



• C •

FCTUC FACULDADE DE CIÊNCIAS
E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE COIMBRA

DEPARTAMENTO DE
ENGENHARIA MECÂNICA

Uso de vestuário de proteção impregnado com água por bombeiros em combate a incêndios de alta intensidade

Dissertação apresentada para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica na Especialidade de Energia e Ambiente

Autor

Ricardo Miguel Moreira Rodrigues

Orientador

Professor Doutor António Manuel Mendes Raimundo

Júri

Presidente Professor Doutor Adélio Manuel Rodrigues Gaspar
Professor Auxiliar da Universidade de Coimbra

Vogais Professor Doutor Avelino Virgílio Fernandes Monteiro Oliveira
Professor no Instituto Superior de Engenharia, Instituto Politécnico de Coimbra

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

Coimbra, setembro, 2018

“Os únicos limites das nossas realizações de amanhã
são as nossas vidas e hesitações de hoje”

Franklin Roosevelt

Aos meus pais e ao meu irmão

Agradecimentos

A realização desta dissertação de mestrado contou com importantes apoios e incentivos, pelo que é meu dever exprimir o meu sincero agradecimento a todos aqueles que de alguma forma, direta ou indiretamente, permitiram tornar esta dissertação numa realidade.

Ao Professor Doutor António Manuel Mendes Raimundo (DEM-FCTUC), pela sua orientação, total apoio, disponibilidade constante e inquestionável, pelo conhecimento transmitido, pelas opiniões e críticas, boa disposição demonstrada durante a realização desta dissertação e por todas as palavras de incentivo, os meus sinceros agradecimentos.

Aos meus amigos e colegas agradeço não só todos os momentos espetaculares que me proporcionaram ao longo da minha vida académica, como também a virtude que demonstraram nos momentos mais difíceis.

Por último, tendo consciência que sozinho nada disto teria sido possível, dirijo um agradecimento especial aos meus pais e ao irmão, por serem modelos da pessoa que ambiciono ser um dia, pelo seu apoio incondicional, pelo sentimento de confiança inabalável que transmitiram ao longo destes meses e por terem sempre contribuído para a concretização dos meus objetivos. A eles dedico este trabalho!

Resumo

O ambiente térmico associado ao combate a um incêndio pode levar os bombeiros para um elevado estado de stress físico e psicológico.

Os softwares disponíveis para simular o comportamento termofisiológico de bombeiros em situação de combate a incêndios assumem que o vestuário de proteção se encontra seco, nomeadamente o software *HuTheReg* desenvolvido no DEM-FCTUC.

O presente trabalho tem como objetivo contribuir para a complementação do *software HuTheReg* com um módulo que permita considerar vestuário impregnado com água. Neste sentido, a principal tarefa a atingir com este trabalho é o desenvolvimento de um modelo matemático que permita a simulação da transferência de calor e de massa que ocorre no vestuário utilizado, impregnado (ou não) com água. O modelo matemático desenvolvido foi implementado numa folha de cálculo em MS Excel (designada por *Wet-Clothing*).

Esta ferramenta em conjunto com o programa *HuTheReg* foi utilizada para analisar o efeito de impregnar com água o vestuário utilizado por bombeiros em situação de combate a duas tipologias de incêndio: florestal e estrutural. O vestuário considerado é constituído por uma camada de roupa interior, uma barreira à água líquida e ao vapor de água e uma camada de vestuário de proteção. Analisam-se oito casos distintos, tendo em conta diferentes massas de água localizadas no interior do vestuário de proteção e diferentes construções de vestuário, que têm como base diferentes distribuições da camada de roupa interior e da camada de vestuário de proteção.

Com base nos resultados obtidos e independentemente do tipo de vestuário, a impregnação com água do vestuário do bombeiro em combate a incêndios permite uma redução fluxo de calor que chega à pele e das temperaturas atingidas pelo vestuário. Como resultado disto foi possível concluir que a impregnação com água da camada exterior do vestuário usado pelos bombeiros durante o combate a incêndios é benéfica, aumentando os tempos até ao aparecimento de patologias indesejáveis associadas ao stress hipertérmico.

Palavras-chave: Simulação termo-higrométrica de vestuário; Vestuário de proteção de bombeiros; Combate a incêndios florestais e estruturais; Stress hipertérmico.

Abstract

The thermal environments which firefighting is associated, is responsible for taking firefighters to a state of great physical and psychologic stress.

The available software that simulate the thermophysiological behaviour of firefighters during firefighting usually assume that firefighter's clothing is dry, namely the *HuTheReg* program, developed at DEM-FCTUC.

The purpose of the present work has the complementation of *HuTheReg* program with a module which allows the consideration of clothing impregnated with water. Thus, the main task is the development of a mathematical model that allows the simulation of mass and heat transfer occurred in clothing, impregnated (or not) with water. The mathematical model developed was implemented in a MS Excel sheet (designated by *Wet-Clothing*).

This tool, in conjunction with *HuTheReg* program, was used to analyse the effect of impregnating firefighter's clothing with water through the fight against two distinct fire typologies: forest fire and structural fire. The used clothing is comprised by a layer of underwear, a layer of liquid water and water steam, and a layer of protective clothing. Analysing eight distinct cases, considering the different water masses localised inside the protective clothing (in the cases in which the clothing is wet), and the different clothing constructions, which considers the different distributions of underwear and protective clothing.

Attending the results produced by the *Wet-Clothing* model, independently of the type of clothing construction, it is verified that, throughout the time, the existence of water inside the protective clothing during firefighting, allows a flux reduction of the heat that reaches the skin, as well as the temperatures through the clothing. These results allow some conclusions about the fact that the impregnation of firefighter's protective clothing with water is beneficial, increasing the times needed to the appearance of the pathologies undesirable associated to hyper thermic stress.

Keywords: Clothing thermo-hygro-metric simulation; Personal protective clothing; Wildland and Structural firefighting; Hyper thermic stress

Índice

Índice de Figuras	v
Índice de Tabelas	vii
Simbologia e Siglas	viii
Simbologia.....	viii
Subscritos	xi
Siglas	xii
1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1. Enquadramento	1
1.2. Revisão Bibliográfica	2
1.2.1. Stress térmico-e patologias associadas	2
1.2.2. Especificação do vestuário	4
1.3. Objetivos.....	10
2. METODOLOGIA.....	11
2.1. Metodologia Geral	11
2.2. Software <i>HuTheReg</i>	12
2.3. Folha de Cálculo <i>Wet-Clothing</i>	14
2.3.1. Especificação do vestuário	14
2.3.2. Algoritmo global	18
2.3.3. Modelação numérica.....	20
3. PROBLEMA EM ESTUDO.....	33
3.1. Stress Térmico Associado ao Combate a Incêndios	33
3.1.1. Fatores internos	33
3.1.2. Fatores externos.....	36
3.2. Caraterização dos Casos em Estudo	37
3.2.1. Protocolo de combate aos incêndio	38
3.2.2. Vestuário utilizado.....	41
3.2.3. Sistematização dos casos em estudo.....	42
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	44
4.1. Incêndio Florestal	45
4.1.1. Previsões do <i>software HuTheReg</i>	45
4.1.2. Previsões da folha de cálculo <i>Wet-Clothing</i>	46
4.2. Incêndio Estrutural.....	48
4.2.1. Previsões do <i>software HuTheReg</i>	48
4.2.2. Previsões da folha de cálculo <i>Wet-Clothing</i>	49
4.3. Análise e comparação dos resultados	52
5. CONCLUSÕES	56
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	58

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Variação da temperatura profunda do corpo humano e os fenômenos físicos associados (adaptado de Arens & Zhang, 2006)	4
Figura 1.2. Processos físicos envolvidos na transferência de calor e massa ao longo do vestuário de proteção de um bombeiro húmido (adaptado de Keiser, 2007)	7
Figura 2.1. Estrutura do modelo do corpo humano dividido em 22 segmentos (adaptado de Anjo, 2016).....	12
Figura 2.2. Esquema dos sistemas de controlo passivo e ativo num modelo de termorregulação do corpo humano (adaptado de Katić et al., 2016)	14
Figura 2.3. Esquema de um vestuário de proteção constituído por 3 camadas (adaptado de Fire Engineering, 2014)	15
Figura 2.4. Vestuário utilizado pelos bombeiros no presente estudo (adaptado de Morel, 2014).....	16
Figura 2.5. Caracterização geral do modelo Wet – Clothing	19
Figura 2.6. Representação esquemática do modelo desenvolvido na folha de cálculo <i>Wet-Clothing</i>	20
Figura 3.1. Relação entre a taxa metabólica (M), a temperatura ambiente e a pressão de vapor com os tempos de tolerância do indivíduo (adaptado de McLellan, 2016). 34	
Figura 4.1. Evolução temporal da temperatura do hipotálamo, da temperatura retal, da temperatura da pele máxima e da temperatura profunda do corpo humano durante o cenário de combate ao incêndio florestal em estudo e os tempos previstos para a ocorrência das patologias associadas ao stress hipertérmico	45
Figura 4.2. Incêndio florestal - Evolução temporal da resistência térmica da camada do vestuário de proteção (camada exterior à barreira de vapor)	46
Figura 4.3. Incêndio florestal - Evolução temporal da massa de água no interior da camada do vestuário de proteção.....	46
Figura 4.4. Incêndio florestal - Evolução temporal da temperatura no interior da camada da roupa interior.	47
Figura 4.5. Incêndio florestal - Evolução temporal da temperatura no interior da camada de vestuário de proteção.....	47
Figura 4.6. Incêndio florestal - Evolução temporal do fluxo de calor sensível que chega à superfície da pele.....	48
Figura 4.7. Evolução temporal da temperatura do hipotálamo, da temperatura retal, da temperatura da pele máxima e da temperatura profunda do corpo humano durante o cenário de combate ao incêndio estrutural em estudo e os tempos previstos para a ocorrência das patologias associadas ao stress hipertérmico.....	49
Figura 4.8. Incêndio estrutural - Evolução temporal da resistência térmica da camada do vestuário de proteção (camada exterior à barreira de vapor)	49

Figura 4.9. Incêndio estrutural - Evolução temporal da massa de água no interior da camada do vestuário de proteção.....	50
Figura 4.10. Incêndio estrutural - Evolução temporal da temperatura do interior da roupa interior.	50
Figura 4.11. Incêndio estrutural - Evolução temporal da temperatura do interior do vestuário de proteção.....	51
Figura 4.12. Incêndio estrutural - Evolução temporal do fluxo de calor que chega à superfície da pele.....	51

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1. Trocas de calor e massa ao longo do vestuário.....	22
Tabela 2.2. Modelo de sudação do corpo humano desenvolvido por Ooka (2010)	32
Tabela 3.1. Enumeração e caracterização dos casos em estudo para um cenário de incêndio florestal.....	42
Tabela 3.2. Enumeração e caracterização dos casos em estudo para um cenário de incêndio estrutural.	43
Tabela 4.1. Incêndio florestal - Tempo (após o início do combate ao incêndio florestal) previsto para a ocorrência das patologias associadas ao stress hipertérmico do bombeiro.....	52
Tabela 4.2. Incêndio estrutural - Tempo (após o início do combate ao incêndio estrutural) previsto para a ocorrência das patologias associadas ao stress hipertérmico do bombeiro.....	52

SIMBOLOGIA E SIGLAS

Simbologia

Símbolo	Significado	Unidades
A_{bv}	Área da superfície de controlo da barreira de vapor	[m ²]
A_{cle}	Área da superfície de controlo da camada do vestuário de proteção	[m ²]
A_{cli}	Área da superfície de controlo da camada de roupa interior	[m ²]
A_{cls}	Área da superfície exterior da camada de vestuário de proteção em contato com a envolvente térmica	[m ²]
A_{skin}	Área de superfície da pele (não contém a área da cabeça e dos pés)	[m ²]
A_{2e}	Área da superfície de vestuário que contém o nodo representativo da camada exterior da roupa interior	[m ²]
A_{2i}	Área da superfície de vestuário que contém o nodo representativo da camada interior da roupa interior	[m ²]
A_{3e}	Área da superfície de vestuário que contém o nodo representativo da camada exterior do vestuário de proteção	[m ²]
A_{3i}	Área da superfície de vestuário que contém o nodo representativo da camada interior do vestuário de proteção	[m ²]
cp_{cl}	Calor específico do vestuário	[J/(kg.°C)]
cp_w	Calor específico da água	[J/(kg.°C)]
$E_{máx}$	Calor máximo possível de ser dissipado pelo corpo humano	[W/m ²]
E_{req}	Calor metabólico dissipado necessário para manter o equilíbrio homeostático	[W/m ²]
E_{rsw}	Calor resultante da evaporação do suor requerido para a regulação da taxa de sudação do corpo humano	[W/m ²]
E_{sk}	Calor dissipado pela evaporação do suor na pele	[W/m ²]
E_{sweat}	Calor máximo perdido pela evaporação do suor	[W/m ²]

F_{aclim}	Fator de aclimatização	[-]
f_{cl}	Fator de correção da área do vestuário	[-]
F_{mwa}	Massa de água por área de vestuário	[kg/m ²]
F_{pos}	Fator de correção da posição do indivíduo	[-]
h_{conv}	Coefficiente de transferência de calor por convecção	[W/m ² .°C]
h_{fg}	Coefficiente de entalpia de vaporização	[J/kg]
h_{rad}	Coefficiente de transferência de calor por radiação	[W/m ² .°C]
I_a	Resistência térmica entre a superfície exterior do vestuário e a envolvente térmica	[m ² .°C/W]
I_{cl}	Resistência térmica intrínseca do vestuário (não inclui o I_a)	[m ² .°C/W]
I_T	Resistência térmica total do vestuário	[m ² .°C/W]
\dot{I}_{rad}	Fluxo de radiação térmica	[W/m ²]
i_{vp}	Permeabilidade ao vapor do vestuário	[-]
LR	Coefficiente de Lewis	[°C/ kPa]
M	Atividade Metabólica	[met]
m_{cl}	Massa de vestuário	[kg]
m_{cp}	Capacidade calorífica de uma determinada camada de vestuário com água no seu interior	[J/°C]
m_{evap}	Massa de água evaporada	[kg]
m_{sweat}	Massa de suor produzido pelo corpo humano	[kg]
\dot{m}_{sweat}	Taxa de suor produzido pelo corpo humano	[kg/s]
m_w	Massa de água acumulada	[kg]
Pv_{air}	Pressão parcial de vapor do ar ambiente	[kPa]
Pv_{cl}	Pressão parcial de vapor de água	[kPa]
Pv_{sk}	Pressão de vapor saturado à temperatura da pele	[kPa]

\dot{Q}_a	Calor acumulado na superfície de controlo	[W]
$\dot{Q}_{cond,A_{2e}}$	Transferência de calor resultante da condução de calor na área A_{2e}	[W]
$\dot{Q}_{cond,A_{2i}}$	Transferência de calor resultante da condução de calor na área A_{2i}	[W]
$\dot{Q}_{cond,A_{3e}}$	Transferência de calor resultante da condução de calor na área A_{3e}	[W]
$\dot{Q}_{cond,A_{3i}}$	Transferência de calor resultante da condução de calor na área A_{3i}	[W]
\dot{Q}_{conv}	Transferência de calor resultante da convecção de calor	[W]
\dot{Q}_e	Calor que entra na superfície de controlo	[W]
\dot{Q}_{evap}	Transferência de calor resultante da evaporação da massa de água	[W]
\dot{Q}_{rad}	Transferência de calor resultante da radiação de calor	[W]
\dot{Q}_s	Calor que sai na superfície de controlo	[W]
$\dot{Q}_{sweat,dif}$	Transferência de calor resultante da difusão do suor líquido existente na superfície da pele	[W]
$\dot{Q}_{sweat,evap}$	Transferência de calor resultante da evaporação do suor existente na superfície da pele	[W]
R_{cl}	Metade da resistência térmica de uma determinada camada de vestuário	[m ² .kPa/W]
R_{et}	Resistência evaporativa do vestuário	[m ² .kPa/W]
t	Tempo	[s]
T_{ar}	Temperatura do ar da envolvente térmica	[°C]
T_b	Temperatura média global do corpo humano	[°C]
T_{cle}	Temperatura no interior do vestuário de proteção	[°C]
T_{cli}	Temperatura no interior da roupa interior	[°C]
T_{cls}	Temperatura da superfície exterior do vestuário em contacto com o ar ambiente	[°C]
T_{mr}	Temperatura média radiante	[°C]

T_{skin}	Temperatura da superfície da pele	[°C]
T_{vb}	Temperatura da barreira de vapor	[°C]
v_{ar}	Velocidade do ar (pessoa parada)	[m/s]
w	Humidade da pele	[-]
w_{rsw}	Humidade da pele requerida para a manutenção do equilíbrio térmico	[-]
ΔI_T	Diminuição da resistência térmica total do vestuário	[m ² .°C/W]
ΔR_{cl}	Diminuição da resistência térmica de uma determinada camada de vestuário	[m ² .°C/W]
Δt	Intervalo de tempo	[s]
ϵ	Emissividade do vestuário	[-]
η	Eficiência da evaporação do suor	

Subscritos

Símbolo

E	Este
evap	Evaporação
ext	Camada de vestuário de proteção
i	Instante
Inf	Inferior
int	Camada de roupa interior
máx	Máximo
mín	Mínimo

N	Norte
O	Oeste
Ooka	Ok
S	Sul
Sup	Superior
sweat	Suor
wet	Molhado

Siglas

Símbolo	Significado
DEM	Departamento de Engenharia Mecânica
EN	European Norm
FCTUC	Faculdade de Ciência e Tecnologia da Universidade de Coimbra
HTI	Heat Transfer Index
ISO	International Standard Organization
LR	Lewis Relation
OMS	Organização Mundial da Saúde
NASA	National Aeronautics and Space Administration
NFPA	National Fire Protection Association
PBI	Polybenzimidazole
PHS	Predicted Heat Strain
PTFE	Polytetrafluoroethylene
RPP	Radiative Protective Performance
TPP	Thermal Protective Performance
UC	Universidade de Coimbra

1. INTRODUÇÃO

1.1. Enquadramento

Atualmente, existem diversas atividades que exigem ao ser humano um tremendo esforço físico, quando este é sujeito a níveis de exposição ao calor muito elevados, nomeadamente o combate a incêndios praticado pelos bombeiros. Os Estados Unidos, considerado um dos países mais afetados por incêndios, entre os cerca de 1,1 milhões de bombeiros que anualmente combatem os incêndios, 100 morrem todos os anos (Rosenstock & Olsen 2007; Su, Y.; He J. & Li, 2016), o que vem acontecendo desde de 1977, segundo o relatório realizado pela NFPA (Haynes, 2017).

Os danos fisiológicos a que estão sujeitos certos profissionais, nomeadamente bombeiros que enfrentam ambientes térmicos muito quentes, levou à necessidade de tentar compreender os mecanismos de termorregulação utilizados pelo corpo humano como forma de adaptação a este tipo de ambientes. O conhecimento e compreensão destes mecanismos tornam-se fulcrais para melhorar a segurança dos indivíduos expostos ao calor, de forma a prevenir danos fisiológicos causados pelo mesmo, assim como melhorar o desempenho físico do indivíduo sob condições ambientais extremas (Nagashima, 2006; Nilsson et al., 2016).

O ser humano é um animal homeotérmico, isto é, possui a capacidade de manter a temperatura corporal dentro de um intervalo de temperaturas considerado estável ($37 \pm 0,6$ °C) (HealthLink BC, 2018), ou seja, em equilíbrio térmico, mesmo quando sujeito a variações térmicas do ambiente. O sistema de termorregulação do corpo tem uma importância significativa na manutenção do equilíbrio térmico do corpo humano e numa situação normal produz os efeitos desejados, mas em certos casos o esforço físico e/ou a envolvente térmica a que está sujeito um indivíduo pode comprometer a integridade do sistema de termorregulação, o que pode resultar em dois casos: (i) o calor metabólico produzido aumenta significativamente e não existe capacidade do sistema de termorregulação de dissipar a quantidade de calor metabólica necessária ao equilíbrio térmico, resultando em hipertermia; (ii) a dissipação de calor metabólico é de tal forma excessiva, que supera o calor metabólico produzido pelo corpo humano.

Um dos elementos fundamentais para o controlo do fluxo de calor e fluxo de humidade entre o ser humano e a envolvente térmica é a pele (Arens, 2006). Em condições

térmicas normais a pele é suficiente para a manutenção do equilíbrio térmico do organismo, mas em situações de stress térmico, a existência de vestuário de proteção torna-se proeminente no seu combate. O vestuário de proteção estende assim o controlo do sistema de termorregulação, servindo como um atenuador do calor metabólico produzido pelo organismo em situações potencialmente perigosas para a integridade do ser humano, reduzindo as trocas de calor sensível e, na maior parte dos casos, permitindo a evaporação do teor de água que resulta das trocas de calor latente entre o ser humano e a envolvente térmica. A existência de água no interior do vestuário tem uma forte influência nas propriedades físicas do mesmo, como por exemplo as resistências térmica e evaporativa, a condutividade térmica ou a capacidade calorífica (Richards et al., 2015; Rosenstock & Olsen 2007; Wang et al., 2016), podendo aumentar ou diminuir a transferência de calor ao longo de vestuário.

O presente estudo é focado no vestuário utilizado no combate a incêndios florestais e estruturais.

1.2. Revisão Bibliográfica

1.2.1. Stress térmico-e patologias associadas

O sistema de termorregulação é constituído, de uma forma geral, por sensores térmicos, o centro integrador e de comando e os sistemas eferentes (Magalhães, 2001). O normal funcionamento do sistema ocorre da seguinte forma:

- ✓ Os sensores térmicos, localizados predominantemente sob a pele e em órgãos corporais profundos, detetam variações da temperatura cutânea e corporal profunda, respetivamente;

- ✓ Os estímulos provenientes dos sensores térmicos, através de vias aferentes, são integrados no centro integrador;

- ✓ No centro integrador está localizado o hipotálamo. A informação proveniente das vias aferentes é processada pelo hipotálamo e através de diversas vias eferentes promove os estímulos necessários à homeostase corporal, ou seja, promove o equilíbrio da temperatura corporal média ativando os mecanismos de conservação ou dissipação de calor, condição necessária para conservar a conformação estrutural e funcional das proteínas.

Se ocorrerem anomalias ou danos estruturais em alguns dos componentes do sistema de termorregulação, este pode perder a capacidade de regulação térmica, o que pode

levar o ser humano a ser vítima de stress térmico, definido qual a quantidade de calor que tem que ser dissipada ou produzida, por forma a manter o corpo humano em equilíbrio térmico (WHO,1969). O stress térmico não tem apenas efeito sobre o estado físico do indivíduo, mas também pelo seu estado psicológico (Guidotti, 1992; Holmér & Gavhed, 2007; Torvi & Hadjisophocleous, 1999).

Em situações em que o indivíduo é sujeito a atividades que promovem o aumento da sua temperatura corporal, a possibilidade de stress térmico é elevada. Uma das atividades que submete o corpo humano a esta ocorrência é o combate a incêndios, uma vez que estão sujeitos a operações que envolvem elevadas temperaturas do ar, elevada humidade, fontes de calor radiante, contato físico com objetos quentes e atividades físicas de elevada intensidade.

Segundo Durand (2018), dois dos sistemas fisiológicos mais utilizados como referência nos estudos realizados sobre stress térmico em bombeiros são o batimento cardíaco e a temperatura profunda do corpo humano, que sofrem mudanças em situações de hipertermia:

✓ **Batimento cardíaco** - Observou-se que quando os bombeiros são sujeitos a elevadas cargas térmicas, há aumento da sua temperatura corporal profunda e ficam sujeitos a um estado de desidratação, o que resulta na redução de volume do plasma (solução aquosa presente no sangue), na redução da quantidade de sangue bombeado pelo ventrículo por batimento e no aumento do batimento cardíaco.

✓ **Temperatura profunda do corpo humano** - Na presença de um ambiente quente, verifica-se um aumento temperatura média do corpo humano, uma vez que existe o aumento da produção de calor através de diversos mecanismos: calor produzido pelos músculos esqueléticos (metabolismo basal e atrito), o coração (metabolismo basal e bombeamento sanguíneo), o fígado (metabolismo basal e estimulação simpática) e o cérebro (metabolismo basal).

Existem discordâncias sobre o local ideal para mensurar a temperatura corporal, sendo as zonas axilar, bucal e retal as zonas as mais utilizadas para representar a temperatura profunda do corpo humano e, deste modo, funcionar como indicadores do risco de lesões associadas ao calor. Raimundo e Figueiredo (2009) reivindicam que a temperatura do hipotálamo representa melhor a temperatura profunda do corpo humano, dado que a sua temperatura está associada às patologias sentidas pelo indivíduo. Quando ocorre uma elevação da temperatura corporal como resultado de uma alteração ao nível do centro

integrador localizado no hipotálamo (aquecimento da zona preótica do hipotálamo) são acionados uma série de mecanismos destinados a manter a homeostasia do organismo, como os tremores, a sudação e a atividade vasomotora e celular (Magalhães, 2001).

A figura seguinte (Figura 1.1) ilustra uma gama de valores relativa à temperatura profunda do corpo humano e as diversas patologias que ocorrem em cada um desses valores:

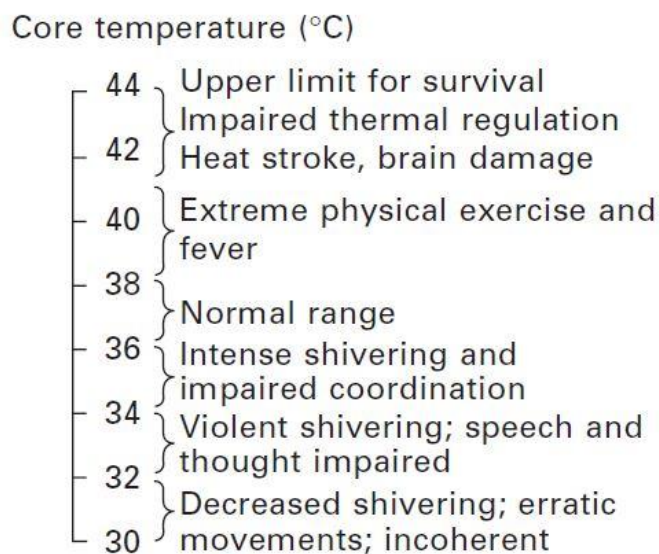


Figura 1.1. Variação da temperatura profunda do corpo humano e os fenômenos físicos associados (adaptado de Arens & Zhang, 2006)

As patologias associadas ao stress térmico sentido pelo indivíduo ocorrem devido a fatores internos, tais como o calor metabólico e as diferenças individuais e fatores externos como as características da envolvente térmica e o vestuário utilizado pelo indivíduo (Sharkey, 1999; McLellan & Selkirk, 2005; Keiser, 2007).

1.2.2. Especificação do vestuário

Durante o combate a incêndios, florestais e estruturais, os bombeiros deparam-se com diversos fatores prejudiciais ao seu conforto e saúde, não estando estes fatores apenas relacionados com as condições ambientais referentes a estes tipos de incêndios, mas também com as características do próprio vestuário utilizado. Embora o vestuário de proteção seja fundamental para garantir a segurança do bombeiro no combate a incêndios, funcionando como uma barreira que os protege do fluxo de calor, de líquidos a elevadas temperaturas, de produtos químicos e de impactos mecânicos que possam atingir o corpo humano (Park et al.,

2014), as suas características podem comprometer essa mesma segurança. De acordo com a Norma Europeia (EN 469), o vestuário de proteção de um bombeiro deve preencher uma série de requisitos:

- ✓ Proteção contra o calor proveniente das chamas e da radiação térmica
- ✓ Proteção contra líquidos a elevadas temperaturas e outros químicos
- ✓ Resistência à abrasão e outras cargas mecânicas
- ✓ Inflamável e infusível
- ✓ Sem encolhimento
- ✓ Fácil de lavar
- ✓ Leve e confortável
- ✓ Respirável

São diversos os estudos realizados com o objetivo de melhorar a performance do vestuário de proteção e de uma forma geral isso tem vindo a acontecer nas últimas décadas (Keiser, 2007), mas a dificuldade em construir um vestuário que garanta um equilíbrio entre a proteção térmica do bombeiro e o seu conforto tem sido alvo de uma constante melhoria e inclusive mencionado em diversos estudos realizados (Holmér, 2006; Li et al., 2007; Nayak et al., 2014). Na tentativa de melhorar a proteção térmica do vestuário de proteção, um aumento do peso da roupa, como também da rigidez, da espessura e do volume do vestuário (Bakri & Tochihara, 2015; Bröde et al., 2010; Li et al., 2007; Nayak et al., 2014) , pode aumentar a produção de calor metabólico por parte do organismo do ser humano, assim como restringir o fluxo de calor entre o corpo humano e a envolvente térmica, levando à possível existência de uma situação de stress térmico. A maior preocupação na construção de um vestuário de proteção é garantir a maior proteção do indivíduo do fluxo de calor que o pode comprometer, através de uma dissipação de calor metabólico para a envolvente térmica que providencie o equilíbrio e conforto térmico do corpo humano.

Efeito da água no vestuário de proteção

A performance do vestuário de proteção é afetada pela presença de água. A presença de água e a sua distribuição no vestuário, juntamente com os materiais utilizados no fabrico do vestuário, o design do vestuário e as características da envolvente térmica afetam a proteção térmica do vestuário. A transferência de calor no vestuário é alterada na presença de água, uma vez que as propriedades térmicas do vestuário sofrem alterações,

como o coeficiente de capacidade térmica, a condutividade térmica do vestuário e as resistências térmica e evaporativa.

A presença de água no vestuário deve-se quer a fatores internos (perspiração produzida pelo bombeiro) quer a fatores externos (chuva, mecanismos utilizados para molhar o vestuário, etc.) (Lawson et al., 2004). Os fatores mais importantes que afetam a transferência de calor ao longo do vestuário são: o grau de absorção de água, o local onde está concentrada a água no vestuário e a sua fonte de origem, o momento/altura de exposição (antes, durante ou depois da exposição da radiação térmica) e a duração dessa exposição (Keiser, 2007). Por exemplo, Barker et al. (2006) estudaram a influência da água absorvida pelo vestuário de proteção no desempenho do mesmo, verificando que o teor de água diminui severamente a performance de proteção do vestuário, para teores baixos de água. Fukazawa et al. (2005) estudaram o transporte de vapor de água e a distribuição da condensação de água ao longo do vestuário de proteção e verificaram que para elevadas taxas de produção de suor ocorre uma elevada condensação.

Também foram realizados alguns estudos em relação aos efeitos da localização do teor de água. Weder et al. (2006) estudou a distribuição da água em vestuários de proteção constituído por multicamadas e verificou que a maior parte da água se acumulava nas duas camadas mais próximas da pele. Por seu lado, Keiser et al. (2008) verificaram que o teor de água de uma única camada depende das propriedades desta e das propriedades da camada vizinha ou dentão das propriedades resultantes da combinação de ambas, verificando assim que a distribuição total da água é definida pelas diferentes combinações de camadas de vestuário.

O mecanismo de transferência de calor a temperaturas baixas tem sido estudado de forma intensiva e já se encontra bem compreendido, mas o mecanismo de transferência de calor através do vestuário é algo complexo quando se depara com temperaturas elevadas ($T > 35^{\circ}\text{C}$). A temperaturas elevadas, através de medições relacionadas a transferência de calor (HTI, TPP, RPP), diversos autores chegaram à conclusão que a presença de água no vestuário pode aumentar ou diminuir a insulação térmica, afetando assim a proteção térmica do vestuário.

Transferência de calor ao longo do vestuário

Quando se verifica a existência de uma situação de incêndio ou outra situação térmica semelhante, os principais processos físicos envolvidos consistem na transferência de calor e massa (Figura 1.2). Os principais mecanismos de transferência de calor são a condução, convecção e radiação térmica, enquanto que a transferência de massa envolve os processos de difusão de água líquida (processo capilar) e difusão de vapor de água. Ambos os processos de transferência de calor e massa são acompanhados pelos processos de evaporação e condensação.

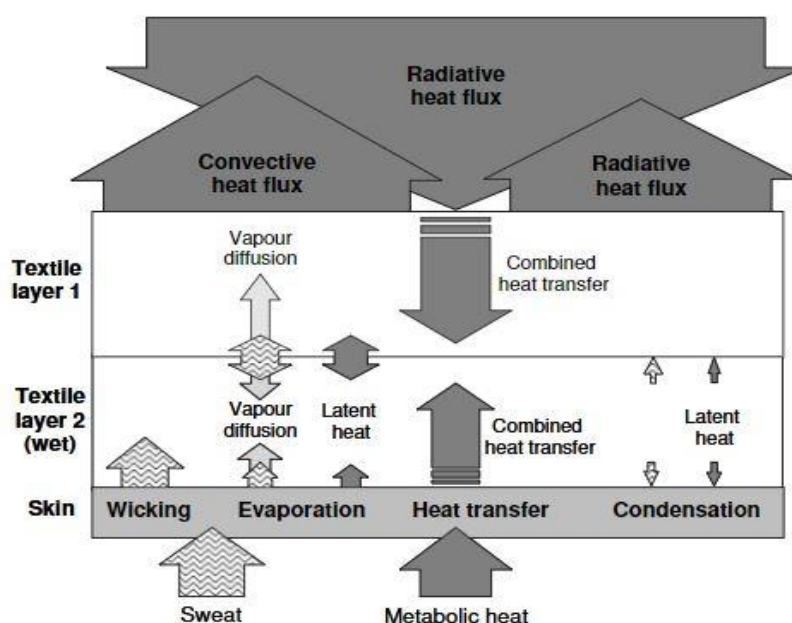


Figura 1.2. Processos físicos envolvidos na transferência de calor e massa ao longo do vestuário de proteção de um bombeiro húmido (adaptado de Keiser, 2007)

Condução

A transferência de calor do pelo processo de condução ocorre entre a pele e uma superfície envolvente (líquida ou sólida), devido não só ao gradiente de temperatura como também à condutividade térmica da superfície em questão. Na situação de combate a um incêndio, a condução de calor começa a partir do momento que a pele do bombeiro entra em contato com o vestuário de proteção.

A condução de calor entre a pele e o vestuário aumenta significativamente se o vestuário ficar molhado ou for comprimido. No primeiro caso, a água fornece uma ligação entre superfícies isoladas, deslocando o ar no interior das camadas do vestuário como

também o ar entre camadas, o que aumenta a condução de calor. Por outro lado, a compressão das camadas de vestuário, induzida pela posição de rastejo e o contato com superfícies quentes durante o combate a incêndios (Morel et al., 2014), aproxima as superfícies sujeitas ao processo de condução, contribuindo para o seu aumento. O pior caso que poderia acontecer é considerar o vestuário completamente saturado de água e comprimido contra um objeto quente, pois se tornaria doloroso para o corpo humano.

Convecção

A convecção resulta da troca de calor entre o corpo humano e do fluido da envolvente térmica (ar ou água) (Holmér et al., 1998). Depende fundamentalmente da área superficial do corpo humano exposta, do coeficiente de convecção do ar da envolvente térmica e das diferenças de densidade causadas por gradientes de temperatura entre a superfície exposta (pele ou vestuário) e o fluido da envolvente térmica.

A convecção afeta a transferência de calor para a roupa como também a transferência de calor entre as camadas de vestuário e o corpo devido ao fenómeno de ventilação (natural ou forçada). Estudos realizados afirmam que durante a atividade física, o movimento do corpo aumenta a circulação de ar contida no interior do vestuário, o que aumenta o mecanismo convectivo de transferência de calor.

Radiação

A transferência de calor por radiação entre a fonte responsável pela emissão de energia eletromagnética e o corpo humano, ocorre principalmente devido à diferença de temperaturas entre as duas superfícies envolvidas. A troca de calor por radiação depende do gradiente de temperatura entre duas superfícies, a distância entre as duas superfícies e a refletividade das respetivas superfícies.

Considerando a troca de calor por radiação entre o vestuário de proteção e as superfícies envolventes, a absorvidade do tecido do vestuário em causa influencia a taxa de transferência de calor por radiação (Naval Air Development Center, 1970). Quanto maior a absorvidade do tecido, maior é a acumulação de energia radiativa por parte do vestuário (Keiser, 2007). No entanto, durante o combate a um incêndio, o vestuário fica sujo e molhado, o que aumenta a absorvidade e diminui a proteção do bombeiro.

Difusão de vapor de água e difusão de água líquida (Keiser, 2007)

A difusão de vapor de água ocorre devido a um gradiente de pressão de vapor, o que permite obter a transferência de vapor de água entre dois pontos distintos do vestuário.

A difusão de água líquida é um processo que depende das propriedades hidrofílicas do tecido, da fibra do tecido, o processo de fabrico do tecido e também d modo como estão combinadas as diferentes camadas do vestuário. Quanto mais camadas de vestuário existirem, mais complexo se transforma a transferência de água líquida.

Evaporação/Condensação

A perda de calor por evaporação ocorre quando o calor é transferido para a envolvente térmica, uma vez que a água líquida existente nas vias respiratórias e na superfície da pele muda de fase. Esta mudança de fase ocorre desde que a pressão parcial de vapor seja menor que a pressão de saturação à mesma temperatura. Se a pressão de saturação for atingida, dá-se início ao processo de condensação (Keiser, 2007). A condensação corre fundamentalmente durante atividades de elevado esforço físico, concentrando-se em zonas do vestuário onde a permeabilidade é menor (Lotens, 1993).

Quando a temperatura da envolvente térmica é elevada e superior à temperatura da pele, o corpo humano absorve calor através dos mecanismos de condução e de radiação, logo, o corpo humano fica dependente do fenómeno de evaporação como forma de perder calor e assim evitar uma subida perigosa da temperatura corporal.

A evaporação do suor a partir da pele e das vias respiratórias é a principal forma do corpo humano dissipar calor para a envolvente térmica quando a temperatura desta ultrapassa a temperatura da pele. A evaporação da pele, retira o calor armazenado em excesso do corpo humano, funcionando como um mecanismo natural de arrefecimento corporal. No entanto, a evaporação pode ser reduzida na presença de um ambiente térmico muito húmido, baixa velocidade do ar e pela próprio vestuário (Pascoe et al., 1994): elevada humidade limita a quantidade de calor perdido por evaporação; a velocidade reduzida do ar à volta do corpo humano leva à saturação de vapor de água, o que limita a taxa de evaporação perdida para a envolvente térmica; o vestuário prende a água no interior do vestuário antes que ela evapore, o que aumenta a temperatura do vestuário que, posteriormente, pode contribuir para o stress térmico do corpo humano.

A realização de atividade física em ambientes quentes e húmidos representa um desafio à manutenção do equilíbrio térmico do corpo humano, uma vez que é perdido uma

grande quantidade de suor que pouco contribui para o arrefecimento corporal. A perda elevada de suor contribui negativamente para a diminuição do volume da reserva de fluido corporal, colocando o corpo humano sob o estado de desidratação.

1.3. Objetivos

O presente trabalho tem como principal objetivo desenvolver um modelo matemático de simulação da transferência de calor e massa que ocorre em vestuário impregnado (ou não) com água, nomeadamente nas situações de combate a incêndios florestais e estruturais. Com a implementação do modelo matemático desenvolvido numa folha de cálculo em MS Excel (*Wet-Clothing*), pretende-se avaliar o efeito da água na possível melhoria da proteção térmica do bombeiro durante o combate às duas tipologias de incêndio mencionadas.

Adicionalmente serão analisados vários casos distintos que diferem na conjugação de diferentes tipos de construção de vestuário e diferentes massas de água. Para cada caso serão obtidas a evolução das temperaturas no interior do vestuário em análise e o fluxo de calor que chega à pele.

Através da utilização de um software de análise do comportamento termofisiológico do corpo humano, o programa *HuTheReg*, serão obtidos os tempos máximos de combate em segurança de incêndios florestais e estruturais. Com a ferramenta *Wet-Clothing* será analisada a influência da impregnação do vestuário com água no comportamento termofisiológico de bombeiros em situação de combates a incêndios.

2. METODOLOGIA

2.1. Metodologia Geral

Na continuação de trabalhos anteriormente realizados na área da termorregulação do corpo humano foi utilizado um software, denominado *HuTheReg*, na simulação do comportamento termofisiológico do corpo humano na presença de condições externas que possibilitem a existência de situações de stress térmico, nomeadamente o combate a incêndios, sobre o qual se insere o tema em estudo. Apesar do software ter a vantagem de prever uma situação real de um combate a um incêndio, a aplicação do mesmo apenas é propícia em situações em que o vestuário do bombeiro é “seco”, ou seja, em situações em que o vestuário não está impregnado com água.

Esta contrariedade levou à necessidade de criar e validar um modelo termo – higrométrico do vestuário, numa folha de cálculo em MS Excel, denominada por *Wet-Clothing*. Este modelo matemático possibilita o estudo térmico e mássico, a nível de trocas de calor latente e sensível, entre o corpo humano e a envolvente térmica. O objetivo inicial era implementar este novo modelo, já validado, no código já existente do programa *HuTheReg*, algo que não se revelou compatível de ser feito.

No presente trabalho, o programa *HuTheReg* e a ferramenta *Wet-Clothing* são utilizados em complementaridade. O programa *HuTheReg* é utilizado na simulação de cenários de combates a incêndios (florestais e estruturais) e na resposta termofisiológica dos bombeiros aos mesmos, fornecendo dados exclusivamente intrínsecos ao corpo humano, como a evolução temporal das temperaturas da pele, a evolução temporal do calor do corpo humano e a evolução temporal das temperaturas internas do corpo humano e da temperatura do vestuário de proteção. Para além das características da envolvente térmica e do vestuário de proteção, a temperatura média da pele e a temperatura média do corpo humano (imediatamente antes do combate ao incêndio (fase de pré-combate), inserida no núcleo das temperaturas internas do corpo humano são utilizadas, posteriormente, na ferramenta *Wet-Clothing*, sendo essenciais ao funcionamento deste.

Como foi mencionado, a ferramenta *Wet-Clothing*, fazendo uso de dados fornecidos pelo programa *HuTheReg*, das condições ambientais caracterizadoras dos incêndios florestais e estruturais, das características físicas do vestuário e da massa de água contida nas camadas que constituem o vestuário, é utilizado para avaliar a necessidade ou

não do impregnamento do vestuário de proteção na redução do stress térmico dos bombeiros, fornecendo dados sobre a evolução temporal do fluxo de calor entre a pele e a envolvente térmica, das temperaturas internas do vestuário e da taxa de evaporação da água contida no interior do vestuário. No presente estudo, a ferramenta *Wet-Clothing*, realiza-se simulações para o vestuário seco e para vestuário molhado, com o objetivo de perceber se é benéfico para o conforto e segurança dos bombeiros molhar o vestuário.

2.2. Software *HuTheReg*

Um dos primeiros modelos de termorregulação constituídos por múltiplos nodos foi desenvolvido por Stolwijk para a NASA (1971), com o intuito de prever o comportamento termofisiológico dos astronautas no espaço. O software *HuTheReg*, desenvolvido por Raimundo baseia-se num dos primeiros modelos de termorregulação do corpo humano constituídos por múltiplos nodos, desenvolvido por Stolwijk para a NASA (1972), com o intuito de prever o comportamento termofisiológico dos astronautas no espaço. O modelo desenvolvido por Stolwijk é constituído por 25 nodos articulados em 6 segmentos, enquanto que o modelo desenvolvido por Raimundo (Figura 2.1) é constituído por 111 nodos (22 segmentos). Cada um dos 22 segmentos é formado por 5 camadas (núcleo, músculo, gordura, pele e roupa), enquanto que o compartimento sanguíneo central perfaz o nodo 111).

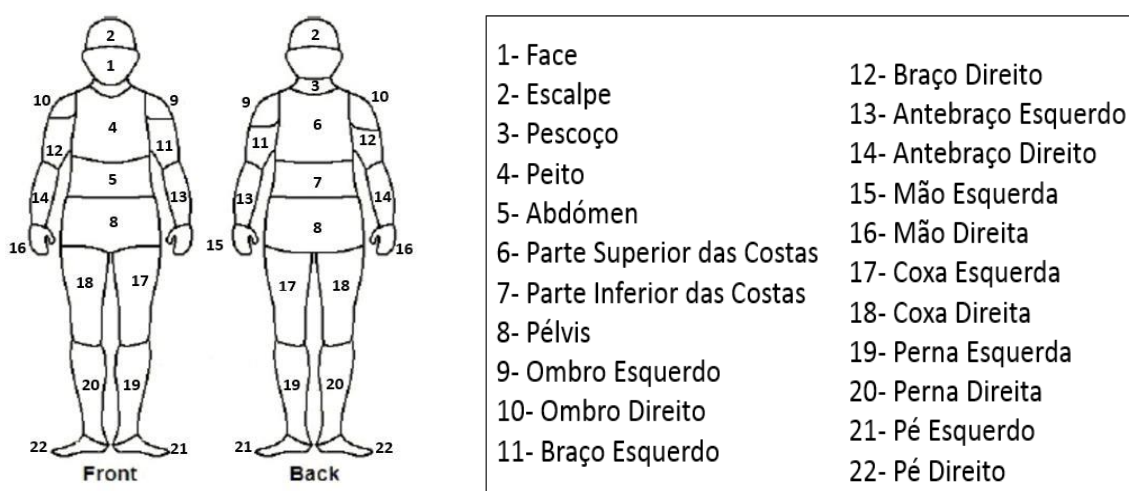


Figura 2.1. Estrutura do modelo do corpo humano dividido em 22 segmentos (adaptado de Anjo, 2016)

O software *HuTheReg* é composto por sete módulos: (i) resposta termofisiológica do corpo humano; (ii) o transporte de calor e água através do vestuário; (iii) a troca de calor e massa entre o vestuário e a envolvente térmica; (iv) função respiratória e cardiovascular; (v) quantificação e análise do conforto térmico sentido pela pessoa ou estimativa do stress térmico; (vi) o 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 e Figueiredo, 2009). Depois da introdução dos dados relativos ao corpo humano e à envolvente térmica, o programa gera ficheiros ilustrativos da capacidade termofisiológica do corpo humano, tendo em conta determinadas condições ambientais.

Este modelo foi concebido para um indivíduo médio com 1,72 m de altura, 74,43 kg de massa corporal e 17% de gordura corporal (1,869 m² 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).

Tal como muitos outros modelos de termorregulação, o algoritmo de cálculo do software *HuTheReg* é composto por dois sistemas, um sistema de controlo passivo e outro ativo (Raimundo e Figueiredo, 2009; Raimundo et al., 2012):

- O sistema de controlo passivo simula a constituição física do corpo, como também o fluxo de calor que ocorre no interior do corpo humano e o fluxo de calor entre o corpo humano e a envolvente térmica. O calor metabólico do corpo humano é continuamente gerado e distribuído pelo organismo através da circulação sanguínea. O fluxo de calor é transferido através das camadas de tecido corporal até ao vestuário através do mecanismo de condução de calor. Por último ocorre uma transferência de calor com a envolvente térmica através de uma combinação dos mecanismos de condução, convecção, radiação e evaporação.

- O sistema de controlo ativo é responsável por controlar o sistema de controlo passivo, como forma de manter o equilíbrio térmico do corpo humano quando existe uma destabilização deste por parte da envolvente térmica. Este sistema é responsável simula a resposta termofisiológica do corpo humano através de diversos mecanismos, nomeadamente, a vasoconstrição, a vasodilatação, tremuras e a transpiração.

As componentes ativa e passiva do modelo termofisiológico do modelo *HuTheReg* (Figura 2.2) encontram-se descritas em Raimundo & Figueiredo (2006, 2009), Abreu (2014), Pereira (2015) e em Anjo (2016).

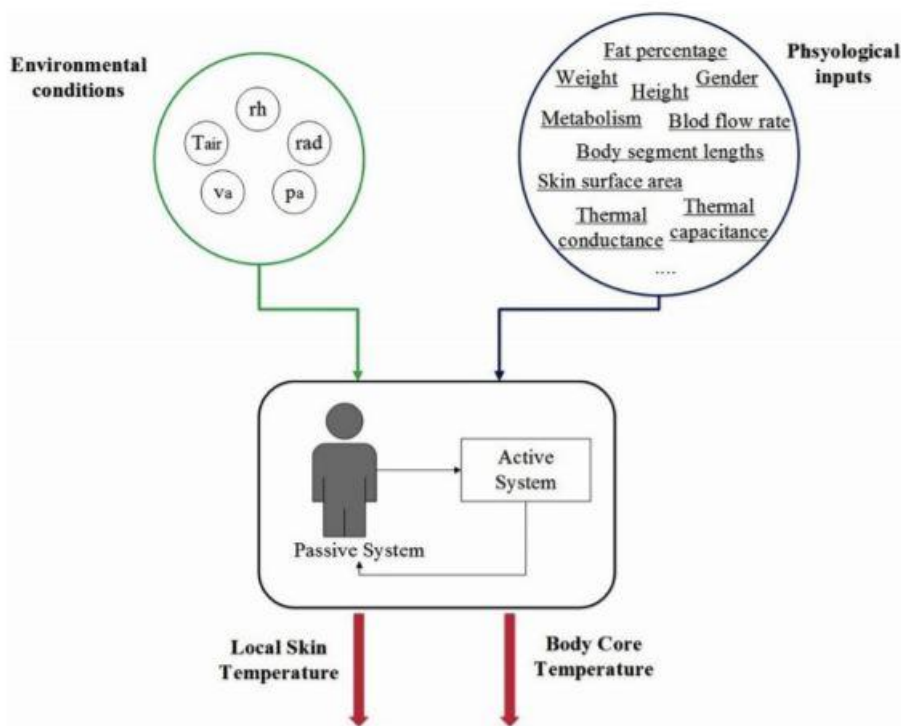


Figura 2.2. Esquema dos sistemas de controlo passivo e ativo num modelo de termorregulação do corpo humano (adaptado de Katić et al., 2016)

2.3. Folha de Cálculo *Wet-Clothing*

2.3.1. Especificação do vestuário

Holcombe (1981) demonstrou que um vestuário de proteção constituído por multicamadas providencia uma melhor proteção que um vestuário de proteção constituído apenas por uma camada, uma vez que as camadas de roupa no interior do vestuário potenciam uma melhor resistência térmica. A maior parte dos vestuários de proteção é constituído por 3 camadas, Figura 2.3, (camada exterior, barreira à humidade e o forro térmico), cada uma com uma função diferente (McQuerry et al., 2017; Young, 2010):

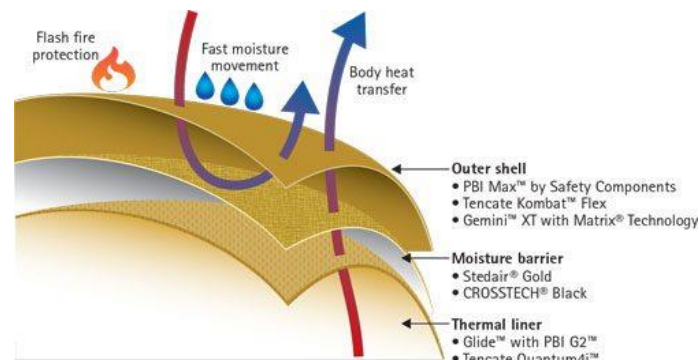


Figura 2.3. Esquema de um vestuário de proteção constituído por 3 camadas (adaptado de Fire Engineering, 2014)

-A Camada Exterior (“Outer Shell”) é a primeira linha de defesa contra o calor, impactos mecânicos e o impacto da chama, garantindo assim a integridade e a eficácia das outras camadas. Esta camada é normalmente constituída por materiais como o Kevlar, Nomex e PBI, numa combinação simbiótica.

- Debaixo da camada exterior do vestuário de proteção encontra-se a Barreira à Humidade (“Moisture Barrier”), a camada mais frágil e vulnerável a danos. Esta barreira garante a resistência à água, químicos e agentes virais. Geralmente, esta barreira possui na sua constituição uma película permeável de PTFE expandido (PolyTetraFluoroEthylene) laminada. Esta barreira pode prevenir totalmente a difusão de água líquida, mas ser permeável à passagem de vapor de água. Por outro lado, com uma barreira totalmente impermeável, a pressão de vapor saturado da camada de ar entre a pele e o vestuário aumenta até ao ponto de saturação.

- O Forro Térmico (“Thermal Liner”) é o componente crítico do vestuário de proteção, uma vez que possui o maior impacto na proteção térmica e redução do stress térmico. O forro térmico é constituído por diversas camadas, sendo a camada mais interior (junta à pele) responsável pela melhoria da mobilidade, do conforto e no controlo da humidade presente no vestuário.

No trabalho presente, o vestuário total utilizada por um bombeiro sujeito ao combate de incêndios florestais e estruturais, será constituída por um vestuário de proteção, uma camada de roupa interior e uma barreira à água líquida e ao vapor de água (adimensional) entre as duas camadas (Figura 2.4).

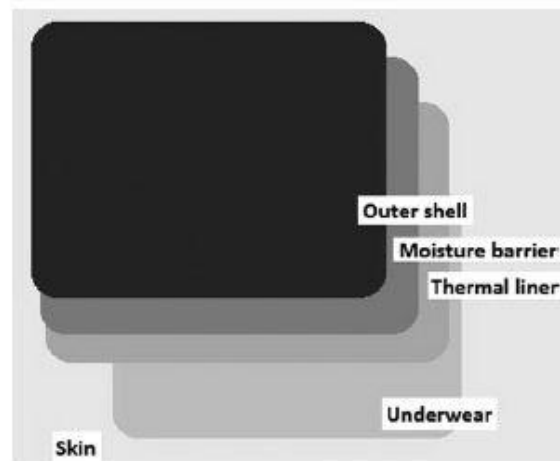


Figura 2.4. Vestuário utilizado pelos bombeiros no presente estudo (adaptado de Morel, 2014)

As camadas que constituem o vestuário total possuem as seguintes características:

- O vestuário de proteção (camada em contato com a envolvente térmica) engloba, de forma complementar, as características individuais das camadas que o constituem, tal como é mencionado anteriormente.

- A camada de roupa interior é leve e obrigatoriamente mais leve que o vestuário de proteção, uma vez que não influencia de forma tão significativa a transferência de calor entre a pele e a envolvente térmica e, conseqüentemente, a proteção de bombeiro. Apesar disso, a roupa interior tem um papel importante em relação à sensação de conforto do bombeiro. Este conforto é obtido através das características do tecido que compõe a camada de roupa interior, nomeadamente, o facto de este dever afastar a humidade da pele, que existe principalmente devido ao fenómeno de condensação.

- A barreira à água líquida e ao vapor de água é considerada totalmente impermeável e adimensional, ou seja, não deixa que nenhuma massa de água a atravesse qualquer que seja o sentido e direção e tem uma espessura desprezável, respetivamente. Embora impermeável a qualquer fluxo de água que a atravesse, esta barreira não é impermeável ao fluxo térmico de calor que a possa atravessar.

São diversas as características do vestuário que influenciam o fluxo de calor entre o corpo humano e a envolvente térmica, mas as mais importantes são as resistências térmica e evaporativa (Holmér, 2006):

- A resistência térmica do vestuário é a resistência ao fluxo de calor resultante dos processos de condução, convecção e radiação e é determinada pelas propriedades dos

materiais que constituem as diferentes camadas do vestuário e a sua disposição no vestuário, as camadas de ar no interior de cada camada e as camadas de ar entre cada camada. A resistência térmica total do vestuário é definida pela seguinte equação matemática:

$$I_T = I_{cl} + \frac{I_a}{f_{cl}} \quad (2.1)$$

em que I_{cl} , I_a correspondem à resistência térmica do vestuário e à resistência térmica da camada de ar, respetivamente e f_{cl} corresponde ao fator de correção da área do vestuário.

No presente trabalho, os valores de I_{cl} e I_a são obtidos a partir da norma ISO 9920. A partir da consulta de determinadas tabelas existentes na norma é possível encontrar os valores de resistência térmica das mais variadas peças de vestuário, enquanto que para se obter o valor de I_a recorre-se à seguinte equação:

$$I_a = \frac{1}{h_{conv} + h_{rad}} \quad (2.2)$$

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

Os valores de h_{conv} e h_{rad} são obtidos através das seguintes equações, também presentes na norma ISO 9920:

$$h_{conv} = \begin{cases} 2,38 |T_{skin} - T_{ar}|^{0,25} \\ 3,5 + 5,2 v_{ar} \\ 8,7 v_{ar}^{0,6} \end{cases} \rightarrow \text{O maior valor corresponde ao valor-a} \quad (2.3)$$

considerar

$$h_{rad} = 5,67 \cdot 10^{-8} \varepsilon F_{pos} \frac{(T_{cls}+273)^4 - (T_{mr}+273)^4}{T_{cls} - T_{mr}} \quad (2.4)$$

onde T_{skin} , T_{ar} , T_{cls} e T_{mr} representam as temperaturas da superfície da pele, a temperatura do ar, a temperatura da superfície exterior do vestuário de proteção. F_{pos} representa o fator de posição do indivíduo e v_{ar} , ε representam a velocidade do ar e a emissividade do vestuário.

- A resistência evaporativa é a resistência ao fluxo de calor resultante do processo de evaporação. Esta resistência é influenciada pelo tamanho dos poros existentes no tecido das respetivas camadas do vestuário e das camadas de ar existentes no interior de cada camada e entre as camadas. A resistência térmica é definida pela seguinte equação matemática:

$$R_{et} = \frac{I_T}{LR i_{vp}}. \quad (2.5)$$

onde LR corresponde à constante de Lewis (equivalente na maior parte das aplicações a $16.65 \text{ }^\circ\text{C}/\text{kPa}$ e i_{vp} corresponde à permeabilidade térmica ao vapor.

A resistência térmica e a resistência evaporativa, juntamente com outras características características do vestuário definem as diferentes camadas do vestuário total (vestuário de proteção e roupa interior) utilizado pelos bombeiros nos incêndios florestais e estruturais.

Sendo o vestuário de proteção (camada exterior do vestuário) mais determinante na proteção térmica do bombeiro do que a camada de roupa interior (camada interior do vestuário), será este que terá a maior resistência térmica.

No presente estudo, um dos objetivos é determinar a influência da massa de água nas características físicas do vestuário, sendo que um dos fatores que influencia mais a transferência de calor ao longo do vestuário é o local onde está concentrada a água no vestuário (Keiser, 2007). Havendo água na camada interior e exterior do vestuário, dividir-se-á as respetivas camadas em diferentes percentagens da massa e resistência térmica total do vestuário, sendo assim possível estudar qual a melhor local para concentrar a água no interior de cada camada de vestuário, de forma a influenciar positivamente a transferência de calor ao longo do vestuário e, assim, garantir uma melhor proteção do bombeiro.

2.3.2. Algoritmo global

A ferramenta *Wet-Clothing*, desenvolvida com o recurso ao *software* Excel da Microsoft, representa um modelo matemático puramente explícito concebido com o intuito de simular a transferência de calor e massa no vestuário do bombeiro durante o combate a incêndios (florestais e estruturais), tendo em conta dois cenários diferentes: vestuário seco e o vestuário impregnado com água.

Através da extração dos valores da temperatura profunda do corpo humano e da temperatura média da pele obtidas pelo programa *HuTheReg* no instante imediatamente antes ao início do combate ao incêndio e tendo em conta a conjugação de ambas com as características da envolvente térmica, com as características do corpo humano, com as características do vestuário, com os fenómenos de condução, convecção, radiação e evaporação e com a massa de água no interior das camadas de vestuário (Figura 2.5), é possível modelar a resposta térmica do vestuário perante um cenário de incêndio, que se

divide nos seguintes módulos: (i) evolução transiente da resistência térmica e evaporativa de cada camada; (ii) evolução transiente das temperaturas das camadas do vestuário (temperatura média da camada de roupa interior, temperatura média do vestuário de proteção, temperatura da superfície exterior do vestuário de proteção e a temperatura da barreira à água); (iii) evolução transiente da massa de água evaporada na camada interior e exterior do vestuário; (iv) evolução transiente do fluxo de calor entre a superfície da pele e a envolvente térmica, nomeadamente, o fluxo de calor que chega à superfície da pele e o fluxo de calor que chega à superfície do vestuário exterior.



Figura 2.5. Caraterização geral do modelo Wet – Clothing

2.3.3. Modelação numérica

O modelo *Wet-Clothing* desenvolvido a partir do programa Microsoft Excel está representado esquematicamente da Figura 2.6:

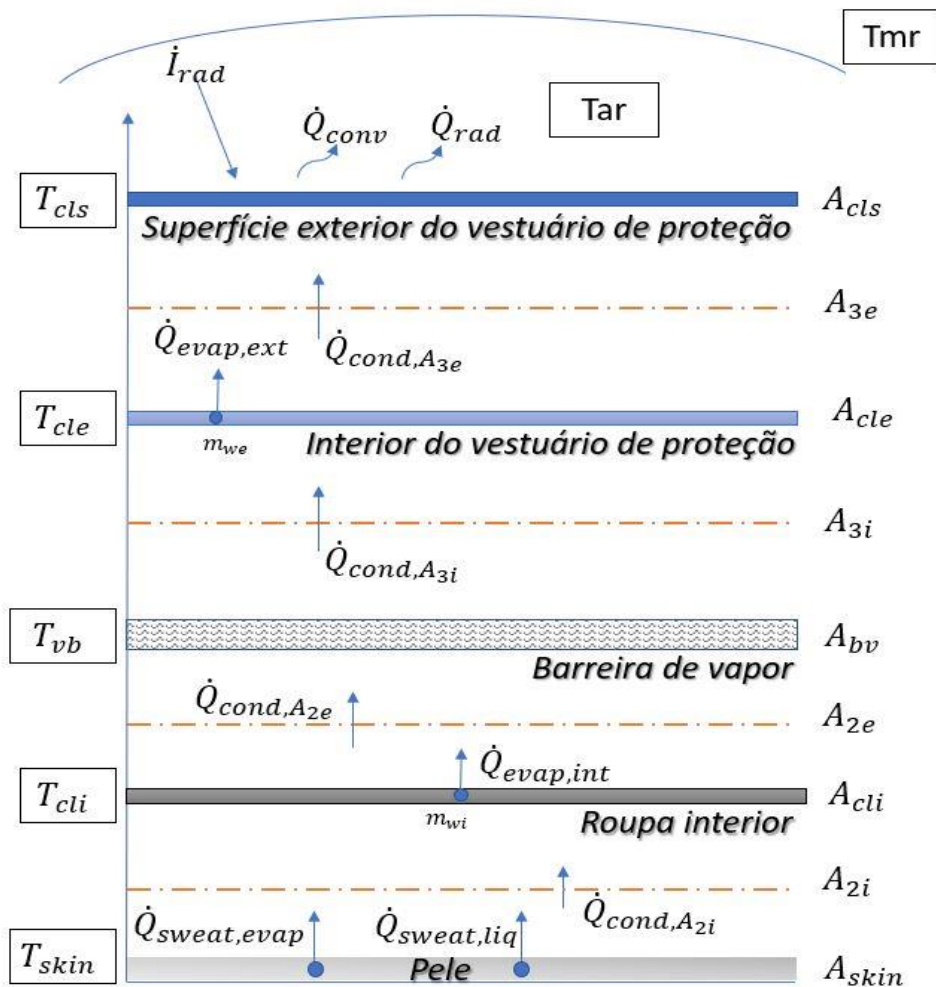


Figura 2.6. Representação esquemática do modelo desenvolvido na folha de cálculo *Wet-Clothing*.

Pela observação da representação esquemática do modelo, verifica-se que o modelo numérico é constituído por 4 nós e 5 superfícies de controlo:

- ✓ 1ª Superfície de controlo - superfície da pele, representada na figura pelo termo “Pele” e pela área A_{skin} ;
- ✓ 1º Nodo – nodo representativo da camada interior da roupa interior, representado na figura pela área A_{2i}
- ✓ 2ª Superfície de controlo – roupa interior, representada na figura pelo termo “Roupa interior” e pela área A_{cli} ;

- ✓ 2º Nodo – nodo representativo da camada exterior da roupa interior, representado na figura pela área A_{2e} ;
- ✓ 3ª Superfície de controlo – barreira de vapor, representada na figura pelo termo “Barreira de vapor” e pela área A_{bv} ;
- ✓ 3º Nodo – nodo representativo da camada interior do vestuário de proteção, representado na figura pela área A_{3i} ;
- ✓ 4ª Superfície de controlo – interior do vestuário de proteção, representada na figura pelo termo “Interior do vestuário de proteção” e pela área A_{cle} ;
- ✓ 4º Nodo – nodo representativo da camada exterior do vestuário de proteção, representado na figura pela área A_{3e} ;
- ✓ 5ª Superfície de controlo – superfície do vestuário de proteção em contato com a envolvente térmica, representada na figura pelo termo “Superfície exterior do vestuário de proteção” e pela área A_{cls} ;

Ao contrário do programa *HuTheReg*, em que a área total da pele do indivíduo resulta da soma da área dos 22 segmentos que constituem o indivíduo, a área total da pele, na ferramenta *Wet-Clothing* não tem em conta a área da cabeça (face e escalpe) e dos pés. Por outro lado, as áreas relativas ao vestuário resultam das seguintes expressões, retirada na norma ISO 9920:

$$\begin{cases} f_{cl} = 1 + 0,2 I_{cl}, se I_{cl} \leq 0,5 \\ f_{cl} = 1,05 + 0,1 f_{cl}, se I_{cl} > 0,5 \end{cases} \quad (2.6)$$

em que f_{cl} é o fator de correção da área.

A transferência de calor e massa que ocorrem nas áreas de vestuário referentes aos respetivos nodos e superfícies de controlo, ao longo do vestuário, e visíveis na Figura 2.6, estão especificadas na Tabela 2.1:

Tabela 2.1. Trocas de calor e massa ao longo do vestuário

	Transferência de calor	Transferência de massa
1ª Superfície de controlo	-	Evaporação de suor ($\dot{Q}_{sweat, evap}$) Difusão líquida de suor ($\dot{Q}_{sweat, liq}$)
1ª Nodo	Condução de calor ($\dot{Q}_{cond, A_{2i}}$)	-
2ª Superfície de controlo	-	Evaporação de água presente na roupa interior ($\dot{Q}_{evap, int}$)
2ª Nodo	Condução de calor ($\dot{Q}_{cond, A_{3i}}$)	-
3ª Nodo	Condução de calor ($\dot{Q}_{cond, A_{2e}}$)	-
4ª Superfície de controlo	-	Evaporação de água presente na roupa interior ($\dot{Q}_{evap, ext}$)
4ª Nodo	Condução de calor ($\dot{Q}_{cond, A_{3e}}$)	-
5ª Superfície de controlo	Convecção de calor (\dot{Q}_{conv}) Radiação de calor (\dot{Q}_{rad} e \dot{I}_{rad})	-

A evolução temporal das temperaturas do vestuário (temperatura média da roupa interior (T_{cli}), temperatura média da barreira de vapor (T_{bv}), temperatura média do vestuário de proteção (T_{cle}), temperatura da superfície exterior do vestuário de proteção (T_{cls})), a evolução temporal da massa de água evaporada no interior da roupa interior e no interior do vestuário de proteção, se este for impregnado com água, são obtidas a partir de balanços térmicos e mássicos realizados nas superfícies de controlo anteriormente mencionadas.

A existência de água no interior da roupa interior e do vestuário de proteção altera certas propriedades físicas do vestuário que, posteriormente, afeta a transferência de calor e massa ao longo do vestuário. A resistência térmica e a resistência evaporativa são as duas características físicas do vestuário que mais afetam a transferência de calor ao longo do vestuário (Holmér, 2006; Huang, 2006). Na maior parte da bibliografia analisada, verifica-se que a existência de água no interior do vestuário leva à diminuição das destas resistências (Lu, et al., 2016; Wang et al., 2016; Wanget al., 2015). Através do estudo realizado por (Lu

et al., 2016), num manequim Newton, obteve-se as equações respetivas à diminuição da resistência térmica e à resistência térmica total devido à presença de água, respetivamente:

$$\Delta I_T (\%) = 0.0000001 w_t^3 - 0,00016 w_t^2 + 0,1004 w_t \quad (2.7)$$

$$I_{T,wet} = I_T \left(1 - \frac{\Delta I_T}{100} \right) \quad (2.8)$$

Na equação respetiva à diminuição da resistência térmica ($\Delta I_T (\%)$), w_t refere-se ao teor de água e tem gramas (g), como unidade. Esta equação foi alterada, de modo a que ΔI_T deixasse de ter percentagem como unidade e passasse a ter a unidade utilizada pelo Sistema Internacional ($\frac{m^2 \cdot ^\circ C}{W}$), substituindo-se w_t por F_{mwa} , que corresponde ao teor de água por unidade de área do vestuário. Tendo em conta esta alteração, a nova fórmula a ser utilizada para a diminuição da resistência térmica passa a ser composta da seguinte forma:

$$\Delta I_T = 4,887 F_{mwa}^3 - 4,6077 F_{mwa}^2 + 1,7038 F_{mwa} \quad (2.9)$$

Balço térmico à superfície exterior do vestuário de proteção (5ª superfície de controlo)

Para a obtenção da temperatura da superfície exterior do vestuário de proteção (T_{cls}), considerou-se um balanço térmico em regime transiente na área vestuário entre a superfície exterior do vestuário de proteção e a envolvente térmica (A_{cls}), tendo em conta apenas as trocas calor sensível entre os mesmos através dos fenómenos de condução, convecção e radiação.

$$\dot{Q}_e = \dot{Q}_s \quad (2.10)$$

onde \dot{Q}_e representa o fluxo de calor que entra e \dot{Q}_s representa o fluxo de calor que sai na 5ª superfície de controlo.

Inicialmente, a temperatura média da superfície exterior do vestuário de proteção (T_{cls}), é desconhecida, sendo necessário arbitrar um valor inicial. Depois de se arbitrar um valor inicial, os valores de T_{cls} no instante presente $t = N$, são obtidos a partir do desenvolvimento da equação 2.10:

$$T_{cls}^N = \frac{B_1 + B_2 T_{cl}^N + B_3 T_{ar}^N + B_4 T_{mr}^N}{B_0} \quad (2.11)$$

com

$$\begin{cases} B_1 = A_{cls} \dot{I}_{rad} \alpha \\ B_2 = \frac{A_{3e}}{R_{cl,wet}} \\ B_3 = A_{cls} h_{conv} \\ B_4 = A_{cls} h_{rad} \\ B_0 = B_1 + B_2 + B_3 \end{cases} \quad (2.12)$$

O termo B_1 está relacionado com a transferência de calor proveniente do fluxo térmico do exterior, o termo B_2 com a transferência de calor proveniente da condução de calor que ocorre no 4º nodo e os termos B_3 e B_4 estão relacionados às transferências de calor resultantes dos processos de convecção e radiação na 5ª superfície de controlo, respetivamente.

Balço térmico e mássico na superfície de controlo representativa do vestuário de proteção (4ª superfície de controlo)

O processo de cálculo de T_{cl} recorre-se a um balanço térmico e mássico à área de vestuário referente à 4ª superfície de controlo, representado pela seguinte equação:

$$\dot{Q}_e - \dot{Q}_s - \dot{Q}_{evap} = \dot{Q}_a \quad (2.13)$$

onde \dot{Q}_e representa o fluxo de calor que entra, \dot{Q}_s representa o fluxo de calor que sai e \dot{Q}_a e \dot{Q}_{evap} representam o fluxo de calor acumulado e evaporado na 4ª superfície de controlo.

O fluxo de calor que entra resulta da troca de calor sensível por condução com a barreira de vapor, o fluxo de calor que sai resulta da troca de calor sensível por condução com a superfície exterior do vestuário de proteção e o fluxo de calor evaporado resulta da evaporação da água acumulada no interior do vestuário de proteção.

Conhecida as temperaturas médias da barreira de vapor, da superfície exterior do vestuário de proteção, do interior do vestuário de proteção e da barreira de vapor, num determinado instante $t = P$, é possível determinar a temperatura média do interior do vestuário de proteção no instante $t = N = P + \Delta t$:

com

$$\left\{ \begin{array}{l} B_{vb} = \frac{A_{3i} \Delta t}{R_{cl,wet}} \\ B_{clse} = \frac{A_{2e} \Delta t}{R_{cl,wet}} \\ B_{evape} = \frac{\Delta t}{m_{cpe}} \\ m_{cpe} = m_{cle} cp_{cle} + m_{we} cp_{we} \end{array} \right. \quad (2.14)$$

O termo B_{vb} faz referência à transferência de calor proveniente da condução de calor na área da superfície de vestuário respetiva ao 3º nodo, o termo B_{cls} corresponde à transferência de calor proveniente da condução de calor que ocorre na área da superfície de vestuário referente ao 4ºnodo, o termo B_{evap} corresponde à transferência de calor proveniente da evaporação da água acumulada na área da superfície de vestuário referente à 4º superfície de controlo.

Balanco térmico e mássico na superfície de controlo representativa da barreira de vapor (3º superfície de controlo)

O processo de cálculo de T_{vb} recorre-se a um balanço térmico e mássico, em regime transiente, à área de vestuário referente à 3º superfície de controlo, representado pela seguinte equação:

$$\dot{Q}_e = \dot{Q}_s. \quad (2.15)$$

onde \dot{Q}_e representa o fluxo de calor que entra e \dot{Q}_s representa o fluxo de calor que sai.

O fluxo de calor que entra resulta da troca de calor sensível por condução com a camada exterior da roupa interior e o fluxo de calor que sai resulta da troca de calor sensível por condução com o interior do vestuário de proteção.

Conhecida as temperaturas médias da barreira de vapor, do interior do vestuário de proteção e do interior da roupa interior, num determinado instante $t = P$, é possível determinar a temperatura média do interior da barreira de vapor no instante $t = N = P + \Delta t$:

$$T_{vb}^N = \frac{B_{int} T_{cli}^P + B_{ext} T_{cle}^P}{B_{oi}} \quad (2.16)$$

com

$$\begin{cases} B_{int} = \frac{A_{3i}}{R_{cl,int,wet}} \\ B_{ext} = \frac{A_{2e}}{R_{cl,ext,wet}} \\ B_{0i} = B_{int} + B_{ext} \end{cases} \quad (2.17)$$

O termo B_{int} está relacionado com a transferência de calor proveniente da condução de calor na área da superfície de vestuário respectiva ao 2º nodo e o termo B_{ext} está relacionado com a transferência de calor proveniente da condução de calor na área da superfície de vestuário respectiva ao 3º nodo.

Em relação aos termos $R_{cli,wet}$ e $R_{cle,wet}$, no presente trabalho, estes correspondem a cerca de metade da resistência térmica das camadas de roupa interior e da camada do vestuário de proteção quando estas se encontram molhadas, respetivamente. As expressões utilizadas para cada um destes termos baseiam-se da equação 2.8 anteriormente mencionada:

$$R_{cl,int,wet} = R_{cl,int} \left(1 - \frac{\Delta R_{cl,int}}{100} \right) \quad (2.18)$$

$$\Delta R_{cl,int} = 4,887 F_{mwa,int}^3 - 4,6077 F_{mwa,int}^2 + 1,7038 F_{mwa,int} \quad (2.19)$$

em que R_{cli} corresponde acerca de metade da resistência térmica da camada de roupa interior, ΔR_{cli} corresponde à diminuição da resistência térmica da camada de roupa interior do vestuário e $F_{mwa,int}$ corresponde à massa de água por unidade de área da 2º superfície de vestuário (roupa interior).

$$R_{cl,ext,wet} = R_{cl,ext} \left(1 - \frac{\Delta R_{cl,ext}}{100} \right) \quad (2.20)$$

$$\Delta R_{cl,ext} = 4,887 F_{mwa,ext}^3 - 4,6077 F_{mwa,ext}^2 + 1,7038 F_{mwa,ext} \quad (2.21)$$

em que $R_{cl,ext}$ corresponde acerca de metade da resistência térmica da camada do vestuário de proteção, $\Delta R_{cl,ext}$ corresponde à diminuição da resistência térmica da camada

do vestuário de proteção e $F_{mwa,ext}$ corresponde à massa de água por unidade de área da 4ª superfície de vestuário (vestuário de proteção).

Balanco térmico e mássico na superfície de controlo representativa do vestuário de proteção (2ª superfície de controlo)

O processo de cálculo de T_{cl} recorre-se a um balanço térmico e mássico à área da superfície de vestuário referente à 4ª superfície de controlo, representado pela seguinte equação:

$$\dot{Q}_e - \dot{Q}_s - \dot{Q}_{evap} = \dot{Q}_a \quad (2.22)$$

onde \dot{Q}_e representa o fluxo de calor que entra, \dot{Q}_s representa o fluxo de calor que sai e \dot{Q}_a e \dot{Q}_{evap} representam o fluxo de calor acumulado e evaporado na 2ª superfície de controlo

O fluxo de calor que entra resulta da troca de calor sensível por condução com a superfície da pele, o fluxo de calor que sai resulta da troca de calor sensível por condução com a barreira de vapor e o fluxo de calor evaporado resulta da evaporação da massa de água acumulada no interior da roupa interior, proveniente da difusão do suor da superfície da pele para o interior da roupa interior que, posteriormente, condensa no interior da roupa interior.

Conhecida as temperaturas médias da superfície da pele, da barreira de vapor e do interior da roupa interior, num determinado instante $t = P$, é possível determinar a temperatura média do interior do da roupa interior no instante $t = N = P + \Delta t$:

$$T_{cli}^N = B_{sk} T_{skin}^P + B_{cls,int} T_{vb}^P - B_{evap,int} Q_{evap,int}^N + T_{cl}^P (1 - B_{sk} - B_{cls,int}) \quad (2.23)$$

com

$$\left\{ \begin{array}{l} B_{sk} = \frac{A_{2i} \Delta t}{R_{cl,int,wet}} \\ B_{cls,int} = \frac{A_{3i} \Delta t}{R_{cl,int,wet}} \\ B_{evap,int} = \frac{\Delta t}{m_{cp,int}} \\ m_{cp,int} = m_{cl,int} cp_{cl,int} + m_{w,int} cp_{w,int} \end{array} \right. \quad (2.24)$$

O termo B_{sk} faz referência à transferência de calor proveniente da condução de calor na área da superfície de vestuário respetiva ao 1º nodo, o termo $B_{cls,int}$ faz referência à transferência de calor proveniente da condução de calor que ocorre na área da superfície de vestuário referente ao 2º nodo, o termo $B_{evap,int}$ faz referência à transferência de calor proveniente da evaporação da água acumulada na área da superfície de vestuário referente à 2ª superfície de controlo e $m_{cp,int}$ corresponde ao valor da capacidade calorífica da roupa interior com água no seu interior

Evaporação de água no interior da roupa interior e no interior do vestuário de proteção

Em situações em que o vestuário utilizado pelos bombeiros está molhado, considera-se que as camadas de vestuário referentes à roupa interior e ao vestuário de proteção contêm água acumulada no seu interior, mais concretamente, nas áreas da superfície de vestuário correspondentes à 2ª e 4ª superfície de controlo, respetivamente. O processo de evaporação da água nas respetivas camadas é idêntico e é afetado essencialmente pela massa de água acumulada ($m_{w,int}$ e $m_{w,ext}$) e pelas temperaturas médias do interior das respetivas camadas (T_{cli} e T_{cle}).

De seguida, serão descritas as três situações em que ocorre a evaporação da água acumulada e enunciadas as fórmulas relativas ao calor latente perdido por evaporação e à quantidade de massa de água evaporada em cada situação:

❖ **1ª Situação** - Se $T_{cli} > 100 \text{ °C}$ (ponto de ebulição da água) e $m_{wi} > 0 \text{ kg}$ (no caso da roupa interior) ou se $T_{cle} > 100 \text{ °C}$ (ponto de ebulição da água) e $m_{we} > 0 \text{ kg}$ (no caso do vestuário de proteção), considera-se que ocorre a evaporação total da água passado um certo intervalo de tempo:

$$Q_{evap,ext}^N = \frac{\Delta t A_{2e}}{R_{cl,ext,wet} \times m_{cp,ext}} (T_{vb}^P - T_{cle}^P) + \frac{\Delta t A_{3e}}{R_{cle,wet} m_{cp,ext}} \times (T_{cls}^P - T_{cle}^P) \quad (2.25)$$

$$m_{evap,ext}^N = \frac{Q_{evap,ext}^N}{h_{fg,ext}} \quad (2.26)$$

$$Q_{evap,int}^N = \frac{\Delta t A_{2i}}{R_{cl,int,wet} \times m_{cp,int}} (T_{skin}^P - T_{cli}^P) + \frac{\Delta t A_{3i}}{R_{cl,int,wet} m_{cp,int}} \times (T_{vb}^P - T_{cli}^P) \quad (2.27)$$

$$m_{evap,int}^N = \frac{Q_{evap,int}^N}{h_{fg,int}} \quad (2.28)$$

em que $Q_{evap,ext}^N$ e $m_{evap,ext}^N$ correspondem ao calor latente perdido por evaporação no interior do vestuário de proteção e à respetiva massa de água perdida por evaporação, enquanto que $Q_{evap,int}^N$ e $m_{evap,int}^N$ correspondem ao calor latente perdido por evaporação no interior da roupa interior e à respetiva massa de água perdida por evaporação.

❖ **2ª Situação** - Se $T_{cli} < 100$ °C (ponto de ebulição da água) e $m_{wi} > 0$ kg (no caso da roupa interior) ou se $T_{cle} < 100$ ° (ponto de ebulição da água) e $m_{we} > 0$ kg (no caso do vestuário de proteção), obtém-se o fluxo de calor latente perdido por evaporação a partir da expressão proposta por Lu (2016):

$$Q_{evap,ext}^N = \frac{A_{cls} (Pv_{cl,ext}^N - Pv_{air}^N)}{R_{et,ext}} \quad (2.29)$$

$$m_{evap,ext}^N = \frac{Q_{evap,ext}^N}{h_{fg,ext}} \quad (2.30)$$

em que $Pv_{cl,ext}^N$ e Pv_{air}^N correspondem às pressões parciais de vapor da área da superfície de vestuário correspondente à 4ª superfície de controlo e do ar ambiente, respetivamente, enquanto $R_{et,ext}$ corresponde à resistência evaporativa do vestuário de proteção.

$$Q_{evap,int}^N = \frac{A_{cls} (Pv_{cl,int}^N - Pv_{air}^N)}{R_{et,int}} \quad (2.31)$$

$$m_{evap,int}^N = \frac{Q_{evap,int}^N}{h_{fg,int}} \quad (2.32)$$

em que $Pv_{cl,int}^N$ e Pv_{air}^N correspondem às pressões parciais de vapor da área da superfície de vestuário relativa à 2ª superfície de controlo e do ar ambiente, respetivamente, enquanto $R_{et,int}$ corresponde à resistência evaporativa da roupa interior.

❖ **3ª Situação** – Se $m_{wi} = 0$ ou $m_{we} = 0$ não ocorre evaporação de água, sendo esta situação independente de T_{cli} ou T_{cle} .

Acumulação de água no interior da roupa interior e no interior do vestuário de proteção

Sendo conhecida a massa de água acumulada (m_{we}) e evaporada (m_{evape}) no interior do vestuário de proteção (4ª superfície de controlo) no instante $t = P$, é possível obter a massa de água acumulada no instante $t = N$:

$$m_{w,ext}^N = m_{w,ext}^P - m_{evap,ext}^P \quad (2.33)$$

No entanto, a massa de água acumulada no interior da roupa interior, num determinado instante $t = N$, é obtido de forma diferente. Se for conhecida a massa de água acumulada ($m_{w,int}$) e evaporada ($m_{evap,int}$), como também a massa de suor evaporada da superfície da pele ($m_{sweat,evap}$) e a massa de suor produzido pelo corpo humano (m_{sweat}) no instante $t = P$, é possível obter a massa de água acumulada no instante $t = N$:

$$m_{w,int}^N = m_{w,int}^P - m_{evap,int}^P - m_{sweat,evap}^P + m_{sweat}^P \quad (2.34)$$

Inicialmente, na ferramenta *Wet-Clothing*, considera-se que a roupa interior não se encontra molhada, ou seja, sem água acumulada no seu interior. A roupa interior só fica com água acumulada no seu interior devido à produção de suor por parte do corpo humano, tal como se observa na equação interior.

A massa de suor produzido pelo corpo humano é obtida a partir da comparação do um modelo de sudção do corpo humano desenvolvido por Ooka et al. (2010), quando o corpo humano está sujeito em ambientes térmicos quentes e um modelo PHS (“Predicted Heat Strain”) desenvolvido por Malchaire (2017). Ambos os modelos possuem equações que permitem calcular a taxa de suor produzido pelo corpo humano, tendo em conta a atividade metabólica (M) e um fator de aclimatização (F_{aclim}), enquanto que o modelo desenvolvido por Ooka, através de um conjunto sequencial de equações, permite obter a taxa de suor evaporado na superfície da pele.

Taxa de sudação do corpo humano✓ Malchaire

$$\dot{m}_{sweat,max} = \text{mínimo} \left[3,25 F_{aclim} (58,15 M - 32); 1250 \frac{F_{aclim}}{A_{skin}} \right] \quad (2.35)$$

em que \dot{m}_{swmax} é a taxa máxima de sudação do corpo humano.

✓ Ooka

$$\dot{m}_{sweat,Ok} = \left[170 (T_b - 36,49) \exp\left(\frac{T_{skin}-33,7}{10,7}\right) \right] \times F_{aclim} [1 + 3 \exp(-0,5 M + 0,5)] \times [1 - \exp(-M + 1)]^2 \quad (2.36)$$

em que T_{skin} e T_b são as temperaturas médias da pele e profunda do corpo humano, respetivamente.

No modelo *Wet-Clothing*, a taxa de sudação do corpo humano (\dot{m}_{sweat}) é obtida pela seguinte equação:

$$\dot{m}_{sweat} = A_{skin} \text{máximo} \left[\frac{\dot{m}_{sweat,min}}{3,6 \times 10^6}; 0,06 \frac{E_{sweat,máx}}{h_{fg}} \right] \quad (2.37)$$

em que $\dot{m}_{sweat,min}$ corresponde ao valor mínimo entre $\dot{m}_{sweat,Ok}$ e $\dot{m}_{sweat,máx}$ e $E_{sweat,máx}$ corresponde ao calor latente máximo perdido pela evaporação do suor.

Taxa de suor evaporado pelo corpo humano

A tabela seguinte (Tabela 2.2) ilustra, de forma sequencial, as equações desenvolvidas pelo modelo de sudção do corpo humano necessárias ao cálculo da taxa de suor evaporado pelo corpo humano:

Tabela 2.2. Modelo de sudção do corpo humano desenvolvido por Ooka (2010)

Equações	Descrição da equação	Descrição das variáveis da equação
<p><u>1ª equação</u></p> $\eta_i = 1 - \frac{w_i - 1^2}{2}$	Eficiência da evaporação do suor no instante i	w corresponde à humidade da pele e o seu valor inicial é arbitrado ($\eta_{inicial} = 0,06$)
<p><u>2ª equação</u></p> $E_{rsw} = \eta \ 0,68 \ m_{sweat,min}$	Calor perdido por evaporação na superfície da pele requerido para regulação da taxa de sudção do corpo humano	$m_{sweat,min}$ corresponde à taxa de sudção do corpo humano
<p><u>3ª equação</u></p> $w_{rsw} = \frac{E_{rsw}}{E_{sweat,max}}$	Humidade da pele requerida para a manutenção do equilíbrio térmico	E_{swmax} corresponde à taxa máxima de evaporação do suor $E_{sweat,max} = \frac{(pv_{sk} - pv_{ar})}{R_{et}}$
<p><u>4ª equação</u></p> $w_i = w_{rsw} + 0,06 (1 - w_{rsw})$	Humidade da pele “prevista” no instante i	-
<p><u>5ª equação</u></p> $E_{sk} = w_i \ E_{sweat,max}$	Calor dissipado pela evaporação do suor	-
<p><u>6ª equação</u></p> $m_{sweat,evap} = \frac{E_{sk} \ A_{skin}}{h_{fg}}$	Taxa de suor evaporado	A_{skin} corresponde à área da superfície da pele e h_{fg} corresponde à entalpia de vaporização da água

3. PROBLEMA EM ESTUDO

3.1. Stress Térmico Associado ao Combate a Incêndios

O stress térmico é extremamente preponderante no combate a incêndios e tem como principais fontes os denominados fatores internos e externos. Estes fatores serão descritos de uma forma geral, mas também serão individualizados no caso de incêndios florestais e estruturais, respetivamente.

3.1.1. Fatores internos

Os principais fatores internos são o calor metabólico gerado pelo indivíduo, principalmente por causa do tipo de exercício e da intensidade com que é realizado, as características físicas e a condição psicológica em que se encontra.

A produção de calor metabólico é afetada significativamente pelo trabalho desempenhado pelos músculos (cerca de 70% da carga térmica do calor provém do trabalho realizado pelos músculos) que depende do tipo de exercício efetuado e a respetiva intensidade. Quando uma pessoa está a descansar, o calor metabólico gerado é à volta dos 60 W/m^2 e quando se exerce um trabalho leve ou pesado, o calor metabólico gerado aumenta para 100 W/m^2 e 250 W/m^2 , mas em atividades desportivas ou de combate a incêndios, o calor metabólico produzido pode atingir os $300 - 500 \text{ W/m}^2$. No combate a incêndios, pode chegar-se a situações em que o calor metabólico dissipado necessário para manter o equilíbrio homeostático (E_{req}) excede a capacidade da envolvente da envolvente térmica para transferir esse calor ($E_{m\acute{a}x}$), ou seja, a capacidade do corpo humano em armazenar o calor produzido e as temperaturas intrínsecas ao corpo humano aumentam até limites de tolerância individuais (Cheung et. Al, 2000; McLellan et al. 2016). A Figura 3.1 ilustra a relação entre o calor metabólico gerado e os tempos de tolerância quando utilizado um vestuário de proteção militar contra agentes nucleares, biológicos e químicos em diferentes condições ambientais.

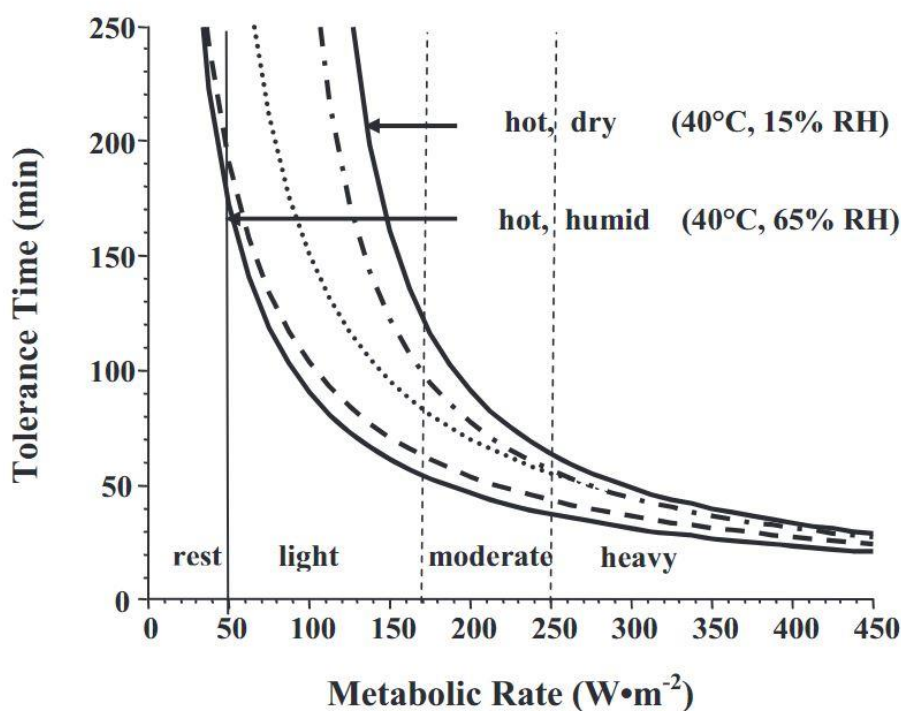


Figura 3.1. Relação entre a taxa metabólica (M), a temperatura ambiente e a pressão de vapor com os tempos de tolerância do indivíduo (adaptado de McLellan, 2016)

Existem diferenças individuais em relação à aptidão física; à aclimatização e tolerância à exposição ao calor e à desidratação. Para além disso, algumas doenças (doenças cardiovasculares, diabetes ou doenças infecciosas), o uso de medicamentos como também o uso excessivo de álcool ou drogas podem condicionar a resposta do organismo em ambientes térmicos e quentes, afetando os limites de tolerância do mesmo (Lucas et. al, 2014). Segundo o Código de Regulação da Califórnia (Artigo 8, Secção 3395), os fatores de risco individuais que contribuem para o stress térmico são os seguintes:

- Consumo de água
- Consumo de álcool
- Grau de aclimatização
- Consumo de cafeína
- Uso de medicamentos
- Idade e condição física do indivíduo
- Saúde
- Peso

Em relação à aptidão física, o peso, a idade e a sua condição física são fatores determinantes para compreender o risco de stress térmico e a suscetibilidade a lesões e doenças provocadas pelo calor que os bombeiros enfrentam. Um indivíduo com uma melhor condição física tem a capacidade de desempenhar melhor uma atividade sobre elevado stress térmico quando sujeito ao calor, apresentando menos stress térmico, um mecanismo de sudoração mais eficiente, consumo de oxigénio e produção de dióxido de carbono relativamente mais baixos. Existe certas evidências que indivíduos mais velhos apresentam taxas de produção de suor baixas e temperaturas profundas do corpo elevadas quando sujeitos a elevadas cargas térmicas de calor, tendo maior dificuldades em eliminar o excesso de calor produzido pelo organismo. Por último, o excesso de peso é um fator prejudicial uma vez que o calor metabólico produzido é superior do que em indivíduos com menos massa corporal, o que condiciona a tolerância do indivíduo ao calor, a sua taxa de sudação e o ritmo cardíaco.

O consumo de álcool, medicamentos e de substâncias que contenham cafeína, de uma forma geral, aumentam o nível de desidratação, uma vez que afetam a capacidade do corpo em reter a água. A desidratação torna um indivíduo mais suscetível a lesões e doenças provocadas pelo calor, logo, o consumo de água torna-se extremamente importante em condições ambientais quentes, de forma a manter o equilíbrio homeostático do organismo.

A aclimatização é um processo em que o corpo se ajusta à exposição de cargas térmicas provenientes de um determinado ambiente térmico, permitindo assim um período de exposição mais elevado. Este processo de ajustamento é um processo que demora a convergir para o resultado esperado e pode ocorrer entre 5 e 10 dias de exposição ao calor (Sharkey;1999) ou atingir as duas (Lucas et al., 2014) ou três semanas (Judge,2003). Como resultado final, a aclimatização permite que a transpiração aumente e se inicie a temperaturas mais baixas, aumenta a distribuição da corrente sanguínea, sanguínea e diminui o batimento cardíaco, como também as temperaturas da pele e do interior do organismo, nomeadamente a temperatura profunda do corpo (Sharkey,1999).

Um exemplo concreto que ilustra necessidade da aclimatização do indivíduo quando sujeito a elevadas cargas térmicas foi realizado por Clark e Edholm (1985). Neste estudo, foram escolhidos 18 indivíduos para passar 4 horas por dia por 5 dias num ambiente térmico quente. A taxa de produção de suor que no primeiro dia era de $0,8 - 1,551 \text{ l/m}^2$ aumentou para $1,5 - 3,4 \text{ l/m}^2$ no quinto dia de aclimatização. Febbraio et al. (1994) também

verificou que num período de aclimatização semelhante (sete dias), a taxa de produção de suor aumentava, a temperatura retal diminuía e a taxa de batimento cardíaco diminuía sobre as mesmas condições de stress térmico.

3.1.2. Fatores externos

Os principais fatores externos que promovem possíveis de situação térmico são as características da envolvente térmica e as características físicas do vestuário de proteção utilizado pelos bombeiros no combate a incêndios.

Durante o combate a incêndios florestais, estruturais ou de outro tipo, os bombeiros enfrentam diversas adversidades que podem contribuir para o seu stress térmico, nomeadamente, a temperatura do ar e a humidade relativa. Para além das condições ambientais referidas, também existem outros fatores que podem contribuir para o stress térmico do indivíduo: fluxo térmico proveniente das chamas, o contato com superfícies quentes e a convecção de gases quentes e fumo.

Durante o combate a incêndios, para além das os bombeiros são sujeitos a elevadas cargas térmicas, principalmente devido ao fluxo de radiação térmica proveniente das chamas (mais de 80%), que pode atingir os 40 kW/m² durante incêndios domésticos e pode atingir os 200 kW/m² em incêndios industriais. As chamas podem atingir temperaturas entre os 800 e os 1100 °C.

Um dos piores cenários para um bombeiro é quando tem de combater um incêndio em que para além do elevado fluxo de radiação térmica proveniente das chamas e de outras fontes, se verificam elevadas temperaturas (CCOHS define temperaturas elevadas ≥ 35 °C) e elevada humidade relativa. Maiores temperaturas aumentam a carga térmica que atinge o bombeiro e a elevada humidade relativa impede que o suor evapore de forma adequada, diminuindo assim a capacidade do mecanismo de dissipar o calor existente no interior do organismo (Lucas, 2014).

Tal como referido anteriormente, outro fator externo que contribui para o stress térmico nos bombeiros durante o combate a incêndios é o vestuário de proteção utilizado pelos bombeiros. O vestuário de proteção embora seja um fator fundamental para a segurança do bombeiro, pode contribuir para o aumento do stress térmico do mesmo. Em 1987, a NFPA (“National Fire Protection Agency”) tentou standardizar o vestuário de proteção utilizado pelos bombeiros nos Estados Unidos da América, através da implementação de uma moção denominada NFPA 1500. Apesar do esforço efetuado e do

facto do vestuário de proteção apresentar elevados valores de resistência térmica e baixos valores de permeabilidade ao vapor, este também provocava o encapsulamento do bombeiro, o que reduzia a sua tolerância térmica (inibição da evaporação do suor e dissipação do calor inadequada).

De uma forma geral, um vestuário de proteção mais pesado, espesso (aumento do número de camadas que o constituem), rígido e volumoso exacerba o mecanismo de termorregulação devido à diminuição da permeabilidade ao vapor de água, ao aumento da produção de calor metabólico e das propriedades de insulação térmica.

3.2. Caracterização dos Casos em Estudo

Os casos a analisar baseiam-se, numa primeira fase, no estudo do comportamento termofisiológico de um bombeiro (com o vestuário seco) num combate a incêndios florestais e estruturais e, numa segunda fase, na avaliação do efeito do impregnamento da água em algumas das propriedades físicas do vestuário (resistência térmica e resistência evaporativa) e na evolução das temperaturas no interior do vestuário (temperatura da camada de roupa interior e temperatura da camada de vestuário de proteção) e do fluxo de calor que chega à pele

Na primeira fase, utilizando o programa *HuTheReg*, serão analisadas duas situações diferentes: comportamento termofisiológico de um bombeiro no combate a um incêndio florestal e o comportamento termofisiológico de um bombeiro no combate a um incêndio estrutural. Em ambas as situações, adota-se um protocolo de combate a incêndios, caracterizado normalmente por 3 fases, genericamente caracterizadas por um nível de atividade, um vestuário de proteção, uma envolvente térmica e pela ingestão de alimentos (água, principalmente). O objetivo da simulação do comportamento termofisiológico do bombeiro no combate às duas tipologias em estudo mencionadas foi obter o tempo que decorria até ao aparecimento das patologias associadas ao stress hipertérmico.

Na segunda fase, utilizando a ferramenta *Wet-Clothing*, através das características da envolvente térmica, das temperaturas média da pele e do corpo humano obtidas pelo programa *HuTheReg*, das características físicas do vestuário (resistências térmica e evaporativa e a permeabilidade ao vapor de água, etc.) e a água armazenada no interior das camadas de vestuário (camada de roupa interior e vestuário de proteção) foi possível obter a evolução temporal das temperaturas entre a superfície da pele e a envolvente térmica (temperatura da camada de roupa interior e da camada de vestuário de proteção), como

também a evolução temporal do fluxo de calor entre a superfície da pele e a envolvente térmica, mais concretamente, o fluxo de calor que chega à pele. Com o intuito de avaliar o efeito da água no interior do corpo vestuário, para cada uma das tipologias de incêndio (incêndio florestal e estrutural), foram analisadas oito situações tendo em conta o tipo de vestuário e o estado do vestuário:

- ❖ O tipo de vestuário está relacionado com a diferente distribuição das percentagens da massa e da resistência térmica total do vestuário que constituem as camadas de roupa interior e do vestuário de proteção;

- ❖ O estado do vestuário está diretamente ligado com a existência ou não de água no interior da camada do vestuário de proteção. O vestuário encontra-se molhado se existir água no interior da camada de vestuário de proteção e encontra-se seco se não existir água no seu interior.

3.2.1. Protocolo de combate aos incêndio

Como referido anteriormente, no presente trabalho, o protocolo de combate a incêndios (florestais e estruturais) a que é submetido o bombeiro divide-se em 3 fases: a Fase Neutra (de estabilização), a Fase de Pré-Combate ao Incêndio e a Fase de Combate ao Incêndio. Cada uma das etapas é caracterizada por um nível de atividade metabólica, um vestuário, uma envolvente térmica e a ingestão de alimentos (água, geralmente).

De seguida, serão descritas estas fases para cada um dos casos em estudo: os incêndios florestais e estruturais. O protocolo em estudo tem como referência o trabalho desenvolvido por Raimundo (2018).

Fase Neutra (ou de estabilização termofisiológica)

Esta fase destina-se a garantir que todos os bombeiros submetidos ao protocolo existente o iniciem com a mesma igualdade de critérios de forma a garantir um estado de neutralidade térmica.

Tendo em conta os diversos casos estudados que visaram a utilização do programa *HuTheReg*, na execução deste trabalho, foram consideradas as seguintes características para a corrente fase: duração de 30 minutos, pessoa integralmente nua ($I_{cl} = 0$) com uma atividade metabólica consideravelmente baixa ($M = 0,8$), a temperatura do média do ar envolvente de a temperatura média radiante têm o valor de $29,2^{\circ}\text{C}$

($T_{ar} = T_{mr} = 29,2^{\circ}C$) , a velocidade do ar é de 0,1 m/s ($v_{ar} = 0,1 \text{ m/s}$) e a humidade relativa do ar é de 50% ($HR = 50\%$).

É importante referir que esta fase é totalmente independente da tipologia de incêndio em estudo, ou seja, no presente trabalho é igual para incêndios florestais e estruturais.

Fase de Pré- combate ao incêndio

Na fase de Pré-Combate ao incêndio, que começa 1 hora antes do início da carga térmica a que o bombeiro é sujeito durante o combate ao incêndio, o indivíduo tem uma atividade metabólica moderada, caracterizada pelo deslocamento até ao cenário de combate e pela realização de um trabalho de preparação para o combate ao incêndio ($M = 1,5 \text{ met}$). A envolvente térmica possui as seguintes singularidades: temperatura do média do ar envolvente de a temperatura média radiante igual a $35^{\circ}C$ ($T_{ar} = T_{mr} = 35^{\circ}C$) , a velocidade do ar é de 5 m/s ($v_{ar} = 5 \text{ m/s}$) e a humidade relativa do ar é de 50% ($HR = 50\%$).

Ao contrário da fase anterior, o corpo do bombeiro encontra-se parcialmente coberto por um t-shirt, calças de proteção, cuecas, meias e botas. Neste caso, tendo em conta o conhecimento das características do vestuário em cada um dos segmentos do corpo humano (permeabilidade ao vapor, resistência térmica, emissividade radiativa e calor específico) o vestuário do bombeiro é definido pelas seguintes valores globais: resistência térmica de 1 clo ($I_{cl} = 1 \text{ clo}$), eficiência da permeabilidade ao vapor de água de 0,47 ($i_{vp} = 0,47$), emissividade radiativa de 0,91 ($\epsilon = 0,91 \text{ clo}$), massa total do vestuário igual a 3,08 kg ($m_{cl} = 3,08 \text{ kg}$).

Fase de Combate ao incêndio

Nesta fase, quando o bombeiro se encontra num cenário de combate ao incêndio, a sua atividade metabólica é relativamente alta ($M = 3 \text{ met}$) A envolvente térmica durante um incêndio possui as seguintes características: temperatura do média do ar envolvente de a temperatura média radiante igual a $50^{\circ}C$ ($T_{ar} = T_{mr} = 50^{\circ}C$) , a velocidade do ar é de 5 m/s ($v_{ar} = 5 \text{ m/s}$) e a humidade relativa do ar é de 50% ($HR = 50\%$).

Esta fase, ao contrário das outras, possui características que diferem em relação à tipologia de incêndio em estudo, nomeadamente, as características físicas do vestuário de proteção e o fluxo de radiação incidente no corpo humano dos bombeiros.

No caso de incêndios florestais, em termos do vestuário utilizado, este é caracterizado por um $I_{cl} = 1,59 clo$, $i_{vp} = 0,22$, $\varepsilon = 0,9$ e $m_{cl} = 5,2 kg$. No presente estudo, um incêndio florestal será caracterizado por um fluxo radiativo máximo de $10 KW/m^2$ (proveniente da frente de chama), em que o bombeiro está a uma distância de 5m da frente de chama com 40 m largura e 5m de altura (Raimundo, 2009).

No caso de incêndios estruturais, o vestuário do bombeiro é caracterizado por um $I_{cl} = 2,63 clo$, $i_{vp} = 0,22$, $\varepsilon = 0,9$ e $m_{cl} = 6,1 kg$. No presente estudo, um incêndio estrutural será caracterizado por um fluxo radiativo máximo de $20000 W/m^2$ (proveniente da frente de chama), representativo de um fluxo radiativo existente num espaço fechado, localizado ao nível do chão, no início do denominado fenómeno físico “flashover” (Lawson, 2009).

No programa *HuTheReg*, o fluxo radiativo provém de todas as direções. Por exemplo, no caso do Incêndio florestal, caracterizado por um fluxo radiativo máximo de $10000 W/m^2$ e em que a frente de chama está localizada a norte do bombeiro, o fluxo radiativo distribui-se em todas as direções da seguinte forma: $10000 W/m^2$ de frente ($\dot{I}_{rad,Norte}$), $200 W/m^2$ de trás ($\dot{I}_{rad,Sul}$), $4000 W/m^2$ de ambos os lados ($\dot{I}_{rad,Oeste}$ e $\dot{I}_{rad,Este}$), $400 W/m^2$ ($\dot{I}_{rad,superior}$) e $200 W/m^2$ ($\dot{I}_{rad,Inferior}$). Por outro lado, na situação de Incêndio estrutural, caracterizado por um fluxo radiativo máximo de $20000 W/m^2$, os valores do fluxo radiativo atribuídos às diferentes direções correspondem ao dobro dos valores da situação de Incêndio florestal.

Na ferramenta *Wet-Clothing* é considerada uma distribuição uniforme do fluxo radiativo, ao contrário do que acontece no programa *HuTheReg*. A expressão utilizada para obter o valor do fluxo radiativo incidente nesta distribuição uniforme é:

$$\begin{aligned} \dot{I}_{rad} = & 0,3 \dot{I}_{rad,N} + 0,3 \dot{I}_{rad,S} + 0,15 \dot{I}_{rad,O} + 0,15 \dot{I}_{rad,E} + 0,05 \dot{I}_{rad,Sup} \\ & + 0,05 \dot{I}_{rad,Inf} \end{aligned} \quad (3.38)$$

Os valores relativos ao fluxo radiativo uniforme são $4290 W/m^2$ e $8580 W/m^2$ para os casos de Incêndio florestal e estrutural, respetivamente.

3.2.2. Vestuário utilizado

Nesta secção, tendo em conta os valores globais das características físicas do vestuário utilizado pelos bombeiros em cenários de incêndio florestal e estrutural, utilizadas no programa *HuTheReg*, nomeadamente a resistência térmica total e a massa total, como também a existência ou não de água no interior do vestuário de proteção, a ferramenta *Wet-Clothing* analisará diferentes casos de estudo. Tal como mencionado anteriormente, os casos de estudo têm em conta o tipo de vestuário e o estado em que se encontra.

São analisados dois tipos de vestuário:

- **Vestuário (Tipo 1)** – camada de roupa interior constituída por 20 % da resistência térmica e massa totais e a camada do vestuário de proteção constituída pelos restantes 80%;
- **Vestuário (Tipo 2)** – camada de roupa interior constituída por 30 % da resistência térmica e massa totais e a camada do vestuário de proteção constituída pelos restantes 70%.

São analisados quatro estados de vestuário:

- **Vestuário seco (Estado 1)** – não existe água no interior do vestuário de proteção;
- **Vestuário molhado (Estado 2)** – a massa de água é metade da massa total da camada exterior do vestuário de proteção ($m_{we} = 0,5 m_{cle}$);
- **Vestuário molhado (Estado 3)** – a massa de água é igual à massa total da camada exterior do vestuário de proteção ($m_{we} = m_{cle}$);
- **Vestuário molhado (Estado 3)** – a massa de água é igual à massa total da camada exterior do vestuário de proteção ($m_{we} = 2 m_{cle}$);

3.2.3. Sistematização dos casos em estudo

As Tabelas 3.1 e 3.2, apresentadas a seguir, ilustram os casos em estudo em relação ao cenário de combate a incêndios, tendo em conta a tipologia de incêndio, o tipo de vestuário e o estado em que se encontra (seco ou molhado):

Tabela 3.1. Enumeração e caracterização dos casos em estudo para um cenário de incêndio florestal

Caso em estudo	Tipologia de Incêndio	Tipo de Vestuário	Estado do Vestuário
<u>Caso A0</u>	Incêndio florestal	Vestuário (Tipo 1)	Vestuário seco (Estado 1)
<u>Caso A1</u>	Incêndio florestal	Vestuário (Tipo 1)	Vestuário molhado (Estado 2)
<u>Caso A2</u>	Incêndio florestal	Vestuário (Tipo 1)	Vestuário molhado (Estado 3)
<u>Caso A3</u>	Incêndio florestal	Vestuário (Tipo 1)	Vestuário molhado (Estado 4)
<u>Caso B0</u>	Incêndio florestal	Vestuário (Tipo 2)	Vestuário seco (Estado 1)
<u>Caso B1</u>	Incêndio florestal	Vestuário (Tipo 2)	Vestuário molhado (Estado 2)
<u>Caso B2</u>	Incêndio florestal	Vestuário (Tipo 2)	Vestuário molhado (Estado 3)
<u>Caso B3</u>	Incêndio florestal	Vestuário (Tipo 2)	Vestuário molhado (Estado 4)

Tabela 3.2. Enumeração e caracterização dos casos em estudo para um cenário de incêndio estrutural.

Caso em estudo	Tipologia de Incêndio	Tipo de Vestuário	Estado do Vestuário
<u>Caso A0</u>	Incêndio estrutural	Vestuário (Tipo 1)	Vestuário seco (Estado 1)
<u>Caso A1</u>	Incêndio estrutural	Vestuário (Tipo 1)	Vestuário molhado (Estado 2)
<u>Caso A2</u>	Incêndio estrutural	Vestuário (Tipo 1)	Vestuário molhado (Estado 3)
<u>Caso A3</u>	Incêndio estrutural	Vestuário (Tipo 1)	Vestuário molhado (Estado 4)
<u>Caso B0</u>	Incêndio estrutural	Vestuário (Tipo 2)	Vestuário molhado (Estado 1)
<u>Caso B1</u>	Incêndio estrutural	Vestuário (Tipo 2)	Vestuário molhado (Estado 2)
<u>Caso B2</u>	Incêndio estrutural	Vestuário (Tipo 2)	Vestuário molhado (Estado 3)
<u>Caso B3</u>	Incêndio estrutural	Vestuário (Tipo 2)	Vestuário molhado (Estado 3)

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo serão apresentados e discutidos os resultados obtidos nas simulações suméricas realizados pelo programa *HuTheReg* e os resultados obtidos nas simulações da ferramenta *Wet-Clothing*.

Com recurso ao programa *HuTheReg*, pretende-se avaliar a sua aplicabilidade e fiabilidade na simulação do comportamento termofisiológico dos bombeiros durante o combate a incêndios florestais e estruturais, elaborando-se gráficos que demonstram a evolução transiente dos parâmetros mais relevantes na avaliação do estado térmico dos bombeiros: (i) a temperatura do hipotálamo, a temperatura retal, a temperatura máxima da pele, a temperatura profunda do corpo humano e a temperatura do vestuário. Visto existir uma melhor relação entre a temperatura do hipotálamo e as patologias associadas ao estado de hipertermia (introversão, golpe de calor, morte do indivíduo e a dor na pele), esta servirá para a obtenção dos tempos associados ao começo de cada uma destas patologias.

A ferramenta *Wet-Clothing*, pretende avaliar se o impregnamento do vestuário de bombeiro com água contribui ou não para a melhoria da sua proteção térmica durante o combate a incêndios florestais e estruturais. Esta avaliação será baseada na representação e comparação gráfica dos resultados relativos aos casos de estudo mencionados na Secção 3.2. 3.. Através da demonstração gráfica da evolução transiente dos parâmetros que melhor descrevem a influência da água na proteção térmica do bombeiro: (i) resistência térmica do vestuário de proteção; (ii) massa de água no interior do vestuário de proteção; (iii) temperaturas do vestuário entre a pele e a envolvente térmica (temperatura da roupa interior, temperatura do vestuário de proteção); (iv) e o fluxo de calor que chega à pele, é possível comparar cada um dos casos de estudo mencionados anteriormente e verificar se, na generalidade dos casos, é vantajoso para o bombeiro molhar o vestuário ou mantê-lo seco.

De modo a facilitar a apresentação e análise de resultados dividiu-se este Capítulo em três secções: (i) Programa *HuTheReg*; (ii) Ferramenta *Wet-Clothing* e (iii) Análise e comparação dos resultados obtidos. Na primeira e segunda secção serão apresentados os resultados obtidos pelo programa *HuTheReg* e pela ferramenta *Wet-Clothing* para os Incêndios Florestais e Estruturais, respetivamente. A terceira secção é responsável pela análise dos resultados obtidos e pela comparação entre os resultados obtidos para os Incêndios Florestais e Incêndios Estruturais.

4.1. Incêndio Florestal

4.1.1. Previsões do software *HuTheReg*

Resume-se na Figura 4.1 os resultados obtidos através das simulações feitas, com recurso ao programa *HuTheReg*, para a evolução do estado termofisiológico do bombeiro no decurso do combate a um incêndio florestal.

Nas nas Figuras 4.2 a 4.6, observa-se os resultados obtidos através das simulações feitas, com recurso à folha de cálculo *Wet-Clothing*, para a evolução temporal dos fatores anteriormente mencionados no início do Capítulo 4 para cada um dos casos em estudo.

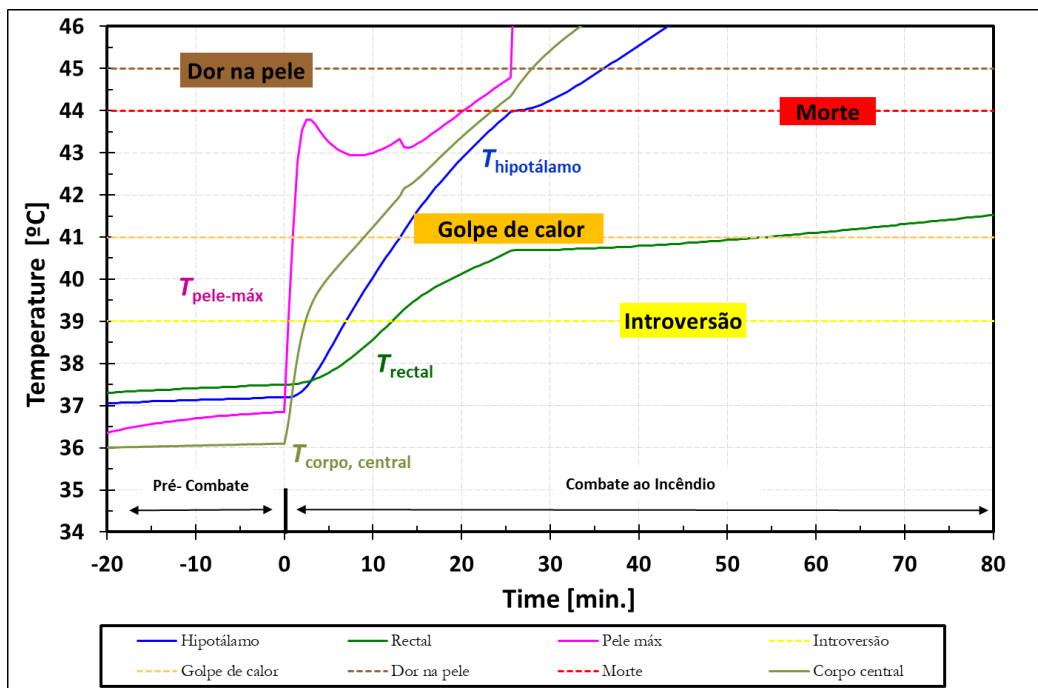


Figura 4.1. Evolução temporal da temperatura do hipotálamo, da temperatura retal, da temperatura da pele máxima e da temperatura profunda do corpo humano durante o cenário de combate ao incêndio florestal em estudo e os tempos previstos para a ocorrência das patologias associadas ao stress hipertérmico

4.1.2. Previsões da folha de cálculo *Wet-Clothing*

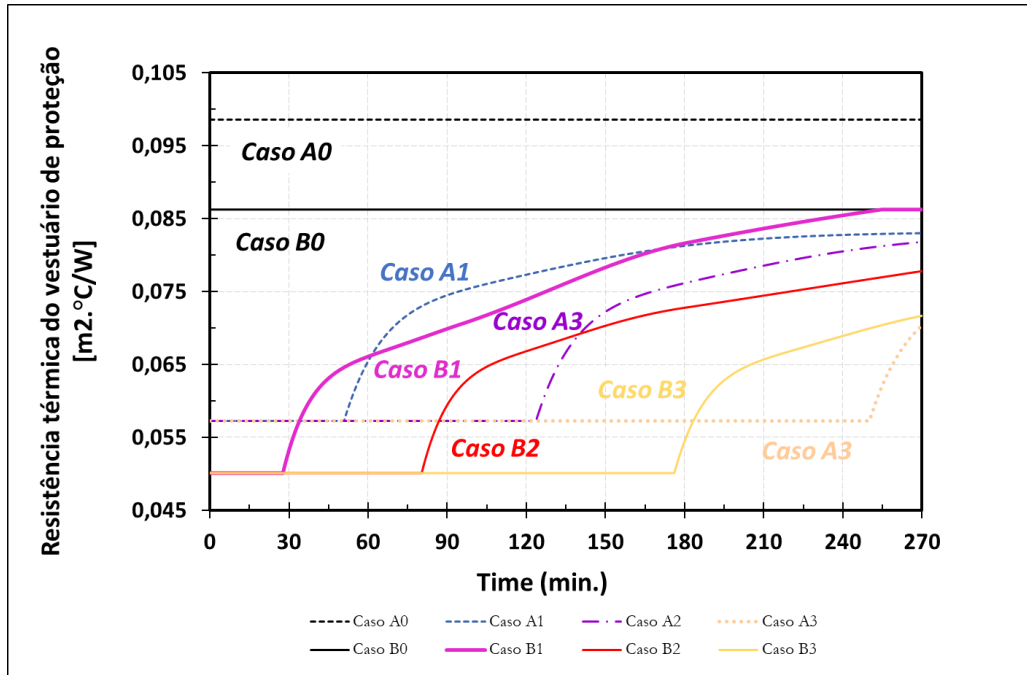


Figura 4.2. Incêndio florestal - Evolução temporal da resistência térmica da camada do vestuário de proteção (camada exterior à barreira de vapor)

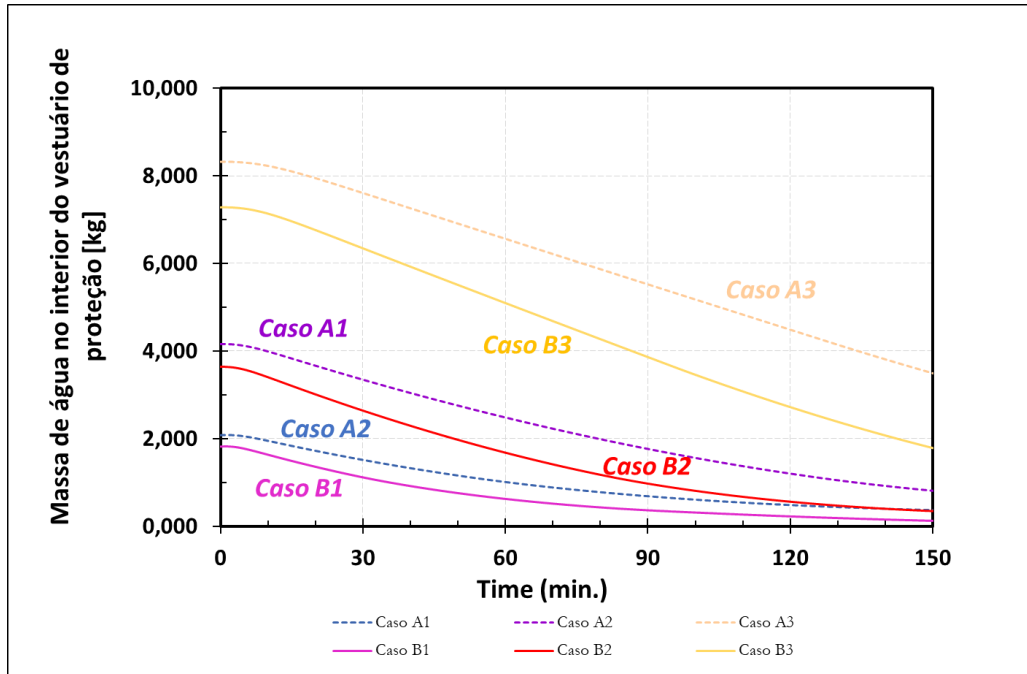


Figura 4.3. Incêndio florestal - Evolução temporal da massa de água no interior da camada do vestuário de proteção

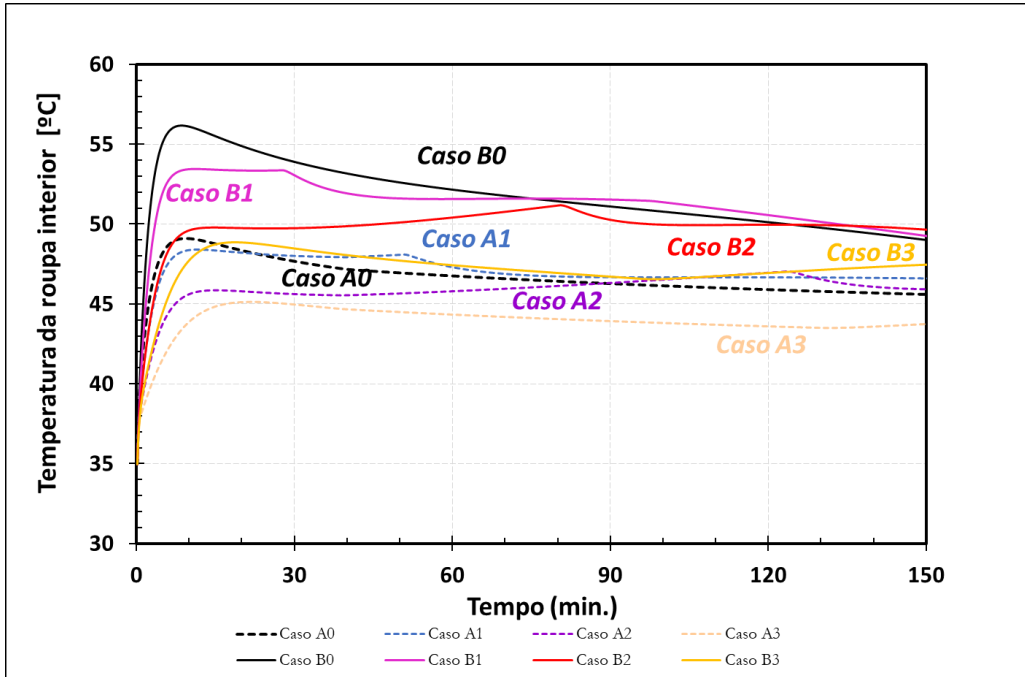


Figura 4.4. Incêndio florestal - Evolução temporal da temperatura no interior da camada da roupa interior.

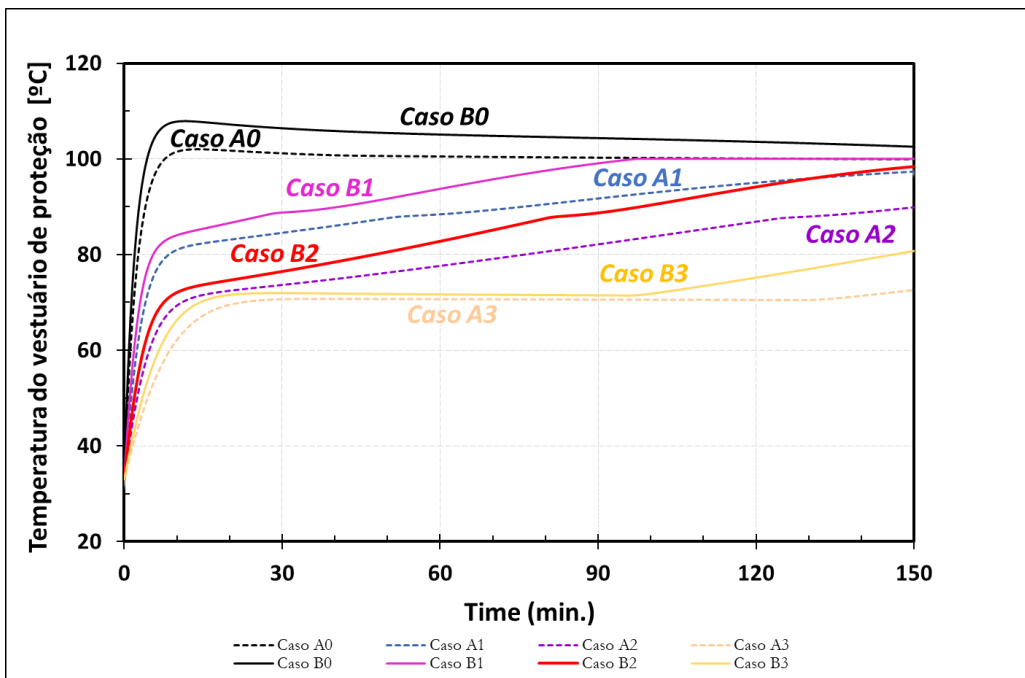


Figura 4.5. Incêndio florestal - Evolução temporal da temperatura no interior da camada de vestuário de proteção.

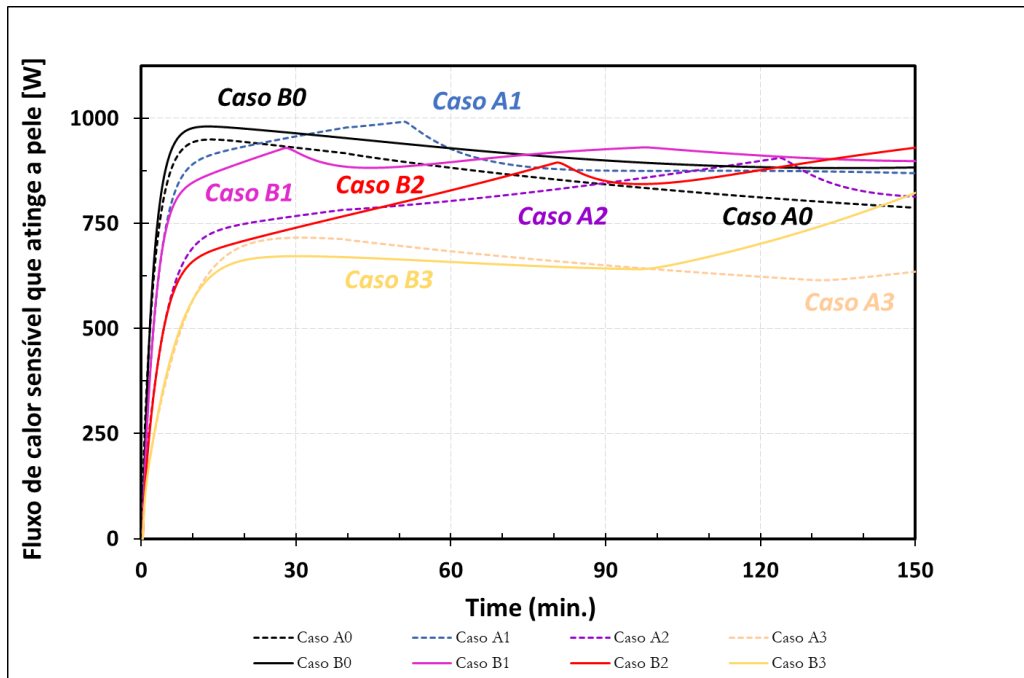


Figura 4.6. Incêndio florestal - Evolução temporal do fluxo de calor sensível que chega à superfície da pele.

4.2. Incêndio Estrutural

4.2.1. Previsões do software *HuTheReg*

Resume-se na Figura 4.7 os resultados obtidos através das simulações feitas, com recurso ao programa *HuTheReg*, para a evolução do estado termofisiológico do bombeiro no decurso do combate a um incêndio florestal.

Resumem-se nas Figuras 4.8 a 4.12 os resultados obtidos através das simulações feitas, com recurso à folha de cálculo *Wet-Clothing*, para a evolução temporal dos fatores anteriormente mencionados no início do Capítulo 4 para cada um dos casos em estudo.

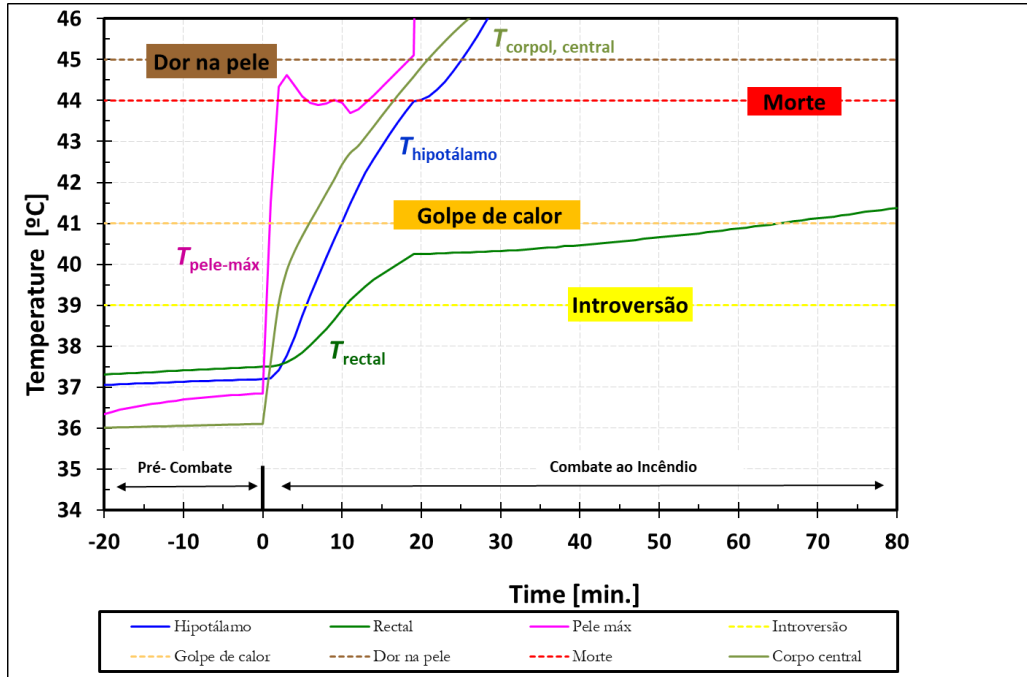


Figura 4.7. Evolução temporal da temperatura do hipotálamo, da temperatura retal, da temperatura da pele máxima e da temperatura profunda do corpo humano durante o cenário de combate ao incêndio estrutural em estudo e os tempos previstos para a ocorrência das patologias associadas ao stress hipertérmico.

4.2.2. Previsões da folha de cálculo Wet-Clothing

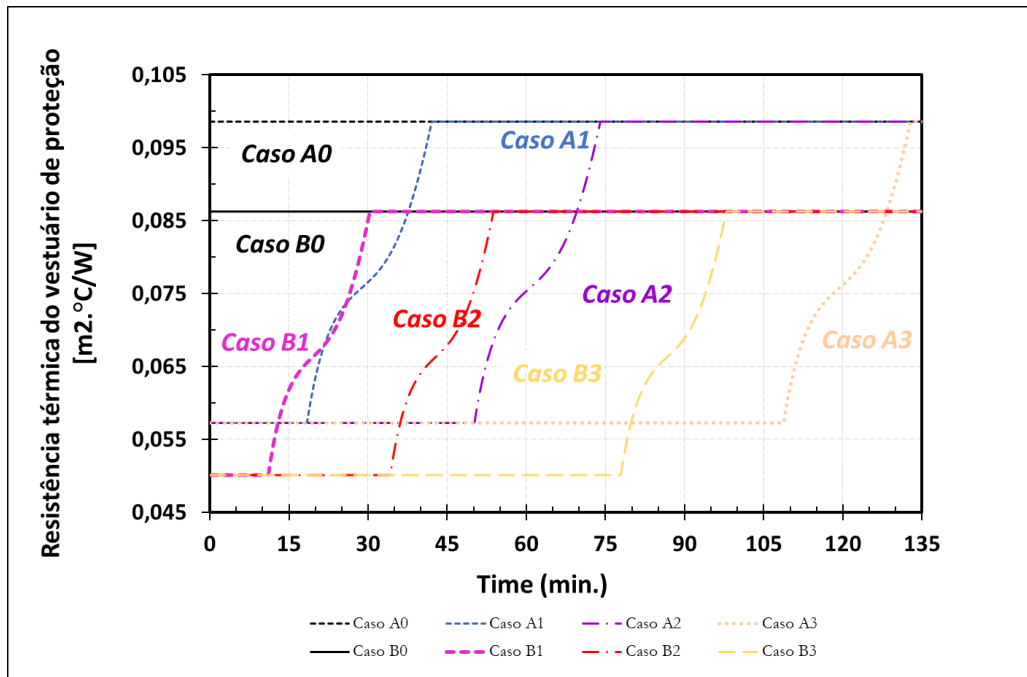


Figura 4.8. Incêndio estrutural - Evolução temporal da resistência térmica da camada do vestuário de proteção (camada exterior à barreira de vapor)

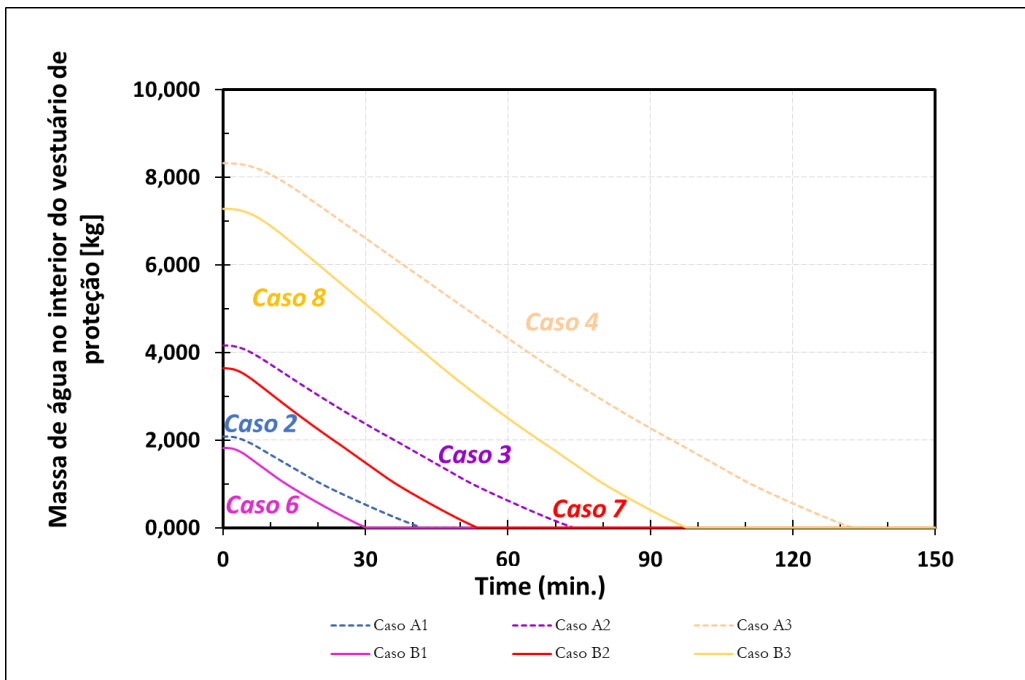


Figura 4.9. Incêndio estrutural - Evolução temporal da massa de água no interior da camada do vestuário de proteção.

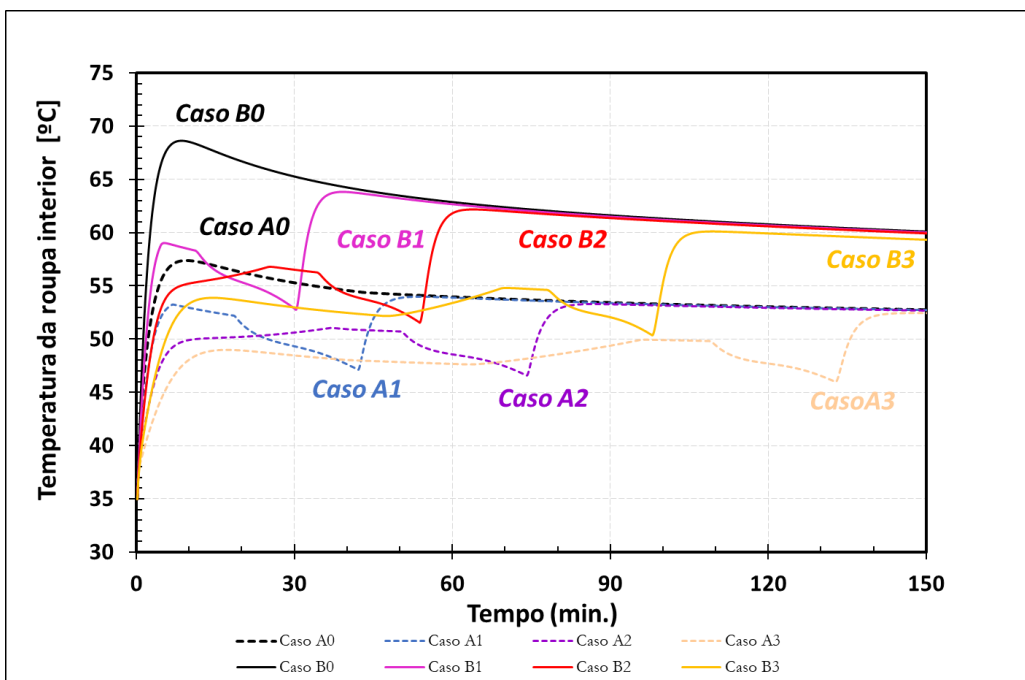


Figura 4.10. Incêndio estrutural - Evolução temporal da temperatura do interior da roupa interior.

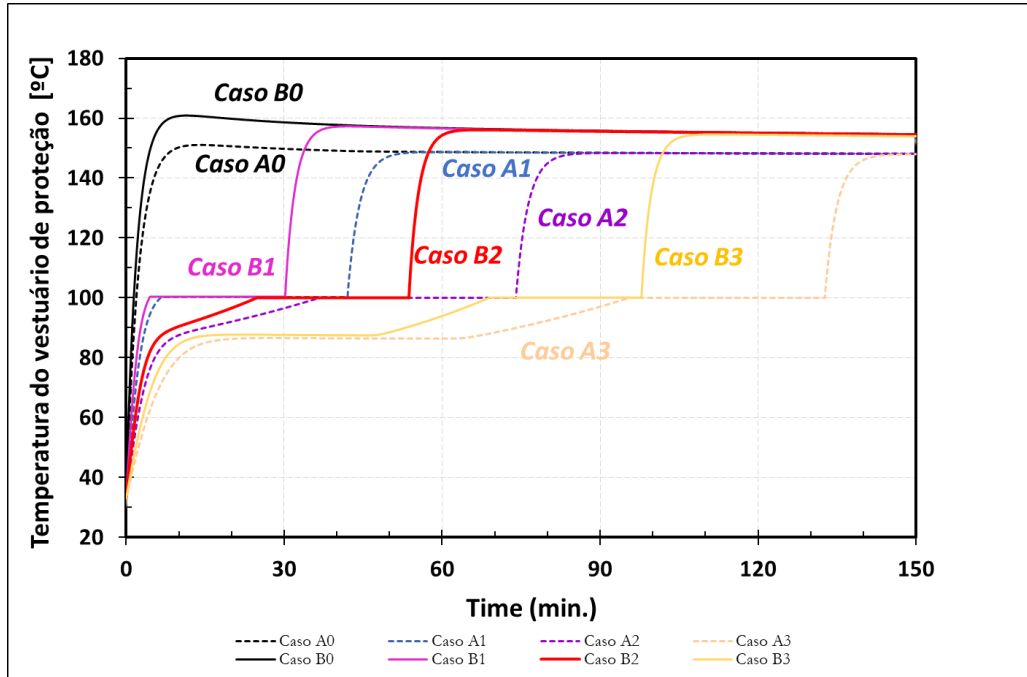


Figura 4.11. Incêndio estrutural - Evolução temporal da temperatura do interior do vestuário de proteção.

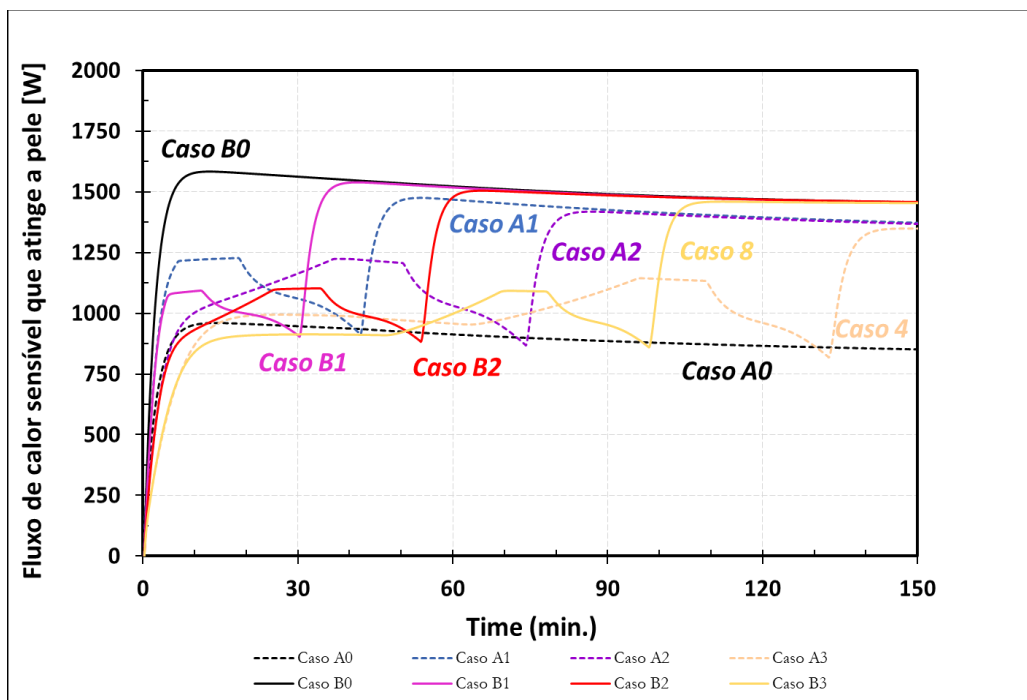


Figura 4.12. Incêndio estrutural - Evolução temporal do fluxo de calor que chega à superfície da pele.

4.3. Análise e comparação dos resultados

As Figuras 4.1 (Incêndio florestal) e 4.7 (Incêndio estrutural) representam não só a evolução temporal da temperatura do hipotálamo, da temperatura retal, da temperatura da pele máxima da temperatura profunda do corpo humano, como também representam os tempos em que se iniciam as patologias associadas ao stress hipertérmico mencionadas anteriormente.

Pela análise dos gráficos das Figuras 4.1e 4.7 obteve-se os tempos necessários para a início das patologias caracterizadores do stress hipertérmico sentido pelo bombeiro para as duas tipologias de incêndio, visíveis nas Tabelas 4.1 e na Tabela 4.2, respetivamente:

Tabela 4.1. Incêndio florestal - Tempo (após o início do combate ao incêndio florestal) previsto para a ocorrência das patologias associadas ao stress hipertérmico do bombeiro

Patologias	Tempo necessário até à ocorrência da patologia
Introversão	7 minutos
Golpe de calor	13 minutos
Morte	26 minutos
Dor na pele	36 minutos

Tabela 4.2. Incêndio estrutural - Tempo (após o início do combate ao incêndio estrutural) previsto para a ocorrência das patologias associadas ao stress hipertérmico do bombeiro

Patologias	Tempo necessário até à ocorrência da patologia
Introversão	6 minutos
Golpe de calor	10 minutos
Morte	19 minutos
Dor na pele	26 minutos

É evidente pela análise às duas tabelas que, numa situação de Incêndio estrutural, o bombeiro ao ser atingido por um fluxo térmico superior (cerca do dobro em relação ao fluxo térmico do Incêndio estrutural), atinge os instantes em que ocorrem as diferentes patologias num intervalo de tempo mais curto.

Nas Figuras 4.2 e 4.3 (Incêndio florestal) e nas Figuras 4.8 e 4.9 (Incêndio estrutural) pode-se observar os gráficos ilustrativos da evolução temporal da resistência

térmica da camada do vestuário de proteção e a evolução temporal da massa água no interior desta camada, respetivamente, para os casos de estudo.

Evolução temporal da resistência térmica

Analisando as Figuras 4.2 e 4.8, observa-se que, inicialmente, em cada um dos casos em estudo, a resistência térmica do vestuário de proteção mantém-se constante. Mas, nos casos em que se verifica existência de água no interior do vestuário de proteção, quando a massa de água no interior do vestuário de proteção começa a diminuir devido à diminuição do decréscimo da resistência térmica ($\downarrow \Delta R_{cl,ext}$), verifica-se um aumento exponencial da resistência térmica. Numa última fase, quando a massa de água se torna nula, a resistência térmica volta a ser constante.

Tendo em conta os casos com diferentes tipo de vestuário e a mesma massa de água inicial no interior do vestuário de proteção, o vestuário (Tipo 1) mantém o mesmo valor de resistência térmica num intervalo de tempo maior até ocorrer a diminuição do decréscimo da resistência térmica mencionada anteriormente. Comparando os casos que apresentam com o mesmo tipo de vestuário (Tipo 1 ou 2), desde o momento em que se inicia a evaporação da massa de água até ao momento em que a massa de água passa a ser nula, os casos em que o vestuário de proteção contém maior massa de água, apresentam menor resistência térmica ao longo do tempo.

Evolução temporal da massa de água no interior do vestuário de proteção

Em relação à evolução temporal da massa de água no interior do vestuário de proteção, observando a Figura 4.3 (Incêndio florestal) e na Figura 4.9 (Incêndio estrutural), é lógico afirmar que quanto maior a massa de água no interior do vestuário de proteção, maior é o intervalo de tempo até ocorrer a sua evaporação total.

Considerando o mesmo intervalo de tempo, na situação de Incêndio estrutural, todos os casos apresentam uma evaporação total da água no interior do vestuário de proteção, enquanto que na situação de Incêndio florestal, a evaporação total da massa de água no interior do vestuário de proteção ocorre em instantes superiores ao intervalo de tempo observado nas Figuras 4.3 e 4.9. Isto deve-se à maior taxa de evaporação que ocorre na situação de Incêndio estrutural.

Evolução temporal da temperatura no interior das camadas de roupa interior e de vestuário de proteção

Nas Figuras 4.4 (Incêndio florestal) e 4.10 (Incêndio estrutural) estão representados os gráficos ilustrativos da evolução temporal da temperatura no interior da camada de roupa interior e nas Figuras 4.5 (Incêndio florestal) e 4.11 (Incêndio estrutural) estão representados os gráficos ilustrativos da evolução temporal da temperatura no interior do vestuário de proteção.

Para as duas tipologias de incêndio, tendo como termo de comparação os casos que apresentam diferentes tipos de vestuário (Tipo 1 e 2) e a mesma massa inicial de água, os casos que em que se utiliza o Vestuário (Tipo 1) apresentam uma temperatura de roupa interior menor e alcançam o equilíbrio térmico num intervalo de tempo inferior. Por outro lado, para o mesmo tipo de vestuário, os casos que apresentam maior massa de água no interior do vestuário de proteção, ao longo do tempo, apresentam temperaturas inferiores à temperatura de equilíbrio térmico durante um intervalo de tempo maior.

Comparando os casos de estudo relativos às situações de Incêndio florestal e Estrutural, os casos de estudo na situação de Incêndio florestal para além de apresentarem temperaturas no interior da roupa interior inferiores ao longo do tempo, demoram mais tempo a alcançar o equilíbrio térmico.

Evolução temporal do fluxo de calor que chega à pele

Nas Figuras 4.6 (Incêndio florestal) e 4.12 (Incêndio estrutural) estão representados os gráficos ilustrativos da evolução temporal do fluxo de calor que chega à pele.

Observando os gráficos relativos às duas tipologias de incêndio, tendo como termo de comparação os casos que apresentam diferentes tipos de vestuário (Tipo 1 e 2) e a mesma massa inicial de água, nos casos que em que se utiliza o Vestuário (Tipo 1), o fluxo de calor que chega à pele é menor com o decorrer do tempo. Para o mesmo tipo de vestuário, de uma forma geral, quanto maior for a massa de água no interior do vestuário de proteção menor é o fluxo de calor que chega à pele.

De uma forma geral, quando impregnado o vestuário do bombeiro com água, verifica-se que, durante o intervalo de tempo maior, a água impregnada no vestuário permite uma redução dos valores dos parâmetros analisados (resistência térmica, temperaturas das camadas de roupa interior e de vestuário de proteção e o fluxo de calor que chega à pele),

permitindo assim uma maior proteção térmica do mesmo. Estes resultados pela ferramenta *Wet-Clothing*, podem prever a influência da água nos resultados da simulação do comportamento termofisiológico do corpo humano realizada pelo programa *HuTheReg*. Com a impregnação do vestuário do bombeiro com água, os tempos necessários ao aparecimento das patologias associadas ao stress hipertérmico poderão ocorrer em instantes superiores, garantindo assim uma melhor proteção do bombeiro durante o combate aos incêndios.

5. CONCLUSÕES

Ao longo do presente trabalho, através da utilização da ferramenta *Wet-Clothing* e do programa *HuTheReg*, foi testada e avaliada a influência do impregnamento do vestuário do bombeiro com água, nas situações de combate a Incêndios Florestais e Estruturais. A ferramenta *Wet-Clothing* foi criada e desenvolvida com o intuito de avaliar a influência da água na transferência de calor e massa que ocorre no vestuário, permitindo retirar conclusões em relação aos resultados obtidos pelo programa *HuTheReg*, responsável pela simulação do comportamento termofisiológico do corpo humano dos bombeiros em situação de combate a incêndios, uma vez que este apenas é viável para situações em que o vestuário utilizado é seco. Para as duas tipologias de incêndio, o programa *HuTheReg* e a ferramenta *Wet-Clothing* permitiram avaliar a influência de diversos parâmetros, nomeadamente, a envolvente térmica, o fluxo térmico proveniente da frente de chama, atividade metabólica (relacionada com a intensidade da atividade de combate ao incêndio), as características físicas do bombeiro e as características do vestuário utilizado por este.

Os tempos necessários ao aparecimento das patologias indesejáveis associadas ao stress hipertérmico (introversão, golpe de calor, morte e dor na pele) foram obtidos a partir das previsões do software *HuTheReg*. Tendo sido comparadas ambas as situações, verificou-se que na situação de combate a um Incêndio estrutural obteve-se menores intervalos de tempo até à ocorrência das patologias mencionadas anteriormente, principalmente devido ao maior fluxo térmico proveniente da frente de chama (cerca do dobro).

Para avaliar a influência da água na transferência de calor e massa no vestuário, constituído por uma camada de roupa interior, uma barreira à água líquida e ao vapor de água e uma camada de vestuário de proteção, foram testados um grande número de casos de estudo, que diferem na conjugação de diferentes tipos de construção de vestuário e diferentes massas de água no interior do vestuário de proteção. Com recurso à folha de cálculo ferramenta *Wet-Clothing* foi prevista a evolução temporal da resistência térmica do vestuário de proteção e da massa de água no seu interior, como também a evolução temporal das temperaturas atingidas pelo vestuário e do fluxo de calor que chega à pele.

Independentemente da tipologia do incêndio, comparando os casos constituídos por diferentes vestuários e a mesma massa de água no interior do vestuário de proteção, o

vestuário que apresenta um vestuário de proteção com maior resistência térmica como também apresenta a massa de água localizada numa zona mais interior do vestuário de proteção (Vestuário Tipo 1 : 20% da camada de roupa interior e 80% da camada de vestuário de proteção) revela uma melhor proteção térmica do bombeiro, uma vez que evidencia ao longo do tempo uma redução mais significativa das temperaturas no interior do vestuário e do fluxo de calor que chega à pele. Por outro lado, para o mesmo tipo de vestuário, quanto maior a massa de água localizada no interior do vestuário de proteção, maior é a redução das temperaturas no interior do vestuário e do fluxo de calor que chega à pele.

As análises dos resultados previstos pela ferramenta *Wet-Clothing* permitem retirar conclusões em relação aos resultados obtidos pelo programa *HuTheReg* na simulação do comportamento termofisiológico dos bombeiros nas situações de incêndio descritas, mais concretamente, acerca dos tempos necessários ao aparecimento das patologias indesejáveis associadas stress hipertérmico. Nas situações em que o vestuário dos bombeiros é impregnado com água, ao verificar-se uma redução do fluxo de calor que chega à pele e das temperaturas no interior do vestuário, nomeadamente, da temperatura da camada de roupa interior que se encontra mais perto da superfície da pele, os bombeiros serão sujeitos a uma diminuição do stress térmico. Estes resultados permitem auferir que os tempos necessários ao aparecimento das patologias associadas ao stress hipertérmico, nas situações em que o vestuário é impregnado com água poderão ocorrer num intervalo de tempo superior e assim garantir uma maior proteção do bombeiro.

Conclui-se assim que a impregnação do vestuário com água é benéfica para a proteção segurança do bombeiro. Com as conclusões obtidas pela ferramenta *Wet-Clothing* recomenda-se que em trabalhos futuros, o programa *HuTheReg* simule não só o comportamento termofisiológico do corpo humano coberto com vestuário seco, como também em situações em que o vestuário do indivíduo se encontre molhado.

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
- Anjo, T.M.L (2015), "Técnicas de Arrefecimento do Corpo Humano, Validação de um modelo Termofisiológico", Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra.
- Arens, Edward A. & Zhang H. (2006), "The skin's role in human thermoregulation and comfort", University of California, Berkeley, USA.
- Artigo 8, Secção 3395, "What causes heat illness?", Código de Regulação da Califórnia Estado da Califórnia, Departamento de Relações Industriais
- Bakri, I. & Tochihara, Y. (2015). "Work wearing protective clothing in hot environments: lessons learned from the development of firefighter personal protective clothing standard test", *Journal of Industrial and Intelligent Information*, Vol. 4, Nº 1, pp 9–14.
- Barker, R.L.; Guerth-Schacher, C.; Grimes, R.V. & Hamouda, H. (2006), "Effects of moisture on the thermal protective performance of firefighter protective clothing in low-level radiant heat exposures", *Textile Research Journal*, Vol. 76, Nº1, pp. 27–31.
- Bröde, P.; Kuklane, K.; Candas, V.; Kuklane, K.; Griefahn, B.; Holmér, I.;... Havenith, G. (2010), "Heat gain from thermal radiation through protective clothing with different insulation, reflectivity and vapour permeability", *International Journal of Occupational Safety and Ergonomics*, Vol. 16, Nº2, pp. 231–244.
- Canadian Centre for Occupational Health and Safety (CCOHS); "Hot environments - Health effects and first aid", Consultado a 22 de agosto de 2018, <https://www.ccohs.ca/oshanswers/phys_agents/heat_health.html>
- Cheung, S.S.; Petersen, S.R. & McLellan, T.M. (2010), "Physiological strain and countermeasures with firefighting", *Scandinavian Journal of Medicine and Science in Sports*, Vol. 20, SUPPL. 3, pp. 103–116.
- Clark, R:P: & Edholm, O.G. (1985), "Man and his thermal environment, Edward Arnold, London
- Durand R. (2006), "Thermoregulatory demands during firefighting activities", Firehouse, Consultado em 19 de julho de 2018, <<https://www.firehouse.com/safetyhealth/article/10498731/thermoregulatorydemands-during-firefighting-activities>>
- 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.
- EN 469 (2005), "Protective Clothing - Requirements for fire fighter's protective clothing", European Standard - Product specification (fire fighters)

- Fire Engineering, "The PBI lightweight gold system", Consultado em 31 de Julho de 2018, <<https://www.fireengineering.com/articles/print/volume169/issue1/departments/technology-today/the-pbi-lightweight-gold-system.html>>
- Febbraio, M.; Snow, R.; Hargreaves, M.; Strathis, C.; Martin, I. & Carey, M. (1994), "muscle metabolism during exercise and heat stress in trained men; Effect of acclimation", *J. Appl. Physiol.*, Vol. 76, Nº 2, pp. 589–597.
- Fukazawa, T.; Hartog, Emiel A. den; Daanen Hein A. M.; Tochihara, Y.; Havenith, G. & THERMOPROTECT network (2005), "Water vapour transfer in the simulated protective clothing system with exposure to intensive solar radiation", IN: Proceedings of the 3rd International Conference on Human-Environment System ICHES' 05, Tokyo, Japan, 2005, pp. 202–205.
- Guidotti, Tee L. (1992), "Human factors in firefighting: ergonomic-, cardiopulmonary-, and psychogenic stress-related issues", *International Archives of Occupational and Environmental Health*, Vol.64, Nº1, pp. 1–12.
- Haynes, H. (2017), "Fire Loss in the United States During 2016", National Fire Protection Association
- HealthLink BC (2018), "Body Temperature", Consultado em 23 de agosto de 2018, <<https://www.healthlinkbc.ca/medical-tests/hw198785>>
- Holcombe, B. V. (1981), "The evaluation of protective clothing", *Fire Safety Journal*, Vol. 4, Nº 2, pp. 91–101.
- Holmér, I. (2006), "Protective Clothing in Hot Environments", *Industrial Health*, Vol. 44, Nº 3, pp. 404–413
- Holmér, I. & Gavhed, D. (2007), "Classification of metabolic and respiratory demands in fire fighting activity with extreme workloads", *Applied Ergonomics*, Vol. 38, Nº 1, pp. 45–52.
- Huang, J. (2006), "Thermal parameters for assessing thermal properties of clothing", *Journal of Thermal Biology*, Vol. 31, Nº 6, pp. 461–466
- 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.
- Lucas, R.A.I.; Epstein, Y. & Kjellstrom, T. (2014). "Excessive occupational heat exposure: A significant ergonomic challenge and health risk for current and future workers", *Extreme Physiology and Medicine*, Vol, 3, Nº1, pp. 1–8.
- Malchaire, J. (2004), "Ergonomics of the thermal environment - Analytical determination and interpretation of heat stress using calculation of the predicted heat strain", *ISO/FDIS 7933*, Vol. 3, pp. 1–34
- Judge, J. (2003), *Thermal stress*, ITEC 471. Consultado em Fevereiro de 2014, <<http://www.public.iastate.edu>>.
- Katić, K.; Li, R. & Zeiler, W. (2016), "Thermophysiological models and their applications: A review", *Building and Environment*, Vol. 106, pp. 286–300.

- Keiser, C. (2007), "Steam burns Moisture management in firefighter protective clothing", PhD thesis, Swiss Federal Institute of Technologic ETH, Zurich, St. Gallen.
- Keiser, C.; Becker, C. & Rossi, R. M. (2008), "Moisture transport and absorption in multilayer protective clothing fabrics", *Textile Research Journal*, Vol. 78, N°7, pp. 604–613.
- Lawson, L.K.; Crown, E. M.; Ackerman, M. Y. & Dale, J. D. (2004), "Moisture effects in heat transfer through clothing systems for wildland firefighters", *International Journal of Occupational Safety and Ergonomics*, Vol. 10, N° 3, pp. 227–238.
- Li, J.; Barker, R.L. & Deaton, A.S. (2007), "Evaluating the effects of material component and design feature on heat transfer in firefighter turnout clothing by a sweating manikin", *Textile Research Journal*, Vol. 77, N° 2, pp. 59–66.
- Lotens, W.A. (1993), "Heat transfer from humans wearing clothing", TNO-Institute for Preception, Soesterberg, Netherlands.
- Lu, Y.; Wang, F.; Peng, H.; Shi, W. & Song, G. (2016), "Effect of sweating set rate on clothing real evaporative resistance determined on a sweating thermal manikin in a so-called isothermal condition ($T_{\text{manikin}} = T_a = T_r$)", *International Journal of Biometeorology*, Vol. 60, N°4, pp. 481–488.
- Magalhães, S.; Albuquerque, R. R.; Pinto, J. C. & Moreira, A.L. (2001), "Termorregulação", Faculdade de Medicina da Universidade do Porto, Serião de Fisiologia.
- McLellan, T.M. & Selkirk, G.A. (2006), "The management of heat stress for the firefighter: a review of work conducted on behalf of the Toronto Fire Service", DRDC, Toronto, Canada, *Industrial Health*, Vol. 44, pp. 414–426.
- McLellan, T.M. & Havenith, G. (2016), "Protective clothing ensembles and physical employment standards", *Applied Physiology, Nutrition, and Metabolism*, Vol. 41, N°6 (Suppl. 2), pp. S121–S130.
- McQuerry, M.; DenHartog, E. & Barker, R. (2017), "Evaluating turnout composite layering strategies for reducing thermal burden in structural firefighter protective clothing systems", *Textile Research Journal*, Vol. 87, N°10, pp. 1217–1225.
- Morel, A.; Bedek, G.; Salaün, F. & Dupont, D. (2014), "A review of heat transfer phenomena and the impact of moisture on firefighters' clothing and protection" *Ergonomics*, Taylor & Francis, Vol. 57, N°7, pp. 1078-1089.
- Nagashima, K. (2006), "Central Mechanisms for Thermoregulation in a Hot Environment", *Industrial Health*, Vol. 44, pp. 359–367.
- Naval Air Development Center (1970), "Heat transfer through Clothing", Johnsville, Warminster, Pennsylvania
- Nayak, R.; Houshyar, S. & Padhye, R. (2014), "Recent trends and future scope in the protection and comfort of fire-fighters' personal protective clothing", *Fire Science Reviews*, Vol. 3, N° 1, pp. 1–19.
- Nilsson, H.; Holmér, I.; Havenith, G. & Parsons, K. (1998). "Convective heat loss through clothing", pp. 293–296.
- Nilsson, J.Å.; Molokwu, M. N. & Olsson, O. (2016) "Body temperature regulation in hot environments", *PLOS ONE*, Vol. 11, N°8, pp.1–9.

- OMS (1969), "Health factors involved in working under conditions of heat stress", WorldHealth Organization, Technical Report Series, N° 412, Genève.
- Ooka, R.; Minami, Y.; Sakoi, T.; Tsuzuki, K. & Rijal, H.B. (2010), "Improvement of sweating model in 2-Node Model and its application to thermal safety for hot environments", *Building and Environment*, Vol.45, N°7, pp. 1565–1573.
- Park, H.; Park, J.; Lin, S.H. & Boorady, L. M. (2014), "Assessment of Firefighters' needs for personal protective equipment", *Fashion and Textiles*, Vol. 1; N° 1, pp. 1–13.
- Pascoe, D.; Shanley, L. & Smith, E. (1994), "Clothing and exercise I: biophysics of heat transfer between the individual, clothing and environment", *Sports Med*, Vol. 18, N°1, pp. 38–54.
- Pereira, C.M.D. (2014), "Teste e validação de um programa de simulação do comportamento termofisiológico do corpo humano", Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra
- Raimundo, A.M. & Figueiredo, A.R. (2006). "Human thermophysiological response to high intensity radiation fluxes near a forest fire line" *Forest Ecology and Management*, Vol. 234, pp. 145.
- 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.
- Raimundo, A.M., Quintela, D.A.; Gaspar, A.R. & Oliveira, A.V.M. (2012), "Development and validation of a computer program for simulation of the human body thermophysiological response", 2nd Portuguese Meeting In Bioengineering, February 2012, Portuguese Chapter of IEEE EMBS, University of Coimbra.
- Raimundo, A.M.; Oliveira, A.V.M.; Quintela, D.A. & Figueiredo, A.R. (2018), "Fire intensity , individual protective clothing and firefighting safety", pp. 1–12.
- Richards, M.G.M.; Rossi, R.; Meinander, H.; Broede, P.; ...; Nocker, W. (2015) "Dry and wet heat transfer through clothing dependent on the clothing properties under cold Conditions", *International Journal of Occupational Safety and Ergonomics (JOSE) 2008*, Vol.14, N° 14, pp. 1–13.
- Rosenstock, L., M.D.,M.P.H. & Olsen, J., M.D., Ph.D. (2007), "Firefighting and Death from Cardiovascular Causes", *The New England Journal of Medicine*, pp. 1261–1263.
- Sharkey, B. (1999), "Heat Stress", *Windland Firefighter Health and Safety Recommendations of the April 1999 Conference*, Missoula Technologic and Development Center, USDA Forest Service, Montana, USA
- Stolwijk, J.A.J. (1971), *A mathematical model of physiological temperature regulation in man*, NASA contractor report CR-1855, NASA, Washington DC.
- Su, Y.; He, J. & Li, J. (2016). "Numerical simulation of heat transfer in protective clothing with various heat exposure distances", *The Journal of The Textile Institute*, Vol. 5000.
- Torvi, D.A. & Hadjisophocleous, G.V. (1999), "Research in protective clothing for firefighters : State of the art and future directions", *Fire Technology*, Vol. 35, N° 2.
- Wang, F.; Shi, W.; Lu, Y.; Song, G.; Rossi, R.M. & Anaheim, S. (2016), "Effects of moisture content and clothing fit on clothing apparent 'wet' thermal insulation: A thermal

-
- manikin study", *Textile Research Journal*, Vol. 86, pp. 57–63.
- Wang, F.; Zhang, C. & Lu, Y. (2015), "Correction of the heat loss method for calculating clothing real evaporative resistance", *Journal of Thermal Biology*, Vol. 52, pp. 45–51.
- Weder, M.; Brühwiler, P.A. & Laib, A. (2006), "X-Ray tomography measurements of the moisture distribution in multilayered clothing systems", *Textile Research Journal*, Vol. 76; N°1, 18–26.
- Young, R. (2010), "Understanding Turnout Gear", DuPont Protection Technologies, Consultado em 17 de agosto de 2018,
<<https://www.fireapparatusmagazine.com/articles/print/volume15/issue10/departments/fire-industry-today/understanding-turnout-gear.html>>