obtidos são ainda utilizadas as funções estatísticas descritas na Secção 3.4.

A referenciação dos casos utilizada é a que consta na Tabela 3.1, onde é apresentada uma lista das situações consideradas neste trabalho.

De modo a facilitar a apresentação e a análise de resultados dividiu-se este Capítulo em duas secções, em que se apresentam as situações relativas a: (i) técnicas de arrefecimento corporal aplicadas apenas durante a fase de recuperação; e (ii) técnicas de arrefecimento corporal aplicadas durante todo o ensaio.

As técnicas de arrefecimento aplicadas apenas durante a fase de recuperação são: AP – Arrefecimento passivo; AAF – Situação anterior reforçada com a imersão das mãos e antebraços em água fria (água entre 10 e 20°C); ACG – Arrefecimento passivo reforçado com o porte de um colete de gelo; e ApV – Arrefecimento ativo com recurso a ventiladores.

Em termos de técnicas de arrefecimento corporal aplicadas durante todo o ensaio só considerou o caso ACGfCR – Porte de um colete de gelo quer durante as fases de combate ao incêndio quer durante as fases de recuperação.

## 4.1. Arrefecimento Apenas Durante a Fase de Recuperação

### 4.1.1. Arrefecimento passivo – AP

Apresenta-se nas Figura 4.1 a Figura 4.9 a comparação entre os valores medidos (pontos) e os previstos pelo programa *HuTheReg* (linhas) dos parâmetros indicativos do estado termofisiológico dos bombeiros no decurso dos protocolos de combate a incêndios de alta intensidade. Estes resultados dizem respeito apenas às situações em que o arrefecimento corporal é passivo e aplicado exclusivamente durante a fase de recuperação.

- **Caso AP1**

Na Figura 4.1 apresentam-se os resultados para a temperatura profunda do corpo ( $T_p$ ) e para a temperatura média da pele ( $T_{sk}$ ), relativos ao caso 1, em que os resultados experimentais (pontos) foram obtidos por Kim *et al.* (2013).

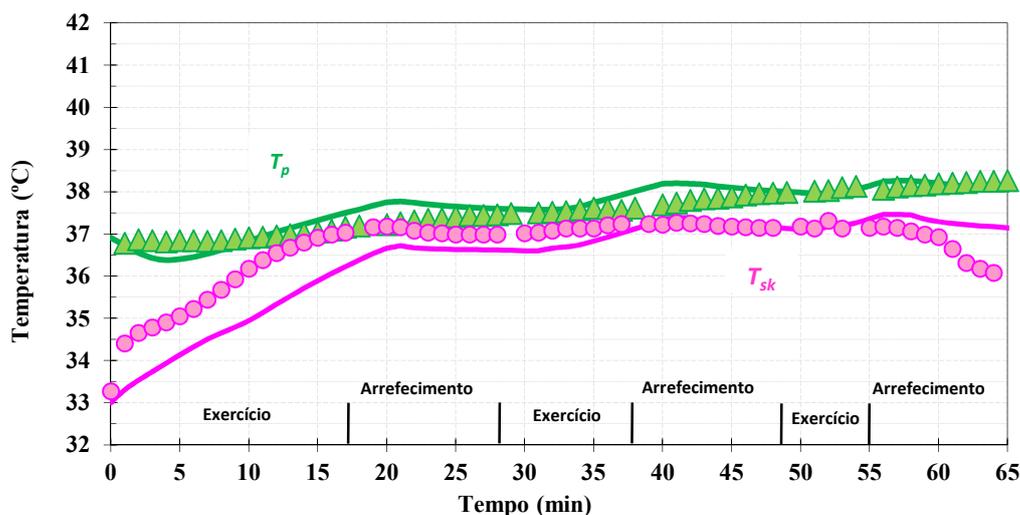


Figura 4.1 - Valores medidos (pontos) e previstos (linhas) obtidos para as temperaturas  $T_p$  e  $T_{sk}$  no caso 1, em que a recuperação é efetuada com recurso ao arrefecimento passivo.

- **Caso AP2**

Os resultados apresentados na Figura 4.2 dizem respeito à relação entre os valores medidos (pontos) e previstos (linhas) das temperaturas rectal ( $T_{re}$ ) e média da pele ( $T_{sk}$ ) obtidos no caso 2. Os resultados experimentais deste caso foram medidos por Selkirk *et al.* (2004).

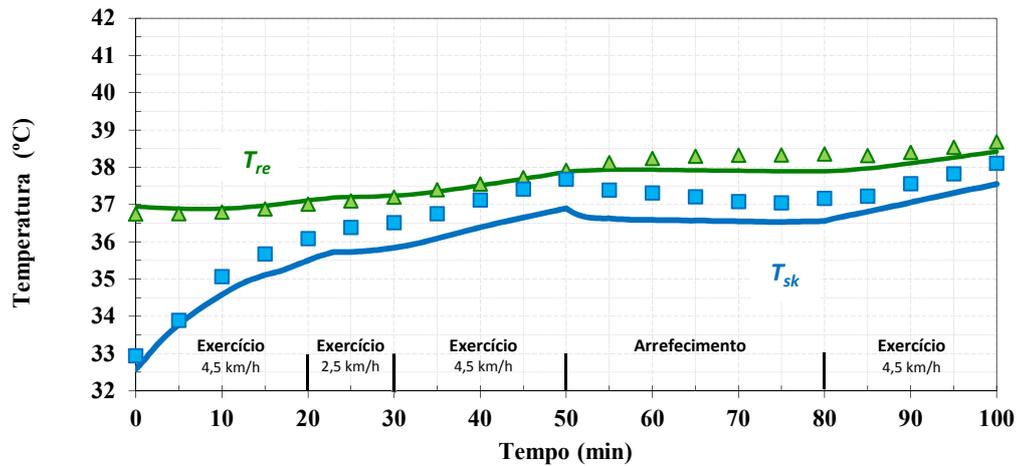


Figura 4.2 - Valores medidos (pontos) e previstos (linhas) obtidos para as temperaturas  $T_{re}$  e  $T_{sk}$  no caso 2, em que a recuperação é efetuada com recurso ao arrefecimento passivo.

• **Caso AP3**

Na Figura 4.3 mostra-se a relação entre os valores medidos (pontos) e os previstos pelo programa *HuTheReg* (linhas) relativos aos indivíduos submetidos ao protocolo do caso 3, em que os valores experimentais foram medidos por Giesbrecht *et al.* (2007). A comparação é efectuada entre as previsões numéricas do fluxo de calor total perdido pelo corpo humano e as correspondentes valores experimentais (neste caso apenas um valor). Já a temperatura timpânica medida ( $T_{tym}$ ) é comparada com o valor previsto pelo programa para a temperatura no hipotálamo ( $T_{hyp}$ ). Está-se consciente de que neste último caso se está a comparar temperaturas em pontos diferentes do corpo humano. No entanto, existem vários autores (p. ex. Raimundo & Figueiredo, 2009) que sugerem que estas temperaturas são muito próximas.

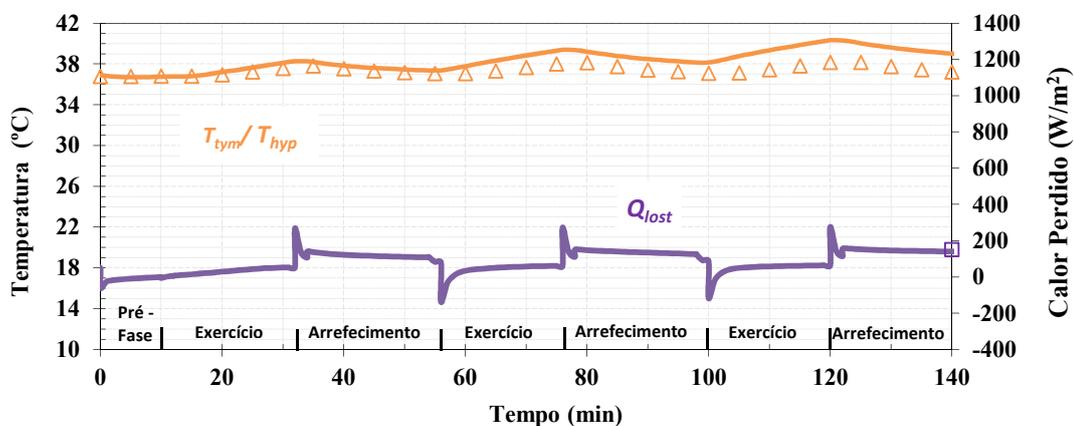


Figura 4.3 - Valores medidos (pontos) e previstos (linhas) obtidos para a temperatura timpânica ( $T_{tym}$ ) e calor perdido ( $Q_{lost}$ ) no caso 3, em que a recuperação é efetuada com recurso ao arrefecimento passivo.

- **Caso AP4**

A Figura 4.4 diz respeito à comparação entre os valores medidos (pontos) e previstos (linhas) para a temperatura profunda do corpo ( $T_p$ ) e para a temperatura média da pele ( $T_{sk}$ ), obtidos no caso 4. Os valores experimentais deste caso foram medidos por Barr *et al.* (2009).

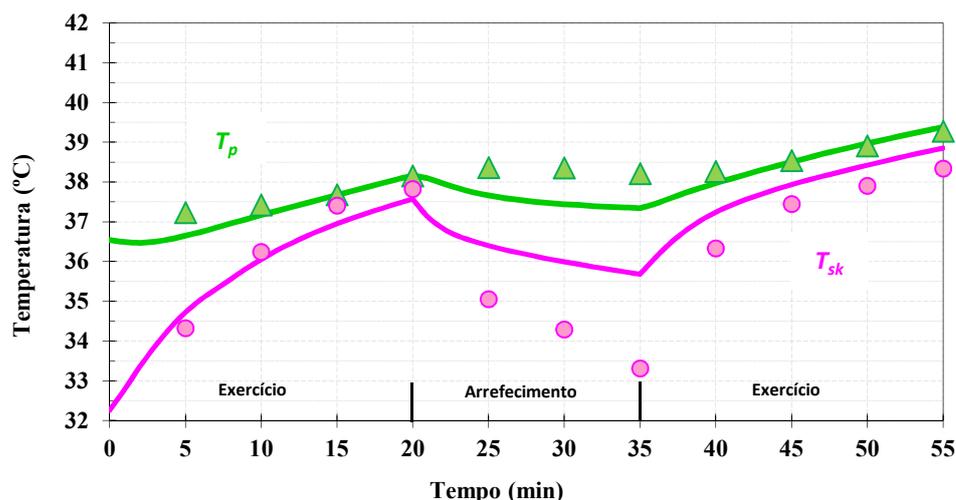


Figura 4.4 - Valores medidos (pontos) e previstos (linhas) obtidos para as temperaturas  $T_p$  e  $T_{sk}$  no caso 4, em que a recuperação é efetuada com recurso ao arrefecimento passivo.

- **Caso AP5**

Na Figura 4.5 são apresentados os valores medidos (pontos) e previstos (linhas) para a temperatura profunda do corpo ( $T_p$ ) dos indivíduos submetidos ao protocolo do caso 5, em que os resultados experimentais foram obtidos por Colburn *et al.* (2011).

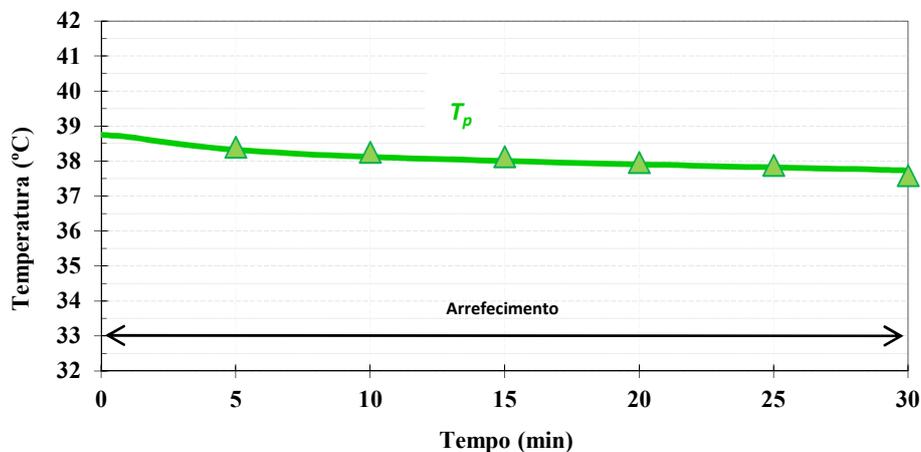


Figura 4.5 - Valores medidos (pontos) e previstos (linhas) obtidos para a  $T_p$  no caso 5, em que a recuperação é efetuada com recurso ao arrefecimento passivo.

- **Caso AP6**

Os resultados apresentados na Figura 4.6 dizem respeito à relação entre os valores medidos (pontos) e previstos (linhas) da temperatura profunda do corpo ( $T_p$ ) obtidos no caso 6. Neste caso, os resultados experimentais foram medidos por Hostler *et al.* (2010).

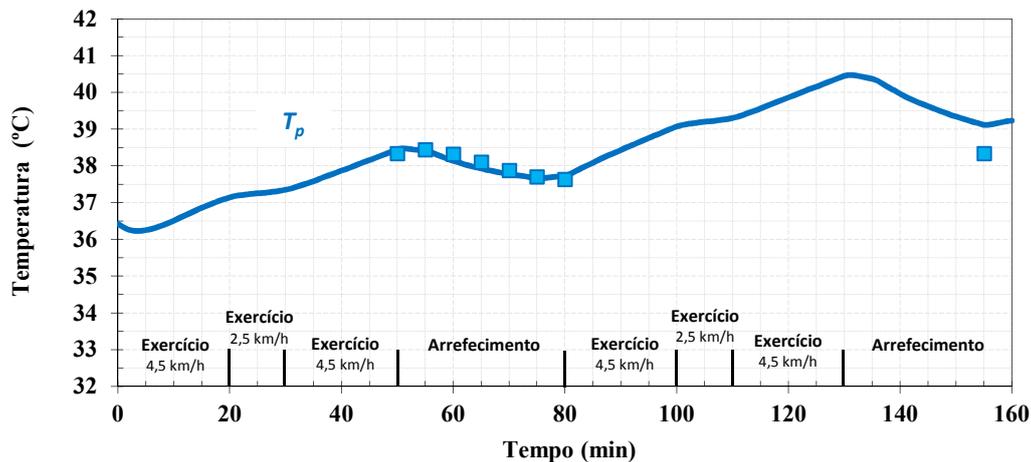


Figura 4.6 - Valores medidos (pontos) e previstos (linhas) obtidos para a  $T_p$  no caso 6, em que a recuperação é efetuada com recurso ao arrefecimento passivo.

- **Caso AP7**

Nas Figura 4.7 e Figura 4.8 é apresentada a comparação entre os valores medidos (pontos) e previstos pelo programa (linhas) obtidos no caso 7. Os valores experimentais deste caso em análise foram medidos por Carter *et al.* (1999). A Figura 4.7 diz respeito à temperatura rectal ( $T_{re}$ ) e timpânica ( $T_{tym}$ ) e na Figura 4.8 são apresentadas as temperaturas na pele no peito ( $T_{sk,peito}$ ), nos braços ( $T_{sk,braços}$ ) e nas coxas ( $T_{sk,coxas}$ ).

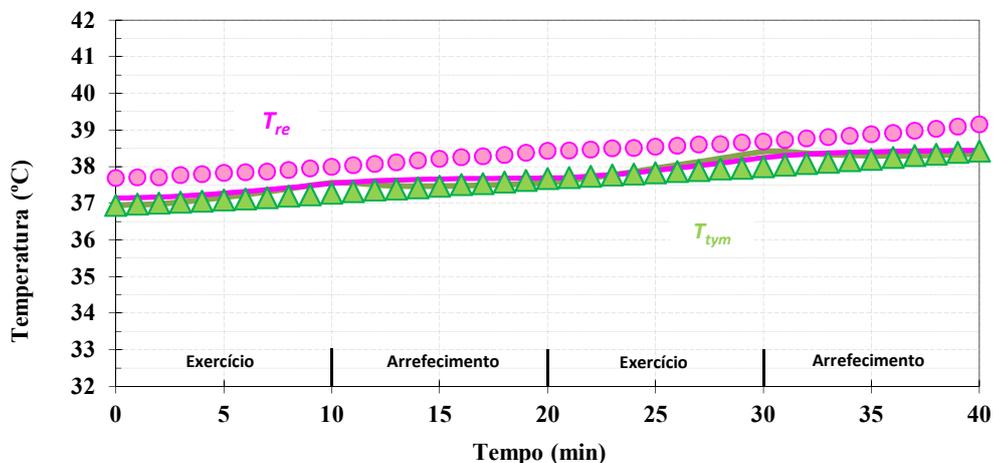


Figura 4.7 - Valores medidos (pontos) e previstos (linhas) obtidos para as temperaturas  $T_{re}$  e  $T_{tym}$  no caso 7, em que a recuperação é efetuada com recurso ao arrefecimento passivo.

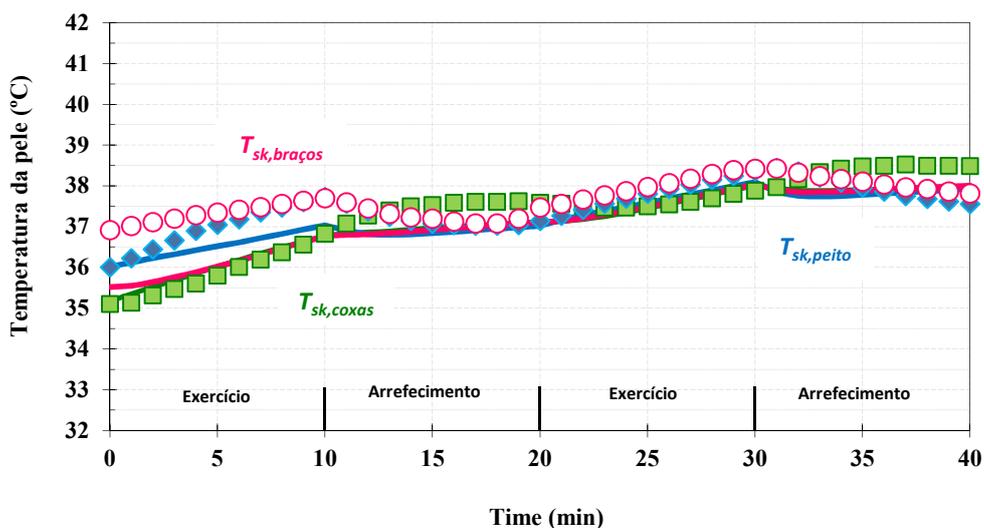


Figura 4.8 - Valores medidos (pontos) e previstos (linhas) obtidos para a temperatura da pele do peito, braços e coxas no caso 7, em que a recuperação é efetuada com recurso ao arrefecimento passivo.

- **Caso AP8**

A Figura 4.9 apresenta os resultados dos valores medidos (pontos) e previstos (linhas) da temperatura rectal ( $T_{re}$ ) e da temperatura média da pele ( $T_{sk}$ ), obtidos no caso 8. Os resultados experimentais deste caso foram medidos por Chou *et al.* (2008).

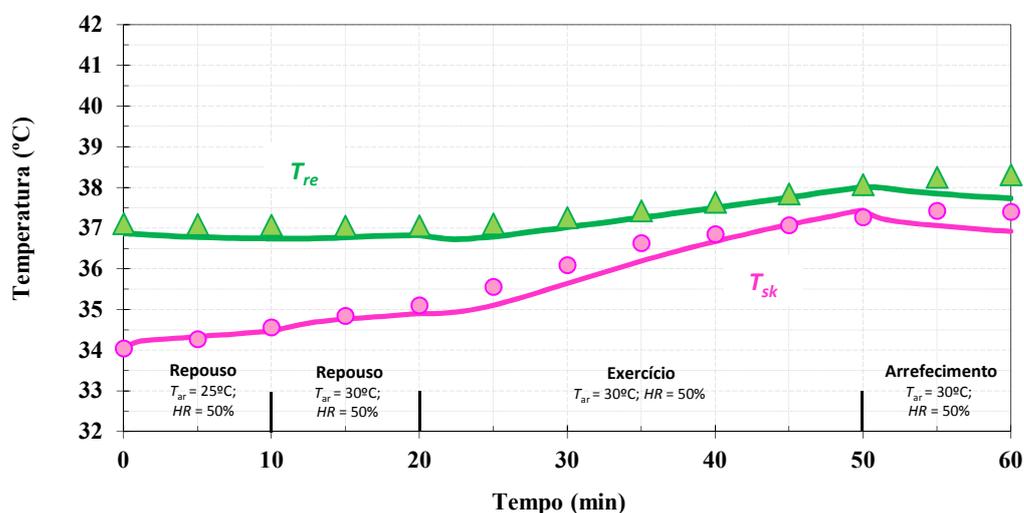


Figura 4.9 - Valores medidos (pontos) e previstos (linhas) obtidos para as temperaturas  $T_{re}$  e  $T_{sk}$  no caso 8, em que a recuperação é efetuada com recurso ao arrefecimento passivo.

- **Notas conclusivas**

Como é possível verificar nos gráficos acima ilustrados anteriormente (Figura 4.1 a Figura 4.9) é nítida a capacidade do programa para prever com precisão a evolução das

temperaturas corporal profunda ( $T_p$ ), rectal ( $T_{re}$ ) e timpânica ( $T_{tym}$ ), bem como o calor total perdido pelo corpo humano ( $Q_{lost}$ ). Por sua vez, como se pode verificar nas Figura 4.1, Figura 4.2, Figura 4.4 e Figura 4.9 a qualidade com que a temperatura da pele ( $T_{sk}$ ) é prevista já não é a mesma. Apesar de acompanhar o comportamento dos valores experimentais, há um afastamento. Este pode ser devido a cinco motivos: (i) por não se conhecer com precisão suficiente todos os detalhes relativos às fases a que os indivíduos são submetidos ao longo dos protocolos, nomeadamente a falta de informação relativa ao vestuário que usam; (ii) diferentes modos de determinar a temperatura média da pele, pois enquanto o programa faz uma média ponderada (pela área de pele) das temperaturas nos 22 segmentos em que supostamente divide o corpo humano, nos ensaios experimentais  $T_{sk}$  é obtida por média aritmética das medições em determinados pontos da pele (entre 5 e 11 pontos); (iii) falta de capacidade de previsão do programa; (iv) erros de medição; e (v) “indivíduo virtual” e “pessoas reais” com estados termofisiológicos diferentes no início dos ensaios. Este último aspecto é deveras importante visto ter influência significativa no comportamento termofisiológico humano e na generalidade dos casos a bibliografia científica consultada não dar informação suficiente para se poder estabelecer a “uniformização inicial”.

Face ao exposto pode considerar-se que o *software* demonstrou ter uma boa capacidade de previsão da resposta termofisiológica do corpo humano quando exposto às condições envolvidas em cada caso analisado.

#### **4.1.2. Arrefecimento por imersão das mãos e antebraços em água fria – AAF**

De um modo semelhante ao caso anterior apresentam-se nas Figura 4.10 a Figura 4.14 os resultados obtidos para os valores medidos (pontos) e previstos pelo programa *HuTheReg* (linhas), dos parâmetros indicativos do estado termofisiológico dos bombeiros submetidos aos protocolos em que o arrefecimento é efetuado por imersão das mãos e dos antebraços em água fria.

- **Caso AAF2**

Na Figura 4.10 apresenta-se a relação entre os valores medidos (pontos) e previstos (linhas) obtidos para as temperaturas rectal ( $T_{re}$ ) e média da pele ( $T_{sk}$ ) no caso 2, em que os

resultados experimentais foram medidos por Selkirk *et al.* (2004). A fase de recuperação deste estudo consistiu no arrefecimento por imersão das mãos e dos antebraços em água a uma temperatura de 17,4°C.

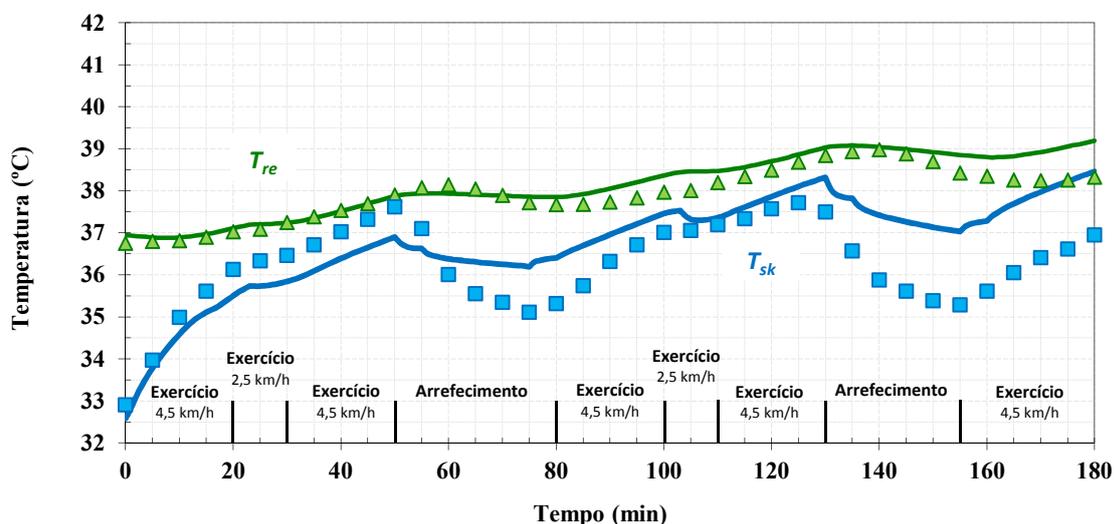
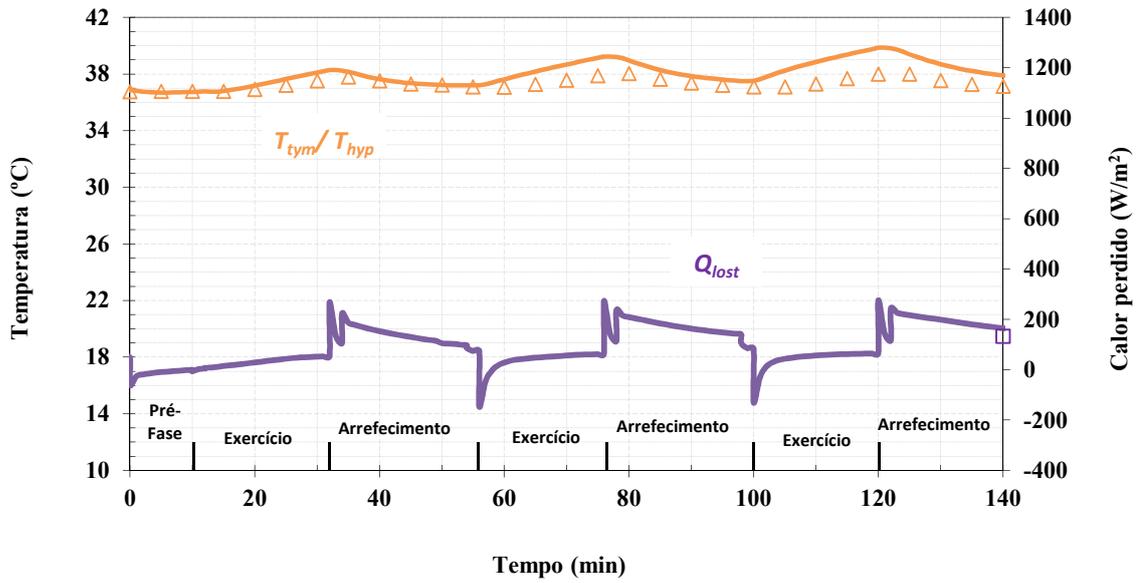


Figura 4.10 - Valores medidos (pontos) e previstos (linhas) obtidos para as temperaturas  $T_{re}$  e  $T_{sk}$  no caso 2, em que o arrefecimento é efetuado por imersão das mãos e dos antebraços em água a 17,4°C.

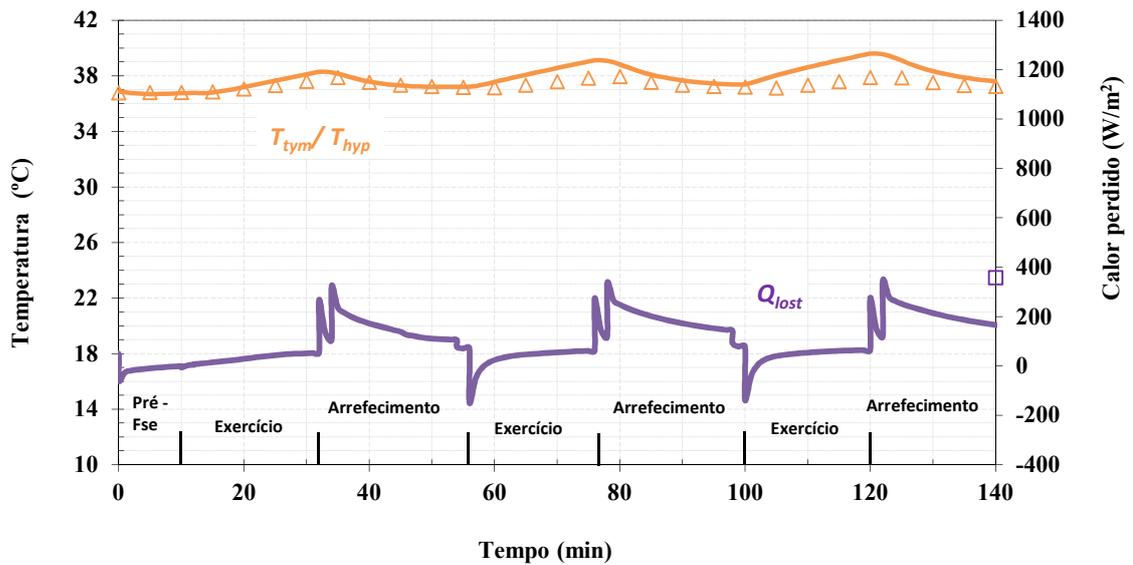
- **Caso AAF3**

Os resultados apresentados nas Figura 4.11 e Figura 4.12 dizem respeito à relação entre os valores medidos (pontos) e previstos pelo programa *HuTheReg* (linhas), relativos aos indivíduos submetidos ao protocolo do caso 3. Os valores experimentais (pontos) foram medidos por Giesbrecht *et al.* (2007). A comparação é efetuada entre as previsões numéricas do fluxo de calor total perdido pelo corpo humano e as correspondentes valores experimentais (neste caso apenas um valor em cada caso). Já a temperatura timpânica medida ( $T_{tym}$ ) é comparada com o valor previsto pelo programa para a temperatura no hipotálamo ( $T_{hyp}$ ).

Na Figura 4.11 o arrefecimento é efetuado por imersão das mãos (a) e imersão das mãos e dos antebraços, em água a 20°C (b). Na Figura 4.12 as técnicas de arrefecimento são as mesmas, mas a água encontra-se a 10°C.

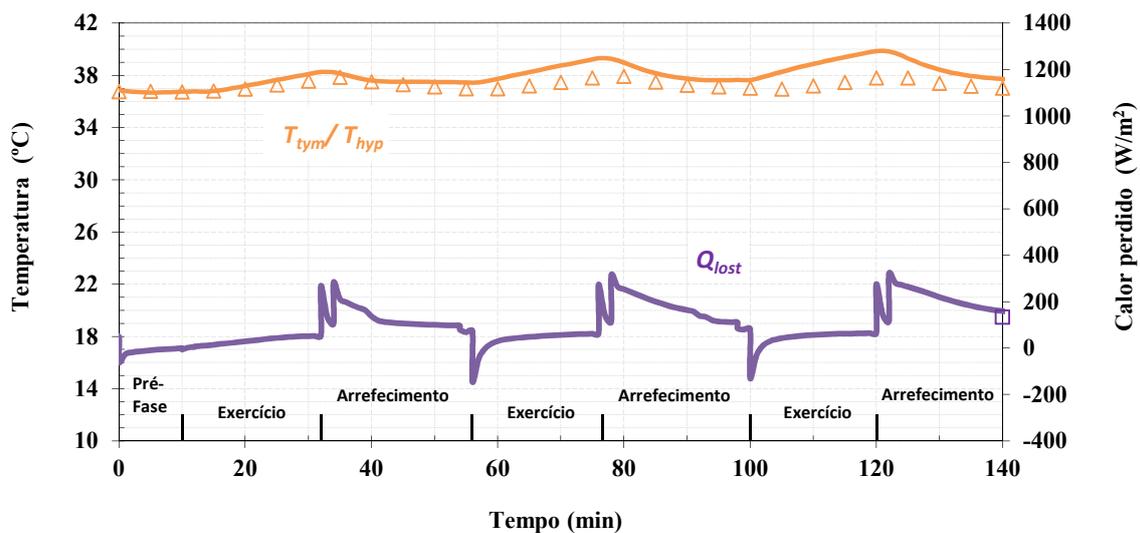


(a)

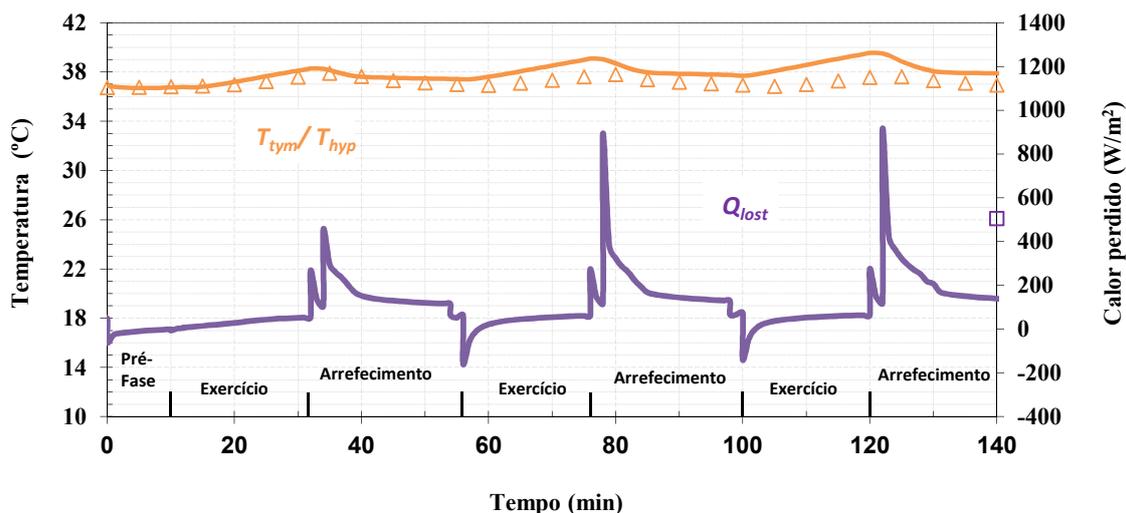


(b)

Figura 4.11 - Valores medidos (pontos) e previstos (linhas) obtidos para a temperatura timpânica ( $T_{tym}$ ) e calor perdido ( $Q_{lost}$ ) no caso 3, em que o arrefecimento é efetuado por imersão das mãos (a) e imersão das mãos e dos antebraços (b), em água a 20°C.



(a)



(b)

Figura 4.12 - Valores medidos (pontos) e previstos (linhas) obtidos para a temperatura timpânica ( $T_{tym}$ ) e calor perdido ( $Q_{lost}$ ) no caso 3, em que o arrefecimento é efetuado por imersão das mãos (a) e imersão das mãos e dos antebraços (b), em água a 10°C.

- **Caso AAF5**

Na Figura 4.13 é apresentada a comparação entre os valores medidos (pontos) e previstos (linhas) para a temperatura corporal profunda ( $T_p$ ) dos indivíduos submetidos ao protocolo do caso 5, em que os resultados experimentais foram medidos por Colburn *et al.* (2011). Neste caso, o arrefecimento é efetuado por imersão apenas dos antebraços em água a uma temperatura de 20,9°C.

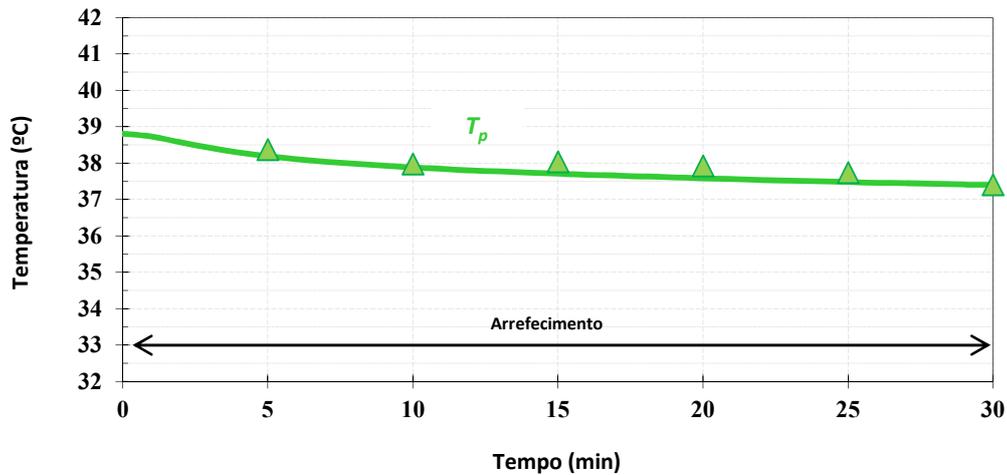


Figura 4.13 - Valores medidos (pontos) e previstos (linhas) obtidos para a  $T_p$  no caso 5, em que o arrefecimento é efetuado por imersão dos antebraços em água a 20,9°C.

- **Caso AAF6**

A Figura 4.14 diz respeito à comparação entre os valores medidos (pontos) e previstos (linhas) da temperatura corporal profunda ( $T_p$ ) no caso 6, em que os resultados experimentais foram obtidos por Hostler *et al.* (2010). Neste caso, os reservatórios para a imersão das mãos e dos antebraços foram encheidos com água a uma temperatura de 14,3°C.

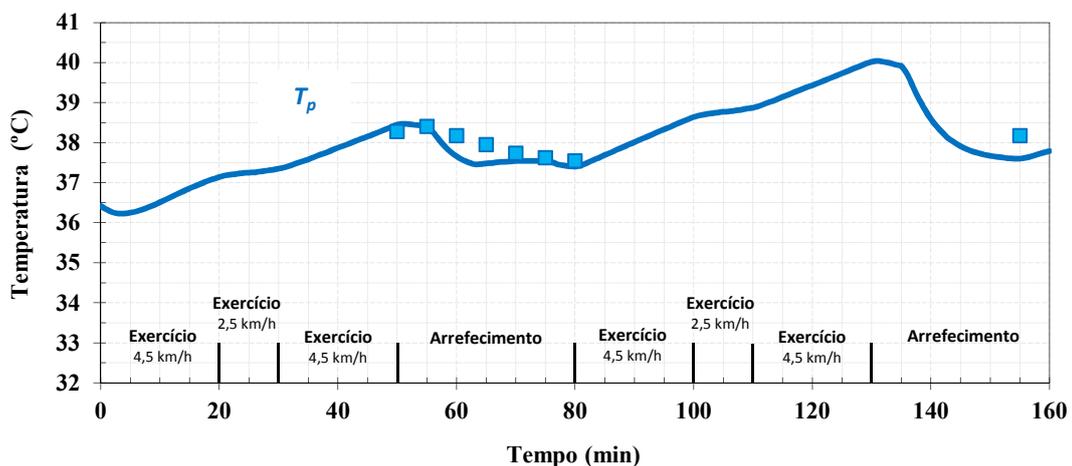


Figura 4.14 - Valores medidos (pontos) e previstos (linhas) obtidos para a  $T_p$  no caso 6, em que o arrefecimento é efetuado por imersão das mãos e dos antebraços em água a 14,3°C.

- **Notas conclusivas**

Para as situações em que o arrefecimento é efetuado por imersão das mãos e/ou antebraços em água fria, é possível verificar que o programa demonstra uma boa capacidade de

previsão da  $T_{re}$ ,  $T_{tym}$ ,  $T_p$  e  $Q_{lost}$ . Verifica-se novamente que existe um afastamento entre os valores medidos e os previstos para a  $T_{sk}$ . Como se pode constatar no caso AAF2 (ver Figura 4.10), a mudança de ambiente térmico ao fim de 50 minutos de exercício, associada a uma alteração da quantidade de roupa e a uma mudança do nível de atividade faz com que o programa responda de forma mais lenta do que as medições experimentais às novas condições térmicas a que o corpo humano foi exposto. Uma ou a combinação de várias das cinco razões identificadas anteriormente no final da Secção 4.1.2 são a causa desta deficiente previsão.

#### 4.1.3. Arrefecimento corporal vestindo coletes de gelo – ACG

Apresentam-se, para os casos em que o arrefecimento corporal é efetuado através do uso de coletes de gelo, nas Figura 4.15 a Figura 4.17 os resultados obtidos dos valores medidos e previstos pelo *software* para a temperatura corporal profunda ( $T_p$ ) e temperatura média da pele ( $T_{sk}$ ) dos bombeiros submetidos aos testes de stresse térmico.

- **Casos ACG4 e AAF4**

Na Figura 4.15 apresenta-se a comparação entre os valores medidos (pontos) e previstos (linhas) das temperaturas  $T_p$  e  $T_{sk}$  obtidos no caso 4. Os valores experimentais foram obtidos por Barr *et al.* (2009). De realçar que neste caso ambas as técnicas de arrefecimento (uso de colete de gelo e imersão das mãos e antebraços em água a 19°C) são aplicadas simultaneamente.

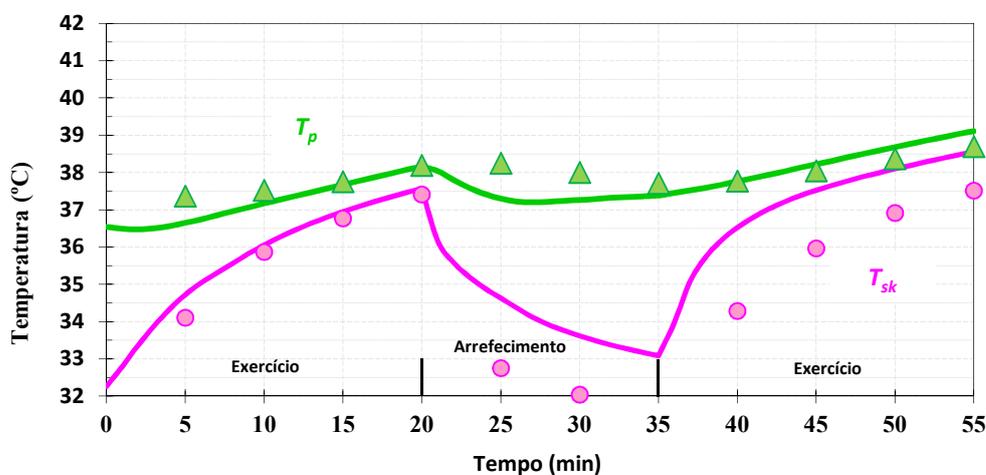


Figura 4.15 - Valores medidos (pontos) e previstos (linhas) obtidos para as temperaturas  $T_p$  e  $T_{sk}$  no caso 4, em que a fase de recuperação consistiu na aplicação de duas técnicas de arrefecimento em simultâneo: ACG e AAF a uma temperatura ~19°C.

• **Caso ACG5**

Os resultados apresentados na Figura 4.16 dizem respeito à relação entre os valores medidos (pontos) e previstos (linhas) da  $T_p$  obtidos no caso 5, em que os resultados experimentais foram medidos por Colburn *et al.* (2011). Neste caso a técnica de arrefecimento assenta apenas no uso de um colete de gelo.

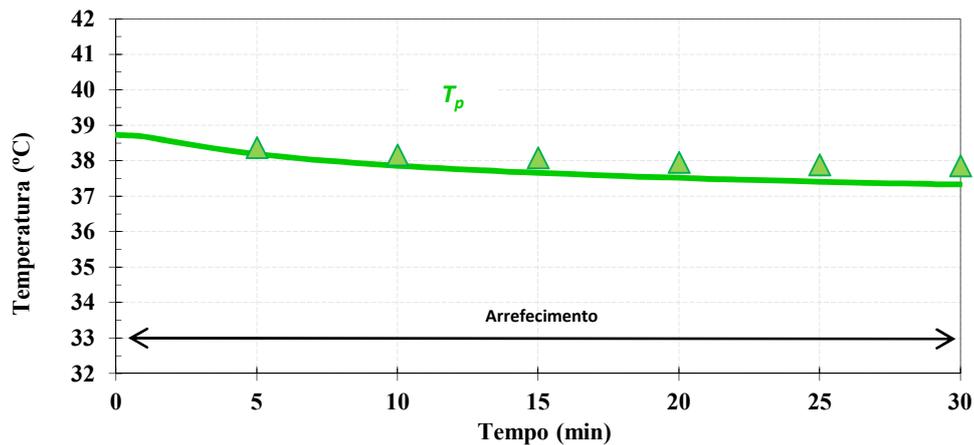


Figura 4.16 - Valores medidos (pontos) e previstos (linhas) obtidos para a  $T_p$  no caso 5, em que na fase de recuperação os indivíduos vestiam coletes de gelo como técnica de arrefecimento corporal.

• **Caso ACG6**

A Figura 4.17 apresenta a comparação entre os valores medidos (pontos) e previstos (linhas) da  $T_p$  obtidos no caso 6, em que os resultados experimentais foram obtidos por Hostler *et al.* (2010). Neste caso a técnica de arrefecimento também se baseia apenas no uso de um colete de gelo.

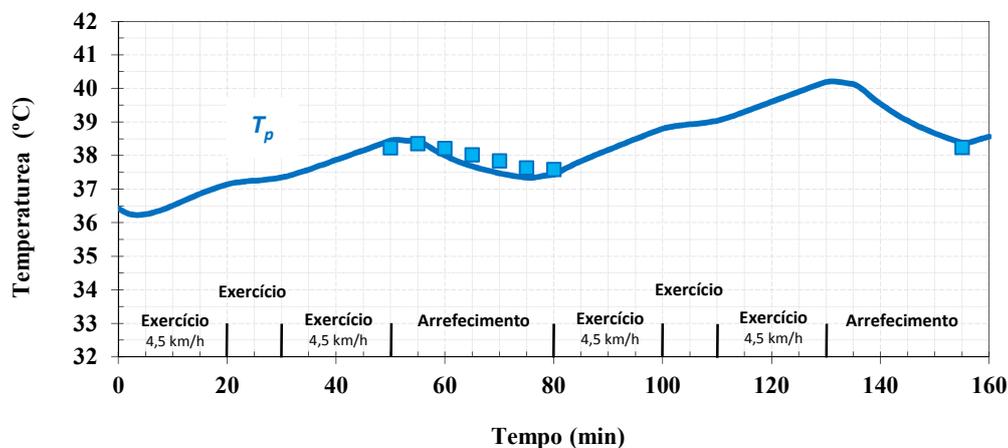


Figura 4.17 - Valores medidos (pontos) e previstos (linhas) obtidos para  $T_p$  no caso 6, em que a técnica de arrefecimento corporal aplicada aos indivíduos durante a fase de recuperação consistiu na utilização de coletes de gelo.

- **Notas conclusivas**

Seguindo a tendência verificada na análise dos resultados obtidos nos dois tipos de arrefecimento corporal vistos anteriormente (AP e AAF), também nos casos em que é aplicado o arrefecimento corporal com coletes de gelo no decurso dos protocolos de combate a incêndios de alta intensidade o *HuTheReg* mostra ter uma excelente competência de previsão do comportamento termofisiológico do corpo humano quando exposto a tais condições.

#### 4.1.4. Arrefecimento corporal recorrendo a ventiladores – ApV

Apresenta-se nas Figura 4.18 a Figura 4.20 a relação entre os valores medidos e os previstos pelo programa dos parâmetros indicativos do estado termofisiológico dos bombeiros submetidos aos testes de stresse térmico para as situações em que o arrefecimento corporal é efetuado com recurso a ventiladores.

- **Caso ApV6**

A Figura 4.18 diz respeito à comparação entre os valores medidos (pontos) e previstos (linhas) da temperatura corporal profunda ( $T_p$ ) no caso 6, em que os resultados experimentais foram obtidos por Hostler *et al.* (2010).

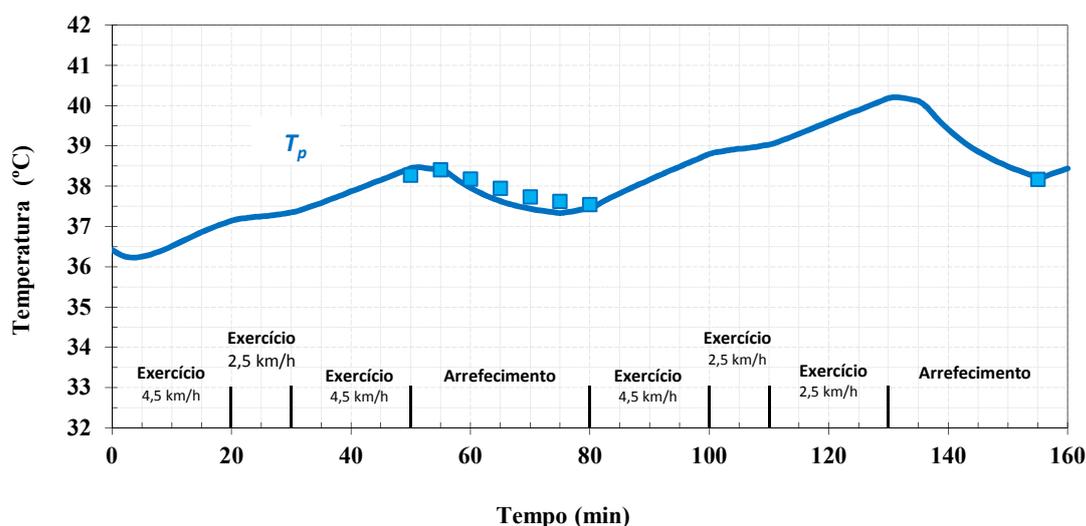


Figura 4.18 - Valores medidos (pontos) e previstos (linhas) obtidos para a  $T_p$  no caso 6, em que a recuperação é efetuada com recurso a ventiladores.

• **Caso ApV7**

Nas Figura 4.19 e Figura 4.20 é apresentada a comparação entre os valores medidos (pontos) e previstos (linhas) obtidos no caso 7. Os valores experimentais deste caso em análise foram medidos por Carter *et al.*, 1999.

A Figura 4.19 diz respeito à temperatura rectal ( $T_{re}$ ) e timpânica ( $T_{tym}$ ) e na Figura 4.20 são apresentadas as temperaturas na pele no peito ( $T_{sk,peito}$ ), nos braços ( $T_{sk,braços}$ ) e nas coxas ( $T_{sk,coxas}$ ).

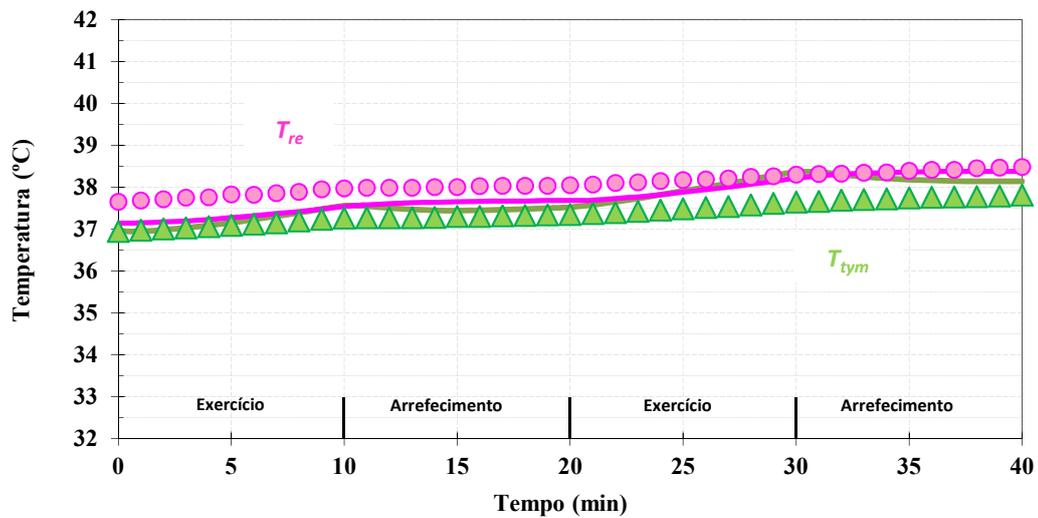


Figura 4.19 - Valores medidos (pontos) e previstos (linhas) obtidos para as temperaturas  $T_{re}$  e  $T_{tym}$  no caso 7, em que a recuperação é efetuada com recurso a ventiladores.

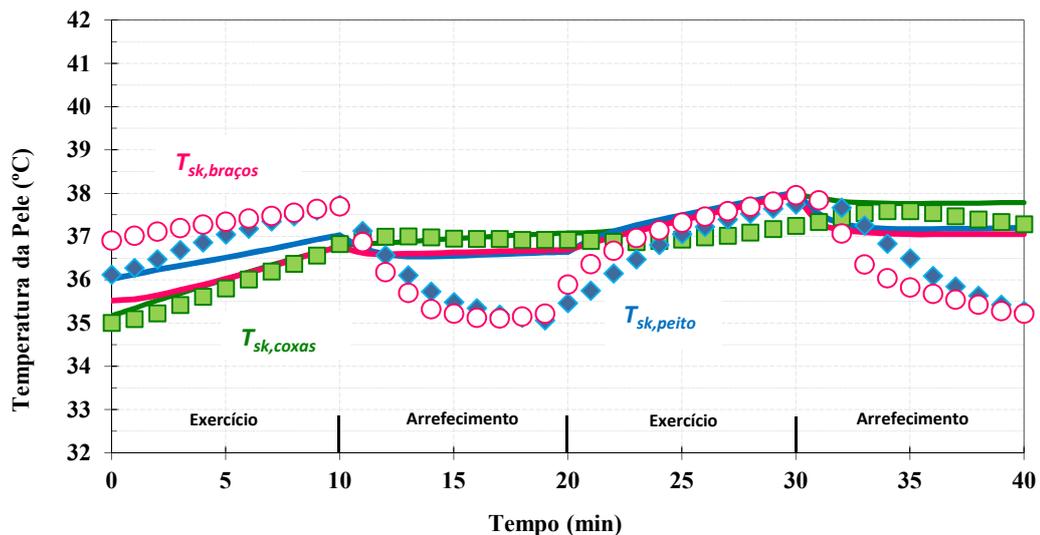


Figura 4.20 - Valores medidos (pontos) e previstos (linhas) obtidos para a temperatura da pele: do peito, braços e coxas no caso 7, em que a recuperação é efetuada com recurso a ventiladores.

- **Notas conclusivas**

À semelhança da análise efetuada aos resultados obtidos para os outros tipos de técnicas de arrefecimento corporal apresentadas (AP, AAF e ACG), também no arrefecimento corporal com recurso a ventiladores se verifica a capacidade do *software* para prever com precisão a resposta termofisiológica do corpo humano quando exposto a estas condições. Continua a verificar-se alguma discrepância entre os valores numéricos e experimentais de  $T_{sk}$ , estando na sua causa as eventuais razões descritas anteriormente.

#### **4.1.5. Comparação estatística e discussão**

Apresenta-se na Tabela 4.1 a comparação estatística dos resultados em que a conformidade entre os resultados obtidos por ambas as vertentes é analisada em termos das funções estatísticas: média aritmética das diferenças relativas ( $\delta$ ) e respetivo desvio padrão ( $\sigma$ ), desvio quadrático médio ( $DQM$ ) e aquela que será dada maior importância, o coeficiente de correlação de Pearson ( $r$ ). Trata-se apenas de situações em que o arrefecimento corporal é aplicado apenas durante a fase de recuperação.

Observando a Tabela 4.1 pode verificar-se que o  $r$  indica que, na maioria dos casos, existe uma correlação muito forte a excelente entre os valores previstos e os experimentais das temperaturas analisadas.

Fazendo uma análise da capacidade de previsão do programa *HuTheReg* em função da técnica de arrefecimento do corpo humano utilizada, verifica-se que de entre as estratégias de arrefecimento passivo obtiveram-se os melhores resultados nos casos 2 e 8 (AP2 e AP8), em que o coeficiente de correlação de Pearson mostra a existência de uma relação excelente entre os valores previstos e experimentais de  $T_{re}$  e  $T_{sk}$ . Para as técnicas de arrefecimento corporal com recurso a ventiladores referentes aos casos 6 e 7 (ApV6 e ApV7), bem como o uso de coletes de gelo dos casos 5 e 6 (ACG5 e ACG6), o  $r$  demonstra também a existência de uma excelente relação entre os valores previstos e experimentais para a  $T_p$ .

Por outro lado, no caso 3, em que é aplicada a técnica de arrefecimento por imersão das mãos e antebraços em água a 10°C (AAF3, M&A) a  $T_{tym}$  não é prevista com a mesma qualidade, visto que as funções estatísticas  $r$ ,  $\delta$  e  $DQM$  apresentam valores inferiores aos pretendidos. Por sua vez, o  $\sigma$  apresenta um valor superior. Também no caso 7, em que é aplicado o arrefecimento corporal com recurso a ventiladores (ApV7), a qualidade com

que a  $T_{sk,peito}$  e  $T_{sk,braços}$  são previstas não é a desejada, pois os parâmetros  $r$  e  $\delta$  indicam valores inferiores aos pretendidos, e o resultado do  $\sigma$  demonstra existir dispersão entre os valores previstos e os experimentais.

**Tabela 4.1 – Análise comparativa dos resultados obtidos em termos de temperaturas.**

Caso	Temperatura	Unid.	$\delta$	$\sigma$	$DQM$	Pearson ( $r$ )		
AP1	$T_p$	(°C)	-0.0120	0.2580	0.0299	0.910		
	$T_{sk}$	(°C)	0.4228	0.4043	0.0972	0.878		
AP2	$T_{re}$	(°C)	0.1409	0.2159	0.0553	0.985		
	$T_{sk}$	(°C)	0.5867	0.1576	0.1324	0.995		
AP3	$T_{tym}$	(°C)	-0.9190	0.7031	0.2135	0.854		
AP4	$T_p$	(°C)	0.3267	0.3938	0.1501	0.893		
	$T_{sk}$	(°C)	-0.6667	0.8653	0.3198	0.880		
AP5	$T_p$	(°C)	-0.0052	0.1884	0.0660	0.843		
AP6	$T_p$	(°C)	0.0399	0.3837	0.1277	0.878		
AP7	$T_{re}$	(°C)	0.5615	0.0937	0.0889	0.976		
	$T_{tym}$	(°C)	-0.0904	0.1415	0.0260	0.955		
	$T_{sk,peito}$	(°C)	0.2731	0.2626	0.0588	0.898		
	$T_{sk,braços}$	(°C)	0.5797	0.4773	0.1167	0.820		
	$T_{sk,coxas}$	(°C)	0.2198	0.3102	0.0589	0.965		
AP8	$T_{re}$	(°C)	0.0516	0.0635	0.0222	0.992		
	$T_{sk}$	(°C)	0.1914	0.2272	0.0805	0.984		
AAF2	$T_{re}$	(°C)	-0.2051	0.2476	0.0524	0.946		
	$T_{sk}$	(°C)	-0.4998	0.8623	0.1622	0.731		
AAF3	20°C	Mãos	$T_{tym}$	(°C)	-0.6405	0.5599	0.1568	0.872
		M&A	$T_{tym}$	(°C)	-0.5233	0.5158	0.1353	0.868
	10°C	Mãos	$T_{tym}$	(°C)	-0.7185	0.5931	0.1718	0.800
		M&A	$T_{tym}$	(°C)	-0.6875	0.5569	0.1632	0.658
AAF5	$T_p$	(°C)	0.1788	0.1471	0.0850	0.956		
AAF6	$T_p$	(°C)	0.2239	0.2690	0.1191	0.769		
ACG4 e AAF4	$T_p$	(°C)	0.2162	0.4496	0.1448	0.837		
	$T_{sk}$	(°C)	-1.1308	0.7571	0.4045	0.949		
ACG5	$T_p$	(°C)	0.3200	0.2146	0.1424	0.997		
ACG6	$T_p$	(°C)	0.1180	0.2179	0.0861	0.927		
ApV6	$T_p$	(°C)	0.1479	0.2138	0.0880	0.919		
ApV7	$T_{re}$	(°C)	0.2991	0.1814	0.0544	0.991		
	$T_{tym}$	(°C)	-0.2942	0.2044	0.0557	0.964		
	$T_{sk,peito}$	(°C)	-0.4125	0.7768	0.1360	0.452		
	$T_{sk,braços}$	(°C)	-0.1761	1.1341	0.1771	0.028		
	$T_{sk,coxas}$	(°C)	-0.2416	0.2205	0.0508	0.959		

As maiores diferenças entre os valores previstos e medidos verificam-se nos momentos de mudança de ambiente térmico, pois o programa responde mais rapidamente

às mudanças das temperaturas ambientais, noutras atrasa-se, mas sempre sem grande degradação em termos de precisão.

Contudo, de um modo geral, pode afirmar-se que o *HuTheReg* indica ter uma boa competência de previsão das temperaturas do corpo humano quando exposto a processos de aquecimento e de arrefecimento em situações de elevado stresse térmico nos casos analisados.

No que diz respeito aos fluxos de calor apresenta-se na Tabela 4.2 uma comparação, em termos de funções estatísticas, entre os valores de  $Q_{lost}$  previstos e medidos por Giesbrecht *et al.* (2007) relativos ao caso 3.

Uma vez que existe apenas um valor de  $Q_{lost}$  medido em cada uma das situações analisadas (AP e AAF em água a 10 e 20°C), não é possível analisar a evolução dos valores previstos pelo programa face aos correspondentes experimentais. Do mesmo modo que não é possível avaliar a dispersão dos valores. Neste sentido, apresenta-se apenas os valores para  $\delta$  e  $DQM$ .

**Tabela 4.2 - Análise comparativa dos resultados obtidos em termos de calor total perdido ( $Q_{lost}$ ) para as diferentes situações analisadas no caso 3 (AP e AAF com água a 10 e 20°C).**

Caso	Calor total perdido	Unid.	$\delta$	$\sigma$	$DQM$	Pearson ( $r$ )		
AP3	$Q_{lost}$	(W/m <sup>2</sup> )	13.238	-	6.619	-		
AAF3	20°C	Mãos	$Q_{lost}$	(W/m <sup>2</sup> )	-25.203	-	12.601	-
		M&A	$Q_{lost}$	(W/m <sup>2</sup> )	197.325	-	98.663	-
	10°C	Mãos	$Q_{lost}$	(W/m <sup>2</sup> )	-25.203	-	12.601	-
		M&A	$Q_{lost}$	(W/m <sup>2</sup> )	371.032	-	185.52	-

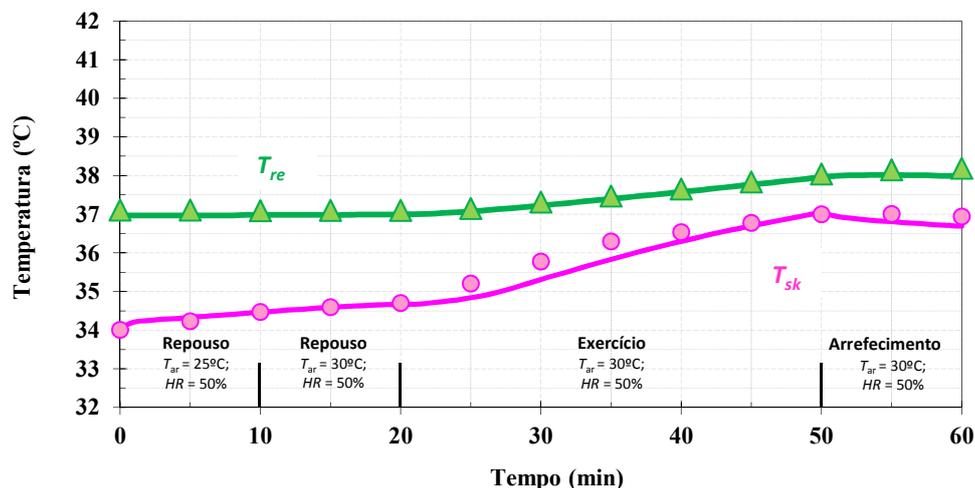
Observando os resultados da Tabela 4.2 verifica-se que a diferença relativa  $\delta$ , para as estratégias de AAF por imersão de mãos em água a 10 e 20°C, apresenta valores negativos o que indica que os resultados experimentais têm um valor inferior aos previstos pelo programa. Nas situações em que o arrefecimento é feito por imersão de mãos e antebraços em água a 10 e 20°C, a  $\delta$  apresenta valores positivos, o que indica que os resultados experimentais são muito superiores aos previstos. Relativamente à função estatística  $DQM$ , esta apresenta valores superiores aos esperados para as situações referidas anteriormente.

É na situação em que é aplicada a estratégia de arrefecimento passivo que o programa consegue prever com melhor precisão o  $Q_{lost}$ , pois as funções estatísticas analisadas indicam os valores mais próximos dos esperados.

## 4.2. Arrefecimento Durante as Fases de Combate e de Recuperação – ACGfCR

- **Caso ACGfCR8**

Apresenta-se na Figura 4.21 a comparação entre os valores medidos (pontos) e os previstos pelo programa *HuTheReg* (linhas) dos resultados obtidos para as temperaturas rectal ( $T_{re}$ ) e média da pele ( $T_{sk}$ ) dos bombeiros submetidos ao protocolo do caso 8, em que os resultados experimentais foram medidos por Chou *et al.* (2008). A técnica de arrefecimento corporal aplicada neste estudo assenta na utilização de coletes de gelo durante todo o ensaio, ou seja quer durante as fases de exercício quer no decurso das de recuperação.



**Figura 4.21 - Valores medidos (pontos) e previstos (linhas) obtidos para as temperaturas  $T_{re}$  e  $T_{sk}$  no caso 8, em que o arrefecimento corporal (uso de coletes de gelo) foi aplicado durante as fases de exercício e de recuperação.**

À semelhança do que foi feito para o arrefecimento apenas durante a fase de recuperação, apresenta-se na Tabela 4.3 uma análise estatística deste caso que demonstra a conformidade existente entre os valores previstos pelo programa e os medidos experimentalmente por Chou *et al.* (2008).

**Tabela 4.3 – Análise comparativa dos resultados obtidos para a  $T_{re}$  e  $T_{sk}$ , no caso apresentado – Arrefecimento corporal com coletes de gelo durante as fases de combate e recuperação.**

Caso	Temperatura	Unid.	$\delta$	$\sigma$	DQM	Pearson (r)
ACGfCR8	$T_{re}$	(°C)	0.1077	0.0383	0.0316	0.996
	$T_{sk}$	(°C)	0.1485	0.1980	0.0669	0.986

Observando a Figura 4.21 e analisando os resultados apresentados na Tabela 4.3 é visível a capacidade do programa para prever com precisão as temperaturas comparadas, já que as funções estatísticas  $\delta$ ,  $\sigma$  e  $DQM$  mostram que os valores previstos são muito próximos dos experimentais e  $r$  indica uma excelente relação entre os valores. Deste modo, pode afirmar-se que o programa mostra ter uma excelente competência de previsão na resposta termofisiológica do corpo humano quando exposto a tais condições.

### 4.3. Conclusões Prévias

Os resultados previstos pelo programa, embora com algumas exceções, são na sua maioria muito próximos dos medidos experimentalmente.

Para as simulações em que as técnicas de arrefecimento são aplicadas apenas durante a fase de recuperação, as previsões mais precisas foram para as temperaturas rectal e média da pele quando aplicada a estratégia de arrefecimento passivo (AP2 e AP8), em que a diferença para os valores medidos e experimentais é muito pequena e o coeficiente de correlação de Pearson mostra a existência de uma relação excelente.

Também para as situações em que são aplicadas estratégias de arrefecimento corporal com recurso a ventiladores e usando coletes de gelo (ApV e ACG) nos casos 5 e 6, a temperatura média do corpo apresenta uma boa proximidade entre valores previstos e medidos e o coeficiente de correlação de Pearson mantém a sua excelência.

As maiores diferenças foram obtidas para a temperatura da pele dos braços e temperatura da pele do peito no caso 7 em que é aplicada a técnica de arrefecimento com recurso a ventiladores, e para as temperaturas da pele no caso 2 e timpânica no caso 3 quando o arrefecimento é feito por imersão de mãos e antebraços em água fria (AAF). Para estes casos o coeficiente de correlação de Pearson apresentou os seus valores mais baixos.

Relativamente aos resultados obtidos para o fluxo de calor global perdido ( $Q_{loss}$ ) para o caso 3, é na situação em que é aplicada a estratégia de arrefecimento passivo que o programa consegue prever com melhor precisão, pois as funções estatísticas analisadas indicam uma boa qualidade das previsões numéricas.

Para as situações em que o arrefecimento é efetuado por imersão das mãos em água fria os resultados numéricos apresentam sempre valores inferiores aos experimentais. Já

com a imersão de mãos e antebraços, as previsões apresentam sempre valores superiores ao correspondente valor experimental.

Para o caso em são usados coletes de gelo como técnica de arrefecimento corporal, durante as fases de combate e de recuperação, o programa prevê com precisão  $T_{re}$  e  $T_{sk}$ , pois os resultados das funções estatísticas  $\delta$ ,  $\sigma$  e  $DQM$  mostram que os valores previstos são muito próximos dos experimentais e o  $r$  obtido indica uma excelente relação entre os valores obtidos pelas duas metodologias.



## 5. CONCLUSÕES

Ao longo do presente trabalho foram efetuados testes às capacidades do *software HuTheReg* de modo a verificar a sua aplicabilidade e fiabilidade, para que o programa possa ser utilizado na previsão do comportamento termofisiológico do corpo humano quando sujeito a situações de stresse térmico em ambientes muito quentes. Como base de comparação utilizaram-se resultados experimentais retirados da bibliografia científica.

O programa foi testado tomando como base uma das atividades em que o corpo humano é submetido a níveis de exposição ao calor muito elevados, o combate a incêndios de alta intensidade. De modo a testar um grande número de situações, os casos considerados envolveram mudanças bruscas de ambiente térmico (de muito quente para ambiente neutro e vice-versa), diferentes níveis intensidade de atividade (desde repouso a elevado esforço físico), diversos tempos de exposição, vários tipos de vestuário (vestuário de proteção térmica) e diversas técnicas alternativas de recuperação da temperatura corporal por arrefecimento (aplicadas durante as fases de combate e de recuperação ou apenas durante a fase de recuperação).

Como ferramentas auxiliares na avaliação do nível de conformidade entre os resultados experimentais e os previstos pelo programa utilizaram-se gráficos, representando a evolução com o tempo ou ao fim de um determinado período de tempo, de temperaturas e fluxos de calor representativos do estado térmico do corpo humano. Recorreu-se ainda às funções estatísticas média aritmética das diferenças relativas ( $\delta$ ), respetivo desvio padrão ( $\sigma$ ), desvio quadrático médio ( $DQM$ ) e o coeficiente de correlação de Pearson ( $r$ ).

De um modo genérico é possível afirmar que é nítida a capacidade do programa para prever com precisão as variáveis analisadas neste estudo, já que as funções estatísticas  $\delta$ ,  $\sigma$ ,  $DQM$  e  $r$  apresentaram normalmente valores bons, muito bons e, nalguns casos, excelentes. São poucos os casos em que estes parâmetros sugeriram uma menor capacidade de previsão do programa.

As diferenças detetadas entre os valores experimentais e os previstos pelo programa não põem em causa a sua capacidade de previsão, visto que os protocolos experimentais

retirados da bibliografia científica apresentam sempre falhas nos detalhes dos ensaios realizados. A descrição dos ambientes térmicos em muitos dos casos é incompleta, o nível de atividade física não é quantificado em termos numéricos e a distribuição do vestuário pelas diferentes zonas do corpo humano nunca é apresentada.

Pode assim concluir-se que o programa *HuTheReg* mostra ter uma excelente competência de previsão do comportamento termofisiológico do corpo humano durante o processo de aquecimento e de arrefecimento em situações de elevado stresse térmico, como o que acontece numa situação de um bombeiro em combate em um incêndio de alta intensidade.

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abreu, R.M.S. (2013), *Análise e simulação termofisiológica de técnicas de arrefecimento corporal aplicadas a um bombeiro no combate a incêndios florestais*, Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra.
- Austin, C. (2008), “Wildland firefighters health risks and respiratory protection”, *Chemical Substances and Biological Agents*, Studies and Research Projects, Report R-572, Institut de recherche Robert-Sauvé en santé et en sécurité du travail (IRSST), Montréal, Québec.
- Barr, D.; Gregson, W.; Sutton, L. & Reilly, T. (2009), “A practical cooling strategy for reducing the physiological strain associated with firefighting activity in the heat”, *Ergonomics*, Vol. 52, Nº 4, pp. 413-420.
- Barr, D.; Gregson, W. & Reilly, T. (2010), “The thermal ergonomics of firefighting reviewed”, *Applied Ergonomics*, Vol. 41, pp. 161-172.
- Berry, C.K. (2013), “Heat stress fact sheet”, N.C. *Department of Labor*, The Occupational Safety and Health Topics A to Z. Consultado em Março de 2014, <[http://www.nclabor.com/osha/etta/A\\_to\\_Z\\_Topics/heat\\_stress.htm](http://www.nclabor.com/osha/etta/A_to_Z_Topics/heat_stress.htm)>.
- Camargo, M. & Furlan, M. (2011), “Resposta fisiológica do corpo humano às temperaturas elevadas: exercício, extremos de temperatura e doenças térmicas”, *Revista Saúde e Pesquisa*, Vol.4, Nº2, pp. 278-288.
- Carter, J.B. (1996), *Thermoregulation responses of fire fighters and recovery in heat*, BSc thesis (Kinesiology), Simon Fraser University, April 1996.
- Carter, J.B.; Banister, E.W. & Morrison, J.B. (1999), “Effectiveness of rest pauses and cooling in alleviation of heat stress during simulated fire-fighting activity”, *Ergonomics*, Vol. 42, pp. 299-313.
- Carter, J.M.; Rayson, M.P.; Wilkinson, D.M.; Richmond, V. & Blacker, S. (2007), “Strategies to combat heat strain during and after firefighting”, *Journal of Thermal Biology*, Vol. 32, pp. 109-116.
- Colburn, D.; Suyama, J. & Reis S. (2011), “A comparison of cooling techniques in firefighters after a live burn evolution”, *Prehospital Emergency Care*, Vol. 15, pp. 226-232.
- Cohen, J. (1988), *Statistical power analysis for the behavioral sciences*, Hillsdale, NJ, Erlbaum.
- Chou, C.; Tochiara, Y. & Kim, T. (2008), “Physiological and subjective responses to cooling devices on firefighting protective clothing”, *European Journal of Applied Physiology*, Vol. 104, pp. 367-374.
- Dancey C. & Reidy J. (2006), *Estatística sem matemática para psicologia usando SPSS para Windows*, Artmed, Porto Alegre.

- Eglin, M. (2006), “Physiological responses to fire-fighting: thermal and metabolic considerations”, *Journal of the Human-Environmental System*, Vol.10, N°1, pp. 7-18.
- Fiala D.; Lomas K.J. & Stohrer M. (1999), “A computer model of human thermoregulation for a wide range of environmental conditions - The passive system”, *Journal of Applied Physiology*, Vol. 87, pp. 1957-1972.
- Giesbrecht, G.G.; Jamieson, C. & Cahill, F. (2007), “Cooling hyperthermic firefighters by immersing forearms and hands in 10°C and 20°C water”, *Aviation Space Environmental Medicine*, Vol. 78, pp. 561-567.
- Havenith, G.; Holmér, I. & Parsons, K. (2002), “Personal factors in thermal comfort assessment: clothing properties and metabolic heat production”, *Energy and Buildings*, Vol. 34, pp.581-591.
- Honeywell (2009), *Kore cooler rehab chair*, Honeywell First Responder Products, formerly by Total Fire Group (4/27/2009).
- Hostler D.; Reis, S.; Bednez, J.C.; Kerin, S. & Suyama, J. (2010), “Comparison of active cooling devices with passive cooling for rehabilitation of firefighters performing exercise in thermal protective clothing: a report from the Fireground Rehab Evaluation (FIRE) trial”, *Prehospital Emergency Care*, Vol. 14, pp. 300-309.
- House, J.R.; Holmes, C. & Allsopp, A.J. (1997), “Prevention of heat strain by immersing the hands and forearms in water”, *Journal of R. Naval Medicine Service*, Vol. 83, pp. 26-30.
- Ilmarinen, R. & Makinen, H., (1992), “Heat strain in fire fighting drills”, in W. A. Lotens and G. Havenith (eds.), *Proceedings of the 5th International Conference on Environmental Ergonomics*. (Soesterberg TNO-Institute for Perception), pp. 90-91.
- ISO 7730 (2005), *Ergonomics of the thermal environment - Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria*, ISO, Geneva.
- ISO 9920 (2007), *Ergonomics of the thermal environment – estimation of thermal insulation and evaporative resistance of a clothing ensemble*, ISO, Geneva.
- Judge, J. (2003), *Thermal stress*, ITEC 471. Consultado em Fevereiro de 2014, em <<http://www.public.iastate.edu>>.
- Keiser, C. (2007), *Steam burns - moisture management in firefighter protective clothing*, PhD thesis, Swiss Federal Institute of Technologic ETH, Zurich, St. Gallen.
- Kim, J-H.; Williams, W.J.; Coca, A. & Yokota, M. (2013), “Application of thermoregulatory modeling to predict core and skin temperatures in firefighters”, *International Journal of Industrial Ergonomics*, Vol. 43, pp. 115-120.
- Lawson, J.R. & Vettori, R.L. (2002), *Thermal measurements for firefighters protective clothing*, National Institute of Technology Standards and Technology (NIST), Gaithersburg.
- McLellan, T.M. & Selkirk, G.A. (2004), *The management of heat stress for the firefighter*, DRDC, ECR 2004-051, Toronto, Canada. Consultado a 2 de Março 2014, <<http://www.mhsao.com/PDFs/HeatStressMgmtReport1.pdf>>.

- 
- McLellan, T.M. & Selkirk, G.A. (2005), *The Management of Heat Stress for the Firefighter*, DRDC, Toronto, Canada.
- Magalhães, S.; Albuquerque, R.R.; Pinto, J.C. & Moreira, A.L. (2001), *Termorregulação*, Faculdade de Medicina da Universidade do Porto, Serviço de Fisiologia.
- Mendes, R.J.P. (2009), *Exposição térmica em incêndios florestais – vestuário de protecção e condições de trabalho de bombeiros*, Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra.
- Oliveira, A.V.F.M. (1998), *Avaliação de condições de trabalho em sectores de actividade com elevada exposição ao calor*, Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra.
- Oliveira, A.V.F.M. (2006), *Estudo de ambientes térmicos frios - desenvolvimentos experimentais e avaliação de condições de trabalho*, Dissertação de Doutoramento em Engenharia Mecânica, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra.
- Oliveira AVM, Gaspar AR, Quintela DA (2011), Dynamic Clothing insulation. Measurements with a thermal manikin operating under the thermal comfort regulation mode. *Appl Ergon*, Vol. 42, N° 6, pp. 890-899.
- OMS (1969), *Health factors involved in working under conditions of heat stress*, World Health Organization, Technical Report Series, N° 412, Genève.
- Quintela D.A.; Gaspar A.R. & Borges C. (2004), “Analysis of sensible heat exchanges from a thermal manikin”, *European Journal of Applied Physiology*, Vol. 92, pp. 663-668. doi:10.1007/s00421-004-1132-3.
- Quintela, D.A. (2007), *Ambientes Térmicos*, 7º Curso de Atualização em Segurança, Higiene e Saúde no Trabalho, ADAI, Departamento de Engenharia Mecânica, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, Coimbra.
- Raimundo A.M., Gaspar A.R., Quintela D.A. (2004), “Numerical modelling of radiative exchanges between the human body and surrounding surfaces”, *Climamed 2004 – 1st Mediterranean congress of climatization*, 16-17 of April, Lisbon, Portugal, paper 8/1.
- Raimundo, A.M. & Figueiredo, A.R. (2006), “Human thermophysiological response to high intensity radiation fluxes near a forest fire line”, *5th ICFER (International Conference on Forest Fire Research)*, Figueira da Foz, Portugal, pp S145 (1-16).
- Raimundo, A.M. & Figueiredo, A.R. (2009), “Personal protective clothing and safety of firefighters near a high intensity fire front”, *Fire Safety Journal*, Vol. 44, pp. 514-521.
- Rossa, C.G. & Cardoso, R.J.P. (2004), *Modelo de termorregulação do corpo humano*, Relatório Apresentado para Aprovação à Disciplina de Seminário, Departamento de Engenharia Mecânica, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra.
- Selkirk, G.; McLellan, T.M. & Wong, J. (2004), “Active versus passive cooling during work in warm environments while wearing firefighting protective clothing”, *Journal of Occupational Environment and Hygiene*, Vol. 1, pp. 521-531.
-

- Sharkey, B.J. (1999), “Heat stress”, *Wildland Firefighter Health and Safety Recommendations Conference*, Missoula Technologic and Development Center, USDA Forest Service, Montana.
- Sharkey, B.J. & Gaskill, S.E. (2009), *Fitness and work capacity – 2009 edition*, A publication of the National Wildfire Coordinating Group, Missoula Technologic and Development Center, USDA Forest Service, Montana.
- Stolwijk, J.A.J. (1971), *A mathematical model of physiological temperature regulation in man*, NASA contractor report CR-1855, NASA, Washington DC.
- Tanabe, S.; Kobayashi, K.; Nakano, J.; Ozeki, Y. & Konishi, M. (2002), “Evaluation of thermal comfort using combined multi-node thermoregulation (65MN) and radiation models and computational fluid dynamics (CFD)”, *Energy and Buildings*, Vol. 34, pp. 637-646.
- Taylor, N.A. (2006), “Challenges to temperature regulation when working in hot environments”, *Industrial Health*, Vol. 44, pp.331-344.