



UNIVERSIDADE D
COIMBRA

Rui Miguel Meneses Almeida Correia

**COMPORTAMENTO HIDROTÉRMICO DE
VESTUÁRIO IMPREGNADO COM ÁGUA
EXPOSTO A RADIAÇÃO INCIDENTE**

VOLUME 1

Dissertação no âmbito do Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica, no ramo de Energia e Ambiente, orientada pelo Professor Doutor António Manuel Mendes Raimundo e apresentada à Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade de Coimbra, Departamento de Engenharia Mecânica

Fevereiro de 2023

1 2



9 0

FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE
COIMBRA

Comportamento Hidrotérmico de Vestuário Impregnado com Água Exposto a Radiação Incidente

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

Hydrothermal behavior of clothing impregnated with water when exposed to impinging radiation

Autor

Rui Miguel Meneses Almeida Correia

Orientador

Professor Doutor António Manuel Mendes Raimundo

Júri

Presidente

Professor Doutor José Joaquim da Costa
Professor Associado da Universidade de Coimbra

Vogais

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

Professor Doutor Avelino Virgílio Fernandes Monteiro de Oliveira
Professor Adjunto do Instituto Superior de Engenharia de Coimbra

Coimbra, Fevereiro, 2023

"Accident is the first building block of evolution."

Interstellar, 2014

Agradecimentos

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

Ao meu orientador, Professor Doutor António Manuel Mendes Raimundo, pelo acompanhamento, orientação e auxílio ao longo dos últimos meses.

À minha mãe e ao meu pai, pelo apoio, cooperação e compreensão, ao longo de todo o meu percurso académico, e por tornarem possível a conclusão de mais uma etapa.

E por fim, mas não menos importante, à minha namorada, pela presença e apoio incansáveis, até nos momentos mais difíceis.

Resumo

Ambientes térmicos exageradamente quentes são caracterizados por altas temperaturas do ar, e, muito frequentemente, também por uma radiação térmica incidente de valor elevado, assim como ocorre na situação de combate a incêndios. Estes ambientes são adversos para as pessoas, pois levam ao aparecimento de *stress* térmico e também de patologias, tais como queimaduras, golpes de calor e até a morte. De modo a mitigar estas consequências nefastas, os bombeiros em combate a incêndios utilizam vestuários de proteção, os quais não são completamente eficazes, pelo que é desejável melhorar o desempenho dos mesmos.

Pretende-se com o presente trabalho avaliar a melhoria do desempenho dos vestuários de proteção utilizados pelos bombeiros no combate a incêndios, através da impregnação dos mesmos com água. Estes vestuários de proteção são, tipicamente, constituídos por três camadas, e podem ser impregnados com água, intencionalmente ou não, alterando assim a sua *performance*.

Foi desenvolvida a modelação matemática dos fenómenos termofísicos envolvidos, nomeadamente da transferência de calor e de massa através das várias camadas do vestuário e do comportamento termofisiológico da pele, tendo sido posteriormente implementada num software.

Neste trabalho foi estudado o efeito da presença de água na camada exterior de dois tipos de vestuário, mais concretamente, o vestuário normalmente utilizado no combate a incêndios florestais e o utilizado no combate a incêndios estruturais. Foram testadas diversas quantidades de água, e um leque alargado de radiações incidentes.

Concluiu-se que a presença de água na camada exterior do vestuário leva a um aumento dos tempos até ao aparecimento de queimaduras de 1º e de 2º grau, bem como a um aumento do tempo até à sensação de dor na pele. Adicionalmente, foi possível constatar que, de um modo geral, o vestuário de proteção contra incêndios estruturais apresenta um melhor comportamento do que o de proteção contra incêndios florestais.

Palavras-chave: Ambiente térmico quente, *Stress* térmico, Vestuário de proteção térmica, Vestuário impregnado com água, Queimaduras na pele.

Abstract

Extremely hot thermal environments are characterized by high air temperatures, and frequently also by high incident thermal radiation, as it happens in a firefighting situation. These environments are adverse to people, as they lead to thermal stress and pathologies, such as burns, heat strokes, and even death. In order to mitigate these harmful consequences, firefighters combating fire resort to the use of protective clothing, which are not completely effective, so it is desirable to improve their performance.

This study aims to evaluate the improvement of the performance of protective clothing used by firefighters in fire combat, through the impregnation of the clothing with water. These thermal protective garments are typically composed of three layers and can be impregnated with water, intentionally or not, thus changing their performance.

A mathematical model of the thermophysical phenomena involved, namely heat and mass transfer through the various layers of clothing and the thermophysiological behavior of the skin, was developed and then implemented in software.

In this work, the effect of the presence of water on the outer layer of two types of garments was studied, more specifically, the garments normally used in forest firefighting and those used in structural firefighting. Several amounts of water and a wide range of incident radiation were tested.

It was concluded that the presence of water on the outer layer of clothing leads to an increase in the time to onset 1st and 2nd degree burns, as well as an increase in the time to pain sensation on the skin. In addition, it was possible to find that, in general, structural fire protection clothing performs better than forest fire protection clothing.

Keywords: Hot thermal environments, Thermal stress, Thermal protective suit, Water-impregnated clothing, Skin burn.

Índice

| | |
|---|------|
| Índice de Figuras | ix |
| Índice de Tabelas | xi |
| Simbologia..... | xiii |
| 1. INTRODUÇÃO..... | 1 |
| 1.1. Enquadramento | 1 |
| 1.2. Ambientes Térmicos Muito Quentes | 2 |
| 1.2.1. Caracterização | 2 |
| 1.2.2. Vestuário de proteção | 3 |
| 1.2.3. Impregnação do vestuário com água | 4 |
| 1.3. Objetivos..... | 5 |
| 2. METODOLOGIA..... | 7 |
| 2.1. Modelo Matemático | 7 |
| 2.1.1. Base do modelo e simplificações..... | 8 |
| 2.1.2. Discretização do domínio | 8 |
| 2.1.3. Parâmetros a determinar | 10 |
| 2.1.4. Modelo do vestuário | 10 |
| 2.1.5. Modelo da pele | 14 |
| 2.2. Folha de Cálculo | 15 |
| 2.2.1. Implementação do modelo matemático | 16 |
| 2.2.2. Pressupostos e condições..... | 16 |
| 2.2.3. <i>Inputs</i> | 18 |
| 2.2.4. <i>Outputs</i> | 18 |
| 3. DESCRIÇÃO DO PROBLEMA | 21 |
| 3.1. Tipos de Incêndio..... | 21 |
| 3.2. Características do Vestuário | 22 |
| 3.3. Casos em Estudo | 24 |
| 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO | 27 |
| 4.1. Vestuário Típico de Combate a Incêndios Florestais | 27 |
| 4.2. Vestuário Típico de Combate a Incêndios Estruturais..... | 31 |
| 4.3. Comparação Entre os Dois Tipos de Vestuário | 34 |
| 5. CONCLUSÕES | 39 |
| REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 41 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 2.1 Discretização do domínio de cálculo (malha de cálculo)..... | 9 |
| Figura 2.2 Figura representativa das camadas de pele | 14 |
| Figura 2.3 Imagem representativa dos inputs da folha de cálculo em Excel..... | 18 |
| Figura 2.4 Imagem exemplar dos resultados obtidos numa simulação – corpo humano e suor | 19 |
| Figura 2.5 Imagem exemplar dos resultados obtidos numa simulação - camada interior... | 19 |
| Figura 2.6 Imagem exemplar dos resultados obtidos numa simulação – fluxos de calor e parâmetros de queimadura..... | 19 |
| Figura 2.7 Gráfico exemplar da evolução temporal da temperatura nas superfícies das camadas da pele..... | 20 |
| Figura 2.8 Gráfico exemplar da evolução temporal da temperatura nas superfícies e nodos das camadas do vestuário | 20 |
| Figura 2.9 Gráfico exemplar da evolução temporal dos fluxos de calor resultantes das trocas entre o corpo humano e o meio envolvente | 20 |
| Figura 2.10 Gráfico exemplar da evolução temporal da massa de água presente nas camadas de vestuário..... | 20 |
| Figura 2.11 Gráfico exemplar da evolução temporal da humidade relativa em cada camada de vestuário..... | 20 |
| Figura 2.12 Gráfico exemplar da evolução temporal do parâmetro quantificador de dano na pele | 20 |
| Figura 4.1 Tempo decorrido até à evaporação de toda a água presente na camada exterior de vestuário, para vestuário típico de combate a incêndios florestais..... | 28 |
| Figura 4.2 Tempo até à sensação de dor na pele, para vestuário típico de combate a incêndios florestais | 28 |
| Figura 4.3 Tempo até ao aparecimento na pele de queimaduras de 1º grau, para vestuário típico de combate a incêndios florestais..... | 29 |
| Figura 4.4 Tempo até ao aparecimento de queimaduras de 2º grau, para vestuário típico de combate a incêndios florestais..... | 30 |
| Figura 4.5 Tempo (em segundos) entre queimaduras de 1º e 2º grau, para vestuário típico de combate a incêndios florestais | 30 |
| Figura 4.6 Tempo até à evaporação total da água, para vestuário típico de combate a incêndios estruturais | 31 |
| Figura 4.7 Tempo até início de sensação de dor na pele, para vestuário típico de combate a incêndios estruturais | 32 |

| | |
|--|----|
| Figura 4.8 Tempo até ao aparecimento de queimaduras de 1º grau, para vestuário típico de combate a incêndios estruturais | 32 |
| Figura 4.9 Tempo até ao aparecimento de queimaduras de 2º grau, para vestuário típico de combate a incêndios estruturais | 33 |
| Figura 4.10 Tempo entre queimaduras de 1º e 2º grau, para vestuário típico de combate a incêndios estruturais..... | 33 |
| Figura 4.11 Diferença entre tempos de evaporação da água, entre vestuário para incêndios estruturais e vestuário para incêndios florestais..... | 35 |
| Figura 4.12 Diferença entre tempos até à sensação de dor na pele, entre vestuário para incêndios estruturais e vestuário para incêndios florestais | 36 |
| Figura 4.13 Diferenças entre tempos até queimaduras de 1º grau, entre vestuários para incêndios estruturais e vestuário para incêndios florestais | 37 |
| Figura 4.14 Diferenças entre tempos até queimaduras de 2º grau, entre vestuários para incêndios estruturais e vestuário para incêndios florestais | 37 |

ÍNDICE DE TABELAS

| | |
|--|----|
| Tabela 2.1 Parâmetros a determinar | 10 |
| Tabela 2.2 Propriedades das camadas de pele e do sangue (Malaquias et al., 2022)..... | 16 |
| Tabela 3.1 Características do vestuário de proteção normalmente utilizado pelos bombeiros em situação de combate a incêndio florestal | 23 |
| Tabela 3.2 Características do vestuário de proteção normalmente utilizado pelos bombeiros em situação de combate a incêndio estrutural | 23 |
| Tabela 3.3 Listagem dos casos considerados no presente estudo..... | 24 |

Simbologia

| Símbolo | Significado | Unidades |
|-----------------|---|--------------------------|
| A_i | Superfície de controlo da difusão localizada a 25% da camada de vestuário | $[m^2]$ |
| A_e | Superfície de controlo da difusão localizada a 75% da camada de vestuário | $[m^2]$ |
| C_{res} | Trocas de calor convectivo por respiração | $[W/m^2]$ |
| cp_s | Calor específico da camada de vestuário seco | $[J/kg \cdot ^\circ C]$ |
| cp_w | Calor específico da água | $[J/kg \cdot ^\circ C]$ |
| E_a | Energia de ativação da pele | $[J/kmol]$ |
| E_C | Trocas de calor por evaporação na pele | $[W/m^2]$ |
| e_{ep} | Espessura da epiderme | $[mm]$ |
| E_{res} | Trocas de calor evaporativo por convecção | $[W/m^2]$ |
| H | Calor sensível perdido pelo corpo | $[W/m^2]$ |
| h_{conv} | Coeficiente de convecção | $[W/m^2 \cdot ^\circ C]$ |
| h_{rad} | Coeficiente de radiação | $[W/m^2 \cdot ^\circ C]$ |
| I_{cl} | Isolamento térmico da camada de vestuário | $[clo]$ |
| \dot{I}_{rad} | Radiação térmica incidente | $[W/m^2]$ |
| i_{vp} | Difusibilidade do vapor através do têxtil | $[-]$ |
| i_{wt} | Difusibilidade da água através do têxtil | $[-]$ |
| k_{ep} | Condutibilidade térmica da epiderme | $[W/m^2 \cdot ^\circ C]$ |
| M | Nível de atividade física | $[met]$ |
| \dot{M} | Taxa de produção de calor | $[W/m^2]$ |
| m_{cp} | Capacitância térmica | $[J/^\circ C]$ |
| m_{evap} | Massa de água evaporada | $[kg]$ |
| m_s | Massa da camada de vestuário seco | $[kg]$ |
| m_{solv} | Massa de água desorvida pelas fibras | $[kg]$ |
| m_{vp} | Massa de vapor | $[kg]$ |
| m_{vpt} | Massa de vapor transferida entre camadas | $[kg]$ |
| m_w | Massa de água contida na camada de vestuário | $[kg]$ |

| | | |
|--------------------|---|-------------------------|
| m_{wt} | Massa de água transferida entre camadas | [kg] |
| P_v | Pressão parcial de vapor | [kPa] |
| Q_{acum} | Calor acumulado na camada de vestuário | [J] |
| Q_{entra} | Calor recebido pela camada de vestuário | [J] |
| Q_{evap} | Calor perdido por evaporação da água | [J] |
| Q_{ger} | Calor gerado pela camada de vestuário | [J] |
| $Q_{pele(out-in)}$ | Calor recebido pela pele | [J] |
| Q_{sai} | Calor perdido pela camada de vestuário | [J] |
| Q_{solv} | Calor perdido por dessorção da água das fibras | [J] |
| R | Constante universal dos gases perfeitos | [J/kmol.K] |
| R_{cl} | Resistência térmica | [m ² .°C/W] |
| R_{ep} | Resistência térmica da epiderme | [m ² .°C/W] |
| R_{vp} | Resistência do têxtil ao vapor | [m ² .kPa/W] |
| r_{vp} | Resistividade à difusão de vapor | [-] |
| R_w | Razão entre massa de água por massa de vestuário seco | [-] |
| R_{wt} | Resistência do têxtil à água | [s.m ²] |
| r_{wt} | Resistividade à difusão de água | [-] |
| T_{ar} | Temperatura do ar | [°C] |
| T_{ep} | Temperatura da epiderme | [°C] |
| T_{mr} | Temperatura média radiante | [°C] |
| T_n | Temperatura do nodo | [°C] |
| T_{pele} | Temperatura da pele | [°C] |
| T_s | Temperatura da superfície de transição | [°C] |
| v_{ar} | Velocidade do ar | [m/s] |
| W | Trabalho mecânico desenvolvido pelo corpo | [W/m ²] |
| α | Coeficiente de absorção da radiação incidente | [-] |
| Δt | Variação temporal | [s] |
| Ω | Parâmetro quantificador de dano na pele | [-] |

1. INTRODUÇÃO

1.1. Enquadramento

O bombeiro é o principal agente no combate a incêndios, e por esta razão necessitam de uma série de condições que favoreçam a sua proteção. Estão tipicamente sujeitos a um alto nível de atividade física, bem como a condições meteorológicas desfavoráveis, altas temperaturas e radiações térmicas incidentes, por vezes durante largos intervalos de tempo. Deste modo existe um elevado interesse no estudo de fatores que possam proteger o bombeiro no combate a incêndios: não só a salvaguardar-se de possíveis patologias indesejáveis, como também, a melhorar a sua *performance* no combate a incêndios.

O *stress* térmico tem origem nos elevados fluxos de calor emitidos pelas frentes de fogo, podendo acarretar o aparecimento de diversas patologias. As altas temperaturas junto da pele podem levar ao aparecimento de queimaduras, sejam elas de 1º, 2º ou até de 3º grau, existindo ainda estudos que analisem um 4º grau (Parrett et al., 2006), dependendo da intensidade da radiação térmica incidente, bem como do tempo de exposição. Adicionalmente, água presente junto à pele, seja por transpiração, ou por difusão através do vestuário, sujeita a altas temperaturas pode também levar ao surgimento de queimaduras. Por outro lado, em casos com gravidade acrescida, pode ocorrer o aumento de temperatura do hipotálamo, possibilitando a ocorrência de golpe de calor ou mesmo morte (Raimundo & Figueiredo, 2006, 2009).

De forma a evitar os riscos acima referidos, são utilizados vestuários de proteção contra incêndios, prolongando a permanência e permitindo o combate de forma mais segura. Este equipamento é especificamente desenhado com a finalidade de impedir e/ou reduzir o ganho de calor pelo corpo humano, evitar a difusão de líquidos e gases do exterior para a pele e, simultaneamente, permitir a expulsão da água presente por transpiração. De notar que a afirmação anterior demonstra que é importante adaptar o vestuário e as suas características à tipologia do incêndio e ao nível de atividade física requerida pelo mesmo.

Em diversos estudos foram analisadas hipóteses de melhoria de *performance* do vestuário, nomeadamente através da impregnação do vestuário de proteção com água. Este

fator pode dever-se quer à impregnação intencional, rega do vestuário antes da atividade, quer devido à transpiração do bombeiro.

Neste trabalho analisam-se os efeitos da impregnação intencional com água da camada exterior do vestuário de proteção mais utilizado no combate a incêndios florestais e o mais utilizado no combate a incêndios estruturais.

1.2. Ambientes Térmicos Muito Quentes

1.2.1. Caracterização

O corpo humano realiza trocas de calor com o meio que o envolve, de forma a manter o seu equilíbrio térmico, que corresponde à situação ideal de conforto térmico. Esta condição torna-se ideal quando o calor produzido pelo metabolismo é igual ao calor dissipado pelo corpo.

As trocas de calor que o corpo humano realiza com o meio envolvente ocorrem por meios de condução, convecção ou radiação. O balanço térmico do corpo é representado por:

$$M - W = H + E_C + C_{res} + E_{res}, \quad (1.1)$$

onde, M é a taxa de produção de calor, W o trabalho mecânico desenvolvido pelo corpo, H o calor sensível perdido pelo corpo por condução, convecção e radiação, E_C as trocas de calor por evaporação na pele, C_{res} as trocas de calor convectivo pela respiração, e E_{res} as trocas de calor evaporativo pela respiração.

O balanço térmico anterior é principalmente afetado pelas condições ambientais, e com especial atenção nas situações denominadas por ambientes térmicos extremos. Os bombeiros estão tipicamente sujeitos a temperaturas e radiações térmicas incidentes elevadas, o que provoca um valor positivo no balanço térmico corporal. Deste modo, estes casos são denominados de ambientes térmicos quentes, por proporcionarem um aumento da temperatura do corpo.

A exposição a ambientes térmicos quentes, pode levar ao aparecimento de *stress* térmico, que está na origem do surgimento de uma série de patologias. As queimaduras caracterizam uma percentagem de 6% dos acidentes ocorridos em frentes de incêndio (Campbell & Hall, 2022), e são causadas pelo excesso de calor que contacta com a pele, ou

até pela condensação de vapores junto da mesma. Por outro lado, o excesso de calor acumulado no corpo, justifica o aumento da temperatura do hipotálamo, e tem por consequências, golpes de calor ou até mesmo morte (Raimundo & Figueiredo, 2009).

Desta forma, exige-se que, em ambientes extremamente quentes, todos os sintomas sejam vigiados, de maneira a evitar a ocorrência das patologias referidas. Raimundo e Figueiredo (2009), afirmam que, além do uso de vestuário de proteção, a saúde dos bombeiros está também relacionada com o controlo adequado dos tempos de exposição a ambientes excessivamente quentes. Os bombeiros fiam-se normalmente na sensação de dor na pele para avaliar a possibilidade do aparecimento de patologias. Trata-se de uma prática perigosa, pois, segundo Raimundo e Figueiredo (2009), quando o corpo humano está completamente coberto por vestuário de proteção (incluindo capacete e viseira), existe a possibilidade de aparecimento de patologias muito graves ou morte, sem o surgimento de qualquer sensação de dor na pele.

Com vista a reduzir o número elevado de acidentes em trabalho, são utilizados vestuários de proteção adequados, para o combate a incêndios. Ainda assim, os vestuários de proteção não garantem uma proteção absoluta, apenas aumentam o “tempo de exposição em segurança”. No presente estudo é avaliado o aumento deste “tempo de exposição em segurança” conseguido através da impregnação da camada exterior do vestuário com água.

1.2.2. Vestuário de proteção

Em situações de incêndio, os bombeiros estão expostos a condições perigosas, que podem prejudicar a sua saúde, as quais podem ser caracterizadas por: temperaturas elevadas; chamas provenientes das frentes de incêndio; agentes químicos; gases quentes; e radiações incidentes excessivas. Assim, é necessário o uso de uma forma de segurança, que confira proteção, contra os agentes já referidos e que seja leve e flexível, sem prejudicar a saúde do bombeiro. São então usados os vestuários de proteção térmica. De acordo com a Norma Europeia (*EN 469 - European Standards*, n.d.), o vestuário de proteção multicamada deve seguir um conjunto de regras, não só no seu fabrico, como também na sua manutenção, de forma a manter as suas propriedades.

O vestuário, de forma a cumprir todos os requisitos impostos pela sua função, é tipicamente composto por 3 camadas: camada interior térmica, potenciando conforto e proteção térmica; barreira à água e vapores, que previne a difusão de água, seja líquida ou

gasosa; e camada exterior, potenciando ao vestuário resistência à abrasão e a agentes químicos, refletor, e ainda serve o propósito de proteção para as restantes camadas.

Devido à dificuldade que existe em caracterizar os diferentes tipos de riscos subjacentes em situações de incêndio, torna-se por vezes difícil definir o tipo de características que devem ser auferidas ao equipamento de proteção individual (EPI), o qual inclui o vestuário de proteção, o capacete, a viseira e as botas. No combate a certos incêndios, o EPI tem de incluir também um sistema de respiração (composto pela botija de ar, a máscara e os tubos de ligação).

A bibliografia contempla diversos estudos ao vestuário contra incêndios. Raimundo e Figueiredo (2006, 2009), estabeleceram diretrizes para o combate a incêndio de forma segura, nomeadamente através do estudo da influência das propriedades do vestuário no comportamento termofisiológico do corpo humano e na ocorrência de patologias indesejáveis e/ou perigosas. Prasad et al. (2002) desenvolveram um modelo matemático que analisa a transferência de calor e de massa, de forma transiente, num vestuário multicamada, com e sem espaço de ar entre a roupa e a pele. Chitrphiromsri e Kuznetsov (2005) apresentaram um modelo que permite avaliar simultaneamente a transferência de calor e de massa no vestuário de proteção térmica, em situações de *flash fire*.

1.2.3. Impregnação do vestuário com água

Torna-se desafiador definir a *performance* do vestuário de proteção quando este se encontra impregnado com água. Por um lado, devido, não só, às altas temperatura e radiações térmicas incidentes, como também, à elevada exigência física, pois o corpo humano liberta água, perspiração, impregnando a camada interior. Por outro lado, os bombeiros em situação de incêndio acabam por entrar em contacto com água, levando assim à presença de humidade na camada exterior do vestuário de proteção (Zhang et al., 2018). Este fator leva à alteração das características do vestuário e consequentemente tem influência na *performance* do mesmo no combate a incêndios.

Vários estudos foram já realizados com o objetivo de analisar o efeito da água presente no vestuário de proteção multicamada (Keiser & Rossi, 2008; Zhang et al., 2018; Malaquias et al., 2022; entre outros).

Keiser e Rossi (2008) avaliaram experimentalmente a transferência de vapor e de água através das várias camadas do vestuário de proteção. Estes autores concluíram que a presença

de água implicava temperaturas menores nas várias camadas do vestuário quando exposto a baixa radiação incidente, em relação ao vestuário seco.

Zhang et al. (2018) estudaram experimentalmente três situações diferentes de impregnação do vestuário, analisando a presença de água apenas na camada exterior, apenas na camada interior, e em ambas. Constataram que a presença de água em ambas as camadas provoca um aumento positivo nos tempos até queimaduras de 2º grau.

Malaquias et al. (2022) constataram que a presença de água na camada exterior é geralmente benéfica, embora o oposto se verifique quando a água é adicionada à camada interior. Para o efeito, utilizaram uma abordagem numérica de forma a simular o efeito de diferentes quantidades de água, inicialmente presentes no vestuário de proteção térmica, para um abrangente leque de radiações térmicas incidentes, 0 - 80 kW/m².

1.3. Objetivos

Este estudo tem como objetivo central a avaliação da influência da impregnação com água dos vestuários utilizados habitualmente pelos bombeiros no combate a incêndios, com ênfase no aumento do “tempo de combate em segurança”. Para isso foram necessários três passos. O primeiro assentou na modelação matemática dos fenómenos termofísicos envolvidos, nomeadamente da transferência de calor e de massa através das várias camadas do vestuário, comportamento termofisiológico da pele, do processo de aparecimento de dor na pele e de surgimento de queimaduras do 1º, 2º e 3º grau. No segundo passo foram implementados os modelos matemáticos num software (folha de cálculo em MS Excel). No terceiro passo recorreu-se à ferramenta de cálculo anterior para simular várias situações, envolvendo ambientes com uma gama alargada de radiação térmica incidente, um vestuário de proteção típico de combate a incêndios florestais e outro típico de combate a incêndios estruturais, e a impregnação de um leque abrangente de massa de água impregnada no vestuário.

Por fim, os resultados foram analisados e comparados com o intuito de concluir se a presença de água na camada exterior do vestuário de proteção traduz uma melhor resposta do comportamento termofisiológico do corpo humano.

2. METODOLOGIA

2.1. Modelo Matemático

Existem diversos estudos que abordam o comportamento do vestuário de proteção contra incêndios, seja na presença de água ou não. Em grande parte dessa bibliografia o modelo matemático usado é baseado num método puramente implícito.

De realçar que, em cada equação de um método implícito, a variável a calcular aparece relacionada com dois instantes (o futuro e o presente) e todas as restantes variáveis aparecem referidas ao instante futuro. No método explícito, a variável a calcular aparece também relacionada com dois instantes (o futuro e o presente), mas as restantes variáveis aparecem referidas ao instante presente. Trata-se de uma pequena diferença, mas com grande impacto no modo como as equações podem ser resolvidas. Deste modo, o método implícito acarreta uma maior dificuldade de implementação, pois, em cada instante de tempo, as equações são resolvidas recorrendo a um processo iterativo. Como tal, não é viável programar este método numa folha de cálculo MS Excel, sendo necessário o recurso a uma linguagem de programação mais abrangente. Por sua vez, o método explícito é de mais fácil implementação e pode ser programado numa folha de cálculo MS Excel. Tem como desvantagem o facto de ser necessário assumir intervalos de tempo extremamente pequenos, caso contrário o cálculo não produz resultados (começa por instabilizar e depois diverge, não produzindo uma solução coerente). Para a elaboração deste estudo optou-se pela implementação do modelo explícito, que foi programado numa folha de cálculo MS Excel.

2.1.1. Base do modelo e simplificações

Este problema trata, de forma resumida, um balanço térmico e mássico entre o corpo humano, protegido pelo vestuário de proteção térmica, e o meio envolvente. Para tal surgiu a necessidade do estabelecimento de algumas simplificações. Um vestuário de proteção para o combate a incêndios é tipicamente constituído por 3 camadas:

- Camada exterior, sujeita às agressivas condições do meio envolvente, altamente resistente e refletora, que serve de proteção para o corpo humano, bem como para as restantes camadas;
- Camada intermédia, ou barreira à água (e permeável ao vapor), que impede, quer a passagem de água, quer a passagem de agentes químicos que possam comprometer a integridade do bombeiro. Permite também que o suor seja expelido pelo vestuário de proteção;
- Camada interior, ou forro térmico, que oferece a maior proteção térmica contra o meio envolvente, que deve ser confortável ao tato.

A camada interior inclui também a roupa interior, com espessura de cerca de 2,6 mm, sendo que possui características semelhantes às do forro térmico.

Além destas três camadas, foi também considerada uma camada de ar, correspondente ao espaço entre a pele e a camada interior da roupa. Assumiu-se que tem uma espessura de 6,35 mm, e uma resistência térmica de 0,16 clo, o que é equivalente a $0,025 \text{ m}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{W}$.

Adicionalmente, foi assumido que cada camada de vestuário é composta unicamente por 3 elementos: fibras (sólido), água líquida, e ar húmido (mistura de ar seco com vapor de água).

2.1.2. Discretização do domínio

Apresenta-se na Figura 2.1 um esquema do modo como foi discretizado o domínio (malha) de cálculo relativo ao vestuário, no qual não está representada a malha de cálculo relativa à pele.

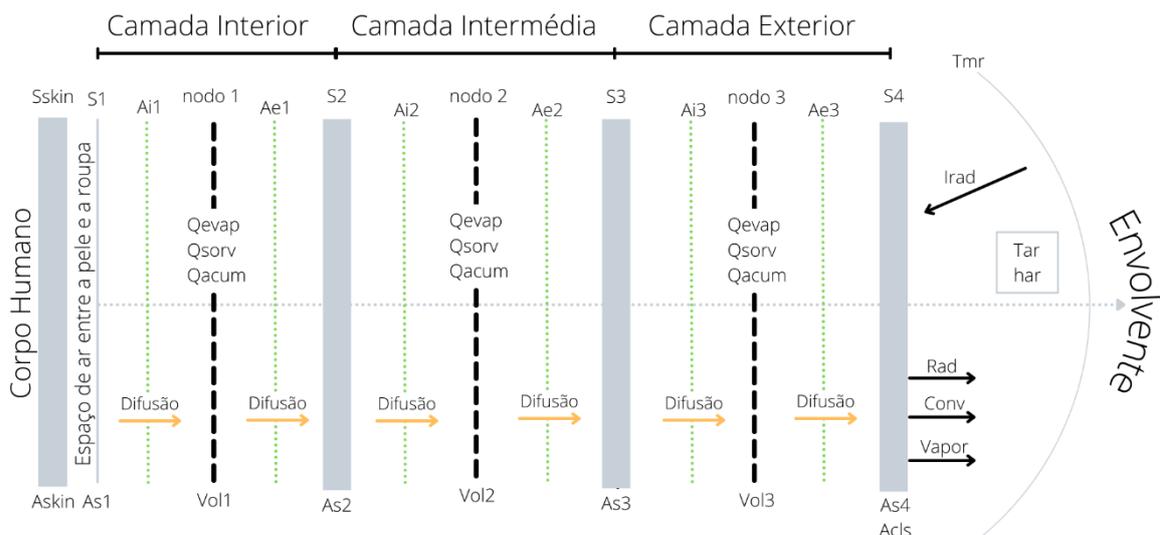


Figura 2.1 Discretização do domínio de cálculo (malha de cálculo)

Para a discretização do domínio em estudo recorreu-se a 3 tipos de elementos:

- Nodos;
- Superfícies de transição;
- Superfícies de controlo de difusão.

Os nodos são três e representam as camadas de vestuário. Cada um deles contém a totalidade da “massa” da camada que representam, constituída por tecido seco (fibras), por água líquida e por ar húmido.

As superfícies de transição são cinco, e representam a transição entre as camadas de vestuário. Por se tratar de superfícies, estas não possuem massa.

Por fim, existem seis superfícies de controlo da difusão. Tal como as anteriores, não têm massa, sendo que se assume que todos os fenómenos de difusão ocorrem através destas superfícies. Neste estudo considera-se a existência de difusão de calor (por condução), difusão de água líquida (através das fibras), e difusão de vapor de água (através do ar). Localizam-se, como se pode ver pela Figura 2.1, a 25% e a 75% da espessura de cada camada de vestuário.

2.1.3. Parâmetros a determinar

Para cada um dos elementos (nós e superfícies), foi necessário calcular, ou conhecer, uma série de valores, com o objetivo de realizar os balanços entre as fronteiras dos elementos. De forma a não tornar a apresentação do modelo exaustiva, apenas serão mostradas as equações e fórmulas que tiveram mais importância para os resultados.

Na Tabela 2.1, encontram-se representados todos os parâmetros a determinar.

Tabela 2.1 Parâmetros a determinar

| Superfícies de Controlo de Difusão | Superfícies de Transição | Nodos |
|---|--|---|
| Área (A) | Área (A_s) | Volume (V) |
| Resistência térmica do vestuário (R_{cl}) | Temperatura (T_s) | Massa de tecido seco (m_s) |
| Resistência à difusão de vapor (R_{et}) | Pressão de vapor (P_v) | Massa de água líquida (m_w) |
| Difusibilidade da água (iwt) | Pressão de vapor saturado (P_{vs}) | Temperatura (T_n) |
| | Humidade relativa (HR) | Pressão de vapor (P_v) |
| | | Pressão de vapor saturado (P_{vs}) |
| | | Humidade relativa (HR) |
| | | Caudal mássico de água evaporada (m_{evap}) |
| | | Massa específica da camada de vestuário (ρ_{cl}) |
| | | Calor específico da camada de vestuário (cp_{cl}) |

2.1.4. Modelo do vestuário

O modelo matemático obtido para o vestuário, foi elaborado considerando um conjunto de balanços térmicos e mássicos, quer aos nodos quer às superfícies.

Temperatura dos nodos

Para se determinar a temperatura de cada nodo foi necessário realizar um balanço de energia térmica da seguinte forma:

$$Q_{acum} = Q_{entra} - Q_{sai} + Q_{ger}, \quad (2-1)$$

onde Q_{acum} é o calor acumulado no nodo em questão, Q_{entra} a energia recebida pela camada de vestuário, Q_{sai} a energia cedida pelo nodo, e Q_{ger} a energia gerada pelo nodo, tendo em consideração a energia cedida por evaporação e por sorção.

Segundo um método explícito foi obtida a seguinte expressão para a temperatura de um dado nodo j :

$$T_n^F(j) = [1 - B_{cli}(j) - B_{cle}(j)] * T_n(j) + B_{cli}(j) * T_s(j) + B_{cle}(j) * T_s(j + 1) - G_{cl}(j) * [Q_{evap}(j) + Q_{sorr}(j)], \quad (2-2)$$

em que

$$\begin{cases} B_{cli}(j) = \Delta t * A_i(j) / [m_{cp}(j) * R_{cl}(j)] \\ B_{cle}(j) = \Delta t * A_e(j) / [m_{cp}(j) * R_{cl}(j)], \\ G_{cl}(j) = \Delta t / m_{cp}(j) \end{cases} \quad (2-3)$$

onde, T_n representa a temperatura do nodo, T_s a temperatura da superfície de transição, Q_{evap} a energia perdida por evaporação, Q_{sorr} a energia perdida por sorção, A_i a área da superfície de controlo da difusão interna, A_e a área da superfície de controlo de difusão externa, Δt a variação temporal, m_{cp} a capacitância térmica, e R_{cl} a resistência térmica. Por outro lado, o sobrescrito F é relativo ao instante futuro, e os subscritos n e s , remetem para nodos e superfícies de transição, respetivamente.

Como foi dito anteriormente, para se atingir a estabilidade do método explícito, é necessário que o intervalo de tempo seja suficientemente reduzido. Assim, o critério de estabilidade é definido por:

$$\Delta t \leq [m_{cp}(j) * R_{cl}(j)] / [A_i(j) + A_e(j)], \quad (2-4)$$

É também importante notar, como se calculam os valores de $m_{cp}(j)$ e de $R_{cl}(j)$:

$$m_{cp}(j) = m_s(j) * cp_s(j) + m_w(j) * cp_w(j), \quad (2-5)$$

onde, $m_s(j)$ é a massa seca da camada de vestuário, $cp_s(j)$ é o calor específico da camada de vestuário em seco, $m_w(j)$ é a massa de água contida na camada em questão, e $cp_w(j)$ é o calor específico da água;

Por sua vez a resistência térmica do vestuário vem:

$$R_{cl}(j) = 0.50 * 0.155 * I_{cl}(j), \quad (2-6)$$

sendo que, $I_{cl}(j)$ diz respeito ao isolamento térmico intrínseco da camada de vestuário.

Temperatura das superfícies de transição

O cálculo da temperatura das superfícies de transição segue o mesmo raciocínio, com a diferença de que, pelo facto de se tratar de superfícies, não têm massa e assim $Q_{acum} = 0$ e $Q_{ger} = 0$. De onde resulta: $Q_{sai} = Q_{entra}$.

Para as superfícies de transição S1, S2 e S3, a equação para o cálculo da sua temperatura é:

$$T_s(j) = [B_{si}(j) * T_n(j - 1) + B_{se}(j) * T_n(j)]/[B_{si}(j) + B_{se}(j)] \quad (2-7)$$

em que

$$\begin{cases} B_{si}(j) = A_e(j - 1) * R_{cl}(j) \\ B_{se}(j) = A_i(j) * R_{cl}(j - 1) \end{cases} \quad (2-8)$$

No caso da superfície S4, esta está sujeita às solicitações do meio envolvente, como radiação e convecção, tomando a seguinte forma:

$$T_s(4) = [B_{ar} * T_{ar} + B_{mr} * T_{mr} + B_3 * T_n(3) + B_{rad} * \dot{I}_{rad}]/[B_{ar} + B_{mr} + B_3], \quad (2-9)$$

onde

$$\begin{cases} B_{ar} = A_S(4) * h_{conv} \\ B_{mr} = A_S(4) * h_{rad} \\ B_3 = A_e(3)/R_{cl}(j) \\ B_{rad} = A_S(4) * \alpha \end{cases} \quad (2-10)$$

sendo que, T_{ar} é a temperatura do ar exterior, T_{mr} a temperatura média radiante exterior, \dot{I}_{rad} a radiação térmica incidente, A_S a área da superfície de transição, h_{conv} o coeficiente de convecção, h_{rad} o coeficiente de radiação, e α o coeficiente de absorção da radiação incidente.

Massa de água contida e transferida entre nodos

Tal como nos casos anteriores, para se determinar a massa de água presente em cada nodo, tornou-se necessário realizar um balanço mássico da água presente em cada camada:

$$m_w^a(j) = m_w(j) - m_{evap}(j) + m_{wt}(j - 1 \rightarrow j) - m_{wt}(j \rightarrow j + 1) - m_{solv}(j), \quad (2-11)$$

$$m_w^F(j) = \text{máximo}[m_w^a(j); 0]. \quad (2-12)$$

Nas equações (2-11) e (2-12), m_w representa a massa de água contida na camada de vestuário, m_{evap} a massa de água evaporada, m_{wt} a massa de água transferida de um nodo para o outro, m_{solv} a massa de água desorvida pelas fibras, e m_w^F a massa de água contida na camada de vestuário no instante temporal futuro.

Interessa conhecer também a massa de água transferida, entre nodos, e assim se obteve uma equação genérica para o seu cálculo:

$$m_{wt}((j-1) \rightarrow j) = \Delta t * A * (m_w(j-1) - m_w(j)) / R_{wt}(j), \quad (2-13)$$

Sabendo que $R_{wt}(j)$ representa a resistência do têxtil à água, $r_{wt}(j)$, a resistividade à difusão de água e $i_{wt}(j)$ (adimensional) a difusibilidade da água através da camada de vestuário, resulta:

$$R_{wt}(j) = r_{wt}(j) * R_{cl}(j), \quad (2-14)$$

onde

$$\left| \begin{array}{l} i_{wt}(j) < 0.0001 \rightarrow r_{wt}(j) = 1 * 10^9 \\ i_{wt}(j) \geq 0.0001 \rightarrow r_{wt}(j) = \frac{1 * 10^7}{16.65 * i_{wt}(j)} \end{array} \right. \quad (2-15)$$

Massa de vapor contida e transferida entre nodos

Esta situação segue a mesma linha de pensamento que o caso anterior, onde a massa de vapor contida em cada camada de vestuário é calculada através de:

$$m_{vp}^a(j) = m_{vp}(j) + m_{evap}(j) + m_{vpt}(j-1 \rightarrow j) - m_{vpt}(j \rightarrow j+1), \quad (2-16)$$

$$m_{vp}^F(j) = \text{máximo}[m_{vp}^a(j); 0]. \quad (2-17)$$

assumindo que, m_{vp} é a massa de vapor contida no nodo, m_{vpt} a massa de vapor transferida de um nodo para o outro e m_{vp}^F a massa de vapor contida no nodo no instante temporal futuro. De maneira a calcular a massa de vapor transferida entre nodos, usou-se a expressão:

$$m_{vpt}((j-1) \rightarrow j) = \Delta t * A_S(j) * (P_v(j-1) - P_v(j)) / R_{vp}(j), \quad (2-18)$$

onde, P_v representa a pressão parcial de vapor, e R_{vp} a resistência do têxtil ao vapor.

$$R_{vp}(j) = r_{vp}(j) * R_{cl}(j), \quad (2-19)$$

em que

$$\begin{cases} i_{vp}(j) < 0.0001 \rightarrow r_{vp}(j) = 1 * 10^9 \\ i_{vp}(j) \geq 0.0001 \rightarrow r_{vp}(j) = \frac{1 * 10^7}{16.65 * i_{vp}(j)} \end{cases} \quad (2-20)$$

sendo, r_{vp} a resistividade à difusão de vapor e i_{vp} a difusibilidade do vapor através da camada de vestuário.

2.1.5. Modelo da pele

O modelo da pele é idêntico ao do vestuário, com a diferença de se considerar que apenas existe transferência de calor entre as várias camadas da pele. Na Figura 2.2 observa-se o modelo usado.

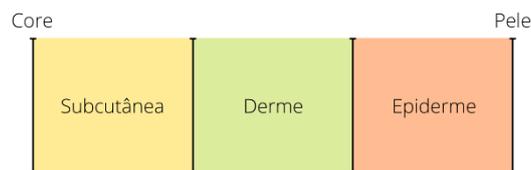


Figura 2.2 Figura representativa das camadas de pele

Tal como no modelo do vestuário, para a determinação das temperaturas nas camadas e nas superfícies de transição recorreu-se a uma série de balanços térmicos. De forma mais concisa, apenas se apresenta a fórmula usada para o cálculo da temperatura da pele, visto ser o aspeto determinante neste subcapítulo:

$$T_{pele} = T_{ep} + Q_{pele(out-in)} * R_{ep} / (\Delta t * A_{pele}), \quad (2-21)$$

onde, T_{pele} é a temperatura da pele, T_{ep} a temperatura da epiderme, $Q_{pele(out-in)}$ o calor que recebido pela pele, R_{ep} a resistência térmica da epiderme, A_{pele} a área de superfície da

pele. Sendo e_{ep} a espessura da epiderme, e k_{ep} a condutibilidade térmica da epiderme, a resistência térmica é calculada a partir de:

$$R_{ep} = 0.5 * e_{ep} / k_{ep}. \quad (2-22)$$

Modelo de queimadura da pele

O modelo usado para simular a queimadura da pele, é aquele que foi proposto por Henriques (1947). Considera que existe um parâmetro Ω que quantifica o dano na pele por queimadura. O mesmo propõe que o aparecimento de dano na pele apenas ocorre para temperaturas superiores a 44 °C:

$$\begin{cases} T < 44^\circ\text{C} \rightarrow \Delta\Omega = 0 \\ T \geq 44^\circ\text{C} \rightarrow \Delta\Omega = \Delta t * P * \exp\left(-\frac{E_a}{R * T}\right) \end{cases} \quad (2-23)$$

onde, Ω é um parâmetro quantificador de dano na pele por queimadura, P um coeficiente pré-exponencial (1/s), E_a a energia de ativação da pele, R a constante universal dos gases perfeitos, e T a temperatura da pele em kelvin.

Mais tarde Weaver e Stoll (1969), propuseram os seguintes parâmetros com base na teoria de Henriques:

$$\begin{cases} se T < 323K: \begin{cases} P = 2.185 * 10^{124} \text{ 1/s} \\ E_a = 7.82 * 10^8 \frac{J}{kmol} \end{cases} \\ T \geq 323K: \begin{cases} P = 1.823 * 10^{51} \text{ 1/s} \\ E_a = 3.27 * 10^8 \text{ J/kmol} \end{cases} \end{cases} \quad (2-24)$$

Para a interface derme-epiderme a queimadura de 1º grau dá-se quando $\Omega_{de} = 0.53$, e o início de queimaduras e 2º grau, quando $\Omega_{de} = 1$. A queimadura de 3º grau acontece quando $\Omega_{sd} = 1$, na superfície de transição subcutânea-derme.

A dor na pele é atingida quando $\Omega_{de} \geq 0.53$, ou quando $T_{de} \geq 45^\circ\text{C}$.

2.2. Folha de Cálculo

O software de cálculo usado para a implementação do modelo foi o Microsoft Excel pela sua facilidade de utilização e alta capacidade de computação.

2.2.1. Implementação do modelo matemático

A folha de cálculo funciona através da introdução de um conjunto de dados, acerca do meio envolvente, do vestuário a ser analisado, e do corpo humano. Posteriormente são realizados cálculos intermédios de forma a facilitar o processo de resolução das equações anteriormente apresentadas. No final de cada simulação são elaborados gráficos, que permitem analisar os dados obtidos de uma maneira visual.

2.2.2. Pressupostos e condições

O modelo matemático usado requer a atribuição de pressupostos e condições que facilitam o processo de cálculo.

Corpo Humano

Começando pelo corpo humano, a Tabela 2.2 demonstra os valores usados para as propriedades das camadas da pele.

Tabela 2.2 Propriedades das camadas de pele e do sangue (Malaquias et al., 2022)

| | Camadas da pele | | | |
|---|-----------------|----------|----------|--------|
| | Subcutânea | Derme | Epiderme | Sangue |
| Condutibilidade térmica - k [W/m.K] | 0,167 | 0,523 | 0,255 | - |
| Calor específico - cp [J/kg.K] | 3060 | 3400 | 3600 | 4142 |
| Massa específica - ρ [kg/m ³] | 1000 | 1200 | 1200 | 1000 |
| Taxa de perfusão do sangue - G [1/s] | 1,25E-03 | 1,25E-03 | - | - |
| Espessura - e [mm] | 10 | 2 | 0,08 | - |
| Temperatura inicial - T [°C] | 36,45 | 35,4 | 34,53 | 37,15 |

É também importante notar que foi considerado, que o corpo humano foi aproximado a um cilindro, com uma altura de $H_{cl} = 0.88$ m, e uma área de superfície (área da pele coberta por vestuário) de $A_{pele} = 1,000$ m².

Considerou-se que a postura do bombeiro é de pé, no combate a incêndio, com um nível de atividade de $M = 3$ met.

Por fim, a temperatura inicial da pele foi assumida como $T_{pele} = 34$ °C.

Vestuário

No que toca ao modelo do vestuário, foram assumidos os seguintes pressupostos, em todas as simulações realizadas:

- Micro-camada de ar entre a pele e o vestuário com uma espessura de 6,35 mm, e resistência térmica da micro-camada de 0,16 clo, 0,025 m²°C/W (Chitrphiomsri e Kuznetsov, 2005);
- A camada interior e a intermédia, 1 e 2, iniciam cada simulação sem massa de água presente;
- Nas camadas 1 e 3 considerou-se que a permeabilidade tanto à água como ao vapor com um valor de $i_{wt1} = i_{wt3} = i_{vp1} = i_{vp3} = 0,40$ [-], e para a camada 2, $i_{wt2} = i_{vp2} = 0.10$ [-];

Condições ambientais exteriores

Em relação às condições do meio envolvente, considerou-se: temperatura média radiante de $T_{mr} = 35$ °C; temperatura do ar de $T_{ar} = 35$ °C; velocidade do ar de $v_{ar} = 1$ m/s; humidade relativa do ar de $RH = 50\%$.

Intervalo de tempo

Por fim, o intervalo de tempo considerado teve de ser suficientemente pequeno de modo que o modelo funcione corretamente (não divirja e produza resultados coerentes). Como foi referido na secção 2.1.4, mais precisamente na equação (2-4), o critério de estabilidade tem de ser respeitado, e desta forma obteve-se o valor de $\Delta t = 0,10$ s. Ainda, o tempo total de cada simulação será $t_{sim} = 66$ minutos.

2.2.3. Inputs

De maneira a poder analisar os resultados das simulações o software requer a introdução de dados, que podem ou não ser diferentes de caso para caso. Os casos encontram-se detalhados mais à frente neste estudo. Na Figura 2.3 encontra-se representado os inputs requeridos por esta ferramenta de cálculo.

| Dados | |
|---|--|
| Condições ambientais exteriores | |
| Radiação térmica incidente: Irad [W/m ²] = | |
| Temperatura média radiante: Tmr [°C] = 35,00 | |
| Temperatura do ar: Tar [°C] = 35,00 | |
| Velocidade do ar: Var [m/s] = 1,00 | |
| Humidade relativa do ar: RH [%] = 50,00 | |
| Corpo humano (--> forma cilíndrica) | |
| Área da pele: Askin [m ²] = 1,060 | |
| Área da pele coberta por vestuário: Acloth [m ²] = 1,000 | |
| Altura do corpo coberto por vestuário: Hcl [m] = 0,88 | |
| Postura da pessoa : De pé | |
| Aclimatização - Pessoa : Não aclimatizada | |
| Nível de actividade: M [met] = 3,00 | |
| Temperatura do núcleo do corpo: Tcore [°C] = 37,50 | |
| Temperatura inicial da pele: Tskin [°C] = 34,00 | |
| Micro-camada de ar entre a pele e o vestuário | |
| Espessura da micro-camada: EspMc [mm] = 6,35 | |
| Resistência térmica da micro-camada: RMc [clo] = 0,16 | |
| Camada interior do vestuário - nodo 1 | |
| Espessura: Esp1 [mm] = | |
| Resistência térmica "sem água": Icls1 [clo] = | |
| Permeabilidade desta camada à água: iwt1 [-] = 0,40 | |
| Permeabilidade desta camada ao vapor: ivp1 [-] = 0,40 | |
| Calor específico das fibras secas: cps1 [J/(kg.°C)] = | |
| Massa de fibras secas: ms1 [kg] = | |
| Massa de água inicialmente contida: mw1-ini [kg] = 0,000 | |
| Temperatura inicial desta camada: Tn1-ini [°C] = 33,00 | |
| Camada intermédia do vestuário - nodo 2 | |
| Espessura: Esp2 [mm] = | |
| Resistência térmica "sem água": Icls2 [clo] = | |
| Permeabilidade desta camada à água: iwt2 [-] = 0,10 | |
| Permeabilidade desta camada ao vapor: ivp2 [-] = 0,10 | |
| Calor específico das fibras secas: cps2 [J/(kg.°C)] = | |
| Massa de fibras secas: ms2 [kg] = | |
| Massa de água inicialmente contida: mw2-ini [kg] = 0,000 | |
| Temperatura inicial desta camada: Tn2-ini [°C] = 32,00 | |
| Camada exterior do vestuário - nodo 3 | |
| Espessura: Esp3 [mm] = | |
| Resistência térmica "sem água": Icls3 [clo] = | |
| Permeabilidade desta camada à água: iwt3 [-] = 0,40 | |
| Permeabilidade desta camada ao vapor: ivp3 [-] = 0,40 | |
| Calor específico das fibras secas: cps3 [J/(kg.°C)] = | |
| Emissividade e absorvidade da superfície exterior: $\epsilon = \alpha = 0,90$ | |
| Massa de fibras secas: ms3 [kg] = | |
| Massa de água inicialmente contida: mw3-ini [kg] = | |
| Temperatura inicial desta camada: Tn3-ini [°C] = 31,00 | |
| Intervalo de tempo | |
| Δt [segundos] = 0,10 | |

Figura 2.3 Imagem representativa dos inputs da folha de cálculo em Excel

2.2.4. Outputs

Os outputs do sistema dividem-se em dois grupos, o conjunto de dados resultantes dos balanços térmicos e mássicos, e os gráficos de evolução temporal.

Na Figuras 2.4 – 2.6, é possível ver imagens que demonstram os valores obtidos para uma simulação exemplo. Na Figura 2.5 encontram-se os resultados relativos apenas à camada interior, mas o mesmo se obtém para as restantes camadas.

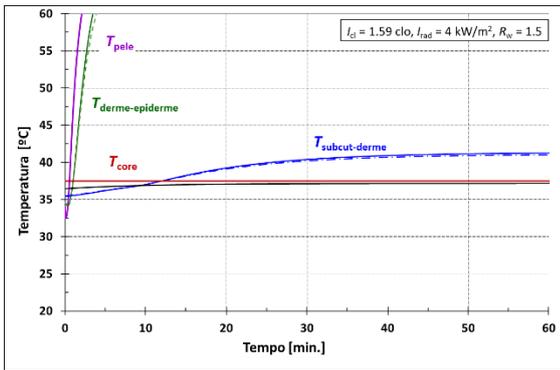


Figura 2.7 Gráfico exemplar da evolução temporal da temperatura nas superfícies das camadas da pele

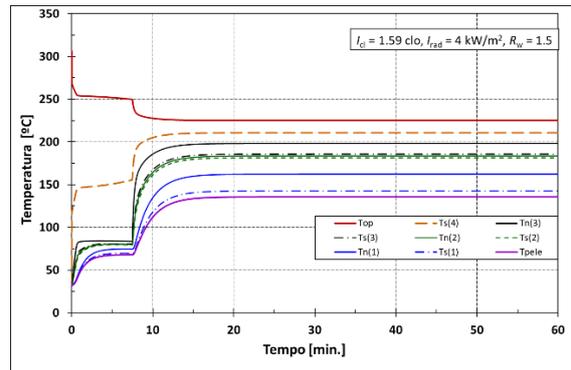


Figura 2.8 Gráfico exemplar da evolução temporal da temperatura nas superfícies e nodos das camadas do vestuário

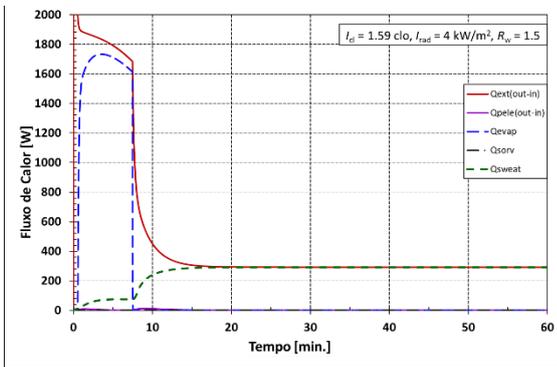


Figura 2.9 Gráfico exemplar da evolução temporal dos fluxos de calor resultantes das trocas entre o corpo humano e o meio envolvente

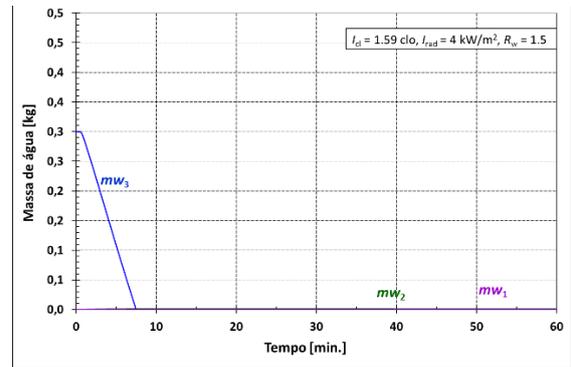


Figura 2.10 Gráfico exemplar da evolução temporal da massa de água presente nas camadas de vestuário

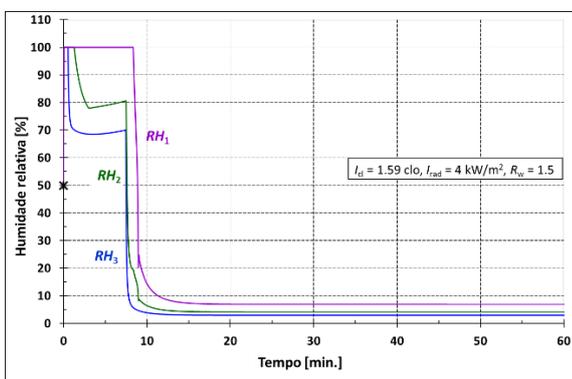


Figura 2.11 Gráfico exemplar da evolução temporal da umidade relativa em cada camada de vestuário

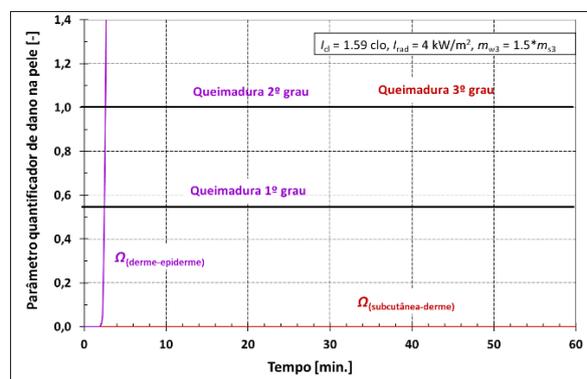


Figura 2.12 Gráfico exemplar da evolução temporal do parâmetro quantificador de dano na pele

3. DESCRIÇÃO DO PROBLEMA

Numa situação de combate a incêndio existem vários aspetos que influenciam o desempenho do vestuário de proteção utilizado, o qual é um aspeto essencial com impacto quer na *performance* do bombeiro quer na sua segurança.

3.1. Tipos de Incêndio

A especificidade de cada incêndio é um aspeto de especial relevância, porque, ao contrário, por exemplo, do vestuário de proteção, não pode ser alterado para se obterem melhores condições de combate. Um incêndio é um fenómeno imprevisível, pelo que, por esta razão, é necessário o seu estudo de forma a poder formar e informar os bombeiros.

É natural que diferentes incêndios apresentem características diferentes, dependendo do tipo e da quantidade de “combustível” disponível, do tipo de confinamento (edifício, nave industrial, floresta, etc.), das condições meteorológicas (temperatura, direção e intensidade do vento, humidade relativa), da forma como foi provocado (atmosfera explosivas, problemas elétricos, fogo posto, químicos), entre muitos outros aspetos.

No presente estudo foram considerados dois tipos de incêndio, um representativo de incêndios florestais e outro representativo de incêndios estruturais. Foram consideradas condições idênticas para as duas tipologias de incêndio, visto o interesse se focar no comportamento do vestuário quando sujeito a ambientes térmicos quentes, e avaliar o efeito da água impregnada no desempenho do mesmo.

Em todas as simulações foram considerados, tanto para incêndio florestal, como para incêndio estrutural, os seguintes valores:

- Temperatura média radiante: $T_{mr} = 35^{\circ}\text{C}$;
- Temperatura do ar: $T_{ar} = 35^{\circ}\text{C}$;
- Velocidade do ar: $v_{ar} = 1 \text{ m/s}$;
- Humidade relativa do ar: $RH = 50\%$;
- Tempo total de cada simulação: $t_{sim} = 66 \text{ minutos}$.

De forma a poder analisar uma variedade de situações, para o caso de incêndio florestal, foram realizadas simulações considerando radiações térmicas incidentes no corpo

do bombeiro de 0,5, 1, 2, 4, 8 e 16 kW/m²; e para a situação de incêndio estrutural, de 1, 2, 4, 8, 16 e 32 kW/m²; visto estes fluxos de calor corresponderem radiações térmicas incidentes passíveis de ocorrer nestes tipos de incêndios.

3.2. Características do Vestuário

Para bombeiros em situação de combate a incêndios, o vestuário de proteção térmica é o principal componente do seu equipamento de proteção individual (EPI). Contudo, é preciso ter em conta que ele pode contribuir para o aumento do *stress* térmico, através da retenção do suor dentro do vestuário, não possibilitando a sua evaporação e a correta dissipação de calor.

Um vestuário de proteção para o combate a incêndios é normalmente constituído por 3 camadas:

- Camada exterior;
- Camada intermédia, ou barreira à água (e eventualmente ao vapor);
- Camada interior formada pelo forro térmico e o pano interior.

Para além destas três camadas, neste estudo foi também considerada uma camada correspondente à roupa interior, com espessura de 2,6 mm, sendo que esta é apenas adicionada à espessura da camada interior, visto apresentar características semelhantes a esta.

Como já foi dito, foram consideradas duas situações, incêndio florestal e estrutural, e desta maneira são também considerados dois tipos de vestuário de proteção. Para tal, tornou-se necessário a determinação das características de cada um deles, de forma a serem posteriormente avaliados. As características dos vestuários de proteção avaliados encontram-se representadas nas Tabela 3.1 e 3.2.

Tabela 3.1 Características do vestuário de proteção normalmente utilizado pelos bombeiros em situação de combate a incêndio florestal

| Propriedades do vestuário | Camada Interior (1) | Camada Intermédia (2) | Camada Exterior (3) | Referência |
|--|---------------------|-----------------------|---------------------|----------------------------------|
| Espessura (e) [mm] | 4,84 | 0,45 | 0,41 | (Zhang, Song, Ren, et al., 2018) |
| Resistência Térmica (I_{cl}) [mm] | 0,9 | 0,1 | 0,59 | (Raimundo et al., 2018) |
| Permeabilidade à água (i_{wt}) [-] | 0,4 | 0,1 | 0,4 | [-] |
| Permeabilidade ao vapor (i_{vp}) [-] | 0,4 | 0,1 | 0,4 | [-] |
| Calor específico das fibras secas (c_{ps}) [J/(kg.°C)] | 1300 | 1150 | 1005 | (Malaquias et al., 2022) |
| Massa das fibras secas (m_s) [kg/m ²] | 0,518 | 0,112 | 0,2 | (Zhang, Song, Gu, et al., 2018) |

Tabela 3.2 Características do vestuário de proteção normalmente utilizado pelos bombeiros em situação de combate a incêndio estrutural

| Propriedades do vestuário | Camada Interior (1) | Camada Intermédia (2) | Camada Exterior (3) | Referência |
|--|---------------------|-----------------------|---------------------|--------------------------|
| Espessura (e) [mm] | 7,3 | 1,33 | 0,7 | (Keiser et al., 2008) |
| Resistência Térmica (I_{cl}) [mm] | 1,5 | 0,2 | 0,93 | (Raimundo et al., 2018) |
| Permeabilidade à água (i_{wt}) [-] | 0,4 | 0,1 | 0,4 | [-] |
| Permeabilidade ao vapor (i_{vp}) [-] | 0,4 | 0,1 | 0,4 | [-] |
| Calor específico das fibras secas (c_{ps}) [J/(kg.°C)] | 1300 | 1150 | 1005 | (Malaquias et al., 2022) |
| Massa das fibras secas (m_s) [kg/m ²] | 0,585 | 0,135 | 0,195 | (Keiser et al., 2008) |

Como se observa pela análise das tabelas acima representadas, a espessura do vestuário típico de combate a incêndio estrutural é maior, e conseqüentemente, a sua resistência térmica também. Tal é justificado, pelo facto de os incêndios estruturais apresentarem tipicamente radiações térmicas incidentes mais elevadas.

3.3. Casos em Estudo

Como já foi dito anteriormente, a presença de água no vestuário de proteção pode ocorrer na camada interior (forro térmico), ou na camada exterior. Este fator leva à alteração das características do vestuário, nomeadamente:

- A água presente na camada interior do vestuário de proteção deve-se normalmente à transpiração do bombeiro, e é prejudicial, pois pode levar à existência de vapor a uma temperatura elevada, que, se contatar com a pele, leva a queimaduras;
- A presença de água líquida na camada exterior do vestuário é normalmente intencional, seja por rega ou outro processo, e geralmente promove uma melhor *performance* do vestuário.

Neste estudo vai ser avaliado unicamente a impregnação intencional do vestuário, e, assim, a presença de água apenas ocorre na camada exterior.

De forma a avaliar uma variedade de situações, foram estudados casos considerando diferentes quantidades de água, e a sua ausência, para as várias radiações térmicas incidentes referidas anteriormente. Na Tabela 3.3 apresentam-se os casos que foram considerados no presente estudo.

Tabela 3.3 Listagem dos casos considerados no presente estudo

| Casos | Vestuário | Radiação térmica incidente (I_{rad}) [kW/m ²] | Massa inicial de água camada interior (m_{w1}) [kg] | Massa inicial de água camada intermédia (m_{w2}) [kg] | Massa inicial de água camada exterior (m_{w3}) [kg] |
|-------------|------------|---|---|---|---|
| 0_M0 | [-] | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0.5F_W(0-2) | Florestal | 0,5 | 0 | 0 | de $0*m_{s3}$ a $2*m_{s3}$ |
| 1F_W(0-2) | Florestal | 1 | 0 | 0 | de $0*m_{s3}$ a $2*m_{s3}$ |
| 2F_W(0-2) | Florestal | 2 | 0 | 0 | de $0*m_{s3}$ a $2*m_{s3}$ |
| 4F_W(0-2) | Florestal | 4 | 0 | 0 | de $0*m_{s3}$ a $2*m_{s3}$ |
| 8F_W(0-2) | Florestal | 8 | 0 | 0 | de $0*m_{s3}$ a $2*m_{s3}$ |
| 16F_W(0-2) | Florestal | 16 | 0 | 0 | de $0*m_{s3}$ a $2*m_{s3}$ |
| 1E_W(0-2) | Estrutural | 1 | 0 | 0 | de $0*m_{s3}$ a $2*m_{s3}$ |
| 2E_W(0-2) | Estrutural | 2 | 0 | 0 | de $0*m_{s3}$ a $2*m_{s3}$ |
| 4E_W(0-2) | Estrutural | 4 | 0 | 0 | de $0*m_{s3}$ a $2*m_{s3}$ |
| 8E_W(0-2) | Estrutural | 8 | 0 | 0 | de $0*m_{s3}$ a $2*m_{s3}$ |
| 16E_W(0-2) | Estrutural | 16 | 0 | 0 | de $0*m_{s3}$ a $2*m_{s3}$ |
| 32E_W(0-2) | Estrutural | 32 | 0 | 0 | de $0*m_{s3}$ a $2*m_{s3}$ |

A nomenclatura usada para a identificação dos casos é definida por: o primeiro dígito representa o fluxo de radiação térmica incidente (em kW/m^2), a primeira letra representa o tipo de vestuário (F \rightarrow florestal; E \rightarrow estrutural), e por fim, a letra “W” seguida de um número representa o rácio entre a massa de água presente na camada exterior do vestuário e a massa dessa camada quando seca. A título de exemplo, o caso 8F_W0.5 diz respeito à simulação realizada considerando um incêndio com radiação térmica incidente de 8 kW/m^2 , utilizando um vestuário de proteção típico de combate a incêndio florestal, impregnado com uma massa de água $m_{w3} = 0,5 * m_{s3}$, em que m_{s3} é a massa seca da camada exterior desse vestuário.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo são apresentados os resultados das simulações, para os casos considerados no capítulo anterior, obtidos através da ferramenta de cálculo desenvolvida.

Dado a extensão dos dados obtidos, para facilitar a sua leitura realizaram-se gráficos que compreendem os parâmetros mais significativos, mais especificamente:

- o tempo até à evaporação total da água presente na camada exterior do vestuário;
- o tempo até ao aparecimento de sensação de dor na pele ($T_{pele} \geq 45^{\circ}\text{C}$ ou início de queimadura do 2º grau, o que ocorrer primeiro);
- o tempo até ao aparecimento de queimaduras de 1º grau;
- o tempo até ao aparecimento de queimaduras de 2º grau.

Estes resultados foram agrupados em função do tipo de vestuário usado pelo bombeiro: os obtidos considerando o uso de vestuário típico para o combate a incêndio florestal, e os calculados considerando vestuário típico para combate a incêndio estrutural. Na última secção deste capítulo é efetuada uma comparação entre o desempenho dos dois tipos de vestuário, onde se analisará o efeito que as alterações das características do vestuário têm nos valores obtidos para os parâmetros identificados anteriormente.

4.1. Vestuário Típico de Combate a Incêndios Florestais

Nas Figuras 4.1 a 4.5 apresentam-se gráficos que resumem os valores obtidos nas simulações, considerando para o efeito as características próprias do vestuário mais comumente utilizado no combate a incêndios florestais. Estes gráficos focam-se na influência da intensidade da radiação incidente no corpo humano (\dot{I}_{rad}) e no rácio de água inicialmente contida na camada exterior do vestuário ($R_w = \text{massa de água} / \text{massa seca da camada exterior do vestuário}$).

Tempo de evaporação da água

Os gráficos da Figura 4.1 representam o tempo necessário até à evaporação total da água, em função do fluxo de calor incidente \dot{I}_{rad} e do rácio R_w .

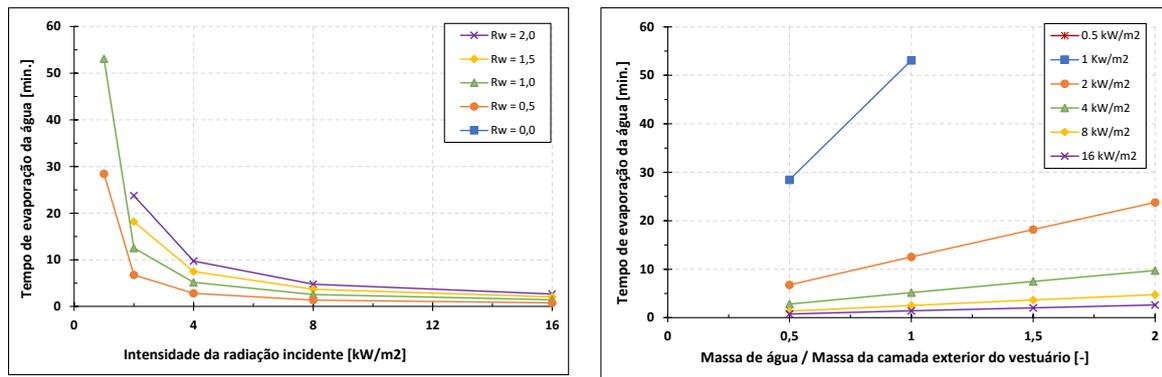


Figura 4.1 Tempo decorrido até à evaporação de toda a água presente na camada exterior de vestuário, para vestuário típico de combate a incêndios florestais

Os gráficos da Figura 4.1 não apresentam resultados para valores da radiação incidente (\dot{I}_{rad}) menores do que 1 kW/m^2 . Isto acontece, pois, a água nunca evapora na sua totalidade, para o tempo considerado nas simulações (66 minutos). O mesmo ocorre para $\dot{I}_{rad} < 2 \text{ kW/m}^2$, mas apenas quando o rácio de água inicialmente impregnada (R_w) é superior a 1,0.

Tal como era expectável, pode observar-se que o tempo de evaporação da água diminui com o aumento do valor de \dot{I}_{rad} e aumenta com o aumento do valor de R_w . Para além disto, quanto maior é o valor de \dot{I}_{rad} menor é a influência de R_w . Por outro lado, quanto maior é o valor de R_w maior é a influência de \dot{I}_{rad} .

Tempo até sensação de dor na pele

Os gráficos da Figura 4.2 representam o tempo de combate a incêndios decorrido até ao surgimento de sensação de dor na pele, em função dos parâmetros \dot{I}_{rad} e R_w .

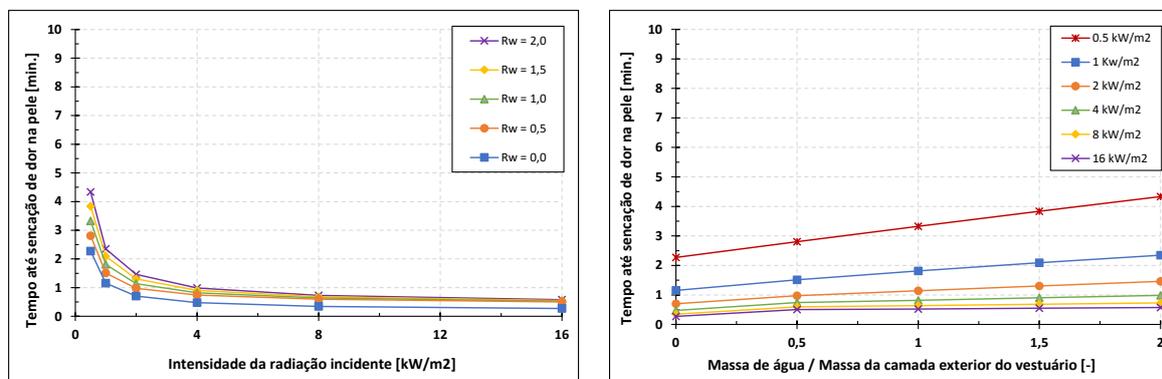


Figura 4.2 Tempo até à sensação de dor na pele, para vestuário típico de combate a incêndios florestais

No que diz respeito aos tempos até se sentir dor na pele, Figura 4.2, observa-se uma situação semelhante à da Figura 4.1, onde, para radiações mais baixas existe um melhor comportamento do vestuário com o aumento da massa de água, e nas radiações mais altas, a presença de água é quase desprezível. É também clara a diferença que a presença de água provoca no desempenho do vestuário, visto que a maior diferença temporal ocorre, para todas as radiações, da linha $R_w = 0$ para $R_w = 0,5$.

Tempo até ao aparecimento de queimaduras de 1º grau

Os gráficos da Figura 4.3 dizem respeito ao tempo decorrido até ao surgimento de queimaduras da pele de 1º grau, em função de \dot{I}_{rad} e de R_w .

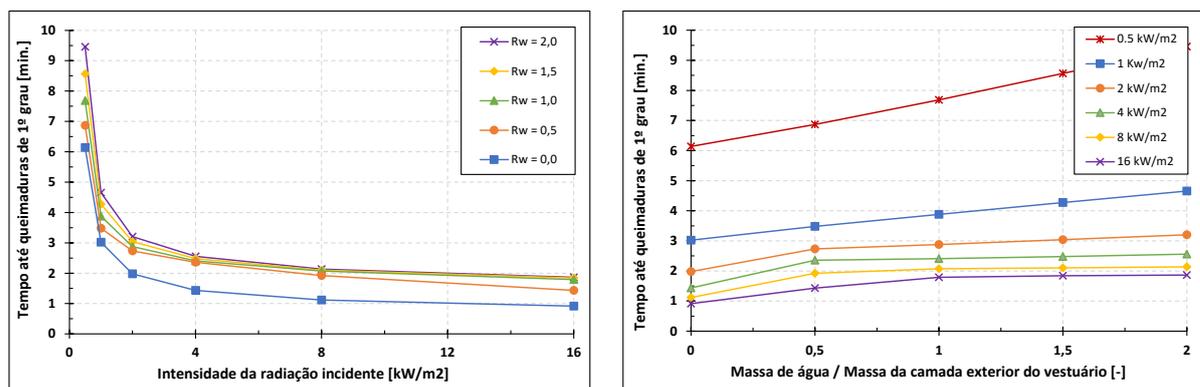


Figura 4.3 Tempo até ao aparecimento na pele de queimaduras de 1º grau, para vestuário típico de combate a incêndios florestais

Mais uma vez se observa o que foi dito anteriormente, a presença de água justifica sempre uma melhor *performance* do vestuário, para qualquer uma das radiações térmicas consideradas, mas com especial relevância para radiações mais baixas.

Tempo até ao aparecimento de queimaduras de 2º grau

Os gráficos da Figura 4.4 dizem respeito ao tempo decorrido até ao surgimento na pele de queimaduras do 2º grau, em função de \dot{I}_{rad} e de R_w .

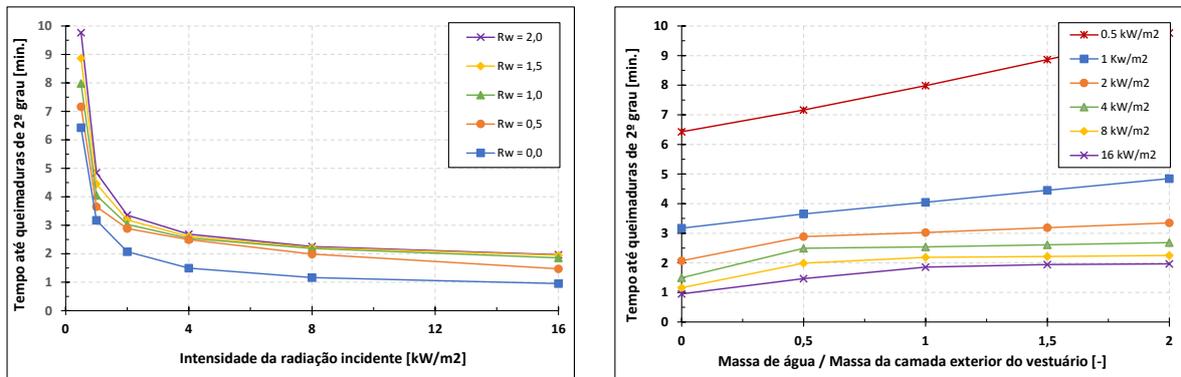


Figura 4.4 Tempo até ao aparecimento de queimaduras de 2º grau, para vestuário típico de combate a incêndios florestais

Nos gráficos da Figura 4.5 representa-se o tempo (em segundos) decorrido entre o aparecimento de queimaduras de 1º grau e o aparecimento de queimaduras do 2º grau, em função de \dot{I}_{rad} e de R_w .

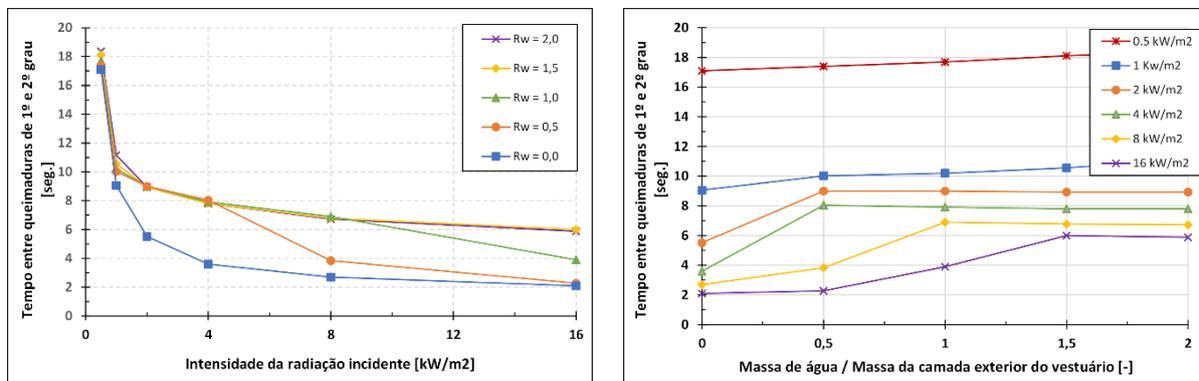


Figura 4.5 Tempo (em segundos) entre queimaduras de 1º e 2º grau, para vestuário típico de combate a incêndios florestais

Comparando a Figura 4.4 (tempo, em minutos, até ao aparecimento de queimaduras do 2º grau) com a Figura 4.3 (tempo, em minutos, até ao aparecimento de queimaduras do 1º grau), constata-se que as diferenças são mesmo muito pequenas. Este fator encontra-se representado na Figura 4.5, em segundos. A presença de água no vestuário, prolonga os tempos entre os dois tipos de queimadura, sobretudo nas radiações mais elevadas. É importante notar que estas diferenças de tempo são muito reduzidas, fazendo com que na prática não tenham aplicabilidade.

4.2. Vestuário Típico de Combate a Incêndios Estruturais

Apresentam-se nas Figura 4.6 a 4.10 gráficos com o resumo dos valores obtidos nas simulações, considerando para o efeito as características próprias do vestuário mais comumente utilizado no combate a incêndios estruturais. Estes gráficos focam-se na influência da intensidade da radiação incidente no corpo humano (\dot{I}_{rad}) e no rácio de água inicialmente contida na camada exterior do vestuário ($R_w = \text{massa de água} / \text{massa seca da camada exterior do vestuário}$).

Tempo de evaporação da água

Os gráficos da Figura 4.6 representam o tempo necessário até à evaporação total da água contida na camada exterior do vestuário, em função do fluxo de calor incidente \dot{I}_{rad} e do rácio R_w .

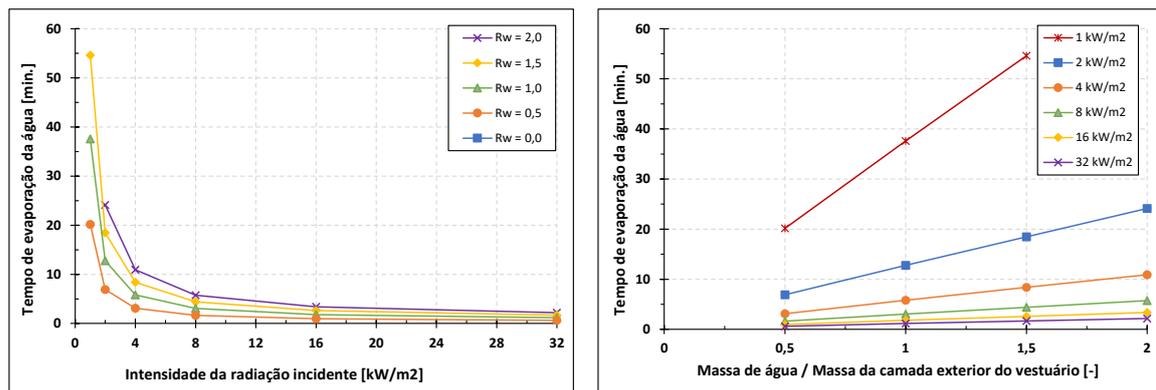


Figura 4.6 Tempo até à evaporação total da água, para vestuário típico de combate a incêndios estruturais

Os gráficos da Figura 4.6 revelam que o tempo requerido para a evaporação completa da água diminui com o aumento do valor de \dot{I}_{rad} e aumenta com o aumento do valor de R_w . Para além disto, quanto maior é o valor de \dot{I}_{rad} menor é a influência de R_w . Por outro lado, quanto maior é o valor de R_w maior é a influência de \dot{I}_{rad} . Consta-se ainda que o tempo de evaporação da água apenas é relevante para as radiações incidentes mais reduzidas.

Tempo até sensação de dor na pele

Os gráficos da Figura 4.7 representam o tempo de combate a incêndios decorrido até ao surgimento de sensação de dor na pele, em função dos parâmetros \dot{I}_{rad} e R_w .

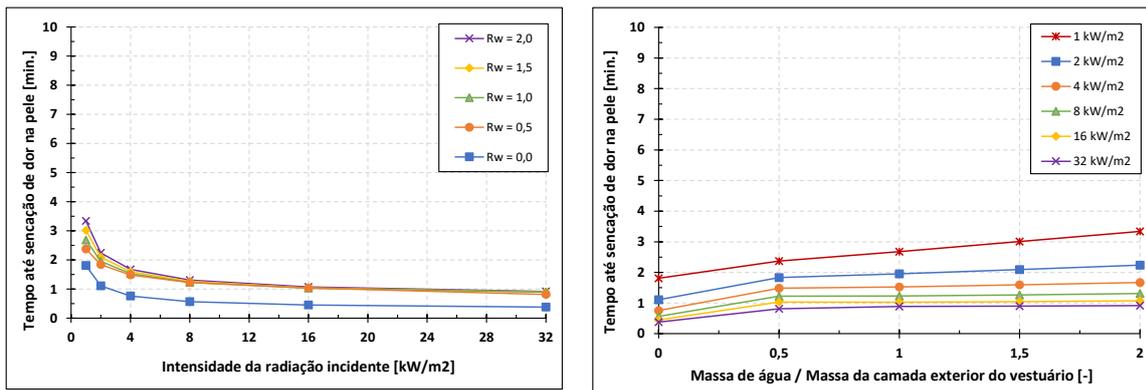


Figura 4.7 Tempo até início de sensação de dor na pele, para vestuário típico de combate a incêndios estruturais

Uma maior quantidade de água líquida impregnada no vestuário leva a um aumento do tempo até ao surgimento de dor na pele, mas, tal como é evidente na Figura 4.7, este aumento não é significativo.

Tempo até ao aparecimento de queimaduras de 1º grau

Os gráficos da Figura 4.8 dizem respeito ao tempo decorrido até ao surgimento de queimaduras na pele de 1º grau, em função de \dot{I}_{rad} e de R_w .

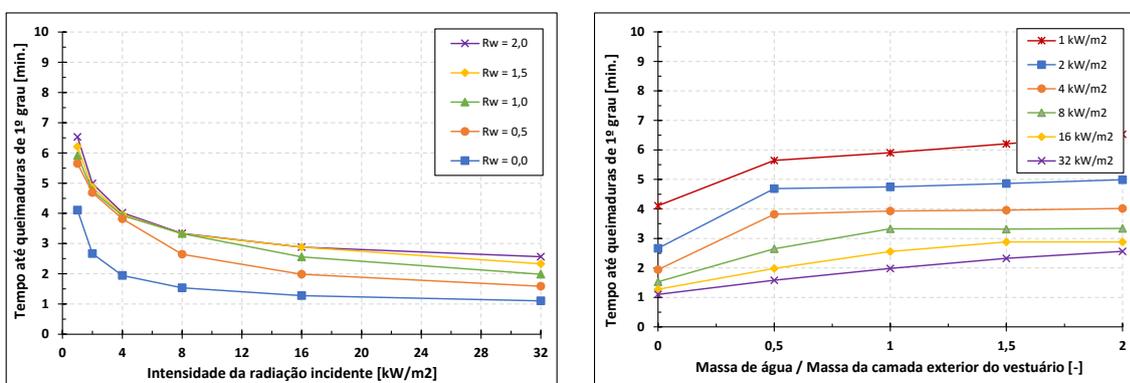


Figura 4.8 Tempo até ao aparecimento de queimaduras de 1º grau, para vestuário típico de combate a incêndios estruturais

Analisando a Figura 4.8 conclui-se que em todas as radiações térmicas consideradas, a presença de água melhora o desempenho do vestuário. O facto de haver água impregnada na camada exterior do vestuário é mais relevante do que o valor dessa massa de água, pois a principal diferença ocorre entre as situações $R_w = 0$ e $R_w = 0,5$. A influência da quantidade de água impregnada diminui com o aumento da radiação térmica incidente.

Tempo até ao aparecimento de queimaduras de 2º grau

Os gráficos da Figura 4.9 dizem respeito ao tempo (em minutos) decorrido até ao surgimento na pele de queimaduras do 2º grau, em função de \dot{I}_{rad} e de R_w .

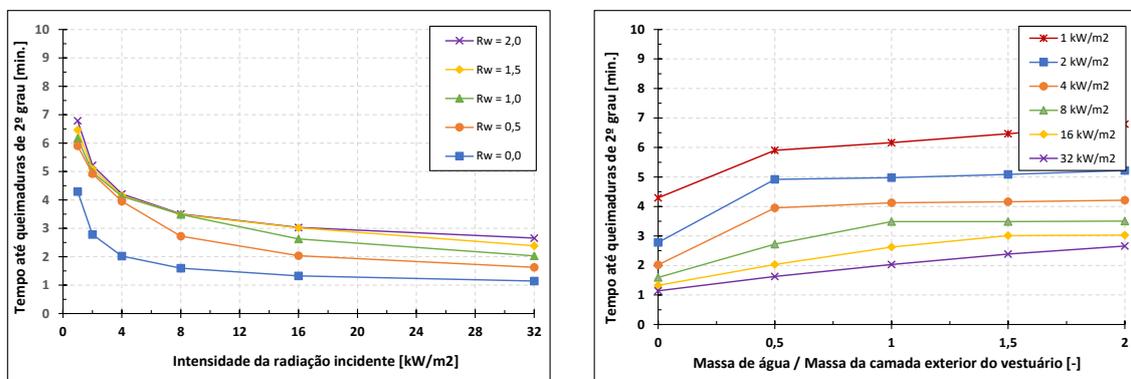


Figura 4.9 Tempo até ao aparecimento de queimaduras de 2º grau, para vestuário típico de combate a incêndios estruturais

Nos gráficos da Figura 4.10 representa-se o tempo (em segundos) decorrido entre o aparecimento de queimaduras de 1º grau e o surgimento de queimaduras do 2º grau, em função de \dot{I}_{rad} e de R_w .

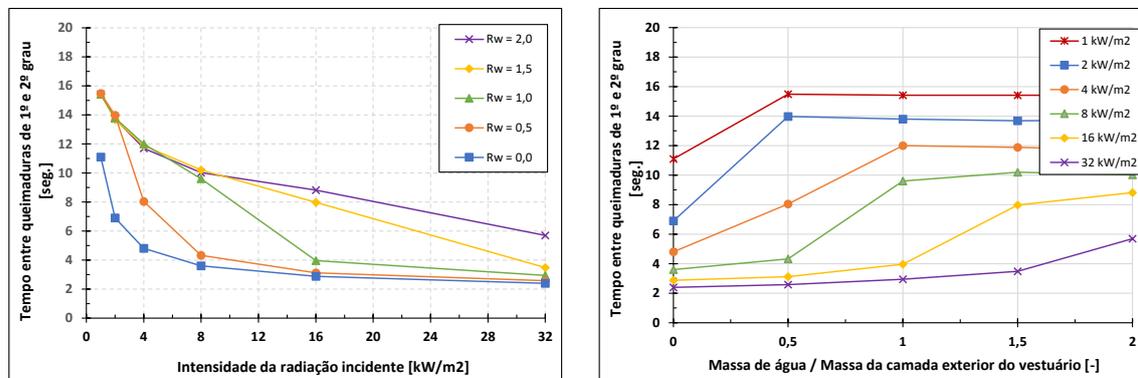


Figura 4.10 Tempo entre queimaduras de 1º e 2º grau, para vestuário típico de combate a incêndios estruturais

Comparando os resultados mostrados na Figura 4.9 (tempo, em minutos, até ao aparecimento de queimaduras do 2º grau) com os apresentados na Figura 4.8 (tempo, em minutos, até ao aparecimento de queimaduras do 1º grau) verifica-se que estes tempos são muito próximos, tal como é revelado pelos valores representados na Figura 4.10 (diferença de tempo, em segundos, entre aparecimento de queimaduras do 1º grau e dos 2º grau). Realça-se que a presença de água impregnada na camada exterior do vestuário tem uma influência positiva no desempenho do vestuário, quer em termos de tempo até ao surgimento de queimaduras do 1º e do 2º grau quer em termos do período decorrido entre estes dois tipos de patologia.

4.3. Comparação Entre os Dois Tipos de Vestuário

Esta secção é dedicada a efetuar uma comparação entre o desempenho do vestuário típico de combate a incêndios florestais e o normalmente utilizado na supressão de incêndios estruturais. Esta comparação é efetuada para a mesma situação em termos de intensidade da radiação incidente no corpo humano (\dot{I}_{rad}) e de rácio de água inicialmente contida na camada exterior do vestuário ($R_w = \text{massa de água} / \text{massa seca da camada exterior do vestuário}$). Face a esta restrição, só são comparados resultados para os valores de \dot{I}_{rad} de 1, 2, 4, 8 e 16 kW/m² e os valores de R_w de 0, 0,5, 1,0, 1,5 e 2,0. Os resultados que se apresentam resultam da subtração dos valores obtidos no caso de o vestuário ser o típico de combate a incêndios florestais aos valores obtidos considerando o vestuário normalmente utilizado pelos bombeiros na supressão de incêndios estruturais.

Tempo de evaporação da água

Apresenta-se nos gráficos da Figura 4.11 a diferença de comportamento entre os dois tipos de vestuário em termos do tempo necessário até à evaporação total da água, em função do fluxo de calor incidente \dot{I}_{rad} e do rácio R_w .

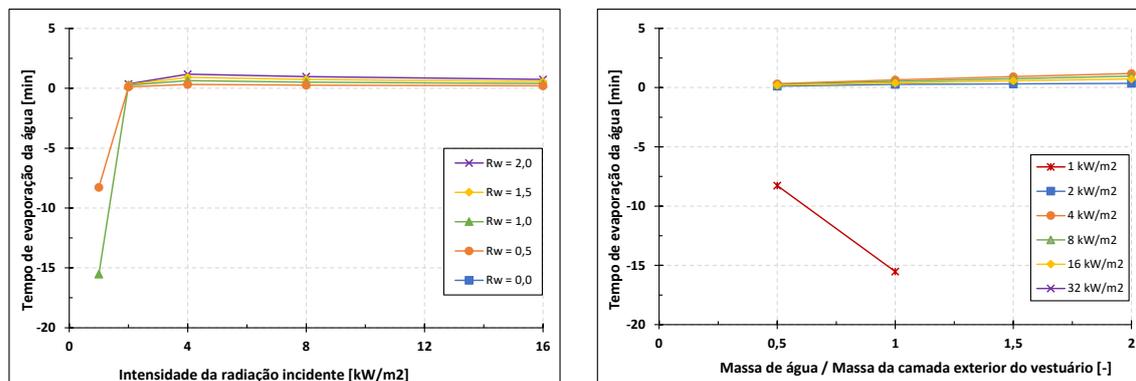


Figura 4.11 Diferença entre tempos de evaporação da água, entre vestuário para incêndios estruturais e vestuário para incêndios florestais

Os resultados apresentados na Figura 4.11 mostram dois tipos de tendência. 1ª) Para $\dot{I}_{rad} < 2 \text{ kW/m}^2$ e $R_w \leq 1$, o tempo até à evaporação completa da água é maior no caso do vestuário típico para combate a incêndios florestais do que no caso do vestuário normalmente usado no combate a incêndios estruturais, e a diferença entre estes tempos pode chegar a ser significativa. 2ª) Para $\dot{I}_{rad} \geq 2 \text{ kW/m}^2$ ou $R_w > 1$, o tempo até à evaporação completa da água é maior no caso do vestuário para combate de incêndios estruturas, mas a diferença em relação ao outro tipo de vestuário é extremamente pequena.

Tempo até sensação de dor na pele

Os gráficos da Figura 4.12 representam a diferença entre os dois tipos de vestuário em termos de tempo até ao surgimento de sensação de dor na pele, em função dos parâmetros \dot{I}_{rad} e R_w .

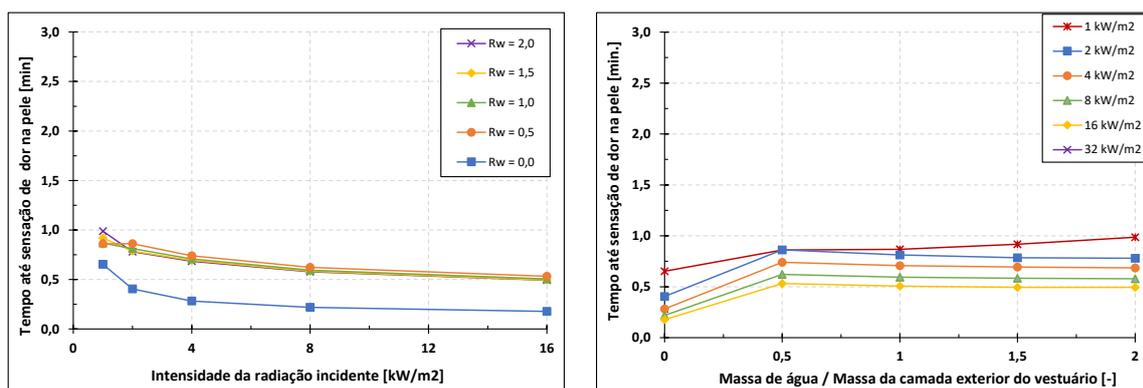


Figura 4.12 Diferença entre tempos até à sensação de dor na pele, entre vestuário para incêndios estruturais e vestuário para incêndios florestais

Os gráficos da Figura 4.12 demonstram que, em termos de tempo até ao surgimento de dor na pele, o vestuário típico de combate a incêndios estruturais apresenta valores superiores em todos os casos simulados. Além disso, exceto no caso de $R_w = 0$, o aumento da radiação incidente ou da razão de massa de água, têm pouca influência nos resultados, sendo que a diferença observada se mantém uniforme.

Tempo até ao início de queimaduras de 1º e de 2º grau

Os gráficos das Figura 4.13 e 4.14 representam a diferença entre os dois tipos de vestuário, sendo que a Figura 4.13 diz respeito ao tempo decorrido até ao surgimento na pele de queimaduras do 1º grau e a Figura 4.14 respeita ao tempo até ao início de queimaduras do 2º grau, sempre em função de \dot{I}_{rad} e de R_w .

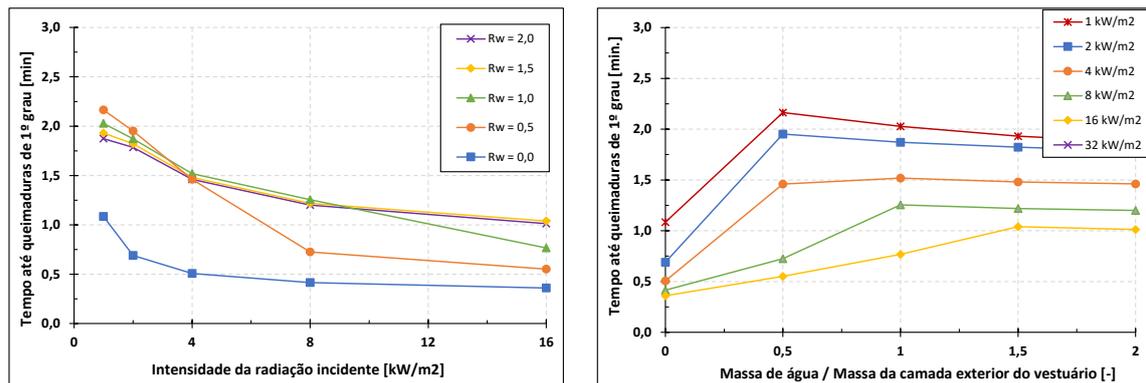


Figura 4.13 Diferenças entre tempos até queimaduras de 1º grau, entre vestuários para incêndios estruturais e vestuário para incêndios florestais

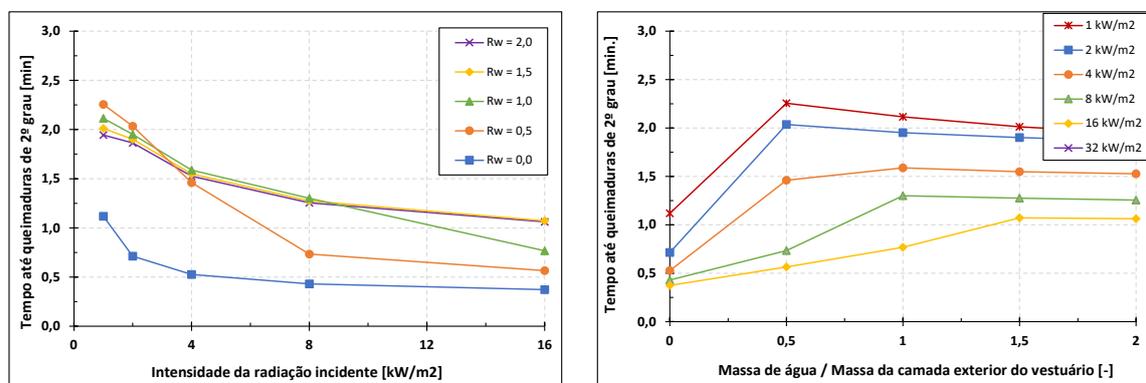


Figura 4.14 Diferenças entre tempos até queimaduras de 2º grau, entre vestuários para incêndios estruturais e vestuário para incêndios florestais

É evidente, pela análise das Figura 4.13 e Figura 4.14, que os valores que elas apresentam são muito similares, pelo que são avaliados simultaneamente.

Como se vê pelos gráficos, os tempos até ao aparecimento de queimaduras representam a maior diferença entre os dois tipos de vestuário. Isto acontece quer nas radiações incidentes mais reduzidas, quer nas mais elevadas, na presença de água ou não. Por exemplo, comparando os resultados do caso 4F_W0 ($\dot{I}_{rad} = 4 \text{ kW/m}^2$, vestuário para incêndio florestal, $R_w = 0$) com o do caso 4E_W0 ($\dot{I}_{rad} = 4 \text{ kW/m}^2$, vestuário para incêndio

estrutural, $R_w = 0$), constata-se um valor de tempo até queimadura de segundo grau de 2,022 minutos, para o vestuário típico de incêndio estrutural, e de 1,495 minutos, para o vestuário de combate a incêndios florestais.

Para demonstrar a influência do rácio de água inicialmente impregnada na camada exterior do vestuário (R_w) na diferença entre os dois tipos de vestuário em termos de tempo até ao surgimento de queimaduras do 1º grau, considera-se, a título de exemplo, o caso com de $\dot{I}_{rad} = 2 \text{ kW/m}^2$. Na situação do vestuário para incêndio florestal, o aumento da massa de água de $R_w = 0$ para $R_w = 2$ causa um incremento de tempo de 1,225 minutos, enquanto na situação do vestuário de proteção para incêndio estrutural, esse valor é de 2,320 minutos. Tal é justificado pelas diferenças entre as características dos dois tipos de vestuário em que o parâmetro com mais influência é o isolamento térmico intrínseco, tomando este um valor superior para o vestuário para combate a incêndios estruturais.

Resumindo, a presença de água na camada exterior do vestuário é sempre benéfica, e quanto maior a sua massa melhor, não ultrapassando a $R_w = m_{w3} / m_{s3} = 2$. Como seria de esperar as melhores performances verificam-se nas radiações mais reduzidas, o que possibilita uma maior permanência de tempo no combate ao incêndio.

De realçar que quando maior é a massa de água embutida no vestuário, maior é o peso que o bombeiro tem de suportar. Mesmo assim, em situações em que o aumento da massa de água não tem efeitos positivos significativos, continua a ser recomendável impregnar a camada exterior do vestuário de proteção, mas, neste caso, deve-se optar por quantidades de água mais reduzidas.

5. CONCLUSÕES

Neste estudo foi analisada a influência da impregnação com água do vestuário de proteção de bombeiros em situação de combate a incêndios. Foram considerados os dois tipos de vestuário normalmente mais utilizados, o usado no combate a incêndios florestais e o utilizado na supressão de incêndios estruturais. Assumiu-se que o vestuário tinha a estrutura típica do utilizado de combate a incêndios, que é formado por três camadas, conferindo-lhe diferentes propriedades. Adicionalmente foi considerado que o vestuário de proteção seria apenas impregnado com água na camada exterior.

Os resultados foram obtidos recorrendo a um software desenvolvido para o efeito, com base num modelo matemático capaz de simular a transferência de calor e massa através do vestuário de proteção, assim como o comportamento termofisiológico da pele do bombeiro.

De maneira a testar uma variedade de situações, foram feitas simulações que compreenderam diferentes condições, onde foi possível observar o comportamento do vestuário impregnado com diversas quantidades de água (de 0 a 2 vezes a massa seca da camada exterior), para uma larga variedade de radiações térmicas incidentes (de 0 a 32 kW/m²).

Através da análise dos *outputs* fornecidos pelo software, observou-se que, em todos os casos simulados, a presença de água melhora o desempenho do vestuário. Nomeadamente, os resultados mostraram a existência de um aumento do tempo até ao aparecimento de queimaduras de 1º e 2º graus, o qual aumenta com o aumento da quantidade de água presente na camada exterior do vestuário.

O vestuário de proteção normalmente usado no combate a incêndios estruturais apresentou melhores resultados do que o tipicamente utilizado no caso de incêndios florestais, especialmente para as radiações térmicas incidentes mais elevadas. Este facto era já esperado, tendo em conta que o fato de combate a incêndios estruturais apresenta uma maior espessura e conseqüente maior resistência térmica.

O vestuário de proteção usado no combate a incêndios não garante a segurança absoluta do bombeiro, apenas aumenta o tempo de exposição ao incêndio até ao aparecimento de patologias indesejáveis. Neste trabalho demonstrou-se que o período durante o qual o combate a incêndios é seguro para os bombeiros pode ser aumentado se, em

vez do uso de vestuário seco, a camada exterior do mesmo for impregnada com água. Assim pode concluir-se que o desempenho do vestuário de proteção contra incêndios melhora com a adição de água à sua camada exterior.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Campbell, R., & Hall, S. (2022). *United States Firefighter Injuries in 2021 (NFPA ®) Key Findings*. <https://www.nfpa.org/-/media/Files/News-and-Research/Fire-statistics-and-reports/Emergency-responders/osffinjuries.pdf>
- Chittrphiromsri, P., & Kuznetsov, A. v. (2005). Modeling heat and moisture transport in firefighter protective clothing during flash fire exposure. *Heat and Mass Transfer/Waerme- Und Stoffuebertragung*, 41(3), 206–215. <https://doi.org/10.1007/s00231-004-0504-x>
- EN 469 - *European Standards*. (n.d.). Retrieved January 30, 2023, from <https://www.en-standard.eu/csn-en-469-protective-clothing-for-firefighters-performance-requirements-for-protective-clothing-for-firefighting-activities/>.
- Keiser, C., & Rossi, R. M. (2008). Temperature Analysis for the Prediction of Steam Formation and Transfer in Multilayer Thermal Protective Clothing at Low Level Thermal Radiation. *Textile Research Journal*, 78(11), 1025–1035. <https://doi.org/10.1177/0040517508090484>
- Malaquias, A. F., Neves, S. F., & Campos, J. B. L. M. (2022). The impact of water on firefighter protective clothing thermal performance and steam burn occurrence in firefighters. *Fire Safety Journal*, 127. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2021.103506>
- Parrett, B. M., Pomahac, B., Demling, R. H., & Orgill, D. P. (2006). Fourth-Degree Burns to the Lower Extremity with Exposed Tendon and Bone: A Ten-Year Experience. *Journal of Burn Care & Research*, 27(1), 34–39. <https://doi.org/10.1097/01.BCR.0000192265.20514.C5>
- Prasad, K., Twilley, W., Lawson, J. R., Bond, P. J., Bement, A. L., & Allbaugh, J. M. (2002). *Thermal Performance of Fire Fighters' Protective Clothing. 1. Numerical Study of Transient Heat and Water Vapor Transfer FEDERAL EMERGENCY MANAGEMENT ADMINISTRATION*.
- Raimundo, A. M., & Figueiredo, A. R. (2006). Human thermophysiological response to high intensity radiation fluxes near a forest fire line. *Forest Ecology and Management*, 234, S145. <https://doi.org/10.1016/J.FORECO.2006.08.192>

- Raimundo, A. M., & Figueiredo, A. R. (2009). Personal protective clothing and safety of firefighters near a high intensity fire front. *Fire Safety Journal*, 44(4), 514–521. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2008.10.007>
- Raimundo, A. M., Oliveira, A.V.M., Quintela, D.A. & Figueiredo, A. R. (2018). Fire intensity, individual protective clothing and firefighting safety, capítulo do livro “Advances in Forest Fire Research 2018”, editado por: Domingos Xavier Viegas, Imprensa da Universidade de Coimbra, Coimbra, pp. 454-465. ISBN: 978-989-26-16-506 (PDF), https://doi.org/10.14195/978-989-26-16-506_49
- Weaver, J. A., & Stoll, A. M. (1967). *MATHEMATICAL MODEL OF SKIN EXPOSED TO THERMAL RADIATION*. <https://apps.dtic.mil/sti/citations/AD0659973>
- Zhang, H., Song, G., Gu, Y., Ren, H., & Cao, J. (2018). Effect of moisture content on thermal protective performance of fabric assemblies by a stored energy approach under flash exposure. *Textile Research Journal*, 88(16), 1847–1861. <https://doi.org/10.1177/0040517517712097>
- Zhang, H., Song, G., Ren, H., & Cao, J. (2018). The effects of moisture on the thermal protective performance of firefighter protective clothing under medium intensity radiant exposure. *Textile Research Journal*, 88(8), 847–862. <https://doi.org/10.1177/0040517517690620>