



UNIVERSIDADE D  
COIMBRA

Pedro Luís Marques Rodrigues

**ANÁLISE DA EFICIÊNCIA DE SISTEMAS DE  
AUTOPROTEÇÃO DE INCÊNDIOS NA INTERFACE  
URBANO-FLORESTAL**

**VOLUME 1**

**Dissertação no âmbito do Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica na especialidade de Produção e Projeto orientada pelos Professor Doutor José Carlos Miranda Góis e Professor Doutor Miguel Abrantes de Figueiredo Bernardo de Almeida, apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra.**

Julho de 2022



1 2



9 0

FACULDADE DE  
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE DE  
COIMBRA

# **Análise da eficiência de sistemas de autoproteção de incêndios na interface urbano- florestal**

Dissertação apresentada para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia  
Mecânica na Especialidade de Produção e Projeto

## **Analysis of the efficiency of fire self-protection at the urban-forestry interface**

**Autor**

**Pedro Luís Marques Rodrigues**

**Orientadores**

**José Carlos Miranda Góis**

**Miguel Abrantes de Figueiredo Bernardo de Almeida**

**Júri**

<b>Presidente</b>	<b>Professor Doutor José Manuel Baranda Moreira da Silva Ribeiro</b> Professor Auxiliar da Universidade de Coimbra
<b>Orientador</b>	<b>Professor Doutor José Carlos Miranda Góis</b> Professor Auxiliar da Universidade de Coimbra
<b>Vogais</b>	<b>Professor Doutor Jorge Rafael Nogueira Raposo</b> Professor convidado do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Coimbra

**Colaboração Institucional**

---



**Associação para o Desenvolvimento da Aerodinâmica  
Industrial**

**Coimbra, julho, 2022**



O trabalho dá-te um propósito e um significado, e a vida é vazia sem isso.

Stephen Hawking, à ABC World News, 2010

A meus Pais



## Agradecimentos

A realização do trabalho aqui apresentado só foi possível graças à colaboração de várias pessoas e entidades, às quais não posso deixar de prestar o meu reconhecimento e gratidão.

Agradeço em primeiro lugar à Associação para o Desenvolvimento da Aerodinâmica Industrial pela forma como me acolheu, e a todas as pessoas que, representando esta entidade, sempre me fizeram sentir em casa.

Ao projeto *House Refuge*<sup>®</sup>, por ter tornado possível a realização deste trabalho a todos os níveis, desde a parte logística, à compra do material necessário e até mesmo à realização da parte experimental.

Aos meus orientadores José Góis e Miguel Almeida, pela disponibilidade, orientação e conhecimentos que me transmitiram ao longo da realização deste trabalho.

Aos Bombeiros Municipais da Lousã, pela disponibilidade de meios terrestres e humanos sempre que foi necessário.

Ao técnico João Carvalho, da ADAI, uma palavra de enorme apreço e gratidão pela disponibilidade e prontidão no acompanhamento de toda a parte experimental.

Um agradecimento final aos meus Pais que sempre me incentivaram e apoiaram, não só durante a execução deste trabalho, como também ao longo de todo o meu percurso académico.



## Resumo

Os incêndios rurais são um dos maiores obstáculos à sustentabilidade das florestas e dos ecossistemas associados. Para além disso, são responsáveis por enormes perdas materiais e humanas. Sendo estes incêndios um problema ao nível global, tem vindo a aumentar o investimento no estudo do comportamento do fogo, com a finalidade de melhorar a estratégia de combate a estas catástrofes naturais.

O trabalho apresentado nesta dissertação visa o desenvolvimento de um programa de investigação para analisar o efeito dos sistemas de aspersão de água na redução da intensidade das chamas e avaliar o seu desempenho no combate a incêndios na envolvente de habitações e comunidades isoladas. Os objetivos do trabalho passam por compreender como os sistemas de aspersão contribuem para a mitigação do risco de incêndio rural na proteção de elementos expostos, perceber se os sistemas de aspersão podem contribuir para uma redução das exigências legislativas em termos da dimensão da largura das faixas de gestão de combustíveis em redor de edifícios e aglomerados populacionais e, assim, contribuir para o desenvolvimento do conhecimento científico para suporte às decisões políticas nestas matérias. O programa experimental dividiu-se em quatro partes. Os dois primeiros ensaios tiveram como objetivo a caracterização do sistema de aspersão para vários modos do seu funcionamento e os dois últimos ensaios dizem respeito à análise da eficiência na redução da intensidade do fogo.

O trabalho desenvolvido permitiu concluir que a utilização de sistemas de aspersão deve ser recomendada em torno de elementos expostos a incêndios rurais, verificando-se uma redução significativa na intensidade do fogo quando este atinge a área coberta pelos aspersores, podendo mesmo essa redução ser total, com extinção das chamas. No entanto, foi possível verificar que a eficiência destes aspersores pode ser muito afetada por condições meteorológicas adversas, especialmente por rajadas de vento fortes. Assim, recomenda-se que continue a ser obrigatório a criação de faixas de gestão de combustível nos termos já existentes.

**Palavras-chave:** Incêndios rurais, Eficiência de aspersores, Autoproteção de comunidades, Intensidade de Byram.



## Abstract

The rural fires are one of the biggest obstacles to the sustainability of forests and associated ecosystems. Furthermore, they are responsible for huge material and human losses. As these fires are a global problem, investment in study the fire behavior is increasing, to improve our strategy to combat these natural disasters.

The work presented in this dissertation aims to develop a research program to analyze the effect of water sprinkler system in reducing the intensity of flames and to evaluate the performance of sprinklers in fighting fires in the neighborhood of isolated dwellings and communities. The objectives of this work are the understanding how sprinkler systems contribute to the mitigation of rural fire risk in the protection of exposed elements, to perceive whether the sprinkler systems can contribute to a reduction of the legislative requirements in terms of the dimensions of fuel management strips around buildings and population centers, and to contribute to the development of scientific knowledge that may support political decisions in these matters. The experimental program was divided into four parts. The first two tests aimed at characterizing the sprinkler systems for various operation modes and the two other tests were concerned with the analysis of efficiency in reducing fire intensity.

The work allowed us to conclude that the use of sprinkler systems should be recommended around rural fires exposed elements, verifying a fire intensity significant reduction when it reaches the area covered by the sprinklers, and this reduction may even be the extinction of the flames. However, it was possible to verify that these sprinkles efficiency can greatly be affected by adverse weather conditions with special influence of strong wind gusts. Therefore, it is recommended that the creation of fuel management bands continue to be mandatory, under the existing rules.

**Keywords:** Rural fires, Sprinkles efficiency, Community selfprotetion, Byram intensity.



---

## Índice

Índice de Figuras .....	ix
Índice de Tabelas .....	xi
Simbologia e Siglas .....	xiii
Simbologia.....	xiii
Siglas .....	xiv
1. INTRODUÇÃO.....	1
2. ESTADO DA ARTE .....	3
2.1. Aldeia Segura e Pessoas Seguras.....	3
2.2. Sistema de aspersores em Travessas.....	5
2.3. <i>Frontline Wildfire Defense</i> ® .....	6
3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL .....	9
3.1. Ensaio 1 – Perda de pressão com o acréscimo do número de aspersores.....	10
3.2. Ensaio 2 – Distribuição espacial de água no campo de projeção do aspersor .....	11
3.3. Ensaio 3 – Ensaios de queima.....	12
3.4. Ensaio 4 – Ensaios de campo.....	17
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	19
4.1. Ensaio 1 – Perda de pressão com o acréscimo do número de aspersores.....	19
4.2. Ensaio 2 – Distribuição espacial de água no campo de projeção do aspersor .....	24
4.2.1. Funcionamento a 2,5 bar .....	24
4.2.2. Funcionamento a 3 bar .....	27
4.2.3. Funcionamento a 4 bar .....	29
4.3. Ensaio 3 – Ensaios de queima.....	33
4.4. Ensaio 4 – Ensaios de campo.....	37
5. CONCLUSÃO.....	41
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	43



## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. Logótipo dos programas Aldeia Segura e Pessoas Seguras [4]. .....	4
Figura 2.2. Aspersor do sistema instalado em Travessas, Arganil [6]. .....	5
Figura 2.3. Esquema da rede de aspersores instalada no telhado de um edifício [9]. .....	6
Figura 2.4. Espuma classe A como proteção contra incêndio [10]. .....	7
Figura 3.1. Aspersor Canhão Super Cris utilizado nos ensaios [11]. .....	9
Figura 3.2. Montagem de aspersores em série: (a) dois aspersores em série; (b) três aspersores em série. ....	10
Figura 3.3. Montagem experimental dos ensaios de distribuição de água proveniente de um só aspersor. ....	11
Figura 3.4. Ensaios de distribuição de água: (a) no decurso dos ensaios; (b) preparação da área de estudo. ....	12
Figura 3.5. Balança de medida de humidade AnD ML-50.....	13
Figura 3.6. Esquema da montagem experimental dos ensaios de queima.....	16
Figura 3.7. Ensaio de queima após ignição. ....	16
Figura 3.8. Dimensões das parcelas destinadas a ensaios de queima.....	17
Figura 3.9. Colocação de varões metálicos e fios ao longo das parcelas. ....	18
Figura 3.10. Segundo ensaio após ligar o aspersor.....	18
Figura 4.1. Pressão no primeiro aspersor em função do número de aspersores com bicos de 10 mm.....	21
Figura 4.2. Pressão no último aspersor em função do número de aspersores com bicos de 10 mm.....	21
Figura 4.3. Pressão no primeiro aspersor em função do número de aspersores com bicos de 7 mm.....	22
Figura 4.4. Pressão no último aspersor em função do número de aspersores com bicos de 7 mm.....	23
Figura 4.5. Volume de água em cada recipiente, medido em mL, para 2,5 bar de pressão à entrada do aspersor.....	24
Figura 4.6. Caudal de água em cada metro quadrado, medido em (L/min)/m <sup>2</sup> , para 2,5 bar de pressão à entrada do aspersor. ....	25
Figura 4.7. Mapa de isolinhas para 2,5 bar de pressão à entrada do aspersor. ....	26
Figura 4.8. Volume de água em cada recipiente, medido em mL, para 3 bar de pressão à entrada do aspersor. ....	27
Figura 4.9. Caudal de água em cada metro quadrado, medido em (L/min)/m <sup>2</sup> , para 3 bar de pressão à entrada do aspersor. ....	28

Figura 4.10. Mapa de isolinhas para 3 bar de pressão à entrada do aspersor.....	29
Figura 4.11. Volume de água em cada recipiente, medido em mL, para 4 bar de pressão à entrada do aspersor.....	30
Figura 4.12. Caudal de água em cada metro quadrado, medido em (L/min)/m <sup>2</sup> , para 4 bar de pressão à entrada do aspersor. ....	31
Figura 4.13. Mapa de isolinhas para 4 bar de pressão à entrada do aspersor.....	32
Figura 4.14. Características geométricas de uma frente de chama (adaptada de [15])......	35
Figura 4.15. Constante no expoente da linha de tendência que traduz a diminuição da intensidade de chama em função do volume de água utilizada na pré humidificação.....	36
Figura 4.16. Tempo de aspersão necessário, a 3 bar, para que haja extinção das chamas em função da carga de combustível.....	37
Figura 4.17. Parcelas 03 e 04 ardidadas.....	38
Figura 4.18. Intensidade de Byram em função da distância para a parcela 04. ....	39

## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 3.1. Humidades registadas e massa de combustível a usar.....	14
Tabela 3.2. Água aspergida a 3 bar numa área de 3,75 m <sup>2</sup> .....	15
Tabela 4.1. Variação da pressão entre a saída da bomba e o último aspersor em função do número de aspersores, para um bico de 10 mm. ....	19
Tabela 4.2. Variação da pressão entre a saída da bomba e o último aspersor em função do número de aspersores, para um bico de 7 mm. ....	20
Tabela 4.3. Tempo mínimo de aspersão para que a propagação das chamas se extinga.....	34



## SIMBOLOGIA E SIGLAS

### Simbologia

$A$  – Área do leito combustível

$A_r$  – Área de um recipiente

$h$  - Poder calorífico

$I_B$  – Intensidade de Byram

$L_f$  – Comprimento de chama

$m$  – Massa total de combustível

$Q_{H_2O}$  – Caudal de água

$R$  – Velocidade de propagação

$t$  – Tempo de aspersão

$V_{H_2O}$  – Volume de água

$W$  – Carga de combustível

$W_1$  – Carga de combustível de 2 kg/m<sup>2</sup>

$W_2$  – Carga de combustível de 3 kg/m<sup>2</sup>

$W_3$  – Carga de combustível de 4 kg/m<sup>2</sup>

$m_{f(bs)}$  – Teor de humidade dos combustíveis em base seca

$m_{f(bh)}$  – Teor de humidade dos combustíveis em base húmida

$\alpha$  – Ângulo de aspersão

## **Siglas**

ADAI – Associação para o Desenvolvimento da Aerodinâmica Industrial

ANAFRE – Associação Nacional de Freguesias

ANEPC – Autoridade Nacional de Emergência e Proteção Civil

ANMP – Associação Nacional de Municípios Portugueses

DEM – Departamento de Engenharia Mecânica

FCTUC – Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra

ISR – Instituto de Sistemas e Robótica

LEIF – Laboratório de Estudos sobre Incêndios Florestais

## 1. INTRODUÇÃO

Os incêndios rurais são considerados catástrofes naturais. De facto, são muitas vezes causados por fenómenos naturais, e a sua ocorrência e forma de propagação são muito dependentes de fatores naturais, tais como o vento, a temperatura e humidade relativa do ar, o declive dos terrenos, etc. No entanto, a sua origem pode decorrer igualmente da intervenção humana seja por negligência ou por dolo. O que distingue os incêndios rurais das restantes catástrofes naturais é precisamente a importância que neles pode ter a intervenção humana.

Em Portugal continental e na Região Autónoma da Madeira, os incêndios rurais são das catástrofes naturais mais graves pela elevada frequência com que ocorrem, pela extensão territorial que atingem e pelos efeitos devastadores que causam. Para além disso, constituem um dos principais obstáculos, talvez o maior, à sustentabilidade da floresta e dos ecossistemas que lhe estão associados.

O assunto tratado nesta dissertação insere-se no projeto *House-Refuge*<sup>®</sup> (Casa Refúgio) desenvolvido pela ADAI. Um dos objetivos do projeto é criar um modelo que, com base no comportamento expectável do fogo, em função da meteorologia típica e topografia, se possa determinar a área de gestão de combustíveis que melhor se adequa a cada local. Neste projeto, pretende-se ainda estudar o impacto do uso de tecnologias ativas que permitam mitigar o risco de incêndio quando as medidas passivas forem insuficientes ou difíceis de cumprir por questões de urbanização, de valor ecológico, etc [1].

Neste trabalho vamos analisar a eficiência de sistemas de autoproteção contra incêndios na interface urbano-florestal. O sistema em estudo foca-se nos aspersores de água e o objetivo é modelar o efeito das linhas de aspersão na intensidade do fogo, obtendo-se e analisando-se as várias curvas do decréscimo das chamas em função das características do funcionamento dos aspersores. Uma finalidade deste programa de investigação é perceber de que forma estes sistemas de autoproteção podem fundamentar decisões em relação às obrigações legais no que diz respeito à largura da faixa de gestão de combustível em torno de habitações e de aglomerados populacionais.

De acordo com o Dec. Lei nº 82/2021 de 13 de outubro, é obrigatória a criação de faixas de gestão de combustíveis de 50 m em torno de habitações e de 100 m em torno de

aglomerados populacionais. Esta exigência legislativa carece, no entanto, de sustentação científica, visto que, em determinados cenários, estas distâncias poderão ser exageradas, e, noutros casos, poderão ser mesmo insuficientes. É referido ainda no artigo 61º que a construção ou ampliação de edifícios a menos de 50 m de territórios florestais deve adotar medidas de autoproteção à passagem do fogo e à contenção de possíveis fontes de ignição do mesmo. Assim sendo, numa altura em que a legislação sobre a proteção de edificações e aglomerados tem vindo a sofrer profundas alterações, e em que o conhecimento científico se apresenta como elemento de extrema importância na fundamentação das decisões políticas, as conclusões deste trabalho e de outros congéneres serão certamente um valioso contributo para ajudar a resolver uma situação conhecida de todos no nosso país, que todos os anos é severamente fustigado por incêndios rurais [1], [2].

Do ponto de vista da sua estrutura, esta dissertação está dividida em cinco capítulos. Neste primeiro capítulo é feita uma introdução e enquadramento do tema abordado, seguido do estado de arte, no segundo capítulo, onde serão abordadas algumas medidas de autoproteção já desenvolvidas na interface urbano-florestal. O terceiro capítulo é referente ao procedimento experimental e nele está descrito o plano delineado, bem como todos os parâmetros medidos e a metodologia adotada. No quarto capítulo é feita a apresentação e análise dos resultados experimentais obtidos. Por fim, o quinto e último capítulo, sintetiza as conclusões finais do trabalho efetuado.

## 2. ESTADO DA ARTE

O “estado da arte” é a forma como habitualmente nos referimos ao atual estado do nosso conhecimento sobre um determinado tópico que está a ser objeto de estudo.

Assim, este capítulo tem como finalidade a descrição e análise de medidas, sistemas e projetos de autoproteção de edifícios e aglomerados já desenvolvidas ou adotadas aquando da elaboração desta dissertação.

Assim, vão ser descritos sucintamente neste capítulo os programas “Aldeia Segura” e “Pessoas Seguras”, bem como o sistema de aspersores já desenvolvido por investigadores da FCTUC e implementado na aldeia de Travessas, no conselho de Arganil. Vai ser também descrito o exemplo de uma empresa fundada nos Estados Unidos da América (EUA) com o objetivo de criar um produto comercial, no contexto dos incêndios rurais, capaz de salvar vidas, casas e empresas.

### 2.1. Aldeia Segura e Pessoas Seguras

Os programas Aldeia Segura e Pessoas Seguras, cujo logótipo é apresentado na Figura 2.1, foram criados após a tragédia de 2017, em Pedrógão Grande, quando assistimos ao maior incêndio de sempre em Portugal, com mais de 500 casas ardidas. Foi também o incêndio mais mortífero no nosso país havendo a lamentar 66 mortes associadas.

Estes programas foram criados pela Resolução do Conselho de Ministros n.º 157-A/2017 de 27 de outubro, na qual o Governo estabeleceu um conjunto de medidas destinadas a introduzir “uma reforma sistémica na prevenção e combate aos incêndios florestais, estendendo-se a outras áreas da proteção e socorro”.

O programa Aldeia Segura é definido como um “Programa de Proteção de Aglomerados Populacionais e de Proteção Florestal” e destina-se a estabelecer “medidas estruturais para proteção de pessoas e bens, e dos edificados na interface urbano-florestal, com a implementação e gestão de zonas de proteção aos aglomerados e infraestruturas estratégicas, identificando pontos críticos e locais de refúgio”. Por sua vez, o programa “Pessoas Seguras” visa promover “ações de sensibilização para a prevenção de comportamentos de risco, medidas de autoproteção e realização de simulacros de planos de evacuação, em articulação com as autarquias locais”.

A execução destes programas decorre ao abrigo de um protocolo entre a Autoridade Nacional de Emergência e Proteção Civil (ANEPC), a Associação Nacional de Municípios Portugueses (ANMP) e a Associação Nacional de Freguesias (ANAFRE). Nos termos deste protocolo, a sua implementação é efetuada a dois níveis. Ao nível estratégico, visa a elaboração de referenciais transversais a todo o território complementada com campanhas de sensibilização e sistemas de aviso. Por outro lado, ao nível operativo, a cargo dos municípios e freguesias, visa a execução de medidas concretas de proteção e sensibilização, tirando partido de uma maior proximidade das autarquias aos cidadãos.

Neste âmbito são desenvolvidas ações nas seguintes áreas:

- Proteção aos aglomerados – ações que visem a proteção de zonas na interface urbano-florestal, de modo a reduzir o risco de afetação das edificações;
- Prevenção de comportamentos de risco – ações de sensibilização de forma a reduzir o número de ignições por negligência associada ao uso do fogo;
- Evacuação de aglomerados – ações destinadas a preparar e executar uma evacuação de um aglomerado face à aproximação de um incêndio rural;
- Sensibilização e aviso à população – sensibilizar e informar a população sobre o risco de incêndio rural e das condutas de autoproteção a adotar;
- Locais de abrigo e refúgio – seleção e preparação de espaços ou edifícios que possam servir como abrigos ou refúgios de um aglomerado populacional aquando da passagem de um incêndio rural [3].



**Figura 2.1.** Logótipo dos programas Aldeia Segura e Pessoas Seguras [4].

## 2.2. Sistema de aspersores em Travessas

Referimo-nos agora a um dispositivo que uma equipa de investigadores da FCTUC desenvolveu, numa colaboração entre a ADAI e o ISR. Trata-se de um sistema de proteção contra incêndios rurais com vista à proteção de comunidades isoladas onde a população é maioritariamente envelhecida e cujos acessos são, muitas vezes, deficitários.

Esta tecnologia foi desenvolvida no âmbito do projeto “*FireProtect* – Sistemas de Proteção de Pessoas e Elementos Críticos Expostos a Incêndios Florestais” que é coordenado pelo Professor Doutor Domingos Xavier Viegas.

O sistema instalado na aldeia de Travessas conta ainda com o apoio da Câmara Municipal de Arganil e da Junta de Freguesia de Celavisa. Este sistema baseia-se numa linha de aspersores de água, idênticos ao da Figura 2.2 repartida em 4 módulos de aspersão independentes distribuídos ao longo de aproximadamente 160 m, de forma a cobrir as zonas periféricas mais expostas da aldeia. Uma vez que no nosso país são várias as comunidades com muito maus acessos rodoviários, estes sistemas podem salvar vidas, preservar bens e facilitar substancialmente as atividades dos meios de proteção civil, incrementando de forma significativa a probabilidade de pessoas, casas e outros bens resistirem aos efeitos de um incêndio. No entanto, é importante salientar que este tipo de sistemas serve apenas de apoio ao combate a um incêndio e, como tal, as zonas cobertas pelos aspersores devem continuar a ser alvo de ações contínuas de gestão de combustíveis [5].



**Figura 2.2.** Aspersor do sistema instalado em Travessas, Arganil [6].

### 2.3. *Frontline Wildfire Defense*®

A *Frontline Wildfire Defense*®, fundada em 2012 no Wyoming, EUA, por Harry Statter, é constituída por um grupo especializado de bombeiros, engenheiros e *designers* com o objetivo comum de criar um produto comercial capaz de salvar vidas, casas e empresas situadas em áreas propensas a incêndios florestais [7].

O sistema de proteção comercializado por esta empresa baseia-se numa rede de aspersores instalada em todo o telhado de um edifício, cumeeiras e também sob áreas cobertas, tal como mostra a Figura 2.3 onde cada ponto preto representa um aspersor de espuma. Como podemos constatar na Figura 2.4, o objetivo é cobrir toda a casa de uma espuma classe A, usada frequentemente pelos bombeiros, de forma a evitar que as faúlhas que voam à frente do fogo iniciem ignições nas zonas a isso mais propícias.

Uma das principais vantagens deste sistema é o facto de se poder monitorizar em tempo real a distância a que o incêndio está de uma habitação através de uma aplicação disponível para telemóvel, e ativar remotamente por dados, *Wi-Fi* ou satélite o sistema de proteção. É importante ainda referir que a caixa de controle tem uma bateria embutida, permitindo que o sistema funcione mesmo no caso de ocorrer uma quebra geral de energia elétrica [8].

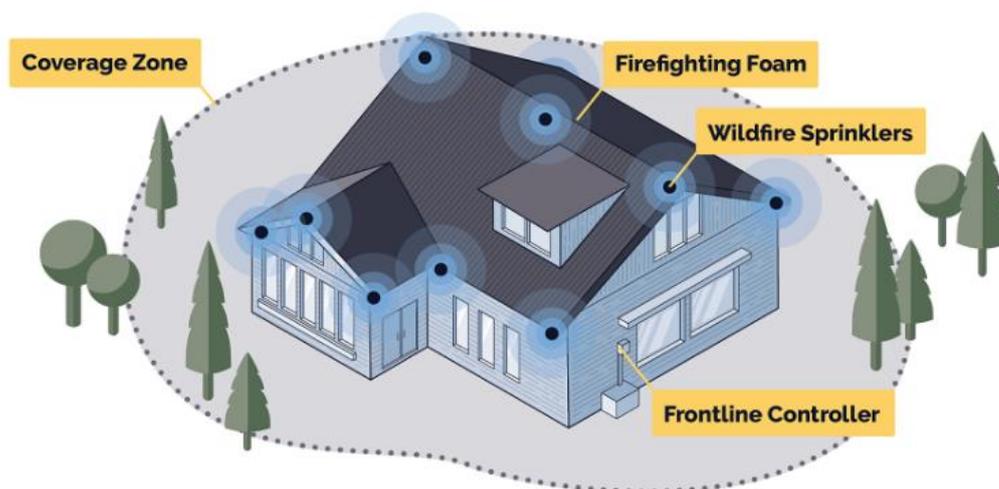


Figura 2.3. Esquema da rede de aspersores instalada no telhado de um edifício [9].



**Figura 2.4.** Espuma classe A como proteção contra incêndio [10].



### 3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Neste capítulo, são descritos os procedimentos seguidos na execução da parte experimental.

O procedimento experimental dividiu-se em quatro partes. Os três primeiros ensaios foram realizados no LEIF e o último ensaio foi realizado na serra da Gestosa, Castanheira de Pêra, e serviu para validação.

O sistema de aspersão utilizado é composto por Aspersores Canhão Super Cris, do fornecedor Prilux, e que podemos ver na Figura 3.1. A peça representada a azul é denominada de “bico” e o seu diâmetro tem influência no alcance, na pressão e no caudal de água aspergida.



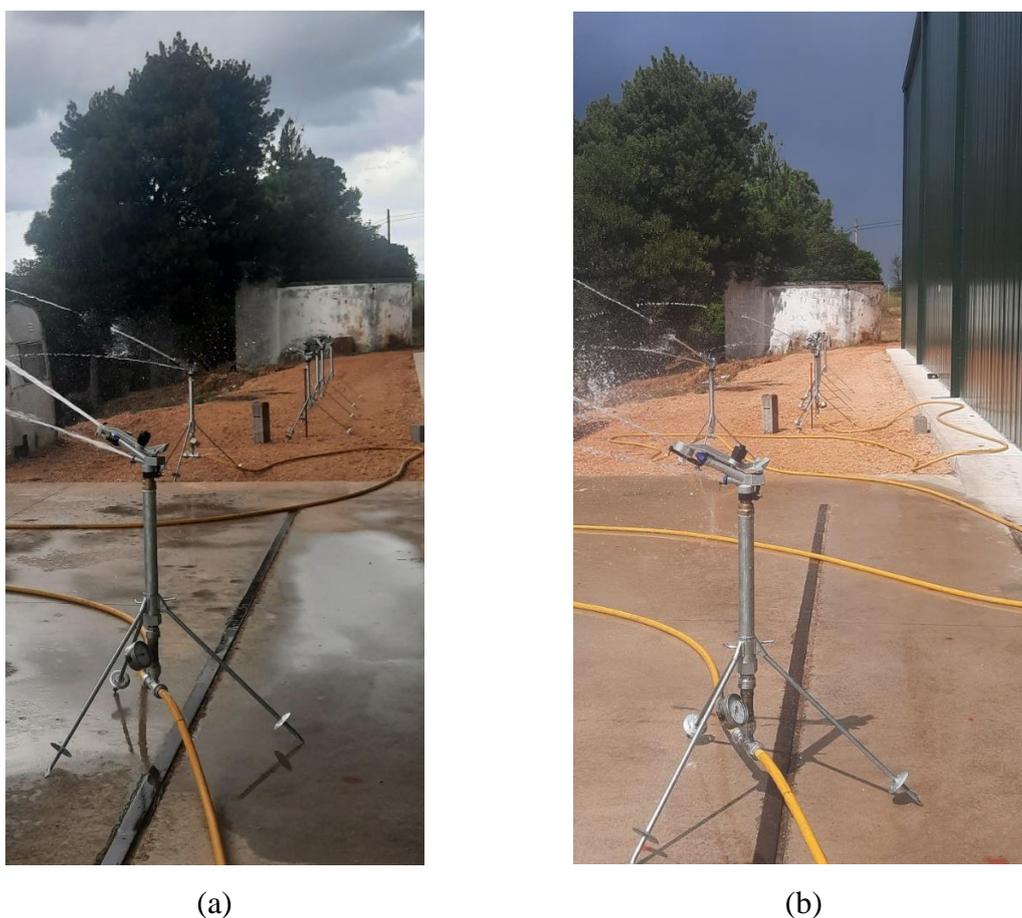
**Figura 3.1.** Aspersor Canhão Super Cris utilizado nos ensaios [11].

São aspersores de caudal médio (45 – 150 L/min) compostos por dois jatos com inclinações diferentes o que permite uma maior uniformização da precipitação. Estes aspersores contam ainda com bicos de diferentes diâmetros que podem ser facilmente substituídos à mão [11].

### 3.1. Ensaio 1 – Perda de pressão com o acréscimo do número de aspersores

Nestes ensaios pretende-se avaliar a perda de pressão que se verifica quando se aumenta o número de aspersores utilizados numa montagem em série ilustrada na Figura 3.2. Para isso, foram efetuados ensaios aumentando o número de aspersores um a um com um objetivo inicial de conseguir chegar até um máximo de oito.

Para a sua realização foram utilizadas mangueiras com 25 mm de diâmetro e 20 m de comprimento entre aspersores e foram colocados três manómetros para medir a variação de pressão, um à saída da bomba, outro no primeiro aspersor e o outro no último aspersor. Estes ensaios foram ainda repetidos para dois bicos diferentes, um com diâmetro interno de 7 mm e outro com diâmetro interno de 10 mm.

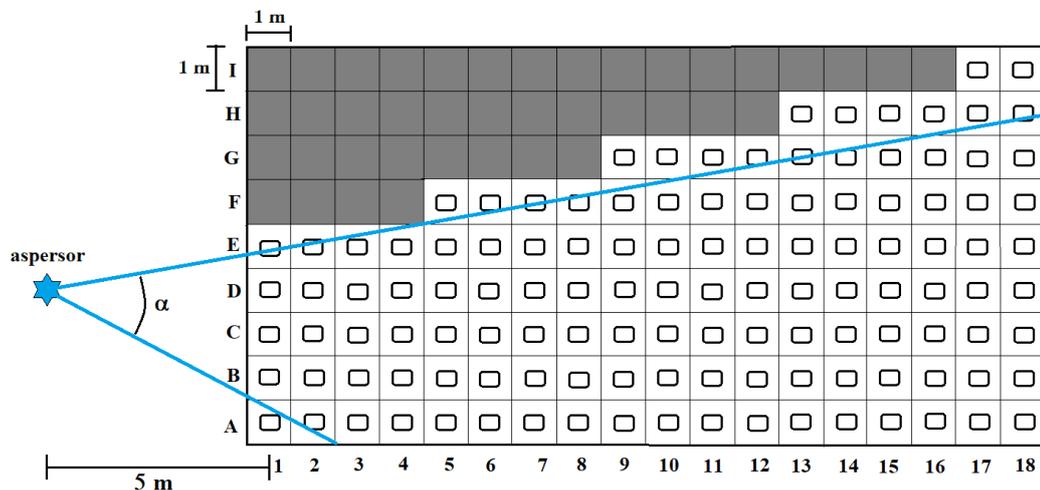


**Figura 3.2.** Montagem de aspersores em série: (a) dois aspersores em série; (b) três aspersores em série.

### 3.2. Ensaio 2 – Distribuição espacial de água no campo de projeção do aspersor

A segunda parte experimental diz respeito ao estudo da distribuição espacial da água aspergida por este tipo de aspersores. Estes ensaios foram efetuados para um funcionamento a 2,5 bar, a 3 bar e a 4 bar.

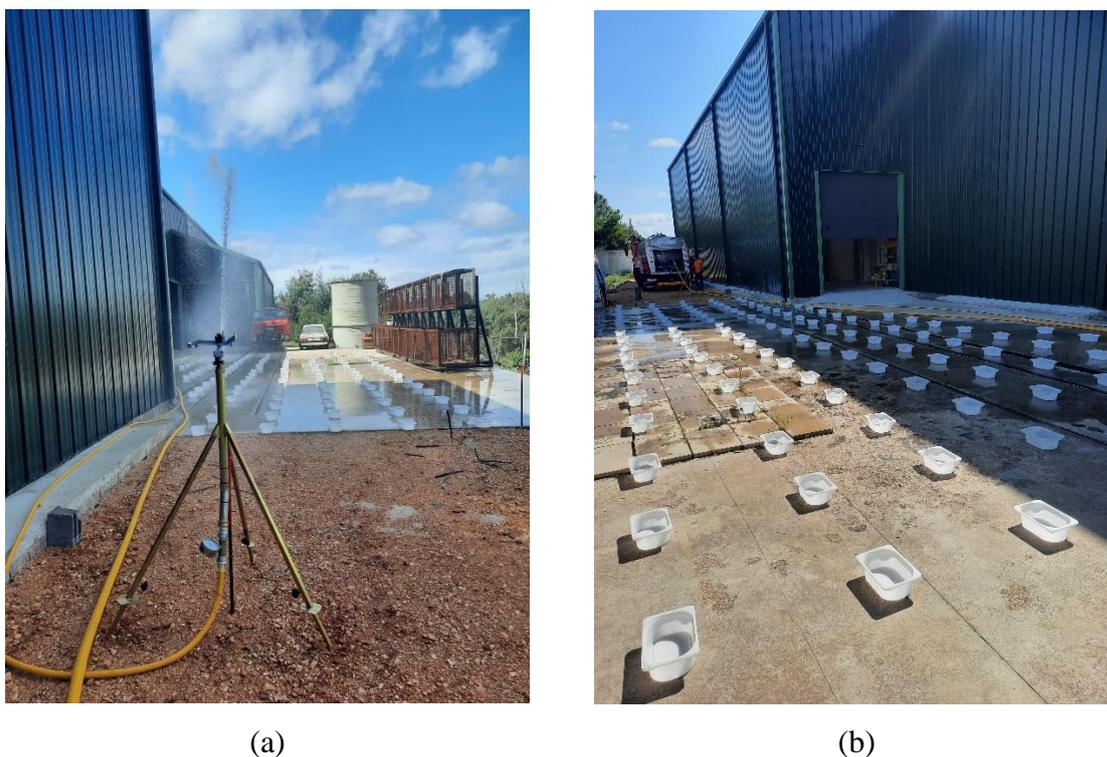
Para a realização deste ensaio a área de estudo foi dividida em parcelas, cada uma com um metro quadrado, onde foram colocados recipientes para captar a água tal como mostra o esquema experimental representado na Figura 3.3. Os recipientes têm uma área de  $0,3 \times 0,2 \text{ m}^2$  e foram colocados no centro geométrico de cada quadrado. O ensaio foi realizado com um bico de 10 mm e um ângulo de aspersão,  $\alpha$ , de  $38,4^\circ$ .



**Figura 3.3.** Montagem experimental dos ensaios de distribuição de água proveniente de um só aspersor.

Após a preparação, o aspersor foi ligado durante dois minutos. Posteriormente, com a ajuda de uma proveta volumétrica graduada, foi medida a quantidade de água em cada recipiente. No registo dos dados foi usado o sistema de coordenadas representado na Figura 3.3 onde cada metro quadrado e respetivo recipiente são identificados por uma letra e um número.

A Figura 3.4. mostra um ensaio durante a sua execução e a área de estudo após a preparação onde podemos facilmente verificar a disposição dos recipientes utilizados.



**Figura 3.4.** Ensaios de distribuição de água: (a) no decurso dos ensaios; (b) preparação da área de estudo.

### 3.3. Ensaio 3 – Ensaios de queima

Com os ensaios de queima pretende-se verificar qual é a alteração que o fogo sofre quando chega a uma zona que foi pré humidificada com os aspersores mencionados. Estes ensaios foram efetuados para três cargas de combustível diferentes:  $2 \text{ kg/m}^2$ ,  $3 \text{ kg/m}^2$  e  $4 \text{ kg/m}^2$ . Para cada uma delas, foi, em determinada zona, feita a pré humidificação para diferentes cargas de água por  $\text{m}^2$ , com base no Ensaio 2.

Estes ensaios foram realizados numa mesa de queima, com uma área de  $2,7 \times 1,8 \text{ m}^2$  e com uma aspersão manual, através de um regador. Sendo a água um bem precioso que é necessário poupar e preservar, a mesa utilizada conta com uma saída de água e foi colocada com uma ligeira inclinação de forma a reaproveitar a água em excesso que escorre entre o combustível.

O combustível utilizado foi mato, disposto numa área de  $2,5 \times 1,5 \text{ m}^2$ , e a sua humidade em base seca foi medida antes dos ensaios, de forma a calcular a massa total necessária para a carga de combustível seco pretendida em casa ensaio. Assim, utilizando a balança de medição de humidade, mostrada na Figura 3.5, obtivemos a humidade dos combustíveis em

base húmida (bh), a partir da qual, foi calculada a humidade em base seca (bs) com a equação (3.1).



**Figura 3.5.** Balança de medida de humidade AnD ML-50.

$$m_{f(bs)} = \frac{100 \times m_{f(bh)}}{100 - m_{f(bh)}} \quad (3.1)$$

onde:

$m_{f(bs)}$  – Teor de humidade dos combustíveis em base seca (%)

$m_{f(bh)}$  – Teor de humidade dos combustíveis em base húmida (%)

Com estes valores, utilizámos a equação (3.2) para calcular a massa total de mato a utilizar para a carga de combustível seco em cada ensaio. Os resultados destes cálculos e os valores de humidade obtidos podem ser consultados na Tabela 3.1.

$$m = W \times A + W \times A \times \frac{m_{f(bs)}}{100} \quad (3.2)$$

onde:

$m$  – Massa total de combustível (kg)

$W$  – Carga de combustível ( $\text{kg/m}^2$ )

$A$  – Área do leito de combustível ( $\text{m}^2$ )

$m_{f(bs)}$  – Teor de humidade dos combustíveis em base seca (%)

**Tabela 3.1.** Humidades registadas e massa de combustível a usar.

Dia	Hora (h)	W ( $\text{kg/m}^2$ )	Área ( $\text{m}^2$ )	$m_{f(bh)}$	$m_{f(bs)}$	$m$ (kg)
30/05/2022	11:00	2	3,75	8,300	9,051	8,179
30/05/2022	14:00	2	3,75	8,300	9,051	8,179
30/05/2022	16:30	2	3,75	8,300	9,051	8,179
31/05/2022	10:00	2	3,75	8,500	9,290	8,197
31/05/2022	11:00	3	3,75	8,500	9,290	12,295
31/05/2022	14:30	4	3,75	7,300	7,875	16,181
31/05/2022	15:45	4	3,75	7,500	8,108	16,216
01/06/2022	10:00	4	3,75	10,400	11,607	16,741
01/06/2022	11:40	4	3,75	10,400	11,607	16,741
01/06/2022	15:00	4	3,75	10,400	11,607	16,741

Para a determinação da água a utilizar tivemos por base o funcionamento do sistema de aspersão em estudo a 3 bar e utilizámos o valor máximo da água recolhida no Ensaio 2 para calcular a quantidade de água que seria aspergida na área de estudo para diferentes tempos de aspersão.

Assim, assumindo o valor registado no recipiente C1, de 98 mL, para dois minutos de aspersão temos, para o volume de água,

$$V_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{98 \times A}{1000 \times A_r} = \frac{98 \times (2,5 \times 1,5)}{1000 \times (0,3 \times 0,2)} = 6,12 \text{ L} \quad (3.3)$$

onde:

$V_{\text{H}_2\text{O}}$  – Volume de água (L)

$A$  – Área do leito de combustível ( $\text{m}^2$ )

$A_r$  – Área de um recipiente ( $\text{m}^2$ )

Analogamente, determinámos a quantidade de água para vários períodos e registámos os valores apresentados na Tabela 3.2.

**Tabela 3.2.** Água aspergida a 3 bar numa área de 3,75 m<sup>2</sup>.

<b>Tempo de aspersão (min)</b>	<b>V<sub>H<sub>2</sub>O</sub> (L)</b>
1,00	3,06
1,25	3,83
1,50	4,59
1,75	5,36
2,00	6,12
2,25	6,89
2,50	7,65
2,75	8,42
3,00	9,18
5,00	15,3

A partir destes dados demos então início aos ensaios efetuando a pré humidificação apenas em metade do leito de combustível. A ignição foi iniciada na extremidade oposta, registando-se a ignição e propagação das chamas através de duas câmaras RGB, uma frontal e outra lateral, e de uma câmara de infravermelhos, na lateral, conforme mostra a Figura 3.6. Foi ainda colocada uma placa vertical, com marcações de referência, no lado oposto às câmaras, para permitir posteriormente a análise dimensional das chamas (Figura 3.7).

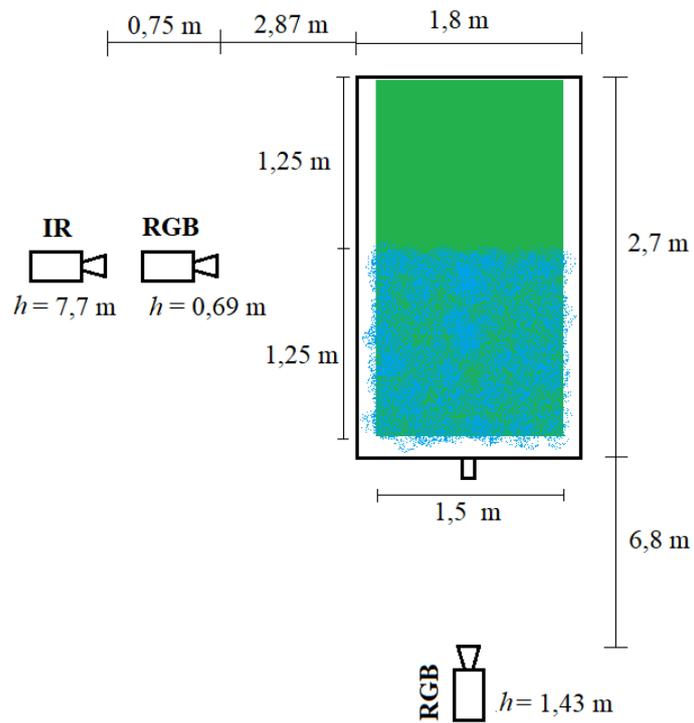


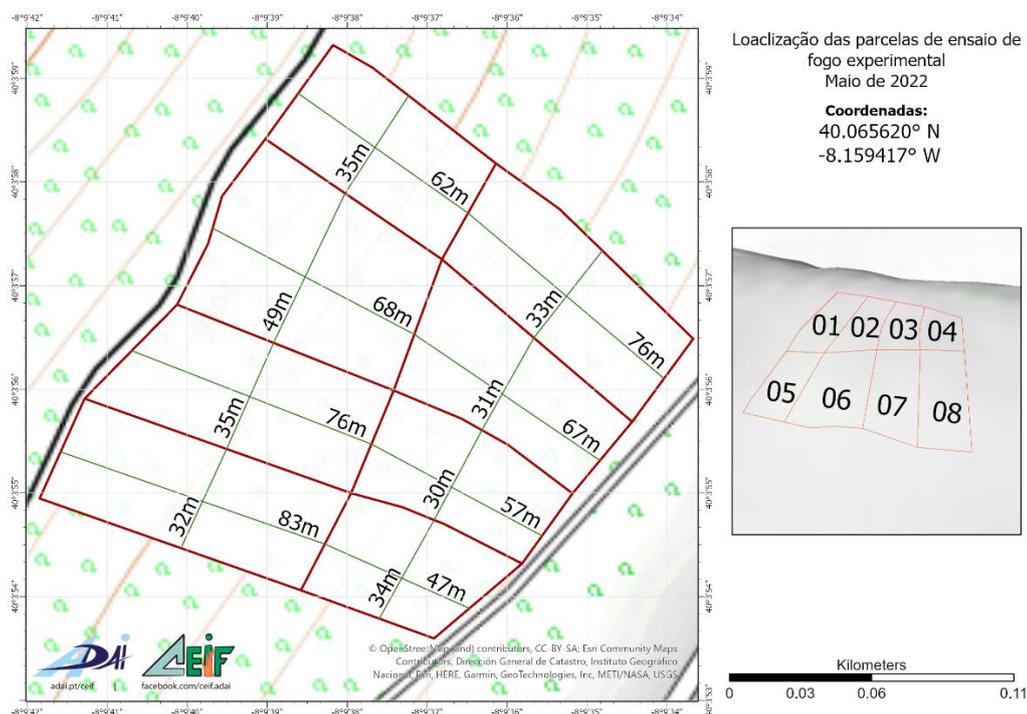
Figura 3.6. Esquema da montagem experimental dos ensaios de queima.



Figura 3.7. Ensaio de queima após ignição.

### 3.4. Ensaio 4 – Ensaios de campo

A última fase de ensaios teve por objetivo a validação dos ensaios de queima realizados em laboratório. Estes ensaios de campo foram em tudo semelhantes aos do Ensaio 3, no entanto, foram realizados numa maior área de estudo que corresponde às parcelas 03 e 04 representadas na Figura 3.8. Estas parcelas estão situadas num terreno com inclinação de aproximadamente 30° e a aspersão foi efetuada utilizando um aspersor na extremidade mais elevada do terreno, o qual foi operado a uma pressão de 4 bar.



**Figura 3.8.** Dimensões das parcelas destinadas a ensaios de queima.

Ao longo de todo o comprimento das parcelas, e de ambos os lados, foram espetados varões metálicos de 1 m de altura aos 20 m, aos 30 m, aos 40 m e aos 45 m medidos a partir do lado onde se deu a ignição. Foram colocados fios a ligar os varões colocados em posições correspondentes, de um lado e do outro lado da parcela. O resultado desta preparação pode ser observado na Figura 3.9.



**Figura 3.9.** Colocação de varões metálicos e fios ao longo das parcelas.

Os varões metálicos servem de referência para medir a altura das chamas numa análise ao vídeo obtido pela camera lateral. Por seu lado, o registo dos instantes da rotura dos fios permite-nos calcular a velocidade de avanço das chamas. Para além da filmagem lateral, estes ensaios foram ainda registados por uma câmara de infravermelhos e por um drone.

No primeiro ensaio, executado na parcela 03, foi efetuada uma pré humidificação, com um ângulo de aspersão de aproximadamente  $83^\circ$ , durante 3:33 min a 4 bar, o que corresponde a 500 L de água, e só depois disso foi efetuada a ignição no lado seco.

No segundo ensaio, feito na parcela 04, o aspersor, com um ângulo de aspersão de  $90^\circ$ , só foi acionado quando o fogo já tinha percorrido 30 m de forma a simular um caso de emergência. A Figura 3.10 é do segundo ensaio após ligar o aspersor.



**Figura 3.10.** Segundo ensaio após ligar o aspersor.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados obtidos nos quatro ensaios descritos na secção anterior.

Para uma maior clareza e mais fácil compreensão, fazemos uso de ferramentas de tratamentos de dados, para a elaboração de gráficos, tabelas e mapas de isolinhas.

### 4.1. Ensaio 1 – Perda de pressão com o acréscimo do número de aspersores

Começando com os bicos de 10 mm de diâmetro, fomos aumentando a pressão à saída da bomba para cada montagem em série e registámos os valores lidos nos manómetros colocados no primeiro e no último aspersor (Tabela 4.1).

**Tabela 4.1.** Variação da pressão entre a saída da bomba e o último aspersor em função do número de aspersores, para um bico de 10 mm.

Nº de aspersores	Pressão (bar)		
	Saída da bomba	1º Aspersor	Último Aspersor
1	4	3,00	-
2	4	2,00	1
3	4	1,65	1
4	4	1,60	0,7
1	5	4,10	-
2	5	2,70	1,9
3	5	2,00	1
4	5	1,95	0,8
1	6	4,70	-
2	6	3,00	2,4
3	6	2,30	1,1
4	6	2,20	0,8
5	7	3,20	0,1
5	8	3,40	0,3
5	9	4,20	0,4
6	9	4,00	0,1

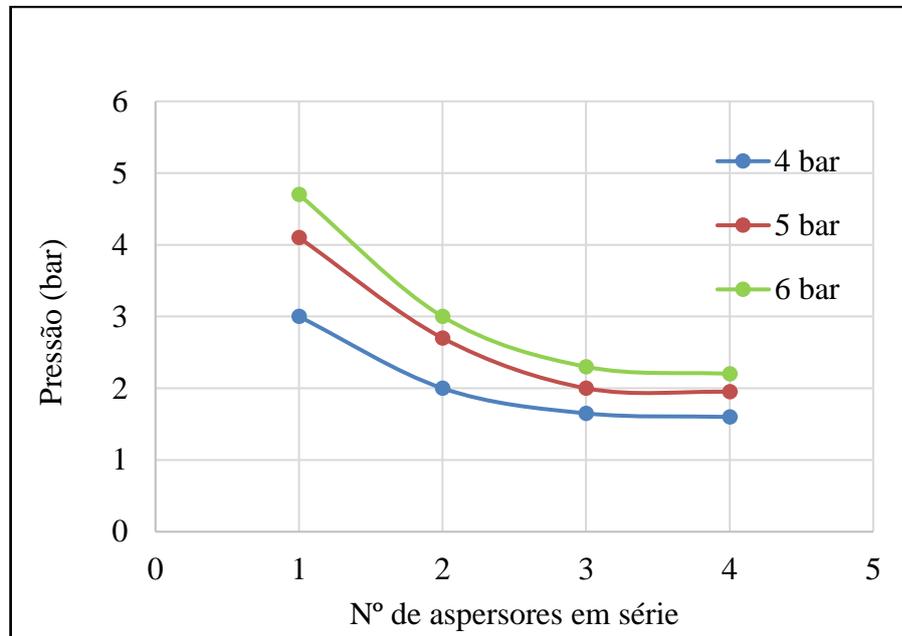
De seguida substituímos todos os bicos por outros mais finos, de 7 mm de diâmetro, e repetimos o processo obtendo os resultados apresentados na Tabela 4.2.

**Tabela 4.2.** Variação da pressão entre a saída da bomba e o último aspersor em função do número de aspersores, para um bico de 7 mm.

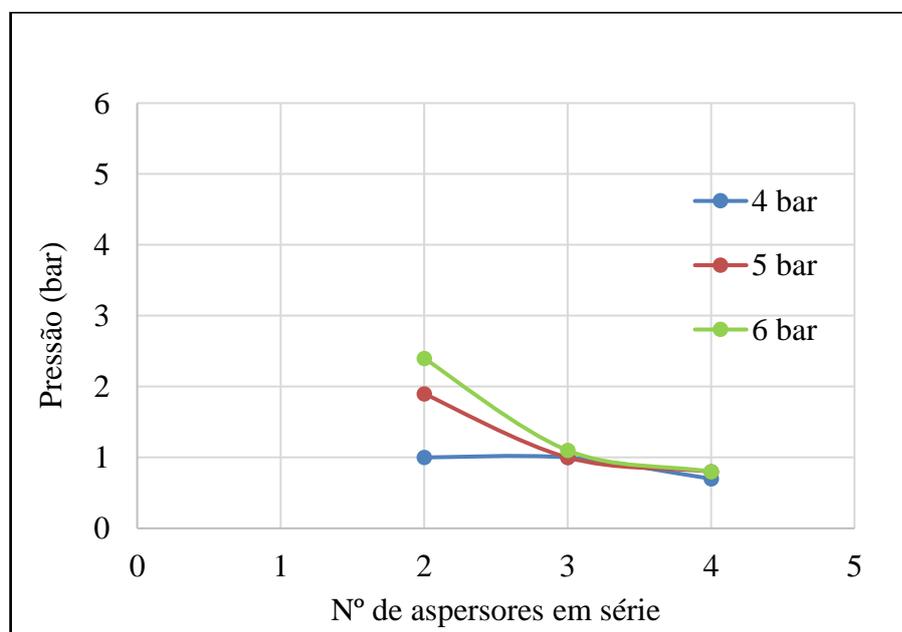
Nº de aspersores	Pressão (bar)		
	Saída da bomba	1º Aspersor	Último Aspersor
1	4	4	-
2	4	2,8	2,8
3	4	2,2	1,7
4	4	2	1
1	5	4,6	-
2	5	3,5	3,4
3	5	2,8	2
4	5	2,45	1,2
1	6	5,4	-
2	6	4,3	3,7
3	6	3,2	2,25
4	6	2,95	1,4
5	7	4,2	0,6
6	7	4	0,3
5	8	4,6	0,7
6	8	4,5	0,45
5	9	5	0,75
6	9	5	0,5

As primeiras conclusões foram retiradas no decorrer dos ensaios e são relativas à pressão máxima a utilizar. Começámos com uma pressão de 4 bar à saída da bomba e verificámos que a água apenas chegava a quatro aspersores, independentemente do bico utilizado. De seguida aumentámos a pressão para 5 bar e posteriormente para 6 bar. Em ambos os casos o resultado foi o mesmo obtido anteriormente, ou seja, colocando um quinto aspersor, a água não vai chegar a este último com pressão suficiente. Assim, fomos aumentando a pressão e ao mesmo tempo o número de aspersores até um máximo de 9 bar, com seis aspersores. Neste ponto percebemos que, com as condições que dispúnhamos, não seria possível testar uma montagem com mais de seis aspersores em série. Isto porque, para colocar sete aspersores teríamos de aumentar a pressão na bomba acima de 10 bar, o que levaria a um conseqüente aumento de pressão no primeiro aspersor. Ora, como podemos ver nas tabelas de resultados, para ambos os bicos, o funcionamento a 9 bar com seis aspersores já obriga a um funcionamento do primeiro aspersor acima de 4 bar, pressão recomendada como máxima pelo fabricante Prilux.

De forma a uma análise mais detalhada acerca dos dados das tabelas anteriores, foram construídos gráficos que nos permitem analisar e comparar mais facilmente os resultados obtidos para ambos os bicos utilizados.



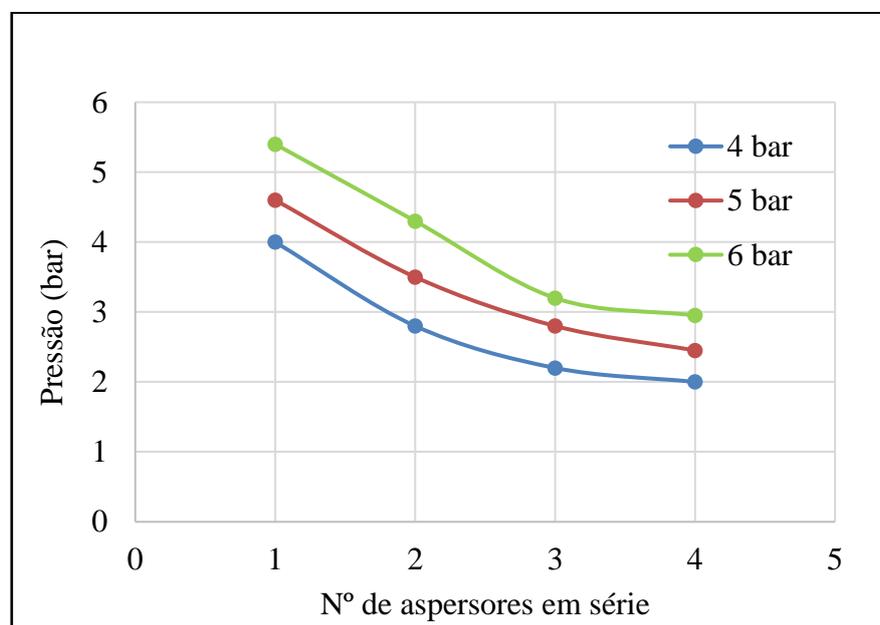
**Figura 4.1.** Pressão no primeiro aspersor em função do número de aspersores com bicos de 10 mm.



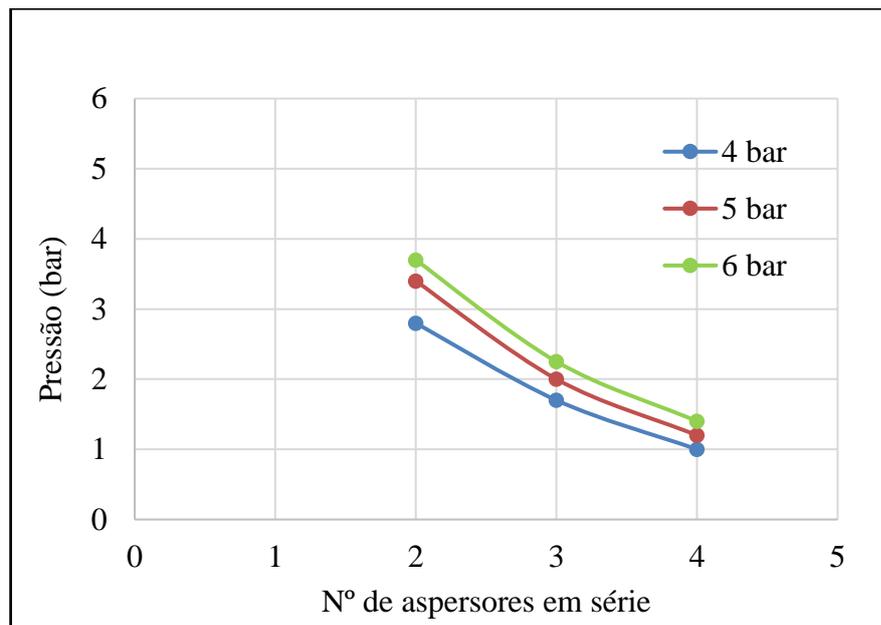
**Figura 4.2.** Pressão no último aspersor em função do número de aspersores com bicos de 10 mm.

Para o bico maior, o gráfico apresentado na Figura 4.1 mostra-nos a pressão no primeiro aspersor em função do número de aspersores colocados em série até um máximo de quatro aspersores de modo a garantir a segurança dos mesmos. Através desse gráfico podemos concluir que, ao aumentar o número de aspersores de um para dois, a pressão diminuiu de forma acentuada, sendo essa diferença tanto maior quanto maior for a pressão à saída da bomba. A partir dos dois aspersores essa diminuição de pressão é atenuada passando a ser quase nula quando passamos de uma montagem com três para uma montagem com quatro aspersores.

Relativamente à pressão no último aspersor, representada na Figura 4.2, temos diferentes comportamentos para um funcionamento da bomba a 4 bar ou a pressões superiores. Para um funcionamento a 4 bar, a pressão no último aspersor mantém-se igual tanto numa montagem de dois como numa montagem de três aspersores, tendo uma ligeira diminuição ao ser acrescentado um quarto aspersor. Para pressões à saída da bomba mais elevadas, ou seja 5 bar e 6 bar, vemos uma maior perda de pressão quando passamos a ter três aspersores e uma atenuação dessa perda de pressão quando passamos a ter quatro aspersores.



**Figura 4.3.** Pressão no primeiro aspersor em função do número de aspersores com bicos de 7 mm.



**Figura 4.4.** Pressão no último aspersor em função do número de aspersores com bicos de 7 mm.

Para o bico menor, e analogamente à análise feita para os resultados obtidos com o bico maior, a Figura 4.3 e a Figura 4.4, representam a pressão no primeiro e último aspersor, respetivamente. A primeira conclusão que resulta da comparação entre os dois bicos utilizados é que, para o bico de 7 mm a perda de pressão é substancialmente menor tanto no primeiro como no último aspersor. Outra diferença dos resultados obtidos para um bico menor é a variação de pressão no último aspersor. Podemos ver no gráfico da Figura 4.4 que a pressão no último aspersor diminui quase linearmente à medida que aumenta o número de aspersores em série para ambas as pressões à saída da bomba. Apesar destas diferenças, há também semelhanças na utilização destes dois bicos, nomeadamente no decréscimo de pressão no primeiro aspersor. À semelhança do que acontecia para o bico com 10 mm, no caso do bico de 7 mm a perda de pressão é mais acentuada quando aumentamos de um para dois aspersores e torna-se mais atenuada à medida que esse número de aspersores aumenta.

Por fim, sugere-se a possibilidade de o número de aspersores poder eventualmente ser aumentado se, em vez de mangueiras com 20 metros, forem usados tubos rígidos de menor comprimento, reduzindo assim as perdas de carga ao longo dos trajetos da água entre aspersores.

## 4.2. Ensaio 2 – Distribuição espacial de água no campo de projeção do aspersor

A análise da distribuição espacial de água foi dividida segundo o modo de funcionamento. Assim, separámos por subsecções o tratamento dos dados obtidos com o aspersor a funcionar a uma pressão de 2,5 bar, de 3 bar e de 4 bar.

O tratamento dos resultados pressupôs o cálculo do caudal de água em cada metro quadrado com base no volume de água recolhido em cada recipiente e na obtenção de mapas de isolinhas que nos permitem visualizar a distribuição espacial da água aspergida.

Para a construção dos mapas de isolinhas foi utilizado um programa de análise denominado de *OriginPro 2022*<sup>®</sup> [12].

### 4.2.1. Funcionamento a 2,5 bar

Com o aspersor em funcionamento a uma pressão de 2,5 bar durante dois minutos, obtivemos os resultados indicados na Figura 4.5 para o volume de água em cada recipiente medido em mL.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1	50	68	80	60	27				
2	60	67	70	70	40				
3	61	62	64	68	46				
4	62	62	63	78	55				
5	70	66	52	62	60	46			
6	68	70	66	68	66	56			
7	60	64	64	70	70	54			
8	66	52	54	56	70	50			
9	60	60	56	56	62	50	42		
10	60	60	62	60	64	58	50		
11	62	66	68	64	64	64	56		
12	70	72	62	66	74	76	54		
13	54	50	52	66	70	72	56	48	
14	30	30	38	50	50	50	52	50	
15	10	20	20	24	28	22	20	28	
16	0	0	0	0	0	0	0	0	
17	0	0	0	0	0	0	0	0	0
18	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Figura 4.5. Volume de água em cada recipiente, medido em mL, para 2,5 bar de pressão à entrada do aspersor.

Com estes resultados de volume de água captado em cada recipiente, podemos extrapolar um caudal em cada parcela de um metro quadrado. Para isso basta dividir cada um destes valores pela área de um recipiente e pelo tempo de aspersão, neste caso dois minutos, tal como mostra a equação (4.1).

$$Q_{H_2O} = \frac{V_{H_2O}}{1000 \times A_r \times t} \text{ (L/min)/m}^2 \quad (4.1)$$

onde:

$Q_{H_2O}$  – Caudal de água (L/min/m<sup>2</sup>)

$V_{H_2O}$  – Volume de água (L)

$A_r$  – Área de um recipiente (m<sup>2</sup>)

$t$  – Tempo de aspersão (min)

Aplicando esta equação a cada uma das parcelas, obtivemos os valores da Figura 4.6 para o caudal em cada metro quadrado em (L/min)/m<sup>2</sup>.

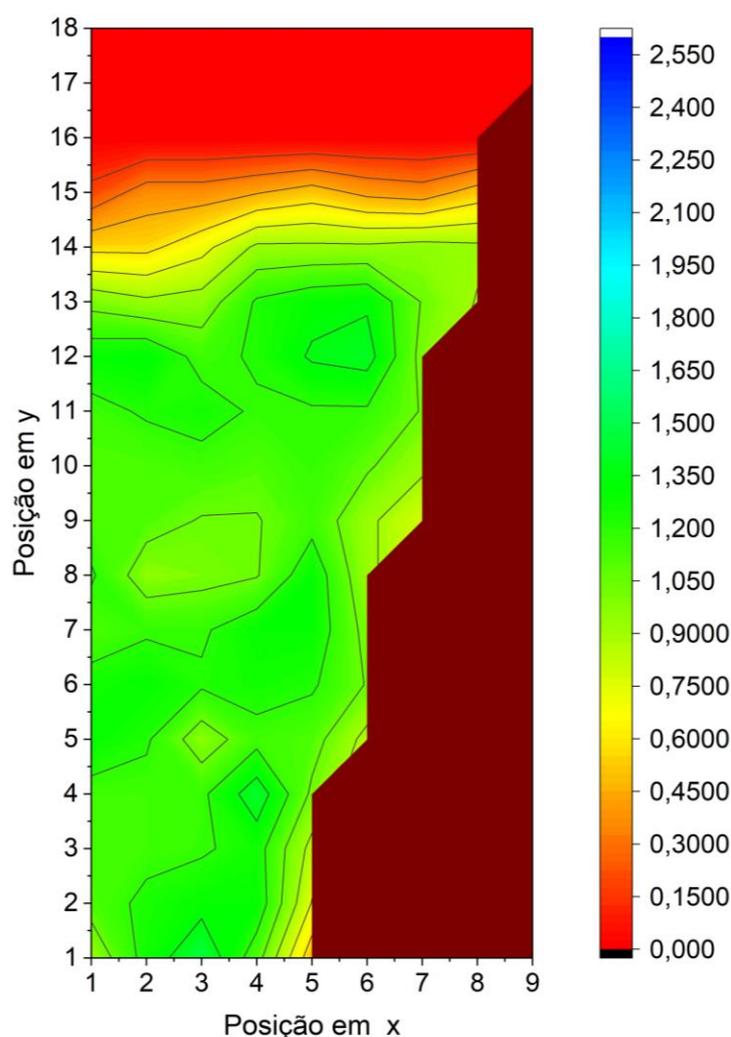
	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1	0,4	0,6	0,7	0,5	0,2				
2	0,5	0,6	0,6	0,6	0,3				
3	0,5	0,5	0,5	0,6	0,4				
4	0,5	0,5	0,5	0,7	0,5				
5	0,6	0,6	0,4	0,5	0,5	0,4			
6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,5			
7	0,5	0,5	0,5	0,6	0,6	0,5			
8	0,6	0,4	0,5	0,5	0,6	0,4			
9	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,4	0,4		
10	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,4		
11	0,5	0,6	0,6	0,5	0,5	0,5	0,5		
12	0,6	0,6	0,5	0,6	0,6	0,6	0,5		
13	0,5	0,4	0,4	0,6	0,6	0,6	0,5	0,4	
14	0,3	0,3	0,3	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	
15	0,1	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	
16	0	0	0	0	0	0	0	0	
17	0	0	0	0	0	0	0	0	0
18	0	0	0	0	0	0	0	0	0

**Figura 4.6.** Caudal de água em cada metro quadrado, medido em (L/min)/m<sup>2</sup>, para 2,5 bar de pressão à entrada do aspersor.

Tendo o caudal em cada metro quadrado, determinámos o caudal total fazendo o somatório de todas estas parcelas e obtivemos o valor de 45,01 (L/min)/m<sup>2</sup>.

Fazendo o quociente entre o caudal de água em cada metro quadrado e o caudal de água total obtivemos a percentagem de água em cada metro quadrado. Utilizando o programa *OriginPro 2022*<sup>®</sup> criámos uma matriz com dezoito linhas e nove colunas onde colocámos os valores percentuais obtidos para cada metro quadrado. Assim, criámos um mapa de isolinhas, representado na Figura 4.7, que nos permite ter uma perfeita noção da distribuição espacial de água aspergida.

É importante ainda referir que este ensaio foi realizado no dia 16 de maio durante a manhã altura em que foi registado vento com uma velocidade média de 17 mph = 27 km/h de sul-sudoeste, sem rajadas, segundo o registo da plataforma *Weather Underground* [13].



**Figura 4.7.** Mapa de isolinhas para 2,5 bar de pressão à entrada do aspersor.

Neste gráfico de isolinhas podemos facilmente comprovar que, para um modo de funcionamento a uma pressão de 2,5 bar, a distribuição espacial de água é bastante uniforme. É possível ainda identificar que o alcance máximo a esta pressão é de aproximadamente 18,5 m, uma vez que, o aspersor se encontra a 5 m de distância da primeira linha de recipientes.

#### 4.2.2. Funcionamento a 3 bar

Para uma pressão de 3 bar durante dois minutos, registaram-se os resultados da Figura 4.8. Volume de água em cada recipiente, medido em mL, para 3 bar de pressão à entrada do aspersor. para o volume de água em cada recipiente medido em mL.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1	50	70	98	76	46				
2	66	78	84	70	50				
3	74	80	74	70	54				
4	78	82	76	72	64				
5	80	82	76	70	70	50			
6	78	80	76	68	70	60			
7	70	72	80	68	70	62			
8	62	70	74	70	66	66			
9	70	64	72	66	64	60	48		
10	66	64	72	72	60	56	56		
11	60	64	70	70	66	56	66		
12	56	56	66	62	66	60	68		
13	60	62	64	60	66	64	60	40	
14	40	46	50	52	62	58	54	50	
15	6	22	30	40	62	58	62	62	
16	0	0	0	12	30	32	30	24	
17	0	0	0	4	0	0	0	0	0
18	0	0	0	0	0	0	0	0	0

**Figura 4.8.** Volume de água em cada recipiente, medido em mL, para 3 bar de pressão à entrada do aspersor.

Tal como fizemos para 2,5 bar, utilizámos estes valores e aplicámos a equação (4.1) para obter um caudal em cada parcela de um metro quadrado. Os valores obtidos são apresentados na Figura 4.9.

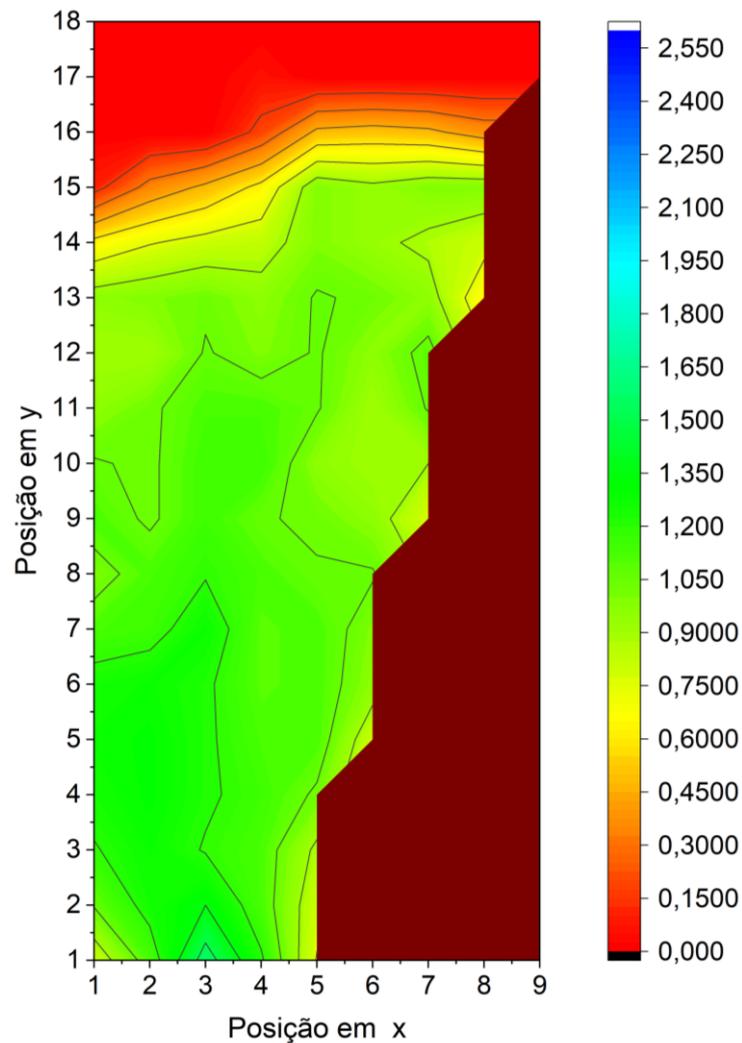
	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1	0,4	0,6	0,8	0,6	0,4				
2	0,6	0,7	0,7	0,6	0,4				
3	0,6	0,7	0,6	0,6	0,5				
4	0,7	0,7	0,6	0,6	0,5				
5	0,7	0,7	0,6	0,6	0,6	0,4			
6	0,7	0,7	0,6	0,6	0,6	0,5			
7	0,6	0,6	0,7	0,6	0,6	0,5			
8	0,5	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6			
9	0,6	0,5	0,6	0,6	0,5	0,5	0,4		
10	0,6	0,5	0,6	0,6	0,5	0,5	0,5		
11	0,5	0,5	0,6	0,6	0,6	0,5	0,6		
12	0,5	0,5	0,6	0,5	0,6	0,5	0,6		
13	0,5	0,5	0,5	0,5	0,6	0,5	0,5	0,3	
14	0,3	0,4	0,4	0,4	0,5	0,5	0,5	0,4	
15	0,1	0,2	0,3	0,3	0,5	0,5	0,5	0,5	
16	0	0	0	0,1	0,3	0,3	0,3	0,2	
17	0	0	0	0	0	0	0	0	0
18	0	0	0	0	0	0	0	0	0

**Figura 4.9.** Caudal de água em cada metro quadrado, medido em (L/min)/m<sup>2</sup>, para 3 bar de pressão à entrada do aspersor.

O somatório de todas estas parcelas permitiu-nos obter um caudal total de 52,00 (L/min)/m<sup>2</sup>.

Da mesma forma que anteriormente, determinámos a percentagem de água em cada metro quadrado e obtivemos o mapa de isolinhas da Figura 4.10

Este ensaio foi efetuado logo a seguir ao ensaio anterior sem que tivesse havido alterações climáticas entre ensaios.



**Figura 4.10.** Mapa de isolinhas para 3 bar de pressão à entrada do aspersor.

O mapa obtido para 3 bar é muito parecido ao obtido para 2,5 bar. Também aqui, a distribuição espacial de água aspergida é bastante uniforme ainda que ligeiramente menos uniforme comparando com um funcionamento a 2,5 bar. No que diz respeito ao alcance, este é ligeiramente maior face ao anterior, atingindo valores muito próximos de 21 m.

#### **4.2.3. Funcionamento a 4 bar**

Por fim, aumentámos a pressão no aspersor para 4 bar, novamente durante dois minutos. O resultado do volume de água recolhido em cada recipiente está registado na Figura 4.8. Volume de água em cada recipiente, medido em mL, para 3 bar de pressão à entrada do aspersor. Figura 4.11 em mL.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1	150	140	140	160	130				
2	146	140	142	150	144				
3	146	140	140	156	142				
4	110	120	120	132	140				
5	96	98	106	102	102	90			
6	70	80	80	86	92	98			
7	64	70	72	76	84	98			
8	52	64	60	66	70	94			
9	54	60	60	60	66	70	80		
10	40	48	52	52	56	58	80		
11	28	40	40	38	50	48	62		
12	14	26	20	24	32	40	46		
13	1	4	4	4	10	10	22	26	
14	1	1	1	1	1	1	1	1	
15	1	1	1	1	1	1	1	1	
16	0	0	0	0	0	0	0	0	
17	0	0	0	0	0	0	0	0	0
18	0	0	0	0	0	0	0	0	0

**Figura 4.11.** Volume de água em cada recipiente, medido em mL, para 4 bar de pressão à entrada do aspersor.

Mais uma vez, aplicámos a equação (4.1) a cada um destes valores para obter os resultados da Figura 4.12.

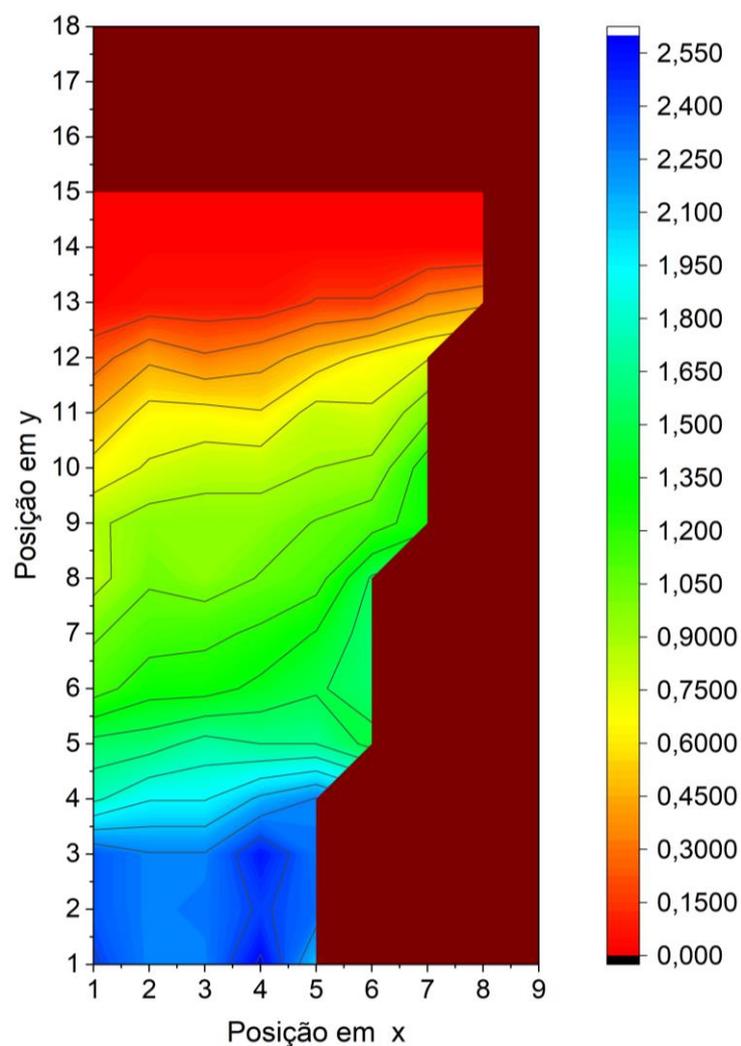
	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1	1,3	1,2	1,2	1,3	1,1				
2	1,2	1,2	1,2	1,3	1,2				
3	1,2	1,2	1,2	1,3	1,2				
4	0,9	1	1	1,1	1,2				
5	0,8	0,8	0,9	0,9	0,9	0,8			
6	0,6	0,7	0,7	0,7	0,8	0,8			
7	0,5	0,6	0,6	0,6	0,7	0,8			
8	0,4	0,5	0,5	0,6	0,6	0,8			
9	0,5	0,5	0,5	0,5	0,6	0,6	0,7		
10	0,3	0,4	0,4	0,4	0,5	0,5	0,7		
11	0,2	0,3	0,3	0,3	0,4	0,4	0,5		
12	0,1	0,2	0,2	0,2	0,3	0,3	0,4		
13	0	0	0	0	0,1	0,1	0,2	0,2	
14	0	0	0	0	0	0	0	0	
15	0	0	0	0	0	0	0	0	
16	0	0	0	0	0	0	0	0	
17	0	0	0	0	0	0	0	0	0
18	0	0	0	0	0	0	0	0	0

**Figura 4.12.** Caudal de água em cada metro quadrado, medido em (L/min)/m<sup>2</sup>, para 4 bar de pressão à entrada do aspersor.

Calculando o somatório de todas estas parcelas obtemos um caudal total de 51,66 (L/min)/m<sup>2</sup>.

Analogamente ao que fizemos nos ensaios anteriores, determinámos a percentagem de água em cada metro quadrado e obtivemos o mapa de isolinhas da Figura 4.13.Figura 4.10

O ensaio com o aspersor a funcionar a 4 bar foi realizado no mesmo dia 16 de maio, mas durante a parte da tarde. Desta forma a meteorologia sofreu algumas alterações significativas com especial atenção para o vento. Segundo a mesma plataforma utilizada anteriormente, aquando da execução deste ensaio a velocidade média do vento era de 20 mph = 32 km/h sul-sudoeste com rajadas de 30 mph = 48 km/h na mesma direção.



**Figura 4.13.** Mapa de isolinhas para 4 bar de pressão à entrada do aspersor.

Quando olhamos para o mapa de isolinhas obtido para um funcionamento a 4 bar, o que sobressai é a distribuição espacial de água ser muito heterogênea em comparação com a distribuição obtida para 2,5 bar e para 3 bar. Para além disso, ao contrário do que seria expectável, o alcance máximo ficou muito abaixo do que foi atingido com pressões mais baixas. Outro dado que pode passar mais despercebido é o caudal total calculado. Este caudal foi praticamente igual ao caudal encontrado para 3 bar. Os resultados menos expectáveis são consequência das alterações meteorológicas que aconteceram entre ensaios, com especial importância na alteração do vento. Sem dúvida que as rajadas de vento contrárias à aspersão que se verificaram à tarde durante o ensaio, tiveram um grande impacto, não só no alcance e na distribuição de água, como também no caudal determinado, uma vez que parte da água aspergida foi empurrada pelo vento para fora da área de estudo coberta com recipientes.

### 4.3. Ensaio 3 – Ensaio de queima

Os ensaios de queima foram analisados através da intensidade de Byram, ou intensidade da frente de chamas, que mede a taxa de libertação de calor por metro linear na frente de chama, e se exprime em kW/m. A intensidade de Byram ( $I_B$ ) pode ser calculada através da velocidade de propagação ( $R$ ) pela equação (4.2), ou através do comprimento de chama ( $L_f$ ) segundo a relação não linear da equação (4.3). Neste trabalho, os cálculos foram realizados através do comprimento de chama, ou seja, utilizando a equação (4.4) que resulta da equação (4.3).

$$I_B = h \times W \times R \quad (4.2)$$

onde:

$I_B$  – Intensidade de Byram (kW/m)

$h$  – Poder calorífico (kJ/kg)

$W$  – Carga de combustível (kg/m<sup>2</sup>)

$R$  – Velocidade de propagação (m/s)

$$L_f = 258 \times I_B^{2,17} \quad (4.3)$$

$$I_B = \left( \frac{L_f}{258} \right)^{\frac{1}{2,17}} \quad (4.4)$$

onde:

$I_B$  – Intensidade de Byram (kW/m)

$L_f$  – Comprimento de chama (m)

Como foi já referido anteriormente, estes ensaios foram gravados por câmaras colocadas em zona frontal e lateral. Começámos por colocar uma carga de 2 kg/m<sup>2</sup> na mesa de queima e fizemos uma aspersão de cinco minutos tendo o fogo parado mal chegou à linha de água. De seguida reduzimos o tempo de aspersão para um minuto e as chamas passaram a linha de água queimando todo o combustível. Fomos então repetindo o processo de forma iterativa até encontrar o mínimo de tempo de aspersão necessário para que se desse a extinção do fogo. Quando encontrado esse valor mínimo, repetimos o ensaio para esse tempo de aspersão e para o tempo imediatamente antes em que as chamas consumiam todo o leito de combustível. Estas duas repetições serviam para confirmação dos resultados. Após os

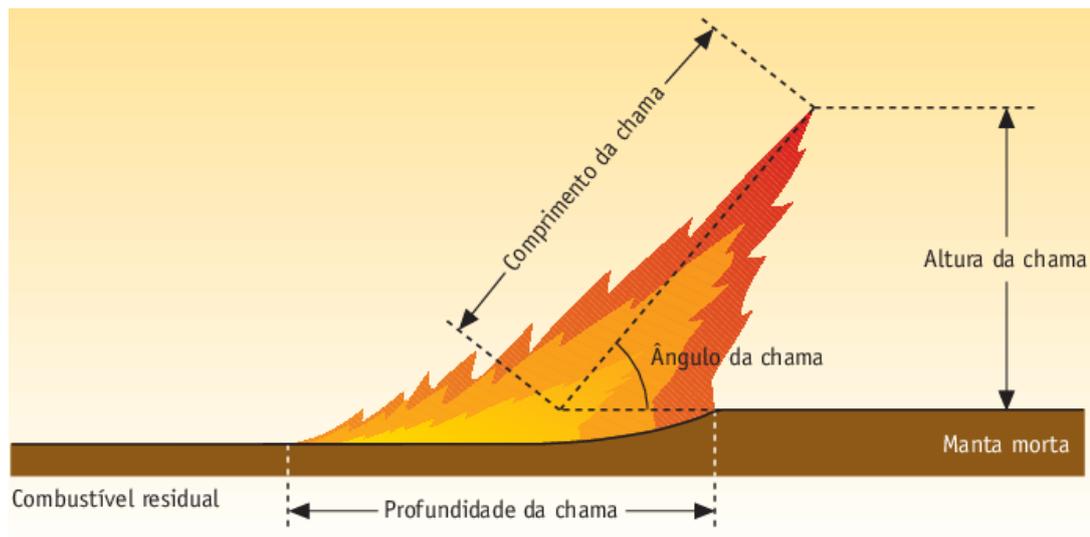
ensaios para a carga de 2 kg/m<sup>2</sup>, repetimos o mesmo processo para as cargas de 3 kg/m<sup>2</sup> e de 4 kg/m<sup>2</sup> obtendo os valores limite para o tempo de aspersão presentes na Tabela 4.3.

**Tabela 4.3.** Tempo mínimo de aspersão para que a propagação das chamas se extinga.

$W$ (kg/m <sup>2</sup> )	$t$ (min)	$V_{H_2O}$ (L)	Observações
2	1,00	3,06	Ardeu tudo
2	1,25	3,83	Extinção
3	1,25	3,83	Ardeu tudo
3	1,50	4,59	Extinção
4	2,50	7,65	Ardeu tudo
4	2,75	8,42	Extinção

Para uma carga de combustível de 2 kg/m<sup>2</sup>, observámos que o tempo mínimo de aspersão necessário para que as chamas se extinguíssem foi de 1,25 minutos com o fogo a passar a linha de humidificação em apenas 0,35 m. Com uma carga de 3 kg/m<sup>2</sup> é necessária uma pré-humidificação de 1,50 minutos para que o fogo se extinga após passar a linha de humidificação em cerca de 0,75 m. Para uma carga de 4 kg/m<sup>2</sup> é necessária uma aspersão de 2,75 minutos, dando-se a extinção das chamas a aproximadamente 0,15 m após a linha de humidificação.

Após os ensaios, foi realizada uma análise às gravações dos mesmos. Os vídeos obtidos com a câmara RGB colocada na lateral, foram divididos em *frames* de cinco em cinco segundos com o auxílio do programa *Free Video to JPG Converter*<sup>®</sup> [14]. Através de uma análise *frame a frame* foram registados em Excel<sup>®</sup> os valores da distância percorrida pelo fogo e das dimensões de chama, representadas na Figura 4.14, ao logo de cada ensaio.

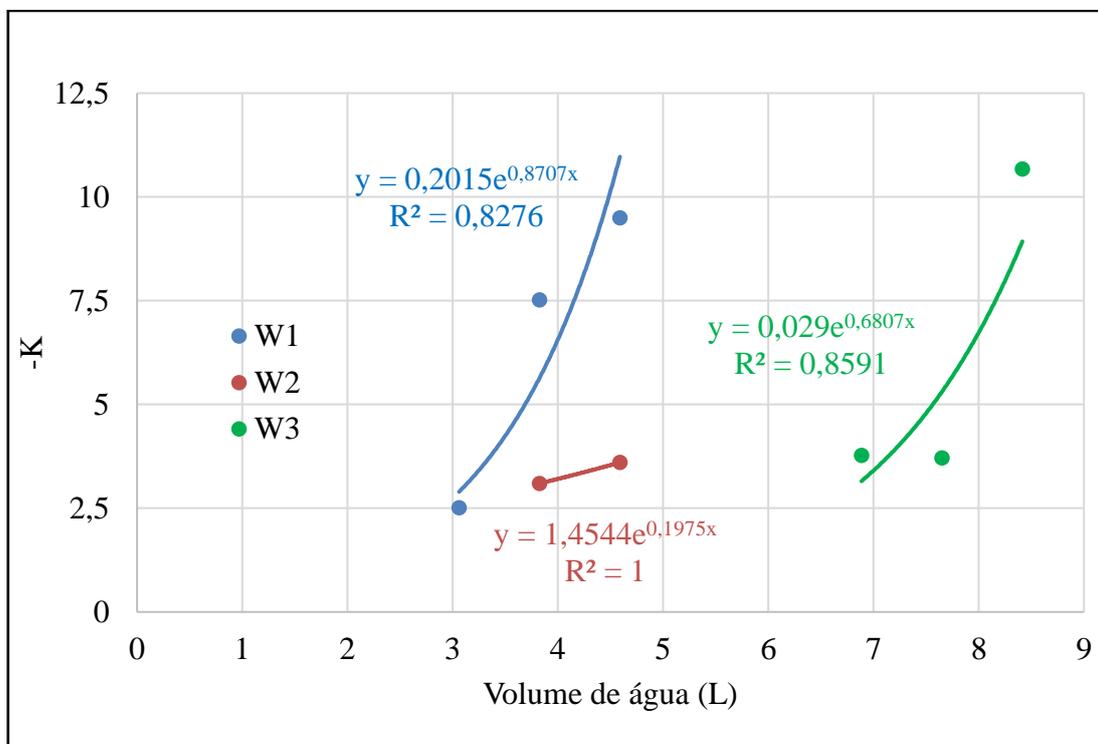


**Figura 4.14.** Características geométricas de uma frente de chama (adaptada de [15]).

Com os valores do comprimento de chama, medidos de cinco em cinco segundos, determinámos a intensidade de Byram através da equação (4.4). Estes resultados permitiram-nos traçar gráficos de dispersão da intensidade da frente de chamas em função da distância percorrida pelo fogo em cada ensaio. Através dos gráficos foi possível distinguir três fases distintas no comportamento do fogo. Após a ignição e alguns segundos de adaptação, as chamas mantêm as suas dimensões praticamente constantes até atingir a área pré-humidificada. Ao chegar à linha de humidificação o fogo sofre um decréscimo de intensidade e tenta adaptar-se às novas condições dos combustíveis molhados. Nos casos em que não se dá a extinção das chamas, estas passam a uma nova fase, muito parecida com a primeira em que as suas dimensões variam muito pouco, mas com intensidades muito mais reduzidas. Foi possível também verificar que, na segunda fase, a variação de intensidade de Byram em função da distância se aproximava de uma função exponencial. Assim, traçámos uma linha de tendência exponencial para cada ensaio e registámos os valores da constante no expoente que nos permite comparar o decréscimo de intensidade.

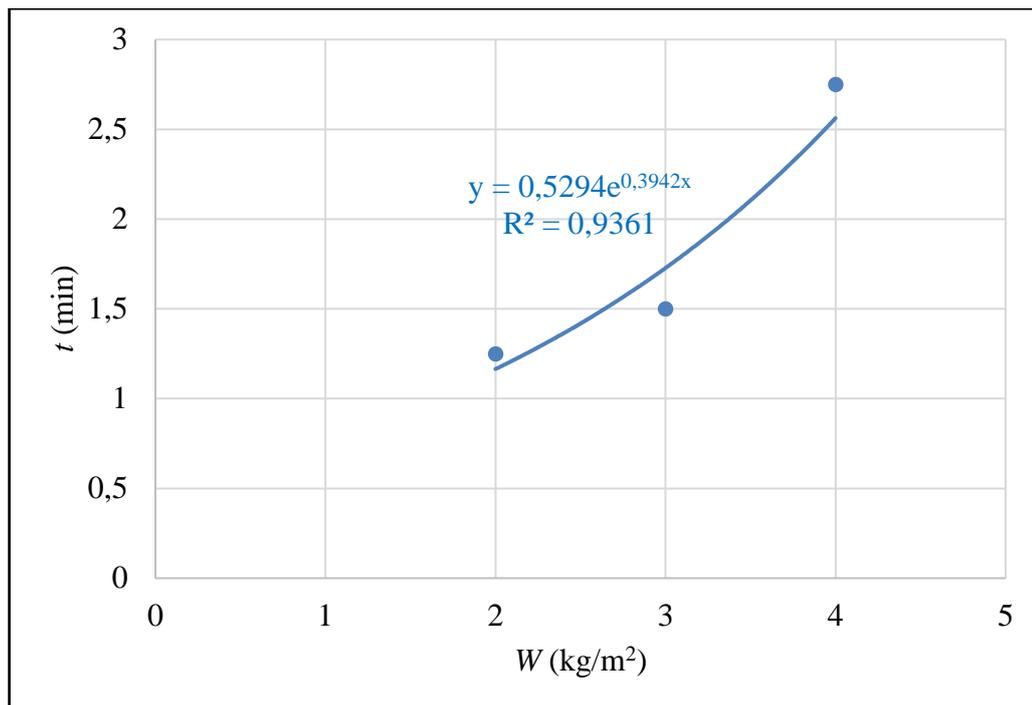
Na Figura 4.15 podemos ver o simétrico da constante em expoente na linha de tendência dos ensaios de queima em função do volume de água utilizado em cada ensaio. Este gráfico permite-nos concluir que, à medida que aumentamos o volume de água utilizado na pré-humidificação, o que se traduz na prática num maior tempo de aspersão, a taxa de redução da intensidade de Byram aumenta exponencialmente. A variação do decréscimo dessa intensidade para a carga W1 e W3 são muito parecidas, ainda que os volumes de água sejam diferentes. Para a carga W2, por falta de dados, não é possível validar um crescimento

exponencial da diminuição da intensidade de Byram. No entanto, é expectável que, caso tivessem sido obtidos mais dados, a linha de tendência se aproximasse das obtidas para os restantes casos.



**Figura 4.15.** Constante no expoente da linha de tendência que traduz a diminuição da intensidade de chama em função do volume de água utilizada na pré humidificação.

Com base nos dados da Tabela 4.3, foi criado um gráfico que nos permita identificar facilmente o tempo de pré-humidificação necessário para que ocorra extinção das chamas em função da carga de combustíveis. Tal como mostra a Figura 4.16, o tempo de aspersão necessário em função da carga de combustíveis aproxima-se de uma variação exponencial, aumentando apenas 0,25 minutos quando passamos de 2 kg/m<sup>2</sup> para 3 kg/m<sup>2</sup> e aumentado em 1,25 minutos quando passamos a ter uma carga de 4 kg/m<sup>2</sup>.



**Figura 4.16.** Tempo de aspersão necessário, a 3 bar, para que haja extinção das chamas em função da carga de combustível.

#### 4.4. Ensaio 4 – Ensaio de campo

Como já foi anteriormente referido, os ensaios de campo tiveram como objetivo a validação dos ensaios de queima realizados em laboratório e com uma aspersão manual.

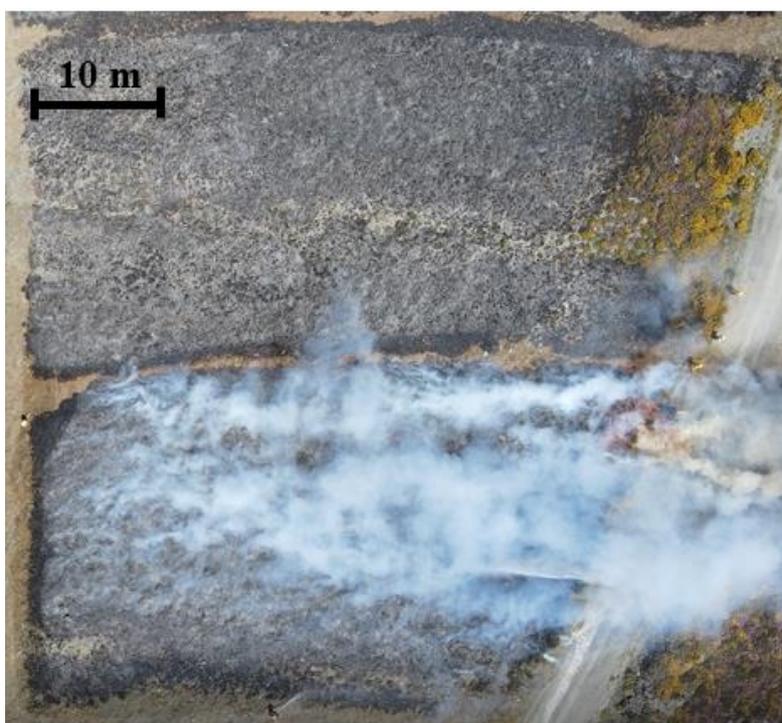
À semelhança do Ensaio 3, a análise deste ensaio também foi efetuada através das filmagens pelas câmaras RGB. Antes de dar início aos ensaios foram montadas estações meteorológicas que nos permitiram medir e registar as condições com que iríamos estar a realizar os ensaios. Para além disso, foi também determinada a carga de combustíveis em cada parcela bem como a sua humidade.

O primeiro ensaio foi realizado às 12:45 h do dia 11/05/2022, na parcela 03 onde foi registada uma carga de combustível de 1,08 kg/m<sup>2</sup>. Durante este ensaio, foram registadas temperaturas na ordem dos 22,5 °C e vento de sul-sudoeste com velocidade média de 7,3 km/h e rajadas de 10 km/h. No fim da pré-humidificação foi ainda medido o alcance máximo que atingiu, de aproximadamente 20 m.

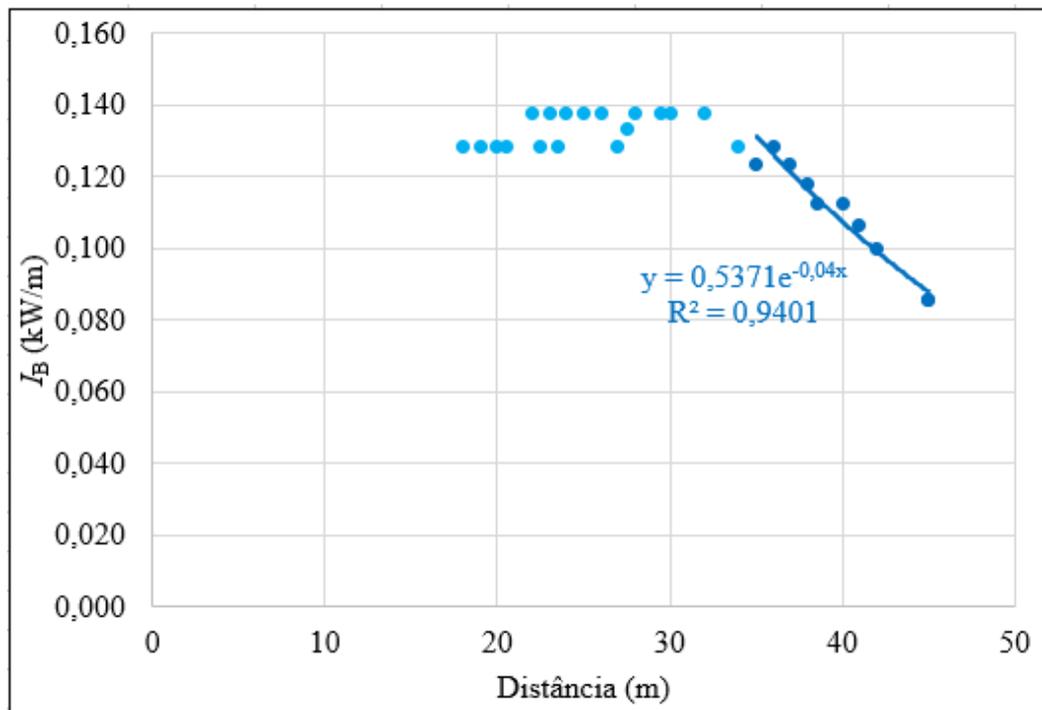
O segundo ensaio foi realizado às 13:30 h do mesmo dia, na parcela 04 com uma carga de combustível de 1,00 kg/m<sup>2</sup>. Aquando da execução deste ensaio foram registadas temperaturas na ordem dos 23 °C e vento de sul-sudoeste com velocidade média de 13,5

km/h e rajadas na ordem de 18 km/h. Para este ensaio não foi possível registrar o alcance máximo do aspersor uma vez que este foi acionado quando o fogo já estava demasiado perto.

Na Figura 4.17 é possível ver as parcelas ardidas em ambos os ensaios. Como podemos verificar, na parte superior da imagem vemos que na parcela referente ao primeiro ensaio o fogo não consumiu todo o leito de combustível. Este acabou por se extinguir quando se encontrava a uma distância do aspersor de 10 m. Tendo em conta as condições meteorológicas apresentadas, nomeadamente o vento com uma baixa velocidade, este foi um resultado expectável e que permitiu validar os ensaios de queima realizados em laboratório. Por outro lado, na parte inferior da imagem, vemos a parcela do segundo ensaio que ardeu completamente. Esta menor eficiência comprovada no segundo ensaio teve duas grandes causas associadas: a primeira de todas foi o facto de não ter sido feita uma pré-humidificação antes de ser feita a ignição; a segunda, à semelhança do que aconteceu nos ensaios de distribuição de água, foi a alteração das condições meteorológicas entre ensaios. Se no primeiro ensaio o vento era pouco significativo, neste segundo ensaio a velocidade do vento e as fortes rajadas de sul-sudoeste levaram a que uma grande parte da água aspergida fosse projetada para trás do aspersor. Ainda assim, apesar das condições adversas e dos resultados menos positivos, foi possível verificar uma diminuição da intensidade de Byram de quase 40 %, tal como mostra o gráfico da Figura 4.18.



**Figura 4.17.** Parcelas 03 e 04 ardidas.



**Figura 4.18.** Intensidade de Byram em função da distância para a parcela 04.



## 5. CONCLUSÃO

Os principais objetivos deste trabalho eram analisar a eficiência de sistemas de aspersão no combate a incêndios rurais na interface urbano-florestal e perceber de que forma estes sistemas ativos poderiam levar a que as obrigações legais no que diz respeito à distância da largura das faixas de gestão de combustíveis pudessem vir a ser alteradas.

Após este trabalho, podemos concluir que:

- O sistema de aspersão em estudo tem uma boa eficiência na diminuição da intensidade da frente de chama, podendo levar à sua extinção se for acionado no tempo necessário, tendo em conta a carga de combustível em causa e as condições meteorológicas adequadas;
- A eficiência destes sistemas de aspersão é severamente afetada pelas condições meteorológicas, nomeadamente a velocidade e a ocorrência de rajadas de vento;
- Os aspersores *Super Cris* apresentam uma distribuição de água bastante homogénea o que permite uma boa pré-humidificação do leito de combustíveis;
- Os aspersores permitem atingir um alcance na ordem dos 20 m, praticamente metade da distância legal para a largura de faixas de gestão de combustível em torno de habitações isoladas;
- No caso de montagens em série de vários aspersores, deve optar-se por tubos rígidos e com o mínimo de curvas de forma a reduzir as perdas de carga entre cada aspersor.

Com base nestas conclusões, recomenda-se a utilização de sistemas de aspersão como mecanismo ativo de combate a incêndios rurais para a proteção de habitações e aglomerados populacionais isolados pela eficiência na redução da intensidade do fogo comprovada neste trabalho. Recomenda-se ainda a utilização de reservatórios de água e fontes energéticas independentes, como geradores elétricos, para o abastecimento destes sistemas de proteção, uma vez que, em caso de incêndio é muito provável a quebra na rede elétrica e de abastecimento de água.

Em relação às obrigações legais, concluiu-se que, apesar de ser possível a redução da distância da largura das faixas de gestão de combustíveis com a utilização deste sistema, é

recomendável que se mantenham as obrigações já em vigor devido à grande influência que as condições meteorológicas podem ter na eficiência dos aspersores. Ainda sobre as obrigações legais, concluiu-se que estes sistemas de aspersão são indicados para utilizar como medidas de autoproteção à passagem do fogo e à contenção de possíveis fontes de ignição, a que estão sujeitas novas construções ou ampliações de edifícios a menos de 50 m de territórios florestais.

---

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] ADAI, “Melhores práticas para a proteção de infraestruturas face a incêndios rurais”, projeto House-Refuge (2020). Acedido a 7 de julho de 2022 em: <https://adai.pt/houserefuge/sobre/>.
- [2] Decreto-Lei n.º 82/2021 de 13 de outubro. “Diário da República nº199/2021, Série I”. Acedido a 7 de julho de 2022 em: <https://dre.pt/dre/detalhe/decreto-lei/82-2021-172745163>.
- [3] ANEPC, programas “Aldeia Segura” e “Pessoas Seguras” (2017). Acedido a 7 de julho de 2022 em: <https://aldeiasseguras.pt/programa/>.
- [4] Turismo de Portugal, “Aldeia Segura Pessoas Seguras | Safe Village Safe People” (2017). Acedido a 5 de julho de 2022 em : <http://business.turismodeportugal.pt/pt/Gerir/gestao-riscos/Paginas/aldeia-segura-pessoas-seguras.aspx>.
- [5] Pinto, C. (2020), “Sistema tecnológico de proteção contra incêndios rurais testado no concelho de Arganil”. Notícia da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra. Acedido a 7 de julho de 2022 em: [https://www.uc.pt/drh/rm/pconcurais/pessoal\\_docente/A\\_decorrer/ctuc/article?key=a-60d1756741](https://www.uc.pt/drh/rm/pconcurais/pessoal_docente/A_decorrer/ctuc/article?key=a-60d1756741).
- [6] Ambiente e saúde, Notícias (2020), Município de Arganil, “Concelho de Arganil recebe sistema piloto de proteção de povoações contra o risco de incêndio florestal”. Acedido a 7 de julho de 2022 em: <https://www.cm-arganil.pt/noticias/concelho-de-arganil-recebe-sistema-piloto-de-protecao-de-povoacoes-contr-o-risco-de-incendio-florestal/>.
- [7] Frontline (2022), “About Frontline”. Acedido a 7 de julho de 2022 em: <https://www.frontlinewildfire.com/about-frontline-wildfire-defense/>.
- [8] Frontline (2020), “Introducing the Frontline Wildfire Defense System”. Acedido a 7 de julho de 2022 em: <https://www.frontlinewildfire.com/>.
- [9] Frontline (2020), “Protect Your Home Today”. Acedido a 7 de julho de 2022 em: <https://www.frontlinewildfire.com/wildfire-news-and-resources/impacts-wildfires/>.
- [10] Buckrail (2018), “Frontline Wildfire Defense System saved residence from raging Roosevelt Fire”. Acedido a 7 de julho de 2022 em: <https://buckrail.com/wildfire-defense-system-saved-residence-from-raging-roosevelt-fire/>.
- [11] Prilux (1992), “Aspersor Canhão Super Cris”. Acedido a 7 de julho de 2022 em: <https://www.prilux.pt/pt/produto-detalhe/260/aspersor-canhao-super-cris>.
- [12] OriginLab Corporation (1992) “Origin and OriginPro”. Acedido a 7 de julho de 2022 em: <https://www.originlab.com/origin> (accessed Jul. 07, 2022).
- [13] Weather Underground, “Local Weather Forecast, News and Conditions”. Acedido a 7 de julho de 2022 em: <https://www.wunderground.com/>.

- [14] Free video to JPG converter, converter videos em frames. Acedido a 11 de julho de 2022 em: <https://www.dvdvideosoft.com/pt/products/dvd/Free-Video-to-JPG-Converter.htm>.
- [15] Fernandes, P. (2001), “Características geométricas de uma frente de chamas”. Artigo sobre “A avaliação do comportamento do fogo no combate a incêndios florestais”. Acedido a 11 de julho de 2022 em: [https://www.researchgate.net/figure/Caracteristicas-geometricas-de-uma-frente-de-chamas\\_fig1\\_232092326](https://www.researchgate.net/figure/Caracteristicas-geometricas-de-uma-frente-de-chamas_fig1_232092326).