



UNIVERSIDADE DE
COIMBRA

Bernardo Meneses Barradas

**OTIMIZAÇÃO DO USO DE SISTEMAS ASPERSÃO
A ÁGUA PARA AUTOPROTEÇÃO DE ELEMENTOS
EXPOSTOS A INCÊNDIOS RURAIS**

Dissertação no âmbito do Mestrado em Engenharia Mecânica na especialidade de Energia e Ambiente orientada pelo 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 2023

1 2



9 0

FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE
COIMBRA

Otimização do uso de sistemas aspersão a água para autoproteção de elementos expostos a incêndios rurais

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

Optimization of the use of water sprinkler systems for self-protection of elements exposed to rural fires

Autor

Bernardo Meneses Barradas

Orientadores

José Carlos Miranda Góis

Miguel Abrantes de Figueiredo Bernardo de Almeida

Júri

Presidente Professor Doutor José Manuel Baranda Moreira da Silva
Ribeiro
Professor Auxiliar da Universidade de Coimbra

Vogais Professor Doutor Miguel Abrantes de Figueiredo Bernardo de Almeida
Professor Auxiliar convidado

Professor Doutor Tiago Daniel Almeida Rodrigues
Investigador ADAI

Colaboração Institucional



Associação para o Desenvolvimento
da Aerodinâmica Industrial

Coimbra, julho, 2023

“Estuda filho! Quando fores grande, quero que sejas Engenheiro!”

Com muita saudade,

A minha mãe, Paula Cristina Neves Meneses

Agradecimentos

A realização desta dissertação de Mestrado não seria possível sem estarem reunidos um conjunto de pessoas e instituições, que contribuíram para a sua conclusão, não podendo eu deixar de agradecer.

Primeiramente, gostaria de expressar a minha profunda gratidão aos meus familiares, que sempre estiveram do meu lado, tanto a nível pessoal como académico. Nos momentos mais difíceis da minha vida, as palavras de carinho, a paciência e a compreensão foram fundamentais para que com determinação e motivação concluísse esta etapa.

Não posso deixar de mencionar a Universidade de Coimbra, que foi muito especial desde o primeiro dia. Expresso também um grande agradecimento ao Departamento de Engenharia Mecânica da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, e aos seus docentes e não-docentes, que vão deixar muitas saudades.

Gostaria igualmente de expressar o reconhecimento aos meus orientadores Professor Doutor José Góis e Professor Doutor Miguel Almeida, cuja sabedoria e os feedbacks foram incalculáveis e indispensáveis para a conclusão deste projeto. As orientações, críticas construtivas e horas de dedicação à minha dissertação foram fundamentais para o desenvolvimento das minhas habilitações académicas.

Agradecimento muito especial à Associação para o Desenvolvimento da Aerodinâmica Industrial, na pessoa do seu presidente, Professor Doutor Manuel Carlos Gameiro.

Por fim, agradeço ao técnico João Carvalho e à Doutora Hafsa Lamsaf pela paciência e pela vontade de ajudar sempre que foi necessário nos ensaios laboratoriais.

Em suma, estes agradecimentos são uma forma de reconhecimento a todos aqueles que tiveram um papel importante nesta jornada académica que, por agora, termina. Espero que com estas palavras tenha conseguido transmitir o quão grato sou pelo apoio e contribuições oferecidas. Sem vocês, seria impossível. Obrigado do fundo do meu coração!

Para a minha falecida mãe, Paula Cristina Meneses.

Para o meu pai, Luís Paulo Barradas,
meu irmão, Renato Saúl Barradas,
e minha namorada, Marta Cristina Palaio.

Resumo

Os incêndios rurais têm se tornado cada vez mais frequentes e intensos devido ao agravamento das condições climáticas e à falta de gestão adequada das áreas florestais. Os estudos do comportamento do fogo têm ganho um grande interesse, de forma a melhorar as medidas ativas e passivas no combate aos incêndios. Neste contexto, os sistemas de aspersão revelam-se altamente eficientes no controlo dos incêndios, uma vez que aumentam a humidade na vegetação e são capazes de reduzir a intensidade e a velocidade de propagação do incêndio.

O estudo e investigação realizados nesta dissertação visaram a melhoria da eficiência dos aspersores contínuos e de impacto, por meio da humedificação da área da vegetação antes da chegada do incêndio.

O procedimento experimental dividiu-se em 4 partes: o primeiro ensaio teve como objetivo estudar a redução de intensidade da chama e a redução da velocidade de propagação, com diferentes tempos de espera entre a finalização da humedificação e a ignição do fogo. Nos ensaios com aspersão contínua e descontínua de água foi avaliada quantitativamente a capacidade de absorção e adsorção do combustível florestal para os dois diferentes aspersores. E, o último ensaio validou os resultados anteriormente obtidos.

Os resultados deste estudo mostraram que o tempo de espera entre o final da humedificação e a ignição do fogo tem efeitos na redução da intensidade de chama e na velocidade de propagação da frente de chama. Revelaram também que num terreno herbáceo cuidado não é necessário uma aspersão contínua; enquanto para um terreno herbáceo abandonado se recomenda a prática da aspersão contínua ou o aumento do caudal de água aspergida.

Palavras-chave: Incêndios Rurais, Aspersores Contínuos e Aspersores de Impacto, Pré-humidificação da vegetação, Capacidade de absorção e adsorção, Teor de humidade em base húmida.

Abstract

Rural fires have become increasingly more frequent and intense due to worsening weather conditions and the lack of proper management of forest areas. The fire behavior studies have gained a huge interest, in order to improve the active and passive measures taken during firefighting. Likewise, sprinkler systems demonstrated a highly efficient in controlling fires, thanks to the increase of the humidity in the vegetation and the reduction of the intensity and speed of fire propagation.

The study and investigation carried out in the present dissertation aimed to the improvement of the efficiency of continuous and impact sprinklers, through humidification of the vegetation before the arrival of the fire.

The experimental procedure was divided into 4 parts: the first test, based on the reduction of the flame intensity and propagation speed, with different waiting times between the completion of humidification and the ignition of the fire. In tests with continuous and discontinuous water sprinkling the absorption and adsorption capacity of forest fuel was quantitatively evaluated for the two different sprinklers. And the last test, was for the validation of the previous obtained results.

The results revealed that the wait time between the completion of humidification and the ignition of the fire effected in reducing the intensity of the flame and the speed of propagation of the flame front. They also revealed that in a well-kept herbaceous land, continuous sprinkling is not necessary; while for an abandoned herbaceous land, the practice of continuous sprinkling or increasing the flow of sprinkled water is recommended.

Keywords: Rural Fires, Continuous Sprinklers and Impact Sprinklers, Pre-wetting of vegetation, Absorption and adsorption capacity, Moisture content on a wet basis.

ÍNDICE

Índice de Equações	ix
Índice de Figuras.....	xi
Índice de Tabelas	xiii
Simbologia e Siglas.....	xv
Simbologia.....	xv
Siglas.....	xvi
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Enquadramento.....	1
1.2. Objetivos e estrutura	4
2. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	5
2.1. Ensaios para medição da redução de intensidade e da velocidade de propagação da frente de chama	7
2.2. Ensaios para medição da capacidade de absorção e adsorção de água pela biomassa	13
2.2.1. Ensaios com aspersão contínua de água	14
2.2.2. Ensaios com aspersão descontínua de água	17
2.2.3. Ensaios de queima para validação do algoritmo ótimo de aspersão descontínua	21
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	25
3.1. Resultados dos ensaios para medição da redução de intensidade e da velocidade de propagação da frente de chama.....	25
3.1.1. Análise da redução de intensidade da chama com o aumento do intervalo de tempo entre o final da aspersão e a ignição da frente de fogo.....	26
3.1.2. Análise da redução de velocidade de propagação da frente de fogo com o aumento do intervalo de tempo entre o final da aspersão e a ignição.....	30
3.2. Apresentação e discussão dos resultados da capacidade de absorção e adsorção de água pela biomassa.....	33
3.2.1. Resultados dos ensaios com aspersão contínua de água.....	33
3.2.2. Resultados dos ensaios com aspersão descontínua de água.....	41
3.2.3. Resultados dos ensaios de queima para validação do algoritmo ótimo de aspersão descontínua	54
4. CONCLUSÃO	57
4.1. Trabalhos Futuros	59
5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	61

ÍNDICE DE EQUAÇÕES

Equação 2.1 – Equação do teor de humidade em base seca.....	10
Equação 2.2 – Equação da massa total de combustível	11
Equação 3.1 – Equação usada para a intensidade da chama	26
Equação 3.2 – Equação da redução da intensidade da chama ao longo do tempo	27
Equação 3.3 – Equação da velocidade de propagação do fogo.....	30
Equação 3.4 – Equação da adimensionalização da velocidade de propagação do fogo	30
Equação 3.5 – Equação do teor de humidade em base húmida ao longo do ensaio 2	34
Equação 3.6 – Equação do teor de humidade em base húmida ao longo dos ensaios.....	41
Equação 3.7 – Equação da massa de palha seca.....	42
Equação 3.8 – Equação da massa de água presente no combustível	42

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 – Humidificação do leito de combustível mato	8
Figura 2.2 – Mesa de queima horizontal preparada para a realização do ensaio	9
Figura 2.3 – Moisture Analyzer AnD ML-50, usada para medição da humidade em base húmida	10
Figura 2.4 – Esquema do procedimento experimental do ensaio de queima	11
Figura 2.5 – Visualização da intensidade de frente de chama: antes do contacto com a área de humidificação (a) na área de humidificação (b).....	12
Figura 2.6 – Área unitária com o combustível florestal.....	15
Figura 2.7 – Caixa de alumínio com o combustível florestal.....	16
Figura 2.8 – Estufa de secagem	16
Figura 2.9 – Figura do cilindro metálico com palha.....	17
Figura 2.10 – Procedimento adotado no Ensaio 3	20
Figura 2.11 – Ensaio preparado para a realização do ensaio.....	22
Figura 2.12 – Ignição do ensaio 4.....	23
Figura 2.13 – Ensaio 4, sem que a palha tivesse sido consumida no interior do cilindro metálico	23
Figura 3.1 – Redução da intensidade da chama ao longo do tempo.....	28
Figura 3.2 – Imagem obtida através da câmara IR frontal	29
Figura 3.3 – Imagem obtida através da câmara IR superior.....	31
Figura 3.4 – Velocidade de propagação adimensionalizada do fogo	32
Figura 3.5 – Figura com todos os ensaios realizados no ensaio 2	34
Figura 3.6 – Taxa de evaporação nos ensaios de aspersão descontínua	36
Figura 3.7 – Evolução do teor de humidade em base húmida (%) dos ensaios 1 e 2	37
Figura 3.8 – Evolução do teor de humidade em base húmida (%) dos ensaios 3 e 4	39
Figura 3.9 – Evolução do teor de humidade em base húmida (%) dos ensaios 5 e 6.....	40
Figura 3.10 – Evolução da massa e do teor de humidade em base húmida dos ensaios P(10.10.10).....	43
Figura 3.11 – Evolução da massa e do teor de humidade em base húmida dos ensaios P(5.5.5)	45
Figura 3.12 – Evolução da massa e do teor de humidade em base húmida dos ensaios P(5.5.10)	47
Figura 3.13 – Evolução da massa e do teor de humidade em base húmida dos ensaios P(5.10.10)	49

Figura 3.14 – Evolução da massa e do teor de humidade em base húmida dos ensaios P(10.5.10).....	50
Figura 3.15 – Evolução da massa e do teor de humidade em base húmida dos ensaios P(30)	52

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1 – Parâmetros dos ensaios realizados	6
Tabela 2.2 – Parâmetros fixos e variáveis do ensaio 1	9
Tabela 2.3 – Descrição dos seis ensaios realizados na aspersão contínua de água	15
Tabela 2.4 – Combinações da sequência de ensaios.....	19
Tabela 3.1 – Teor de humidade em base húmida e seca registado e massa de combustível a usar na A_t	25
Tabela 3.2 – Tabela da intensidade da chama para cada percentagem de intensidade	27
Tabela 3.3 – Valores dos pesos obtidos nos ensaios 1 e 2	36
Tabela 3.4 – Valores dos pesos obtidos nos ensaios 3 e 4	38
Tabela 3.5 – Valores dos pesos obtidos nos ensaios 5 e 6	40
Tabela 3.6 – Massa total de palha necessária para cada ensaio.....	41
Tabela 3.7 – Equações das linhas de tendência e suas fiabilidades do teor de humidade em base húmida	53
Tabela 3.8 – Quantidade mínima de água aspergida para que a propagação das chamas se extinga	55

SIMBOLOGIA E SIGLAS

Simbologia

$\%_{final}$ – Percentagem do comprimento de chama no instante final

$\%_{inicial}$ – Percentagem do comprimento de chama no instante inicial

A_t – Área total de combustível

V_0 – Velocidade de controlo

V_{adim} – Velocidade adimensional

c_c – Carga de combustível

d_{final} – Distância final

$d_{inicial}$ – Distância inicial

t_{final} – Instante final

$t_{inicial}$ – Instante inicial

$FMC(WB)$ – Teor de humidade em base húmida

$FMC(WB)_{inicial}$ – Teor de humidade em base húmida no início do ensaio

g – Gramas

H_2O – Quantidade de água presente no combustível

I_c – Intensidade da chama

kg – Quilogramas

kW - Quilowatts

L – Comprimento da chama

L – Litros

m – Metros

$Massa_{final}$ – Massa da palha quando aspergida com água

$Massa_{inicial}$ – Massa inicial da palha

$Massa_{molhada}$ – Massa inicial da amostra antes de ser colocada na estufa de secagem

$Massa_{seca}$ – Massa final da amostra após permanecer 24 horas na estufa de secagem

mf_{bh} – Teor de humidade de base húmida

mf_{bs} – Teor de humidade de base seca

min – Minutos

mL – Mililitros

m_t – Massa total de combustível

Palha seca – Quantidade de palha sem humidade

R – Redução percentual do comprimento de chama ao longo do tempo

s – Segundos

V – Velocidade de propagação na amostra sujeita a aspersão de água

Siglas

ADAI – Associação para o Desenvolvimento de Aerodinâmica Industrial (Coimbra)

DEM – Departamento de Engenharia Mecânica

FCTUC – Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra

LAI – Laboratório de Aerodinâmica Industrial (Coimbra)

LEIF – Laboratório de Estudos sobre Incêndios Florestais (Lousã)

1. INTRODUÇÃO

1.1. Enquadramento

Em Portugal, à semelhança de outros países, a ocorrência de incêndios florestais é causada por vários fatores, onde se incluem as ações humanas (negligentes ou intencionais), a falta de gestão adequada das áreas florestais, o despovoamento das zonas rurais, o agravamento das condições climáticas, o relevo acidentado, bem como a ineficácia na intervenção ao foco inicial do incêndio e a influência de meios de combate. Todos estes elementos verificados em simultâneo podem explicar a intensidade e a dimensão que, muitas vezes, alguns incêndios atingem. Neste sentido, mostram-se pertinentes as palavras de LUÍS RIBEIRO ao referir que “[e]m Portugal (...) encontramos de forma geral regiões com vegetação abundante e com um clima propício ao desenvolvimento de incêndios, com invernos chuvosos e verões usualmente quentes e secos. Existe uma série de outros fatores que agrava este problema, entre os quais citamos as alterações climáticas e demográficas. (...) o abandono das práticas agrícolas e da manutenção de espaços rurais (...)” [1].

Na última década, os incêndios rurais/florestais têm atingido de forma catastrófica várias regiões do Mundo. Recorde-se, recentemente, os incêndios florestais que devastaram uma vasta área do Canadá, cujas partículas atingiram várias cidades dos Estados Unidos da América, chegaram à Noruega e em pequena quantidade a Portugal. Em 2022, a região de Málaga, em Espanha, foi atingida por um enorme incêndio florestal que devastou mais de 5 mil hectares e cerca de 3 mil pessoas foram retiradas de suas casas. Em 2018, a região Oriental da Ática, a sudeste de Atenas, na Grécia, foi atingida por um enorme incêndio rural que vitimou 93 pessoas e provocou 187 feridos. Também em 2018, um enorme incêndio florestal na Suécia destruiu uma área equivalente a 37 500 campos de futebol. Em Portugal, em junho de 2017 o incêndio florestal de Pedrógão Grande, considerado o maior incêndio de sempre em Portugal, devastou uma área de 53 mil hectares de zonas rurais e florestais, causou a morte de 66 pessoas e destruiu mais de 500 casas de habitação [2-6].

Pela destruição causada, pela perda de vidas humanas, danos em habitações e outros recursos naturais, os impactos económicos, ambientais e sociais são comparáveis a eventos como terremotos, tsunamis, tornados e vulcões.

Se não for possível travar a propagação do incêndio importa salvar as pessoas e tentar proteger os bens patrimoniais de maior valor, como são as habitações. De maneira a prevenir e atuar contra esta destruição de habitações isoladas ou em aglomerados rurais é necessário implementar medidas de proteção eficazes contra a aproximação e combate do incêndio.

No âmbito destas medidas de proteção contra incêndio destacam-se dois grupos: as medidas passivas “(...) de prevenção que devem estar permanentemente presentes.”; e, as medidas ativas “(...) de combate que devem funcionar em caso de incêndio. Em qualquer dos casos, as medidas de autoproteção podem ser ditas de natureza física ou humana. Dentro das medidas de natureza física, pode salientar-se os materiais de construção e os equipamentos de extinção do fogo, enquanto as de natureza humana são os procedimentos de prevenção, a organização da segurança e o plano de emergência.” [7].

As três principais medidas de proteção, que são complementares entre si, são: a implementação de práticas construtivas, usando materiais e soluções arquitetónicas mais eficientes; a gestão eficiente de combustíveis no espaço envolvente – a este respeito, veja-se o Decreto-Lei n.º 82/2021, de 13 de outubro, que refere ser obrigatória a criação de faixas de gestão de combustíveis de 50 metros em torno de habitações isoladas e de 100 metros em torno de aglomerados populacionais, entre outras medidas [8]; e, por fim, a instalação de sistemas de autoproteção, como é o caso dos sistemas de aspersores de água, que pela sua importância serão alvo de estudo.

Os sistemas de aspersores de água assumem um papel crucial no controlo e combate ao incêndio. São caracterizados por fornecerem uma resposta rápida na extinção do incêndio, através do aumento da humidade na vegetação, redução da intensidade da chama e da velocidade de propagação da mesma [9–11].

Para a compreensão do efeito da aspersão de água em materiais sólidos combustíveis importa precisar o significado de dois conceitos: a absorção e a adsorção – que desempenham um papel importante na análise do comportamento do fogo e na propagação do incêndio.

A absorção, ocorre quando um líquido (no caso de estudo, a água) é assimilado pela estrutura do combustível, elevando o seu teor de humidade e, conseqüentemente,

dificultando a ignição ou diminuição da propagação das chamas, podendo levar à sua extinção.

A adsorção “(...) é uma propriedade dos materiais, que no caso descreve a habilidade destes em concentrar na sua superfície determinadas substâncias existentes em fluidos líquidos ou gasosos, possibilitando a separação dos componentes desses fluidos. Uma vez que os componentes são adsorvidos, concentram-se sobre a superfície externa, quanto maior for esta superfície externa por unidade de massa sólida, tanto mais favorável será a capacidade de adsorção.” [12].

Com objetivo de estudar como travar a propagação de incêndios têm sido realizados, ao longo dos últimos anos, diversos trabalhos de investigação pela Associação para o Desenvolvimento da Aerodinâmica Industrial (ADAI), instituição pioneira na investigação, desenvolvimento, formação e prestação de serviços. Tais trabalhos de investigação têm contribuído de forma significativa para o estudo e avanço de conhecimentos nesta área [11, 13-17].

Pese embora estejam a ser desenvolvidos inúmeros projetos nestas temáticas, há uma grande lacuna no que toca à investigação sobre a capacidade dos materiais em absorver e/ou adsorver água por aspersão, nomeadamente a velocidade com que a água precisa de ser absorvida/adsorvida para poder travar a propagação da frente de chamas.

Assim, no sentido de colmatar esta lacuna na pesquisa e investigação, torna-se necessário realizar estudos mais aprofundados sobre a absorção e adsorção de água para diferentes tipos de vegetação em cenário de incêndio.

Com esta explanação de conhecimentos mais profunda é possível olhar de uma perspetiva mais consciente, atenta e crítica no que concerne à elaboração de estratégias de comando de incêndios, ao melhoramento na prevenção de incêndios florestais e à tentativa de desenvolvimento de medidas passivas e ativas mais eficazes no controlo da combustão.

1.2. Objetivos e estrutura

Os incêndios florestais, além dos danos materiais e perdas de vidas humanas que podem provocar devido à sua elevada velocidade de propagação, podem provocar grandes impactos no meio ambiente, podendo destruir ecossistemas naturais e conseqüentemente, alterar totalmente uma paisagem verde.

Esta dissertação tem por objetivo principal analisar o efeito da aspersão de água na redução da intensidade e velocidade de propagação da frente de chama. Centrando-se também a investigação na velocidade de absorção e adsorção de água pelos combustíveis florestais e na influência sobre a intensidade do fogo, através da medida do tempo de antecipação da aspersão de água sobre os combustíveis florestais para poder reduzir ou extinguir a propagação da frente de chama.

Assim, são objetivos específicos deste trabalho:

- Determinação da percentagem de redução de intensidade da chama na área húmida do leito de combustível por efeito da aspersão de água, assim como da redução de velocidade de propagação da frente de chamas;
- Determinação da capacidade de absorção e adsorção de diferentes tipos de combustíveis florestais, em função do tempo de aspersão de água e quantidade de água aspergida por unidade de área de combustível florestal;
- Tratamento dos dados obtidos nos ensaios experimentais, de modo a obter um algoritmo capaz de prever a aspersão de água mais eficiente, expressa pela menor quantidade de água necessária para que se extinga o incêndio.

A estrutura desta dissertação está dividida em quatro capítulos:

Neste primeiro capítulo é feita uma breve introdução, com um enquadramento do tema abordado e quais são os objetivos desta dissertação.

O segundo capítulo, referir-se-á ao procedimento experimental de cada ensaio, estando sempre presente a metodologia usada em todos os ensaios e todos os parâmetros medidos.

No terceiro capítulo é feita a análise dos ensaios realizados, bem como a demonstração dos resultados e discussão dos mesmos.

Por último, no quarto capítulo, fundem-se as conclusões de todos os ensaios efetuados.

2. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Este capítulo descreve de forma detalhada as amostras e os procedimentos experimentais para estudar a capacidade de absorção e adsorção da biomassa florestal, explicitando passo a passo as técnicas e mecanismos adotados, bem como a descrição dos materiais utilizados, as áreas de ensaio selecionadas, a carga de combustível empregue, a quantidade de água aspergida, o teor de humidade em base húmida do combustível e outros dados que se revelam imprescindíveis para cada um dos ensaios.

De forma a tornar mais perceptível e explícito o método adotado, optou-se por subdividir o segundo capítulo em duas partes distintas.

Num primeiro subcapítulo é descrito o procedimento experimental aplicado nos ensaios para medição da redução de intensidade e da velocidade de propagação da frente de chamas.

No segundo subcapítulo são descritas as três diferentes sequências de ensaios realizadas: na primeira sequência é feita uma aspersão contínua de água, na segunda sequência é feita uma aspersão descontínua de água e na terceira sequência, em que se faz a queima da biomassa florestal após a aspersão descontínua, serve para validação do algoritmo ótimo.

A Tabela 2.1 representa todos os parâmetros fixos e variáveis dos ensaios realizados neste trabalho:

<i>Nº</i> <i>Ensaio</i>	<i>Parâmetros fixos</i>			<i>Parâmetros variáveis</i>		
	<i>Biomassa</i>	<i>Área do leito (m²)</i>		<i>Volume de água aspergida</i>	<i>Tempo de aspersão</i>	<i>Carga do combustível (kg/m²)</i>
		<i>Seca</i>	<i>Molhada</i>			
<i>Ensaio 1</i>	Mato	1,875	1,875	4,21 L	1,38 min	3
<i>Ensaio 2</i>	Mato	-	1	1,15 L	1,38 min	3
	Palha			1,30 L	1,38 min	
<i>Ensaio 3</i>	Palha	-	0,0314	10 mL	1 s	0,6
				20 mL		1,5
<i>Ensaio 4</i>	Palha	0,353	0,0314	10 mL	1 s	0,6
				20 mL		1,5

Tabela 2.1 – Parâmetros dos ensaios realizados

Nos ensaios de queima de biomassa é a determinação da percentagem de redução da intensidade das chamas através da altura de chama e da redução de velocidade de propagação da frente de chamas, na área húmida do leito de combustível, em função do intervalo de tempo que medeia entre o término da aspersão de água e a ignição da frente de fogo.

Nos ensaios para determinação da capacidade de absorção e adsorção da biomassa foram usados dois tipos de biomassa, o mato e a palha. A finalidade da realização destes ensaios foi determinar a quantidade de água mínima necessária para que se extinga o incêndio.

2.1. Ensaios para medição da redução de intensidade e da velocidade de propagação da frente de chama

No Laboratório de Estudos sobre Incêndios Florestais (LEIF-Lousã), a amostra característica da biomassa mato consistiu em folhagem fina morta de pinheiro-bravo (*Pinus pinaster*), espécies arbustivas como urze (*Calluna vulgaris*), carqueja (*Pterospartum tridentatum*) e tojo (*Ulex europaeus*). Este tipo de mato é uma fonte de combustível altamente inflamável e facilitadora de uma rápida propagação do fogo. [18]

A metodologia adotada foi baseada no trabalho de Pedro Luís Marques Rodrigues [11], tendo sido efetuadas algumas modificações com o objetivo de garantir maior rigor nos resultados experimentais, designadamente na quantidade de água necessária para extinguir o fogo em cada cenário estudado.

Nos ensaios realizados por Pedro Rodrigues para a queima de mato, conforme a amostra atrás descrita, durante a aspersão da água sobre a camada de combustível foi mantida uma pressão no circuito hidráulico de 3 bar, a carga de combustível foi de 3 kg/m² e a área total de leito combustível foi de 3,75 m². Nesses ensaios as variáveis foram a quantidade de água aspergida e o tempo que durou a aspersão.

Com base nos resultados obtidos por Pedro Rodrigues conclui-se que 4,59 L de água aspergida é suficiente para o fogo se extinguir, enquanto 3,83 L é insuficiente para que se extinga. Portanto, a quantidade de água a aspergir nos ensaios deverá estar compreendida dentro deste intervalo [11]. Importa referir que neste mesmo trabalho para aspergir 3,83 L de água foi preciso 1,25 min e para 4,59 L foi preciso 1,50 min. Assim, o tempo de aspersão necessário para os ensaios estará compreendido neste intervalo de tempo. Escolheu-se o valor médio dos limites, 4,21 L de água aspergida durante 1,38 minutos.

A aspersão de água no leito de combustível foi realizada manualmente usando o espalhador de um regador comum, procurando simular as condições de um aspersor real (Aspersor Canhão Super Cris, do fornecedor Prilux) operado a uma pressão de 3 bar, como já referido anteriormente [11].

A aspersão de água por meio do espalhador do regador permitiu um controlo mais preciso da quantidade de água aspergida sobre o leito de combustível e do tempo de aspergimento. E, considerando a aspersão de água em metade do leito de combustível (mantendo-se uma parte inalterável e outra sujeita a aspersão), retirou-se também a vantagem de formar um gradiente de humidade. Condições estas que permitiram retirar um valor de referência/controlo da velocidade e intensidade de propagação da frente de chama.

Nos ensaios de queima foi utilizada uma mesa horizontal, com $2,7 \times 1,8 \text{ m}^2$, o que resulta numa área total de $4,86 \text{ m}^2$. No entanto, apenas foi usado combustível numa área de $2,5 \times 1,5 \text{ m}^2$, correspondendo a uma área de combustível de $3,75 \text{ m}^2$.

A humedificação foi feita em apenas metade do leito de combustível, conforme mostra a Figura 2.1, perfazendo uma área de humedificação de $1,875 \text{ m}^2$, correspondente ao produto de $1,25 \times 1,5 \text{ m}^2$.



Figura 2.1 – Humidificação do leito de combustível mato

Para os ensaios experimentais realizados foram considerados quatro intervalos de tempo entre o fim da aspersão de água e a ignição do fogo: 0 minutos, 5 minutos, 10 minutos e 15 minutos. No caso de 0 minutos, a ignição do fogo é iniciada simultaneamente com o instante de finalização da aspersão de água.

Para cada intervalo de tempo foram realizados 2 ensaios semelhantes, de modo a perceber as variações de resultados decorrentes do procedimento experimental.

A Tabela 2.2 mostra de forma simplificada os parâmetros fixos e variáveis do ensaio 1:

<i>Parâmetros fixos</i>				<i>Parâmetros variáveis</i>				
<i>Biomassa</i>	<i>Área do leito (m²)</i>		<i>Volume de água aspergido (L)</i>	<i>Tempo de aspersão (min)</i>	<i>Tempo entre o início da ignição e o término da aspersão (min)</i>			
	<i>Controlo</i>	<i>Molhada</i>						
<i>Mato</i>	1,875	1,875	4,21	1,38	0	5	10	15

Tabela 2.2 – Parâmetros fixos e variáveis do ensaio 1

Na Figura 2.2 encontra-se a mesa utilizada nos ensaios de queima e a distribuição do combustível. A placa axadrezada, com quadrados de 25 cm, colocada como fundo de captação das filmagens, destina-se a facilitar a medição da intensidade da frente de chamas.



Figura 2.2 – Mesa de queima horizontal preparada para a realização do ensaio

Para calcular a massa total de combustível, é necessário no início de cada ensaio medir o teor de humidade em base húmida. Para tal foi usada uma balança de medição de humidade, Moisture Analyzer AnD ML-50 (Figura 2.3).

O procedimento experimental para medir o teor de humidade em base húmida passa por colher uma pequena amostra de cada espécie de biomassa incluída no combustível, perfazendo sensivelmente uma massa total de 1 g. À medida que a temperatura no interior da campânula da balança aumenta a amostra vai perdendo massa sendo a monitorização em contínuo. Quando a massa estabiliza num valor constante, obtém-se o teor de humidade em base húmida, mf_{bh} .



Figura 2.3 – Moisture Analyzer AnD ML-50, usada para medição da humidade em base húmida

A partir do teor de humidade em base húmida (mf_{bh}) é possível calcular o teor de humidade em base seca (mf_{bs}), através da Equação 2.1.

$$mf_{bs} = \frac{100 \times mf_{bh}}{100 - mf_{bh}}$$

Equação 2.1 – Equação do teor de humidade em base seca

Em que:

mf_{bh} – Teor de humidade de base húmida, em %

mf_{bs} – Teor de humidade de base seca, em %

Tendo o teor de humidade em base seca calcula-se a massa total de combustível (m_t), através da Equação 2.2.

$$m_t = c_c \times A_t + c_c \times A_t \times \frac{mf_{bs}}{100}$$

Equação 2.2 – Equação da massa total de combustível

Em que:

c_c – Carga de combustível, em kg/m^2

A_t – Área total de combustível, em m^2

mf_{bs} – Teor de humidade em base seca, em %

m_t – Massa total de combustível, kg

Para registar os ensaios foram utilizadas quatro câmaras (Figura 2.4): duas câmaras RGB, uma câmara frontal e outra lateral (que capturam imagens em cores visíveis), e duas câmaras de infravermelhos, IR, uma câmara frontal e outra superior (que capturam imagens na faixa do espectro infravermelho e permitem visualizar o calor emitido pelo fogo e respetiva temperatura em tempo real).

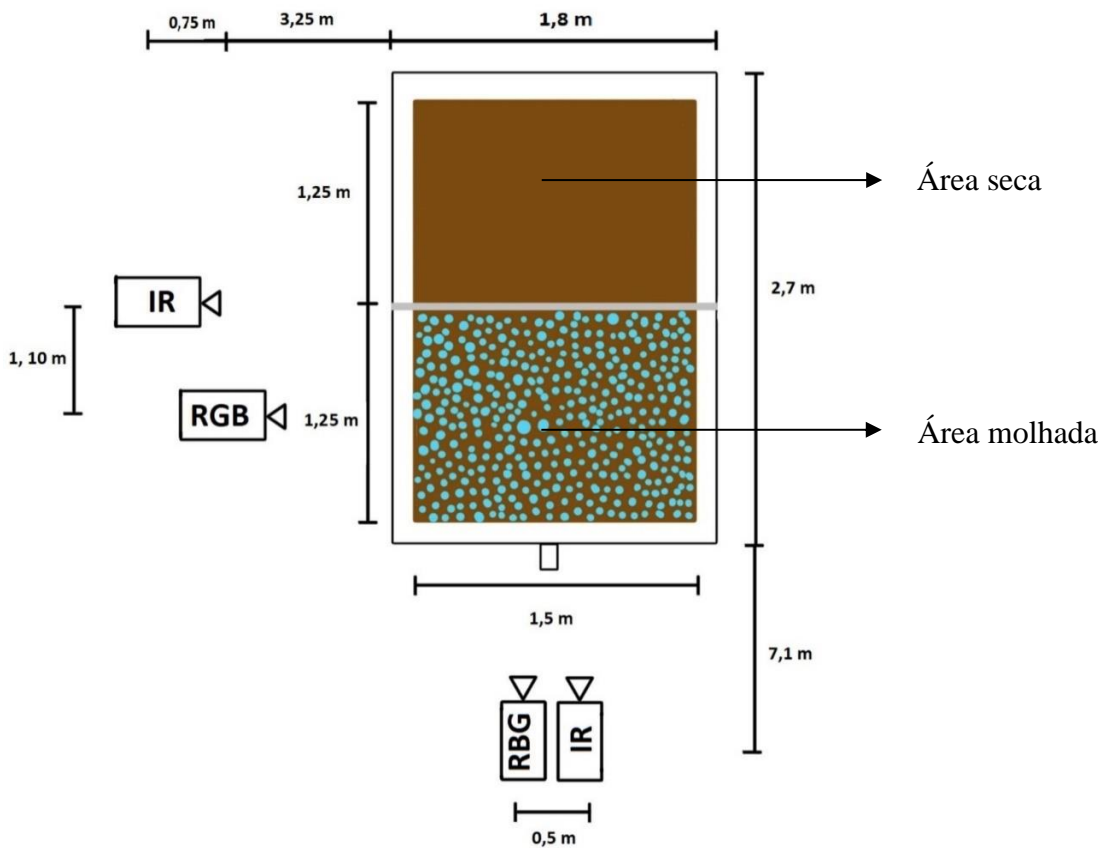


Figura 2.4 – Esquema do procedimento experimental do ensaio de queima

A Figura 2.5, permite evidenciar a diferença significativa na intensidade da frente de chama em duas fases distintas: antes (a) e após entrar em contacto com a área de humedificação (b), sendo clara a influência da humidade no atenuar da intensidade da frente de chamas.



Figura 2.5 – Visualização da intensidade de frente de chama: antes do contacto com a área de humedificação (a) na área de humedificação (b)

2.2. Ensaios para medição da capacidade de absorção e adsorção de água pela biomassa

Os ensaios para medição da capacidade de absorção e adsorção de água pela biomassa foram divididos em três tipos de procedimentos experimentais:

Procedimento 1: aspersão de água durante um determinado período e recolha de pequenas amostras de palha e mato (durante e após a aspersão de água) para determinação do teor de humidade em base húmida, avaliando assim a capacidade de absorção e adsorção de água pela palha e mato em função da quantidade de água aspergida por unidade de área e tempo.

Procedimento 2: aspersão de água realizada numa pequena área do leito com palha (exclusivamente) em intervalos sucessivos de tempo e pesagem da palha após cada período de aspersão de água. Este procedimento é utilizado para determinar a capacidade de absorção e adsorção de água pela palha, por efeito descontínuo de aspersão de água, ou seja, procurar ajustar a quantidade de água por unidade de área e de tempo à capacidade de resposta da palha para absorver e adsorver água.

Procedimento 3: destina-se a validar o procedimento precedente. O procedimento é em tudo semelhante ao ensaio anterior, mas compreende também a ignição de uma frente de fogo na palha para determinar a influência da aspersão de água na extinção das chamas.

2.2.1. Ensaios com aspersão contínua de água

Durante a realização desta sequência experimental foram realizados seis ensaios no Laboratório de Estudos sobre Incêndios Florestais (LEIF - Lousã).

Para a sequência experimental foram utilizados dois tipos de combustível florestal, com o objetivo de recriar as condições de campo da melhor forma possível.

Nos ensaios ímpares (1,3,5) a biomassa utilizada foi mato, composto por várias espécies arbustivas, onde se incluem urze (*Calluna vulgaris*), carqueja (*Pterospartum tridentatum*) e tojo (*Ulex europaeus*). Nos ensaios pares (2,4,6) foi utilizada palha.

Nos ensaios 1 e 2 foi aplicado o mesmo valor de aspersão de água, de 1,15 L/m² e de tempo, 85 segundos, ao mato e à palha simulando o aspersor de água real (Aspersor Canhão Super Cris, do fornecedor Prilux);

Nos ensaios 3 e 4 a aspersão de água foi de 1,15 L/m², mas realizada num tempo mais curto, 60 segundos, visando comparar a capacidade de resposta da palha e do mato para a absorção e adsorção em função do tempo de aspersão;

Por fim, nos ensaios 5 e 6 aplicou-se uma aspersão de água de 1,30 L/m² durante 85 segundos, visando avaliar a influência da variação da quantidade de água aspergida para um mesmo tempo na capacidade de resposta destes dois tipos de biomassa para a absorção e adsorção de água.

Para cada ensaio retirou-se um total de oito pequenas amostras.

A primeira amostra foi retirada no instante 0, permitindo obter o teor de humidade em base húmida, antes da aspersão de água.

A segunda amostra foi recolhida após 10 segundos, para avaliar as mudanças no teor de humidade.

A terceira amostra foi retirada após 30 segundos, a quarta após 60 segundos, e a quinta amostra retirada após 85 segundos, momento em que deixou de haver aspersão de água na maioria dos ensaios.

Após a aspersão de água, as recolhas de amostras serviram para medir a perda de humidade, ao longo do tempo, impondo-se recolhas com intervalos de 5 minutos. Para este último propósito foram retiradas mais três amostras: após 385 segundos, após 685 segundos e após 985 segundos.

A Tabela 2.3 descreve os seis ensaios realizados, com valores impostos para as duas variáveis fixadas (quantidade de água aspergida por unidade de área e tempo da aspersão) e os tempos de recolha de amostras para análise.

<i>Nº Ensaio</i>	<i>Biomassa</i>	<i>Volume aspergido (L/m²)</i>	<i>Tempo de aspersão (s)</i>	<i>Instante de recolha de amostra (s)</i>							
<i>Ensaio 1</i>	Mato	1,15	85	0	10	30	60	85	385	685	985
<i>Ensaio 2</i>	Palha										
<i>Ensaio 3</i>	Mato		60								
<i>Ensaio 4</i>	Palha										
<i>Ensaio 5</i>	Mato	1,30	85								
<i>Ensaio 6</i>	Palha										

Tabela 2.3 – Descrição dos seis ensaios realizados na aspersão contínua de água

Como se pode verificar a Figura 2.6 mostra para o caso da palha, a forma de distribuição homogénea do combustível dentro da área unitária de 1 m².



Figura 2.6 – Área unitária com o combustível florestal

Para determinar o teor de humidade em base húmida das amostras recolhidas, foi necessário seguir um processo de pesagem e de secagem. Tais procedimentos envolveram a pesagem da caixa de alumínio vazia (onde eram colocadas as amostras retiradas da área unitária), a pesagem da caixa mais a biomassa quando era colocada sobre o prato da balança (*massa molhada*) e a pesagem após concluído o processo de secagem (*massa seca*).

A Figura 2.7 mostra a dimensão da amostra de biomassa na caixa de alumínio usada nas medições.



Figura 2.7 – Caixa de alumínio com o combustível florestal

Para medição do teor de humidade de cada amostra o tempo de secagem em estufa (Figura 2.8), foi de 24 horas, ao fim do qual se media o peso final, permitindo assim calcular o teor de humidade da biomassa combustível.



Figura 2.8 – Estufa de secagem

2.2.2. Ensaio com aspersão descontínua de água

No Laboratório de Aerodinâmica Industrial (LAI – Coimbra), foram realizados os ensaios de aspersão descontínua de água.

A biomassa combustível usada em todos os ensaios foi palha. A palha foi escolhida devido à superfície porosa, e ser um adsorvente natural.

A palha seca é constituída por uma estrutura fibrosa, de base celulósica, com muitos espaços vazios e uma grande área superficial. A porosidade permite que a palha absorva água com facilidade, facilitando a realização deste tipo de ensaios.

Nestes ensaios usou-se um cilindro metálico com raio de 10 cm o que faz com que tenha uma área total de $0,0314 \text{ m}^2$ (Figura 2.9).



Figura 2.9 – Figura do cilindro metálico com palha

Estes ensaios tiveram como objetivo principal determinar a menor quantidade de água aspergida sobre o leito combustível para que se extinga a propagação da frente de chamas. Para o efeito foram realizadas seis combinações sequenciais de duração da aspersão de água e estabelecidos intervalos entre cada período de aspersão.

Para obter a menor quantidade de água necessária para extinguir a propagação da frente de chamas, numa perspectiva de minimizar o desperdício de água, bem como otimizar o uso de recursos no combate ao incêndio florestal, foram definidas sequências de duração de aspersão de água de 5 e 10 minutos e estabelecidos intervalos entre cada aspersão a variar entre os 5 e 10 minutos.

Os ensaios realizados compreenderam também variações na carga de combustível em palha, com cargas de 600 g/m^2 e 1500 g/m^2 .

O valor de 600 g/m^2 é um valor referência para um terreno de herbáceas gerido, isto é, uma área cuidadosamente gerida e controlada pelo seu proprietário.

O valor de 1500 g/m^2 é utilizado para representar um terreno ao abandono, ou seja, a sua área de vegetação é, geralmente, mais densa e não têm qualquer tipo de exploração.

Variou-se também a quantidade de água aspergida por cada ciclo, tendo-se fixado 10 mL e 20 mL - valores considerados razoáveis para a área de palha definida nos ensaios.

Na Tabela 2.4 são apresentadas as combinações realizadas:

<i>Combinações</i>	<i>1ª Aspersão de água</i>	<i>Tempo de espera entre aspersão</i>	<i>2ª Aspersão de água</i>	<i>Volume de água aspergida (mL) por Carga de combustível (kg/m²)</i>	
				<i>(min)</i>	<i>0,6 kg/m²</i>
<i>P(10.10.10)</i>	10	10	10	10	
				20	
<i>P(5.5.5)</i>	5	5	5	10	
				20	
<i>P(5.10.10)</i>	5	10	10	10	
				20	
<i>P(10.5.10)</i>	10	5	10	10	
				20	
<i>P(5.5.10)</i>	5	5	10	10	
				20	
<i>P(30)</i>	30	-	-	10	
				20	

Tabela 2.4 – Combinações da sequência de ensaios

De modo a reproduzir com estes ensaios aproximadamente o cenário de aspersão de impacto é necessário definir o tempo de ciclo do aspersor, que corresponde ao tempo necessário para que o aspersor complete um ciclo de 180°. Para tal, visualizou-se um vídeo de um ensaio com aspersores de impacto ligado a um circuito hidráulico à pressão de 3 bar, realizado por Pedro Rodrigues, já anteriormente citado, tendo-se medido um tempo de ciclo de 22 segundos [11].

Dá-se início à sequência de ensaios, com a quantidade pré-definida de água (10 mL e 20 mL) a ser aspergida no interior do cilindro metálico de acordo com os tempos definidos na Tabela 2.4.

O ensaio começa com a aspersão de água inicial. Passados 12 segundos (em que ocorre a absorção e adsorção de água) realiza-se uma pesagem da massa do conjunto com água,

utilizando-se uma balança – repetindo-se este procedimento até perfazer o tempo de aspersão de água pré-definido (5 minutos ou 10 minutos).

A Figura 2.10 mostra a metodologia adotada nestes ensaios experimentais:

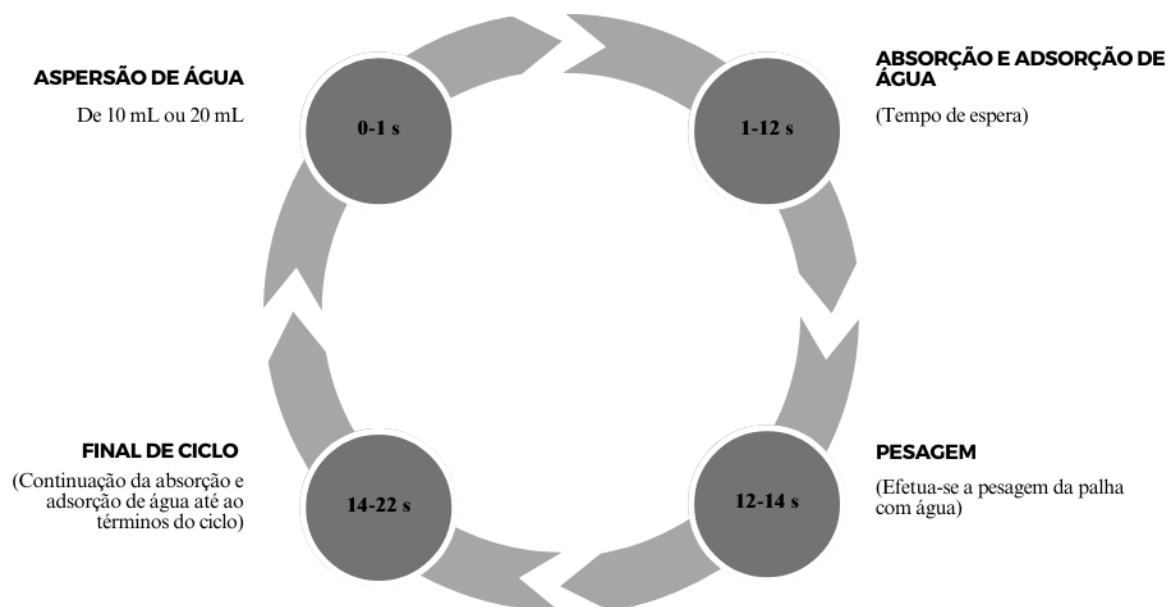


Figura 2.10 – Procedimento adotado no Ensaio 3

O procedimento visa comparar o funcionamento de dois aspersores com o mesmo tempo de ciclo (22 s) e caudais diferentes (10 mL/s e 20 mL/s). De modo a ver a evolução da humidade com o acréscimo de ciclos de aspersão era pesada a massa de palha no final de cada 12 s após o início de cada aspersão.

A diferença obtida entre a massa da última pesagem e a massa inicial determinada na primeira pesagem representa a quantidade de água absorvida e adsorvida pela palha durante o tempo de aspersão de água estabelecido nos ensaios e a que evaporou.

2.2.3. Ensaio de queima para validação do algoritmo ótimo de aspersão descontínua

No Laboratório de Estudos sobre Incêndios Florestais (LEIF-Lousã), foram conduzidos os últimos ensaios realizados neste projeto. A principal finalidade destes ensaios foi validar os resultados obtidos no Ensaio 3.

Para isso, foram mantidas algumas condições e procedimentos experimentais do ensaio anterior, tais como: a carga de combustível florestal de 600 g/m² e 1500 g/m², o tipo de combustível utilizado no ensaio - palha, a quantidade de água aspergida de 10 mL ou 20 mL, e o tempo de ciclo entre cada aspersão de 22 segundos.

Para verificar se a palha seria totalmente consumida pelas chamas optou-se por criar uma chama controlada em volta do cilindro metálico, ao contrário do adotado no ensaio anterior. Caso a palha seja consumida totalmente pelas chamas, significa que a quantidade de água utilizada não foi suficiente para extinguir completamente a chama. Por outro lado, se a palha não for totalmente consumida, pode considerar-se que a aspersão da água foi suficiente para a extinção do fogo.

Esta etapa final dos ensaios experimentais foi crucial para a obtenção do algoritmo de aspersão de água mais eficiente e determinação da menor quantidade de água necessária para extinguir o fogo. Outra componente da etapa final foi determinar o tempo mínimo de aspersão de água sobre a palha capaz de evitar que esta ardesse.

Como se observa na Figura 2.11, foi utilizado um cilindro metálico, com palha no seu interior e palha na sua redondeza. A figura mostra um ensaio antes da sua execução.

Para se entender melhor a figura descrita:

- O raio externo da coroa circular tem 35 cm;
- O raio interno da coroa circular é coincidente com o raio do cilindro e possui uma medida de 10 cm.
- Logo, o raio da coroa circular é de 25 cm.



Figura 2.11 – Ensaio preparado para a realização do ensaio

Antes de iniciar a última sequência de ensaios, foi determinada a quantidade de massa total de combustível necessária para realizar os ensaios. À semelhança dos ensaios anteriores, foi necessário proceder à medição do teor de humidade em base húmida.

Foi medido um teor de humidade da palha de 9,7%.

Considerando a área dentro do cilindro e utilizando a Equação 2.1 e a Equação 2.2, foram obtidos os seguintes valores de massa combustível (palha): 20,9 g para uma carga de combustível de 600 g/m² e, 52,2 g para uma carga de 1500 g/m².

Para a área fora do cilindro, utilizou-se, novamente, a Equação 2.1 e a Equação 2.2 e obteve-se: 234,8 g para a carga de combustível de 600 g/m² e, 587,1 g para a carga de combustível de 1500 g/m².

Após a colocação de toda a massa da palha para a realização do respetivo ensaio, deu-se início à aspersão de água definida (10 mL ou 20 mL) durante o tempo pré-definido. Após o término do tempo de aspersão deu-se início à ignição do fogo, sem que fosse aspergida mais água. A ignição do fogo foi feita na extremidade da coroa circular, conforme mostra a Figura 2.12.



Figura 2.12 – Ignição do ensaio 4

Quando ocorreu a extinção do fogo, e a palha no interior do cilindro metálico não foi consumida, como se pode observar na Figura 2.13, foi realizada a pesagem da palha remanescente. Esta pesagem teve como objetivo determinar a quantidade de massa que não havia sido queimada, mostrando-se essencial para avaliar a eficiência da extinção e a capacidade do algoritmo de aspersão de água em preservar a maior quantidade possível de palha.



Figura 2.13 – Ensaio 4, sem que a palha tivesse sido consumida no interior do cilindro metálico

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados obtidos nos ensaios experimentais. Para o tratamento e apresentação dos principais resultados foi usado o programa **Microsoft Excel**[®]. Para além do uso destas ferramentas, os resultados são acompanhados de uma descrição das principais observações.

São discutidas as dificuldades encontradas em cada experiência, evidenciando as limitações que possam ter interferido nos resultados.

3.1. Resultados dos ensaios para medição da redução de intensidade e da velocidade de propagação da frente de chama

A Tabela 3.1, mostra o valor da massa total de combustível usada em cada ensaio com o respetivo teor de humidade, em base húmida e seca.

<i>Tempo</i>	<i>Teor de Humidade em base húmida (mf_{bh}) (%)</i>	<i>Teor de Humidade em base seca (mf_{bs}) (%)</i>	<i>Massa total de combustível (m_t) (kg)</i>
<i>0 minutos</i>	5,50	5,82	11,905
	5,30	5,60	11,880
<i>5 minutos</i>	11,30	12,74	12,683
	9,40	10,38	12,417
<i>10 minutos</i>	9,00	9,89	12,363
	8,70	9,53	12,322
<i>15 minutos</i>	9,40	10,38	12,417
	9,00	9,89	12,363

Tabela 3.1 – Teor de humidade em base húmida e seca registado e massa de combustível a usar na A_t

3.1.1. Análise da redução de intensidade da chama com o aumento do intervalo de tempo entre o final da aspersão e a ignição da frente de fogo

Para quantificar a variação da intensidade da frente de chama, em função do intervalo de tempo que medeia entre o instante final de aspersão de água e o instante de ignição do fogo, foi necessário avaliar a intensidade da frente de chama e a forma como esta evolui ao longo do tempo.

Segundo BYRAM intensidade da chama é “a taxa de libertação de energia, ou taxa de libertação de calor, por unidade de tempo por unidade de comprimento da frente de chama. Numericamente, é igual ao produto da energia do combustível disponível e a velocidade de propagação. Também é igual ao produto do combustível consumido pelo poder calorífico e pela velocidade de propagação.” [18]. A intensidade de frente de chama é expressa em quilowatt por metro (kW/m).

O cálculo da intensidade da frente de chama (I_c) realizado neste trabalho baseou-se na fórmula de VEGA, *et al.* [19] que é usada para o combustível mato, com um comprimento da chama compreendido entre 1,5 metros e 6,5 metros.

$$I_c = 141,6 \times (L)^{2,03}$$

Equação 3.1 – Equação usada para a intensidade da chama¹

Em que:

I_c – Intensidade da chama, em kW/m

L – Comprimento da chama, em m

Pela análise dos vídeos dos ensaios, através das câmaras frontais IR e RGB, conseguiu observar-se que na primeira parte da mesa, onde não houve humidificação da biomassa, o comprimento da chama permaneceu aproximadamente constante em todos os

¹ A escolha desta equação foi feita tendo em consideração um intervalo mais restrito de valores para garantir uma maior fiabilidade dos resultados observados. Assume-se que as discrepâncias de valores não comprometem a validade geral dos resultados – como é o caso dos valores 30% e 10%.

ensaios realizados. O comprimento da chama foi medido tendo por referência a placa axadrezada que se destina a facilitar a medição da intensidade da frente de chamas.

Para exprimir a intensidade da chama em função do comprimento de chama foi feita a normalização do comprimento da chama em termos percentuais relativamente ao comprimento máximo (Tabela 3.2).

Não havendo ação do vento no ensaio, assumiu-se que a altura da chama é igual ao comprimento da chama.

<i>Percentagem do comprimento da chama (%)</i>	<i>Comprimento da chama (m)</i>	<i>Intensidade da chama (kW/m)</i>
100	3,75	2072
80	3,00	1317
50	1,88	507
30	1,13	180
10	0,38	19

Tabela 3.2 – Tabela da intensidade da chama para cada percentagem de intensidade

A Equação 3.2 foi usada para exprimir a redução percentual da intensidade do fogo ao longo do tempo.

$$R = \left(\frac{\%_{inicial} - \%_{final}}{t_{final} - t_{inicial}} \right)$$

Equação 3.2 – Equação da redução da intensidade da chama ao longo do tempo

Em que:

R – Redução percentual do comprimento da chama ao longo do tempo, em %/s

$\%_{inicial}$ – Percentagem do comprimento de chama no instante inicial, em %

$\%_{final}$ – Percentagem do comprimento de chama no instante final, em %

$t_{inicial}$ – Instante inicial, em s

t_{final} – Instante final, em s

Os resultados obtidos pela aplicação da Equação 3.2 são apresentados na Figura 3.1 e exprimem a redução da intensidade da chama ao longo do tempo, consoante o comprimento

da chama, para diferentes intervalos de tempo entre o fim da aspersão de água e a ignição do fogo.

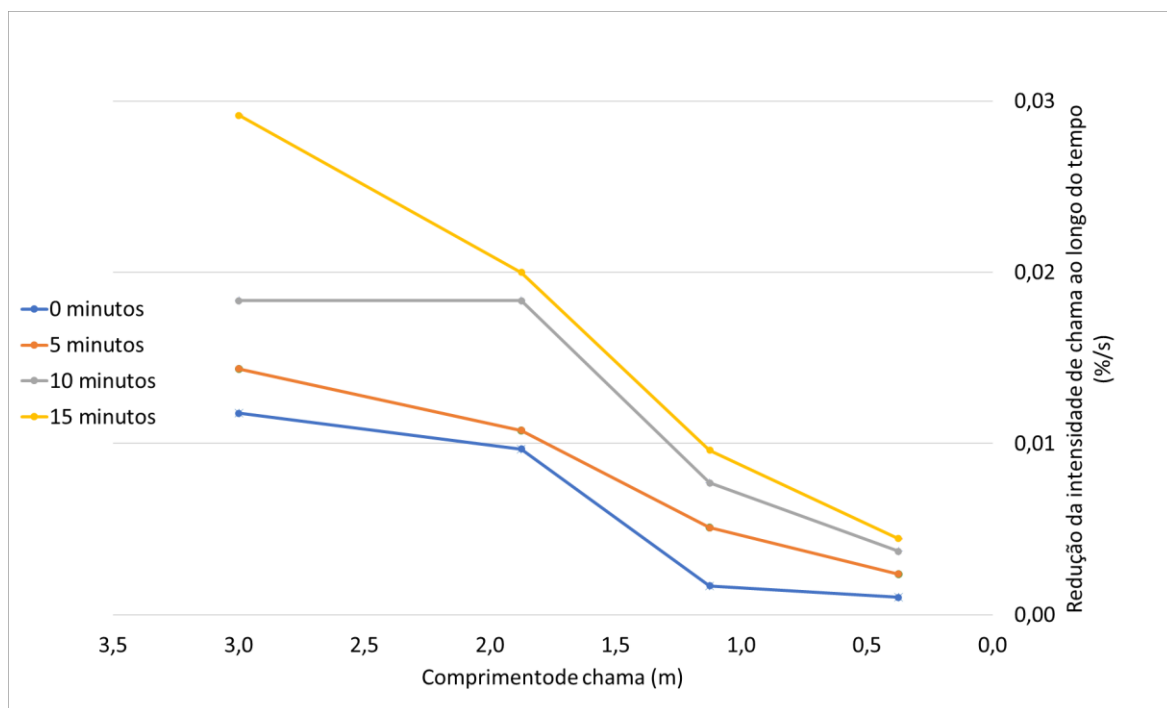


Figura 3.1 – Redução da intensidade da chama ao longo do tempo

A Figura 3.1 tem como variável independente o comprimento da frente de chama (em metros) e, como variável dependente, a percentagem de redução da intensidade de frente de chama ao longo do tempo (em %/s).

A curva azul (0 minutos) corresponde ao ensaio em que o término da aspersão de água ocorreu em simultâneo com a ignição do fogo. Nos restantes ensaios houve acréscimos de 5 minutos entre o fim da aspersão de água e a ignição do fogo.

Ao analisar a figura, verifica-se que há em todos os intervalos de tempo estudados uma diminuição na redução da intensidade de frente de chama ao longo do tempo. Pode-se observar na Figura 3.1, que a única curva que ultrapassa os 2%/s de redução da intensidade da chama é a curva de 15 minutos, no comprimento da chama compreendido entre 3 metros e 1,88 metros.

Através da observação da Figura 3.1, pode concluir-se que o aumento do intervalo de tempo entre o final da aspersão de água e a ignição do fogo se reflete na redução de intensidade do comprimento de chama.

Durante a visualização dos vídeos para caracterização da intensidade da chama (Figura 3.2), identificou-se duas dificuldades significativas. A primeira, pela redução abrupta da intensidade da frente de chama quando entrava em contacto com a área humidificada; e a segunda, a não linearidade da altura da chama, uma vez que se verificavam flutuações significativas.



Figura 3.2 – Imagem obtida através da câmara IR frontal

3.1.2. Análise da redução de velocidade de propagação da frente de fogo com o aumento do intervalo de tempo entre o final da aspersão e a ignição

A velocidade de propagação do fogo, em função do intervalo de tempo entre o final da aspersão de água e a ignição do fogo, é dada pela Equação 3.3:

$$V = \frac{d_{final} - d_{inicial}}{t_{final} - t_{inicial}}$$

Equação 3.3 – Equação da velocidade de propagação do fogo

Em que:

V – Velocidade de propagação do fogo, em m/s

d_{final} – Distância final, em m

$d_{inicial}$ – Distância inicial, em m

t_{final} – Instante final, em s

$t_{inicial}$ – Instante inicial, em s

Para uma análise comparativa de diferentes cenários do comportamento do fogo fez-se a adimensionalização da velocidade de propagação do fogo, ou seja, normaliza-se a velocidade de propagação em relação à velocidade de propagação de controlo, medida no leito de biomassa não atingido pela aspersão de água.

A adimensionalização da velocidade de propagação do fogo é expressa pela seguinte equação:

$$V_{adim} = \frac{V}{V_0}$$

Equação 3.4 – Equação da adimensionalização da velocidade de propagação do fogo

Em que:

V_{adim} – Velocidade adimensional

V – Velocidade de propagação na amostra sujeita a aspersão de água, em m/s

V_0 – Velocidade de controlo, em m/s

Para a visualização da propagação do fogo usou-se as gravações da câmara IR superior (Figura 3.3) e da câmara RGB lateral. Para facilitar a recolha de dados através das gravações de vídeo fixou-se uma determinada distância e mediu-se o tempo que as chamas levaram a percorrer essa mesma distância.

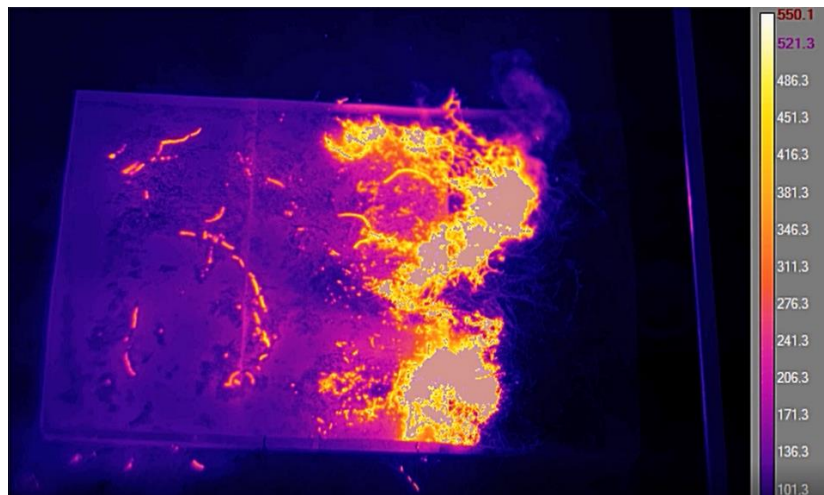


Figura 3.3 – Imagem obtida através da câmara IR superior

Na Figura 3.4 são apresentados os resultados da velocidade adimensionalizada de propagação da frente de fogo no leito de biomassa, que foi sujeito a aspersão de água em função do tempo que mediu entre o final da aspersão de água e a ignição da frente de fogo.

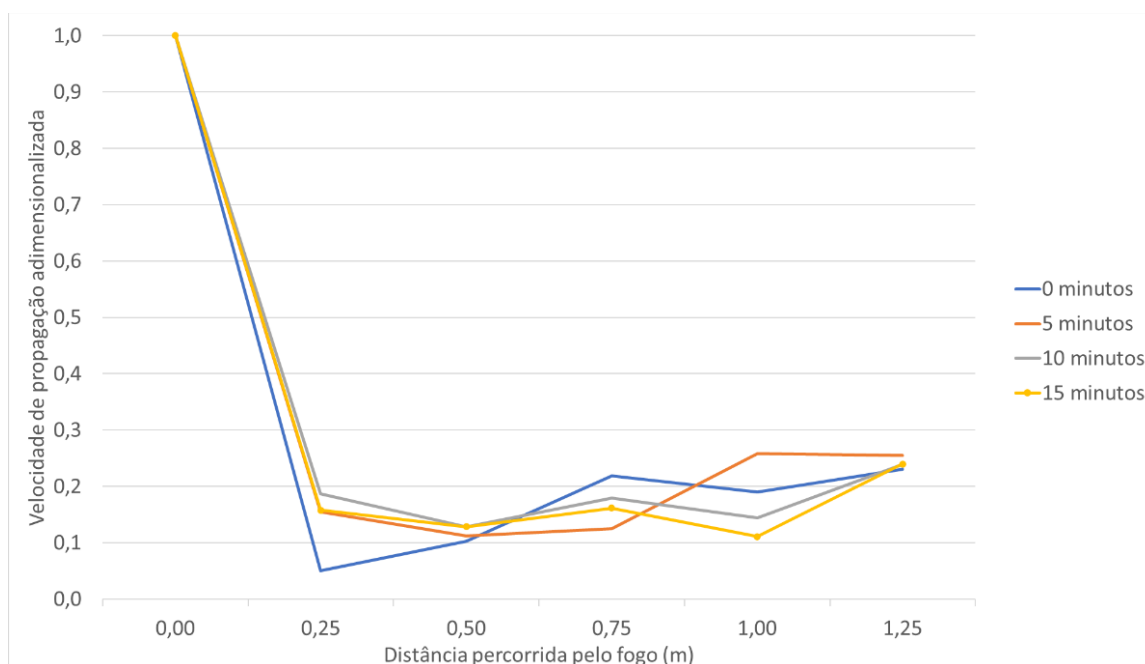


Figura 3.4 – Velocidade de propagação adimensionalizada do fogo

A Figura 3.4 tem como variável independente a distância percorrida na área humidificada (em metros) e, como variável dependente a velocidade de propagação do fogo adimensionalizada de cada ensaio.

A cor azul corresponde a 0 minutos de espera entre o final da aspersão de água e a ignição da frente de fogo.

Pela análise da Figura 3.4, verifica-se uma tendência para a redução da velocidade de propagação com o aumento de intervalo entre o final da aspersão e a ignição da frente de fogo, tomando por referência a propagação da frente de fogo em distâncias compreendidas entre 0,5 e 1 m do início da frente de ignição.

Contudo, esta tendência pode não ser reprodutiva dadas as dificuldades encontradas na observação dos vídeos e na determinação com precisão da distância percorrida pelo fogo na área sujeita a aspersão de água.

3.2. Apresentação e discussão dos resultados da capacidade de absorção e adsorção de água pela biomassa

3.2.1. Resultados dos ensaios com aspersão contínua de água

O cálculo da massa total de combustível, é feito a partir do teor de humidade em base húmida da biomassa, usando uma balança de medida de humidade, a *Moisture Analyzer AnD ML-50*, como mostra a

Figura 2.3.

O teor de humidade em base húmida do mato obtido foi de 6,6%. Considerando uma carga de 3 kg/m², usando a Equação 2.1 e a Equação 2.2, obtém-se uma massa total de combustível de 3,200 kg.

Para a palha, o teor de humidade em base húmida foi de 7,7%, pelo que para uma carga de 1,5 kg/m² se obtém uma massa total de combustível de 1,625 kg.

A análise da capacidade de absorção e adsorção de água pela biomassa foi avaliada em termos da duração da aspersão de água e do caudal de água aspergida em cada ensaio.

Nos ensaios 1 e 2, a duração da aspersão de água foi de 85 segundos e o caudal de água aspergida foi de 1,15 L/m².

Nos ensaios 3 e 4 a duração da aspersão de água foi de 60 segundos, o caudal de água de 1,15 L/m². Pela combinação dos resultados dos ensaios atrás referidos pode-se inferir sobre a influência da duração da aspersão na capacidade de absorção e adsorção de água pela biomassa.

Nos ensaios 5 e 6, a duração da aspersão de água foi de 85 segundos e o caudal de água aumentou para 1,30 L/m².

Para o tratamento dos dados e cálculo do teor de humidade em base húmida, foi necessário obter a massa inicial (massa molhada) e final (massa seca) do combustível florestal, após 24 horas de permanência na estufa de secagem (Figura 2.8).

A partir desses valores, aplicou-se a Equação 3.5 para determinar o teor de humidade em base húmida, expressa da seguinte forma:

$$mf_{(bh)} = \frac{(massa\ molhada - massa\ seca)}{massa\ molhada} \times 100$$

Equação 3.5 – Equação do teor de humidade em base húmida ao longo do ensaio 2

Em que:

$mf_{(bh)}$ – Teor de humidade em base húmida, em %

$massa\ molhada$ – Massa inicial da amostra antes de ser colocada na estufa de secagem, em g

$massa\ seca$ – Massa final da amostra após permanecer 24 horas na estufa de secagem, em g

A Figura 3.5 mostra os resultados do teor de humidade em base húmida da biomassa em função do tempo entre o final da aspersão de água e a recolha da amostra para análise.

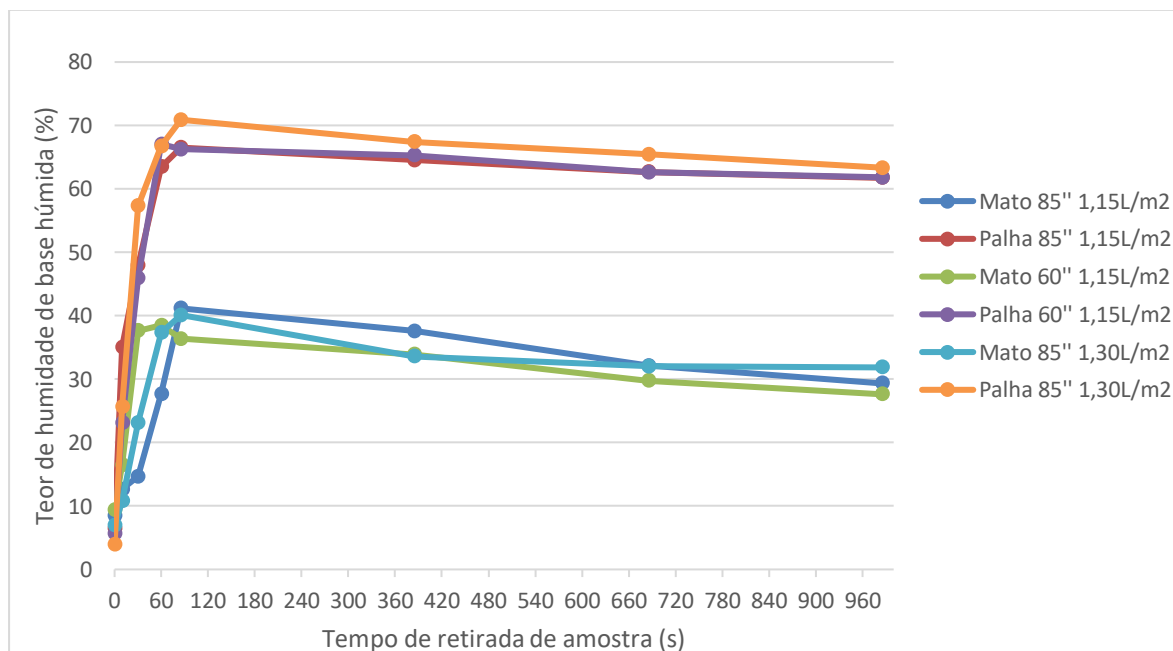


Figura 3.5 – Figura com todos os ensaios realizados no ensaio 2

Tanto a figura anterior como as seguintes (que se analisam de seguida) têm como variável independente o tempo de retirada da amostra (em segundos) e, como variável dependente, o teor de humidade em base húmida (em percentagem).

Os resultados mostram diferenças significativas no teor de humidade e na taxa de evaporação entre o mato e a palha. Essas diferenças podem ser explicadas devido à

porosidade da palha, que tem uma estrutura menos densa que o mato, ou seja, tem mais espaços vazios para absorver água; a superfície de contacto também influencia o resultado, já que a palha tem uma maior superfície do que o mato e, por isso, mais pontos de contacto entre a palha e a água.

Durante estes ensaios surgiram dificuldades relacionadas com: 1) a retirada de amostras num curto intervalo de tempo, por exemplo, 20 segundos. Sendo um tempo muito curto é gerador de erros de reprodutibilidade da amostra; 2) a retirada da amostra durante a aspersão de água, o que pode levar à recolha de amostras em áreas onde ocorreu uma aspersão excessiva de água ou, pelo contrário, em áreas onde a aspersão não tinha ainda ocorrido; 3) a perda de humidade durante a recolha da amostra e o transporte até à sua colocação na estufa para o processo de secagem.

3.2.1.1. Taxa de evaporação dos ensaios de aspersão contínua de água

A taxa de evaporação é a velocidade com que a evaporação da água ocorre num determinado tempo e é influenciada por vários fatores, para além da área de superfície exposta, a temperatura e a humidade relativa do ar também são condições importantes.

Os ensaios foram realizados todos na mesma manhã. Nessa manhã registaram-se temperaturas dentro do LEIF – Lousã a rondar os 26°C e uma humidade relativa de ar a rondar os 49%.

Na Figura 3.6 podemos ver as linhas de tendência dos pontos de valor do teor de humidade em base húmida após a aspersão de água. O declive das linhas de tendência dá o valor da taxa de evaporação da biomassa florestal. Os declives das linhas de tendências do mato são, em módulo, superiores aos declives das linhas de tendência da palha. Significando isso que a taxa de evaporação do mato é maior do que a taxa de evaporação da palha.

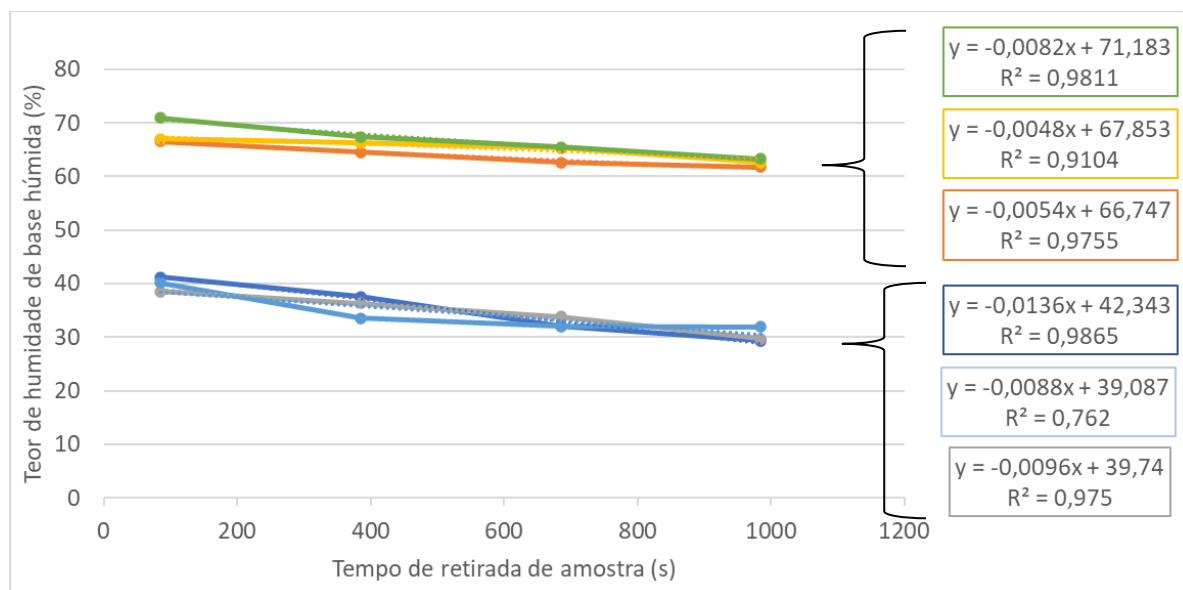


Figura 3.6 – Taxa de evaporação nos ensaios de aspersão descontínua

3.2.1.2. Resultados dos ensaios de aspersão de água durante 85 segundos, com um caudal de 1,15 L/m²

Na Tabela 3.3 são apresentados os valores da massa inicial e final de cada amostra, medidos por uma balança.

Nº de amostra	Ensaio 1		Ensaio 2	
	Massa inicial (g)	Massa final (g)	Massa inicial (g)	Massa final (g)
Amostra 1	9,35	8,56	2,96	2,77
Amostra 2	10,82	9,45	2,71	1,76
Amostra 3	11,44	9,76	6,49	3,38
Amostra 4	13,59	9,83	6,63	2,42
Amostra 5	13,46	7,92	8,54	2,86
Amostra 6	13,47	8,41	6,91	2,45
Amostra 7	8,37	5,68	8,89	3,32
Amostra 8	13,50	9,54	10,93	4,18

Tabela 3.3 – Valores dos pesos obtidos nos ensaios 1 e 2

Aplicando a Equação 3.5 a cada uma das amostras dos ensaios, foi calculada a humidade em base húmida para cada ponto de medição. A Figura 3.7, construída com os resultados da Tabela 3.3 descreve a variação do teor de humidade em base húmida para os dois combustíveis durante e após a aspersão de água.

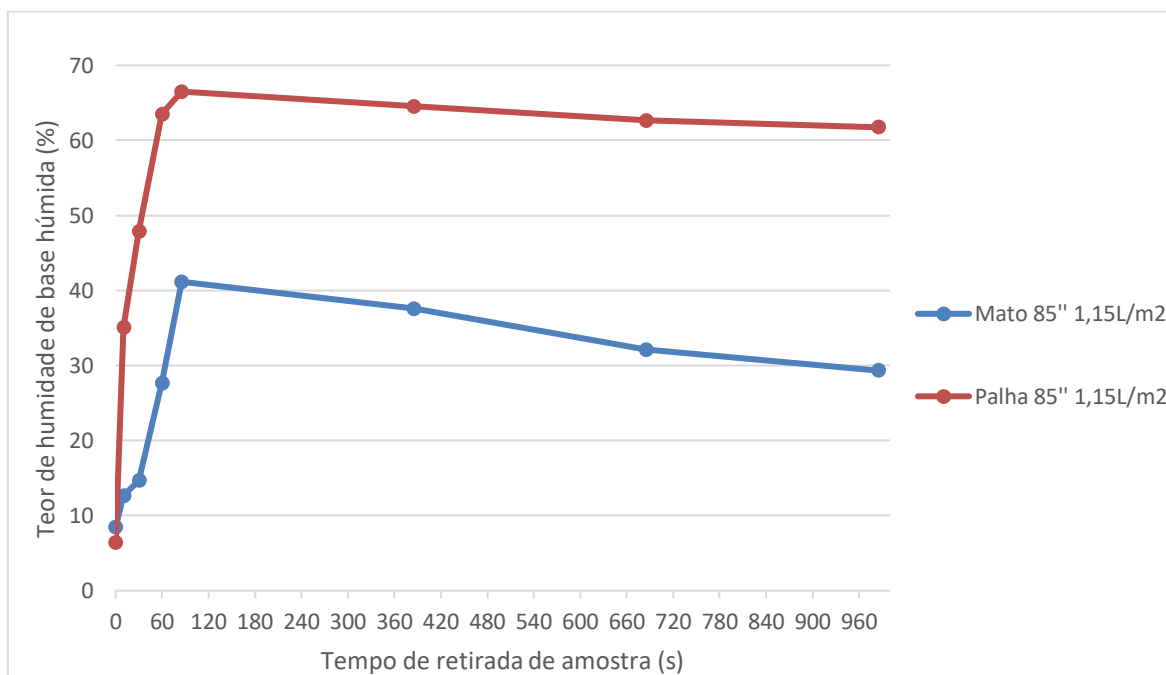


Figura 3.7 – Evolução do teor de humidade em base húmida (%) dos ensaios 1 e 2

Nas primeiras cinco recolhas de amostras observa-se um aumento do teor de humidade em ambas as curvas, coincidindo esse período com a aspersão de água. Terminada a aspersão de água observa-se um decréscimo do teor de humidade na biomassa. Esse decréscimo do teor de humidade é atribuído à perda de água adsorvida facilmente evaporada.

Ao analisar o perfil das curvas na Figura 3.7, constata-se que a palha apresenta teores de humidade muito superiores aos registados para o mato perante igual aspersão de água.

3.2.1.3. Resultados dos ensaios de aspersão de água durante 60 segundos, com um caudal de 1,15 L/m²

A Tabela 3.4 mostra os valores da massa inicial e final dos ensaios 3 e 4.

<i>Nº de amostra</i>	<i>Ensaio 3</i>		<i>Ensaio 4</i>	
	<i>Massa inicial</i> (g)	<i>Massa final</i> (g)	<i>Massa inicial</i> (g)	<i>Massa final</i> (g)
<i>Amostra 1</i>	10,10	9,15	2,29	2,16
<i>Amostra 2</i>	4,19	3,50	3,37	2,59
<i>Amostra 3</i>	4,17	2,60	4,38	2,37
<i>Amostra 4</i>	7,48	4,60	5,07	1,67
<i>Amostra 5</i>	6,63	4,22	8,53	2,88
<i>Amostra 6</i>	10,33	6,83	12,88	4,47
<i>Amostra 7</i>	10,55	7,41	6,31	2,36
<i>Amostra 8</i>	9,87	7,14	9,38	3,58

Tabela 3.4 – Valores dos pesos obtidos nos ensaios 3 e 4

Aplicando a Equação 3.5 aos resultados da Tabela 3.4, obteve-se a Figura 3.8 com a evolução do teor de humidade em base húmida da biomassa durante e após a aspersão de água.

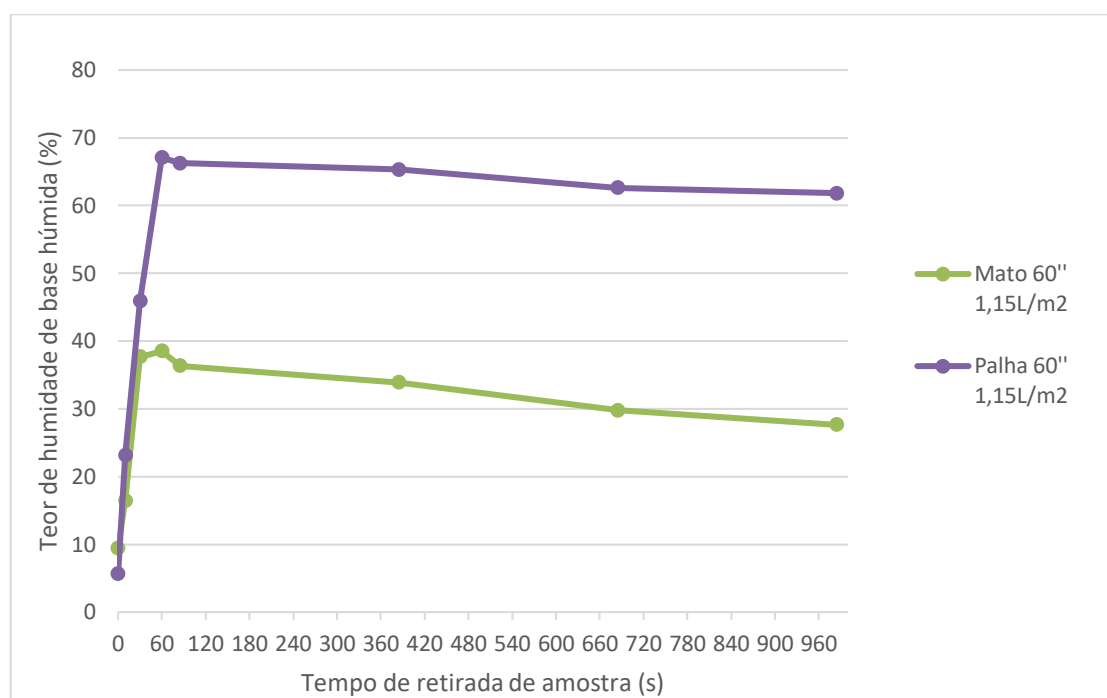


Figura 3.8 – Evolução do teor de humidade em base húmida (%) dos ensaios 3 e 4

Os resultados da figura mostram que durante a aspersão de água as sucessivas recolhas de amostras vão tendo maior teor de humidade em base húmida. Após terminar a aspersão de água, o teor de humidade decresce lentamente, sendo menos acentuado na palha comparativamente ao mato.

3.2.1.4. Resultados dos ensaios de aspersão de água durante 85 segundos, com um caudal de 1,30 L/m²

A Tabela 3.5 mostra os valores da massa inicial e final medidos para cada amostra.

<i>Nº de amostra</i>	<i>Ensaio 5</i>		<i>Ensaio 6</i>	
	<i>Massa inicial</i> (g)	<i>Massa final</i> (g)	<i>Massa inicial</i> (g)	<i>Massa final</i> (g)
<i>Amostra 1</i>	11,79	10,97	1,80	1,73
<i>Amostra 2</i>	5,84	5,21	3,31	2,46
<i>Amostra 3</i>	9,54	7,33	2,93	1,25
<i>Amostra 4</i>	11,97	7,50	3,43	1,14
<i>Amostra 5</i>	19,87	11,90	4,33	1,26
<i>Amostra 6</i>	9,94	6,60	6,20	2,02
<i>Amostra 7</i>	12,21	8,30	9,73	3,36
<i>Amostra 8</i>	15,21	10,36	4,47	1,64

Tabela 3.5 – Valores dos pesos obtidos nos ensaios 5 e 6

Aplicando a Equação 3.5 aos valores da Tabela 3.5, obteve-se a Figura 3.9, com a evolução do teor de humidade em base húmida de um combustível durante e após a aspersão de água.

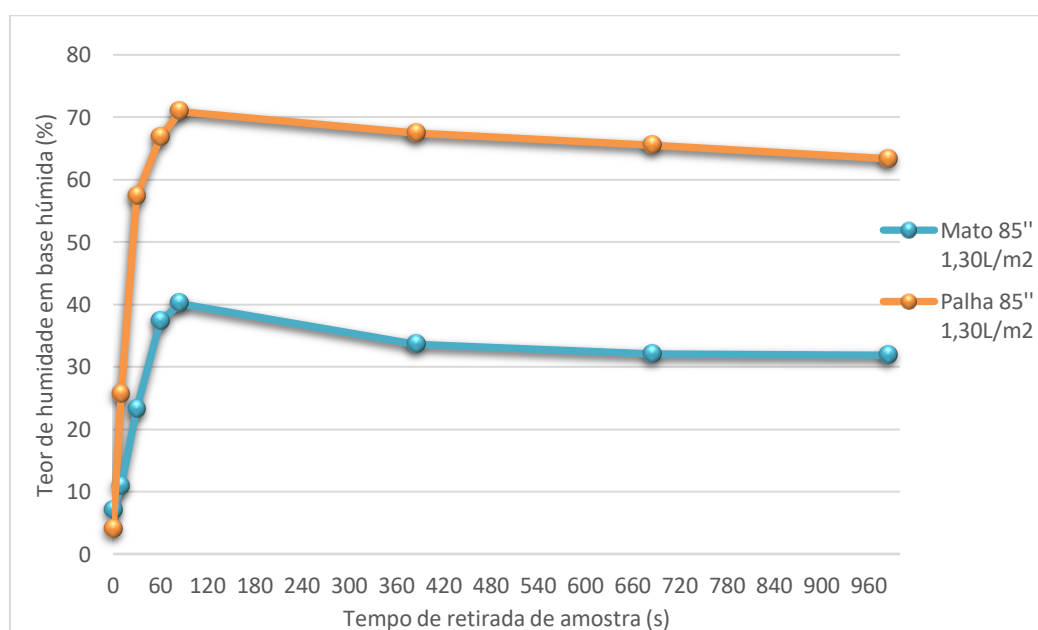


Figura 3.9 – Evolução do teor de humidade em base húmida (%) dos ensaios 5 e 6

3.2.2. Resultados dos ensaios com aspersão descontínua de água

O cálculo da massa total de combustível necessária à realização dos ensaios, seguiu o mesmo procedimento já anteriormente descrito, com a medição prévia do teor de humidade em base húmida da palha.

Os valores de massa total de palha usada em cada ensaio são apresentados na Tabela 3.6:

<i>Dia da realização dos ensaios</i>	<i>Teor de humidade em base húmida (%)</i>	<i>Massa total de combustível (g)</i>	
		<i>600g/m²</i>	<i>1500g/m²</i>
<i>19/06</i>	12,15	21,2	53,0
<i>20/06</i>	10,91	21,2	52,9
<i>21/06</i>	11,76	21,4	53,4
<i>22/06</i>	11,50	21,3	53,2

Tabela 3.6 – Massa total de palha necessária para cada ensaio

Nestes ensaios são apresentados os resultados da evolução do teor de humidade em base húmida da palha ao longo dos períodos em que ocorreu aspersão de água, bem como nos intervalos entre cada aspersão.

Para conhecer a evolução do teor de humidade em base húmida na palha com aspersão descontínua de água, foram adotadas as mesmas sequências de duração de aspersão de água e de intervalos entre cada aspersão, referidos na Tabela 2.4.

Foram realizadas medições da massa total da palha passados 11 segundos após o final da aspersão.

Para determinar o teor de humidade em base húmida, é preciso saber a massa de palha seca (*Palha seca*) e a quantidade de água presente no combustível (H_2O).

$$FMC(WB) = \frac{H_2O}{(Palha\ seca + H_2O)} \times 100$$

Equação 3.6 – Equação do teor de humidade em base húmida ao longo dos ensaios

Em que:

$FMC(WB)$ – Teor de humidade em base húmida, em %

$Palha\ seca$ – Quantidade de palha sem humidade, em g

H_2O – Quantidade de água presente no combustível, em mL

Sendo que, a massa de palha seca é calculada utilizando a seguinte fórmula:

$$Palha\ seca = massa\ inicial - \left(\frac{massa\ inicial \times FMC(WB)\ inicial}{100} \right)$$

Equação 3.7 – Equação da massa de palha seca

Em que:

$Palha\ seca$ – Quantidade de palha sem humidade, em g

$massa\ inicial$ – Massa inicial da palha, em g

$FMC(WB)\ inicial$ – Teor de humidade em base húmida no início do ensaio, em %

A quantidade de água que está presente na massa total da palha ao fim de cada período, assumindo que 1 mL \Leftrightarrow 1 g, é dada por:

$$H_2O = (Massa\ final - Massa\ inicial) + \left(\frac{Massa\ inicial \times FMC(WB)\ inicial}{100} \right)$$

Equação 3.8 – Equação da massa de água presente no combustível

Em que:

H_2O – Quantidade de água presente no combustível, em mL

$Massa\ final$ – Massa da palha quando aspergida com água, em g

$Massa\ inicial$ – Massa inicial da palha, em g

$FMC(WB)\ inicial$ – Teor de humidade em base húmida no início do ensaio, em %

Para cada quantidade de água aspergida por ciclo de tempo, obteve-se as curvas com a variação do teor de humidade em base húmida para cada combinação.

As figuras representativas do ensaio 3 têm como variável independente o tempo de ensaio em que foi pesada a palha (em segundos), como variável dependente, no eixo

principal tem a massa total de palha medida (em gramas) e, no eixo secundário tem o teor de humidade em base húmida (em percentagem).

3.2.2.1. Resultados dos ensaios de simulação de aspersores de impacto P(10.10.10)

Estes ensaios consistiram, numa primeira aspersão que durou 10 minutos, depois, num intervalo entre as aspersões de 10 minutos e, novamente, uma segunda aspersão, também com duração de 10 minutos.

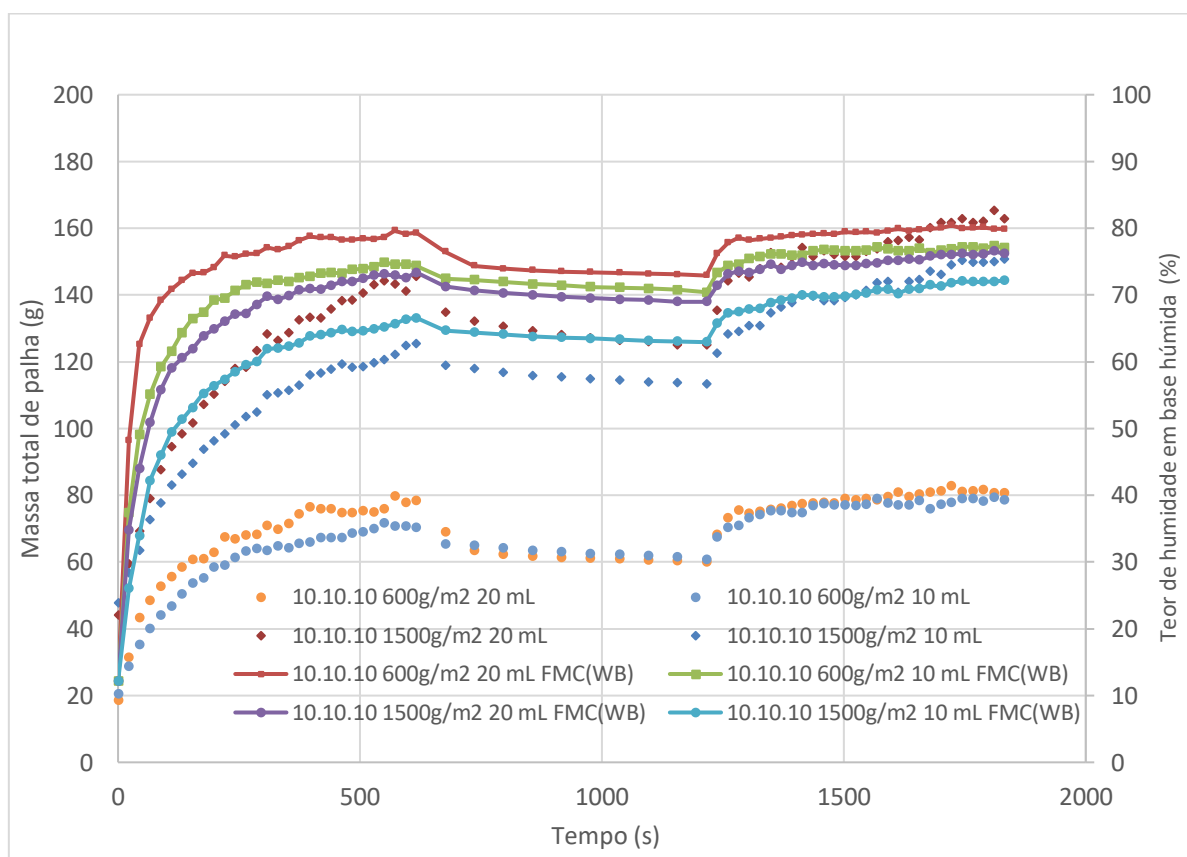


Figura 3.10 – Evolução da massa e do teor de humidade em base húmida dos ensaios P(10.10.10)

Com base na Figura 3.10, para a carga de 600 g/m^2 não há diferenças significativas em termos comparativos na massa da palha quando são aspergidos 10 mL ou 20 mL de água a cada ciclo de 22 segundos, para simular o varrimento do aspersor. Por outro lado, para uma carga de 1500 g/m^2 observa-se uma diferença na massa da palha quando são aspergidos 10 mL ou 20 mL de água.

Isso sugere que quando a carga de combustível é baixa, ou seja, numa situação em que o terreno herbáceo é cuidado, por mais água que seja aspergida se o combustível florestal já estiver saturado não absorverá mais água, mantendo-se a massa da palha inalterável. Enquanto para um terreno herbáceo abandonado, a diferença na quantidade de água aspergida reflete-se de forma significativa na diferença de massa da palha.

Assim, pode concluir-se que num terreno herbáceo cuidado, será mais fácil de controlar o incêndio com menor quantidade de água aspergida do que num terreno que se considera abandonado ou não cuidado.

Pela Figura 3.10, pode ver-se que a partir dos 300 segundos, a curva de massa da palha sobe muito ligeiramente até atingir o valor máximo, por volta dos 600 segundos, quando se interrompe a primeira aspersão de água.

No intervalo de tempo entre cada aspersão, em todas as condições analisadas, verificou-se um declínio acentuado na massa da palha até ao minuto 3, permanecendo praticamente constante até à conclusão dos 10 minutos de intervalo entre as aspersões.

Após o intervalo de tempo de espera, iniciou-se o novo ciclo de aspersão e a massa de palha sofreu de imediato um aumento, à semelhança da queda anteriormente reportada e aumentou de forma suave, chegando a ultrapassar a massa registada no final da primeira aspersão. Tal deveu-se ao facto de durante o intervalo de tempo entre a primeira e segunda aspersão de água uma parte da água ter continuado o processo de absorção a partes mais interiores da palha.

Para este intervalo de tempo entre aspersões verifica-se não haver um acréscimo significativo de humedificação da biomassa pela ação de uma segunda aspersão, o que permite alargar o tempo entre aspersões.

Para a carga de palha de 600 g/m^2 , aspergindo 20 mL, por cada ciclo de 22 segundos, ou seja, a maior carga de água dos quatro ensaios previstos, verificou-se que o teor de humidade no final do ensaio é bastante semelhante ao teor de humidade obtido após a primeira aspersão. Pode assim concluir-se que se está muito próximo do limite máximo de capacidade de absorção e de adsorção da palha. A partir do segundo 396, até ao final da primeira aspersão, constatou-se que o aumento do teor de humidade era muito baixo.

Nas outras três condições, observou-se um aumento no teor de humidade no fim do ensaio, em relação ao final da primeira aspersão de água. Isto pode ser atribuído ao facto de a palha ainda não ter atingido a capacidade máxima de absorção e de adsorção.

3.2.2.2. Resultados dos ensaios de simulação de aspersores de impacto P(5.5.5)

Estes ensaios foram conduzidos de forma semelhante ao anterior variando apenas o tempo das duas fases de aspersão e o intervalo entre as duas: uma primeira aspersão de 5 minutos, seguida por um intervalo de 5 minutos entre as aspersões e, novamente, uma segunda aspersão também com duração de 5 minutos.

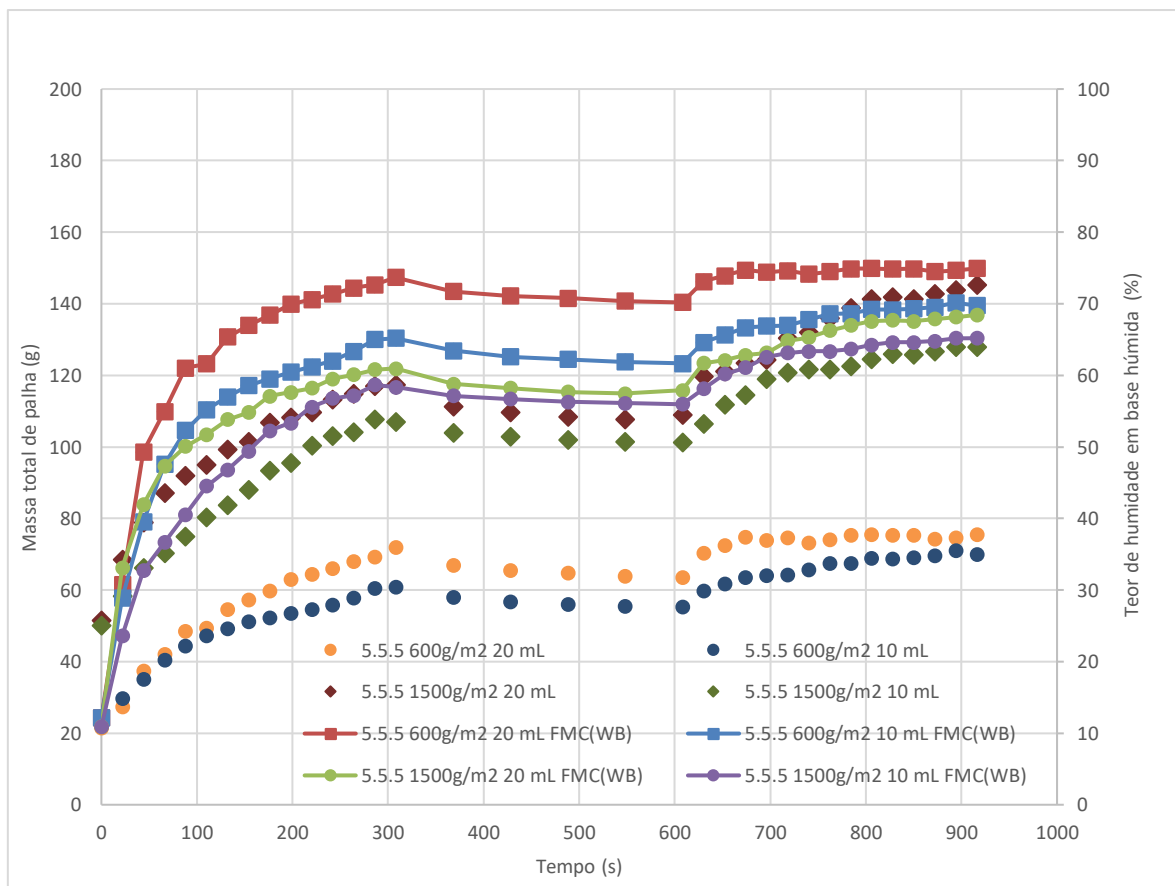


Figura 3.11 – Evolução da massa e do teor de humidade em base húmida dos ensaios P(5.5.5)

A Figura 3.11 permite verificar que a diferença na massa de palha para a carga de 600 g/m^2 variando as quantidades pré-definidas de água aspergida (10 mL e 20 mL por ciclo)

é pequena. Só ao fim de 120 s é que se observa diferença, com aumento em relação à aspersão de água de 10 mL, no entanto, essa diferença nunca ultrapassa as 12 g.

Na carga de 1500 g/m², a diferença entre massas da palha com diferentes quantidades de água aspergida permanece constante até aos 740 s. No entanto, a partir desse momento, a diferença entre as duas cargas de aspersões (10 mL e 20 mL) começa a aumentar alcançando uma diferença de 18 g. Muito embora, pela maior carga de palha a absorção e adsorção se tenha registado maior diferença, no caso de 20 mL muita água não foi retida na palha por esta já estar saturada.

Quando a carga de palha é de 600 g/m², a partir do instante 696 s, a palha atinge quase a saturação e a massa começa a estabilizar. Quando a carga de palha é de 1500 g/m², a palha não atinge o ponto de saturação, e continua a aumentar a massa da palha ao longo de todo o ensaio, mas nem toda a água é absorvida/adsorvida pela palha.

No intervalo de tempo entre as duas aspersões, observou-se que a perda de palha foi mínima em relação à combinação de ensaios P(10.10.10). Isso deve-se ao facto de um menor tempo de aspersão resultar numa menor quantidade de água absorvida e adsorvida.

Em todos os ensaios, após o intervalo de tempo entre as duas aspersões, registou-se sempre um aumento de massa da palha, ultrapassando o valor atingido no final da primeira aspersão.

Como era expectável para a carga de palha de 600 g/m², o teor de humidade é maior em comparação com a carga de 1500 g/m². Durante a segunda aspersão, o teor de humidade para a carga de palha de 600 g/m² permanece praticamente constante, enquanto para a carga de 1500 g/m² há um maior aumento do teor de humidade em relação ao início da segunda aspersão (aproximadamente 10%).

3.2.2.3. Resultados dos ensaios de simulação de aspersores de impacto P(5.5.10)

Estes ensaios consistiram, numa primeira aspersão com duração de 5 minutos, depois, num intervalo entre as aspersões de 5 minutos e, novamente, numa segunda aspersão com duração de 10 minutos.

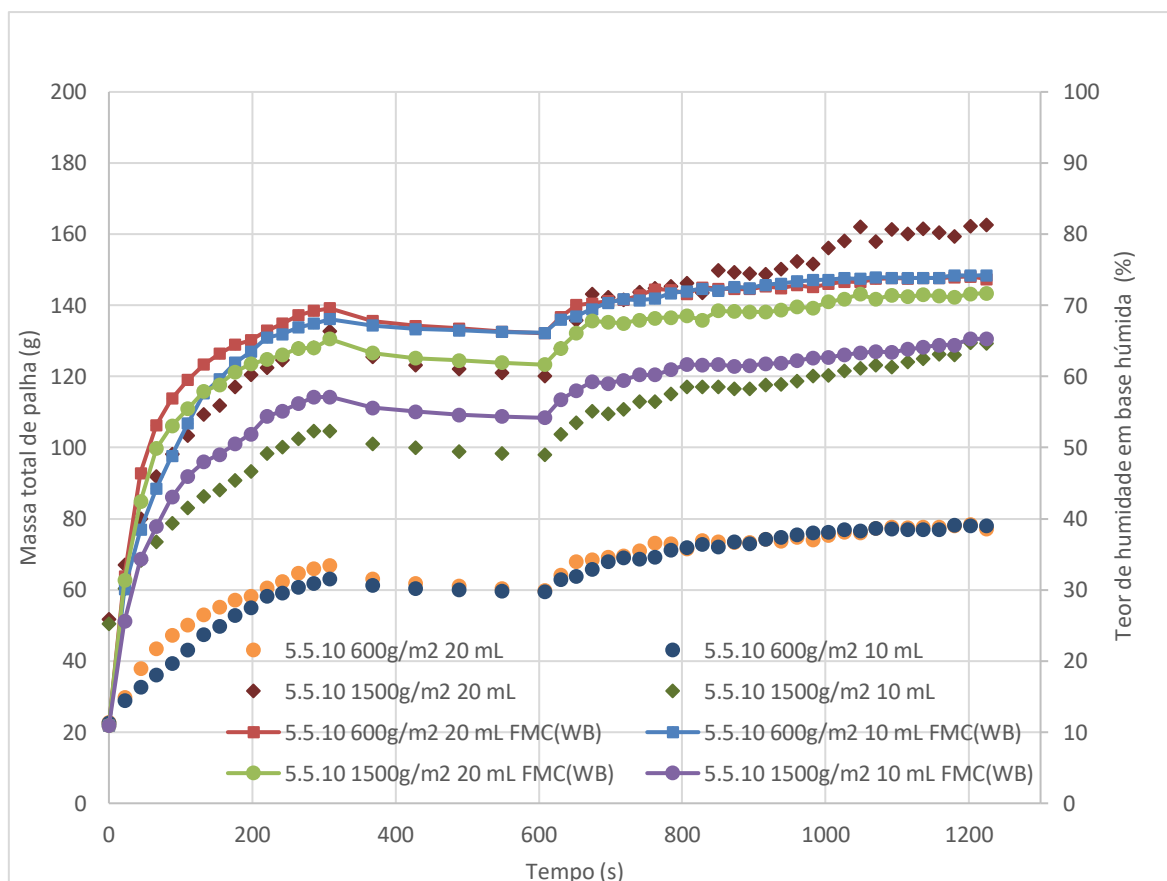


Figura 3.12 – Evolução da massa e do teor de humidade em base húmida dos ensaios P(5.5.10)

Com base nos resultados apresentados na Figura 3.12, pode inferir-se que, para a carga de 600 g/m², não há uma diferença significativa na massa da palha quando são aspergidos 10 mL ou 20 mL de água durante cada ciclo. Mas, para a carga de 1500 g/m², observa-se maior diferença entre a massa da palha quando é aspergida 10 mL ou 20 mL por ciclo, chegando a atingir uma diferença de 33 g.

Para ambas as cargas de palha, na primeira aspersão de água, as curvas não atingiram a saturação. No entanto, na segunda aspersão, para a carga de 600 g/m², a curva manteve-se constante tanto para 10 mL como para 20 mL de água aspergida por ciclo. Na carga de 1500

g/m^2 , a curva que expressa a quantidade de água aspergida de 20 mL tornou-se praticamente constante a partir do instante 674 segundos, enquanto a curva para 10 mL não atingiu a saturação completa.

Comparativamente ao ensaio P(10.10.10), durante o intervalo de tempo entre as duas aspersões, a palha apresentou uma menor perda de humidade. Isso ocorreu devido ao tempo de aspersão reduzido, que fez com que fosse absorvida e adsorvida menor quantidade de água.

Após o intervalo entre as aspersões, a massa da palha aumentou em relação ao máximo atingido no final da primeira aspersão. Isso deveu-se ao facto de que durante o intervalo de tempo entre aspersões a palha absorveu a água que estava adsorvida e assim ganhou capacidade de adsorver mais água para além da água que já havia sido absorvida.

Em relação às curvas do teor de humidade, observa-se que a carga de 600 g/m^2 atinge maior teor de humidade do que a carga de 1500 g/m^2 .

O teor de humidade da carga de 600 g/m^2 na segunda aspersão mantém-se praticamente constante, sendo os valores do teor de humidade idênticos para as diferentes quantidades de água aspergida.

Para a carga de 1500 g/m^2 ocorre um aumento de 10% no teor de humidade no final em relação ao início da segunda aspersão, havendo uma diferença de cerca 6% de teor de humidade no final do ensaio entre as duas quantidades de água aspergida. É importante realçar que a curva que atinge menor teor de humidade é a curva de 1500 g/m^2 com 10 mL de água aspergida em cada tempo de ciclo de 22 segundos.

3.2.2.4. Resultados dos ensaios de simulação de aspersores de impacto P(5.10.10)

Estes ensaios foram realizados da seguinte forma: uma primeira aspersão de 5 minutos, seguida de um intervalo entre as aspersões de 10 minutos e, novamente, uma segunda aspersão com duração de 10 minutos.

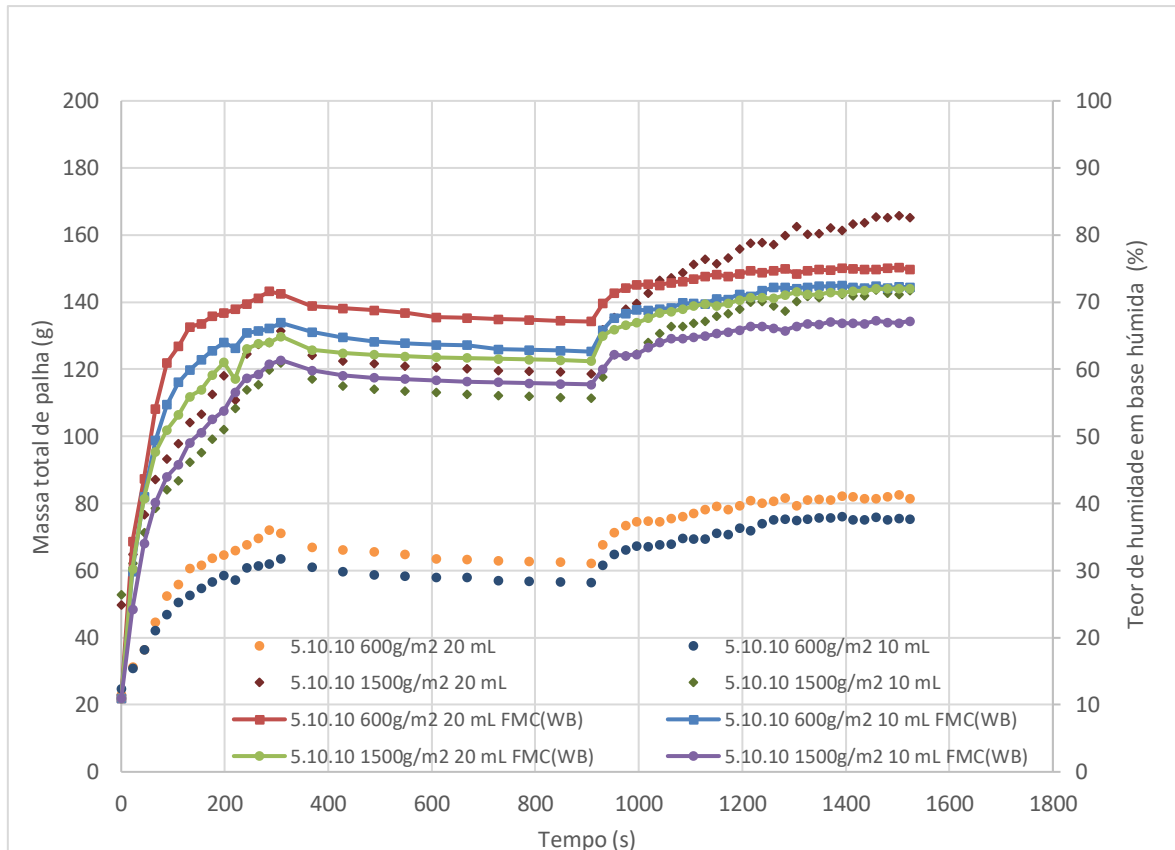


Figura 3.13 – Evolução da massa e do teor de humidade em base húmida dos ensaios P(5.10.10)

Na Figura 3.13, é possível observar que a diferença da massa de palha na carga de 600 g/m^2 entre as duas quantidades de água aspergida (10 mL e 20 mL) é constante ao longo de todo o ensaio. Já para a carga de 1500 g/m^2 , a diferença entre as massas da palha com quantidade de água aspergida diferentes mantém-se constante até aos 908 s. A partir desse instante, essa diferença aumentou consideravelmente, chegando a uma diferença aproximada de 23 g.

Nas curvas em que a carga de palha é de 600 g/m^2 , a partir do instante 1128 s, a palha aproxima-se da saturação, com a massa a ficar praticamente inalterável. Nas curvas em que a carga é de 1500 g/m^2 , a palha não atinge o ponto de saturação, sendo visível o aumento de massa da palha durante todo o ensaio.

No intervalo de tempo entre as duas aspersões, foi observada uma perda de massa relativamente pequena, em relação à combinação de ensaios P(10.10.10). Um menor tempo de aspersão faz com que tenha menor quantidade de água absorvida e adsorvida.

Ao analisar as curvas do teor de humidade, pode ver-se que para a carga de 600 g/m^2 o valor de percentagem de humidade é maior do que para a carga de palha de 1500 g/m^2 .

O teor de humidade para a carga de palha de 600 g/m^2 é praticamente constante na segunda aspersão, enquanto na carga de palha de 1500 g/m^2 o aumento varia entre os 7% e 10%, em relação ao início da segunda aspersão.

3.2.2.5. Resultados dos ensaios de simulação de aspersores de impacto P(10.5.10)

Estes ensaios consistiram: numa primeira aspersão de 10 minutos, depois, num intervalo entre as aspersões de 5 minutos e, novamente, uma segunda aspersão de 10 minutos.



Figura 3.14 – Evolução da massa e do teor de humidade em base húmida dos ensaios P(10.5.10)

Na Figura 3.14, pode-se ver que a diferença da massa de palha na carga de 600 g/m^2 , para as duas quantidades de água aspergida se mantém constante durante todo o ensaio. Para uma carga de 1500 g/m^2 , é notória alguma diferença na massa da palha quando aspergida 10 mL ou 20 mL de água, com diferenças que chegam até, aproximadamente, 38 g.

A partir dos 308 segundos, os acréscimos de massa da palha diminuem consideravelmente, tornando-se cada vez menores até à conclusão da primeira aspersão de água.

Durante o intervalo de tempo entre cada aspersão, em todas as condições estudadas, verificou-se um decréscimo constante na massa de palha ao longo dos 5 minutos de intervalo.

Após o intervalo de tempo entre as duas aspersões, houve um aumento de massa de palha em todos os ensaios com a segunda aspersão, ultrapassando a massa de palha registada no final da primeira aspersão.

No que diz respeito às curvas do teor de humidade, pode notar-se que as curvas em que a carga é de 600 g/m^2 apresentam um teor de humidade maior por comparação com as curvas correspondentes à carga de 1500 g/m^2 . O teor de humidade da carga de 600 g/m^2 na segunda aspersão permanece constante, enquanto para a carga de 1500 g/m^2 aumenta entre 6% e 9% no valor do teor de humidade no final, em relação ao início da segunda aspersão. Importa ainda referir que o teor de humidade para a carga de 600 g/m^2 na segunda aspersão é idêntico para as duas diferentes quantidades de água aspergidas.

3.2.2.6. Ensaio de simulação de aspersores de impacto P(30)

Estes ensaios consistiram numa aspersão de água contínua ao longo de 30 minutos, sem interrupção, com o objetivo de estudar a evolução da massa da palha e do teor de humidade, sem interrupção de aspersão.

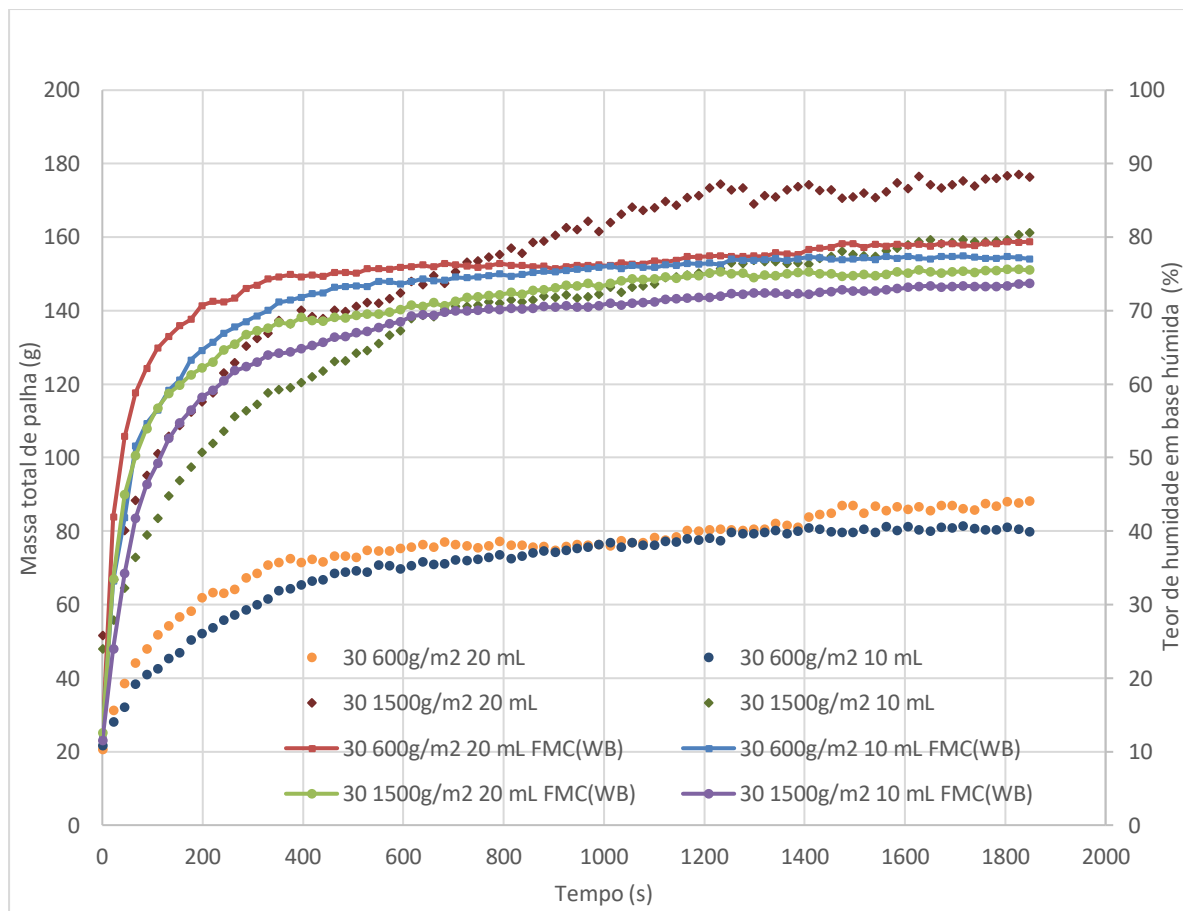


Figura 3.15 – Evolução da massa e do teor de humidade em base húmida dos ensaios P(30)

Pela Figura 3.15 observa-se que a diferença da massa de palha na carga de 600 g/m², para as duas quantidades de água aspergida é praticamente constante ao longo de todo o ensaio. Já para uma carga de 1500 g/m², observa-se diferença em função da quantidade de água aspergida (10 mL ou 20 mL), com diferenças a chegar a 15 g.

A partir dos 418 segundos, a curva com o acréscimo da massa da palha diminuiu, tornando-se praticamente constante até ao momento em que se concluiu a aspersão de água.

Em relação às curvas do teor de humidade, pode-se verificar que as curvas correspondentes à carga de 600 g/m² apresentam um teor de humidade maior por comparação com as curvas de 1500 g/m². O teor de humidade da carga de 600 g/m² torna-se aproximadamente constante a partir dos 352 segundos, enquanto para a carga de 1500 g/m², a partir dos 726 segundos o teor de humidade torna-se aproximadamente constante.

Na Tabela 3.7 apresenta-se as equações das linhas de tendência para cada carga de palha e quantidade de água aspergida, considerando uma aspersão contínua de 30 minutos por ciclos de 22 s.

<i>Carga da palha (g/m²)</i>	<i>Teor de humidade</i>		
	<i>Quantidade de água (mL)</i>	<i>Equação linha de tendência</i>	<i>Fiabilidade da equação</i>
600	10	$y = 7.0349\ln(x) + 24.462$	$R^2 = 0.9554$
	20	$y = 6.5064\ln(x) + 32.332$	$R^2 = 0.9280$
1500	10	$y = 7.6625\ln(x) + 17.397$	$R^2 = 0.9136$
	20	$y = 7.3412\ln(x) + 24.657$	$R^2 = 0.9282$

Tabela 3.7 – Equações das linhas de tendência e suas fiabilidades do teor de humidade em base húmida

Para o teor de humidade utilizou-se uma linha de tendência logarítmica. De realçar que a equação logarítmica não aceita valores nulos ou negativos e, por isso, no instante inicial (tempo 0 s), foi considerado um valor de 0,1.

Nas equações das linhas de tendência logarítmica, o “y” corresponde ao teor de humidade em base húmida da palha e o “x” corresponde ao tempo de ensaio.

Quanto maior o valor de R² menor a flutuação da variável em relação à curva de tendência.

3.2.3. Resultados dos ensaios de queima para validação do algoritmo ótimo de aspersão descontínua

O objetivo deste ensaio 4 é validar os resultados do ensaio 3. Para isso usou-se as mesmas cargas de combustível e quantidade de água aspergida, para identificar o tempo mínimo necessário para que o fogo se extinguisse totalmente.

Começou-se pela pior condição dos ensaios, que envolveu uma maior carga de combustível de 1500 g/m^2 e uma menor quantidade de água aspergida em cada aspersão de 10 mL. Com base na Figura 3.15, no ensaio 3, procurou-se identificar o ponto de saturação, ou seja, o ponto em que a humidade se torna constante. Realizados os ensaios com o tempo de aspersão superior e inferior, observou-se que o fogo não se propagou em ambas as situações. Tal significa que, para o caso em específico, o ponto de saturação não é relevante.

Posto isto, a fim de determinar o tempo mínimo de aspersão para a extinção do fogo, foi-se repetindo o processo de forma iterativa. Uma vez encontrado esse valor mínimo de aspersão para extinguir o fogo, repetiu-se o ensaio nesse tempo e também no tempo inferior para confirmar e validar os resultados alcançados.

Após se obter esse valor mínimo, para os ensaios seguintes, voltou-se novamente a atenção para a Figura 3.15 para analisar os valores do teor de humidade da palha correspondentes ao intervalo de aspersão de água.

Com base nas observações e análises realizadas, para carga de combustível e diferentes quantidades de água aspergida, os ensaios subsequentes foram realizados não observando o ponto de saturação da palha, mas estudando o intervalo em que o teor de humidade em base húmida variava entre 50% a 55%. Estabeleceu-se este intervalo de humidade como referência, pois dentro destes valores a palha apresenta as condições adequadas para a extinção do fogo.

Carga de combustível (g/m²)	Quantidade de água aspergida (mL)	Tempos de aspersão (s)	Massa inicial (g)	Massa final (g)²	Observações
600	20	0	21,66	-	Ardeu tudo
	20	0/22	21,67	28,95	Extinção
	10	0/22	21,61	-	Ardeu tudo
	10	0/22/44	21,33	23,83	Extinção
1500	20	0/22/.../66	54,90	-	Ardeu tudo
	20	0/22/.../88	54,76	55,81	Extinção
	10	0/22/.../110	55,15	-	Ardeu tudo
	10	0/22/.../132	54,70	55,65	Extinção

Tabela 3.8 – Quantidade mínima de água aspergida para que a propagação das chamas se extinga

Na Tabela 3.8, para uma carga de palha de 1500 g/m² e uma quantidade de água aspergida de 10 mL por ciclo, o tempo mínimo para que as chamas se extinguíssem foi de 132 segundos. No entanto, para a mesma carga, mas com a quantidade de água aspergida de 20 mL por ciclo, foram necessários apenas 88 segundos para que ocorresse a extinção das chamas.

Para uma carga de combustível de 600 g/m² e a quantidade de água aspergida de 20 mL, a condição mais favorável estudada neste trabalho, para que ocorra a extinção das chamas bastam 22 segundos. Para a mesma carga, mas com 10 mL de água aspergida, o tempo necessário para a extinção das chamas aumentou para 44 segundos.

Pode assim concluir-se que, ao trabalhar com cargas de combustível menores, a quantidade de água aspergida exerce um impacto mais rápido na extinção do fogo. No entanto, e a fim de garantir uma abordagem segura e eficiente, é sempre necessário ajustar a quantidade de água de acordo com a carga de combustível.

² Massa sobranete com palha queimada e água como mostra a Figura 2.13.

4. CONCLUSÃO

Alcançar uma solução que suprima a 100% os incêndios rurais não controlados, afigura-se difícil. Contudo, a proteção das zonas verdes em redor de habitações isoladas ou de aglomerados habitacionais é fulcral na salvação de vidas humanas e bens materiais, mas também da floresta e dos demais que nessa habitam.

Assim, os objetivos principais desta dissertação passaram por estudar possíveis soluções para a redução da intensidade da frente de chama e da velocidade de propagação da mesma através da humidificação da biomassa por aspersão de água, buscando determinar as quantidades mínimas de água necessárias. O objetivo específico passou por estudar em termos comparativos a capacidade de absorção e adsorção de dois tipos de combustíveis florestais variando o tempo de aspersão e a quantidade de água aspergida, visando determinar o algoritmo de aspersão de água mais eficiente para o qual deve ser usada a menor quantidade de água na extinção do incêndio.

Os ensaios foram feitos em laboratório, num ambiente em que a temperatura é praticamente constante e que garante que os resultados obtidos sejam consistentes e mais bem controlados. No entanto, em cenário de incêndio, as condições são mais complexas e imprevisíveis – por exemplo, quanto mais perto o incêndio estiver da zona de ação dos aspersores, maior será a evaporação de água na biomassa florestal. Assim, os resultados estudados e obtidos são válidos para situações em que o incêndio está distante e devem ser interpretados com cautela quando aplicados a situações reais.

As conclusões obtidas através dos ensaios experimentais realizados foram as seguintes:

- A humidificação da biomassa antes da chegada do fogo à área humidificada demonstrou ter efeitos significativos na redução da intensidade da chama e na velocidade de propagação da frente de chamas.
- Com a aspersão de água sobre a biomassa, o teor de humidade desta sobe rapidamente para valores acima dos 50% em relação ao teor de saturação, caindo de forma menos acentuada após a interrupção, num cenário sem fogo na proximidade. Para os cenários ensaiados a aspersão descontinuada permitiu manter o teor de humidade da biomassa a valores acima de 50% do ponto de saturação.

- Valores de teor de humidade acima de 50% – 55% dependendo das cargas da palha e da quantidade de água aspergida em cada ciclo mostram-se suficientes para a redução da intensidade das chamas e a extinção da propagação da frente de fogo.
- Num terreno com uma vegetação herbácea cuidada, não é necessária uma aspersão contínua (atenta-se ao facto de a água ser um bem fundamental e o incêndio poder levar muito tempo a atingir o raio de ação). Já para uma vegetação herbácea abandonada, a aspersão de água deve ser contínua, uma vez que há uma grande diferença entre o teor de humidade em função da quantidade de água aspergida em cada ciclo; ou então, terá de se usar um aspersor com um caudal de água superior para o sucesso da extinção do incêndio.
- Quando está em causa o processo de pré-humidificação, foi observado que é muito desafiante controlar a distância e velocidade de propagação do incêndio, o que dificulta a determinação do momento exato em que se deve ligar o sistema de aspersão.

Com base em todo o estudo e investigação que se fez neste trabalho, recomenda-se o uso de sistemas de aspersão, sem tempo de intervalo entre aspersões antes da chegada do incêndio. Sendo as herbáceas cuidadas a aspersão descontínua é uma boa solução para minimizar o gasto de água, se o incêndio ainda estiver afastado para a temperatura e humidade do ar no local se manterem. No caso de herbáceas não cuidadas, a solução de aspersão descontínua, só se recomenda se o caudal dos aspersores estiver acima do valor usado em herbáceas controladas.

4.1. Trabalhos Futuros

O trabalho preliminar realizado nesta dissertação revelou algumas evidências que carecem de um estudo mais sistemático e aprofundado. Para garantir a fiabilidade dos resultados sugere-se que se façam mais réplicas de ensaios, para obter uma média dos resultados e o respetivo desvio padrão. A repetição destes ensaios é essencial, uma vez que a heterogeneidade da biomassa pode conduzir a resultados diferentes em cada ensaio.

Outro aspeto importante a ser considerado é o intervalo de tempo entre cada aspersão de água durante os ensaios. Alargar esse intervalo permitiria estudar melhor o tempo que o combustível florestal demora a alcançar o teor de humidade em que não arde.

Apesar de não refletir um cenário real, sugere-se que se faça uma experiência para se conhecer melhor o comportamento da palha quando humidificada, saturando completamente a palha (emergindo-a em água durante 24h/48h). Após essa fase, a palha seria colocada dentro da estufa de secagem de maneira a alcançar valores percentuais de teor de humidade, e ver qual é o intervalo de valores em que a palha deixa de arder ou arde completamente.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] RIBEIRO, Luís – “*Os incêndios na Interface Urbano-Florestal em Portugal: Uma análise de diagnóstico*”. Tese de mestrado em Dinâmicas Sociais, Riscos Naturais e Tecnológicos. Faculdade de Letras da Universidade de Coimbra, Coimbra, julho de 2016, pág. 21
- [2] JORNAL EXPRESSO – “*Fumo dos incêndios no Canadá chegou à Noruega*”. [Consult. 3 jul. 2023]. Disponível em: <https://expresso.pt/internacional/2023>
- [3] CANALSUR – “*Málaga es la provincia con más hectáreas quemadas este verano com 6.300*”. [Consult. 3 jul. 2023]. Disponível em: <https://www.canalsur.es/malaga>
- [4] WIKIPÉDIA – “*Incêndios florestais na Grécia em 2018*”. [Consult. 3 de jul. 2023]. Disponível em: [https://pt.wikipedia.org/Incêndios florestais na Grécia em 2018](https://pt.wikipedia.org/Incêndios_florestais_na_Grécia_em_2018)
- [5] GRUPO GLOBO – “*Incêndios florestais na Suécia atingem área equivalente a 35.700 campos de futebol*”. [Consult. 3 jul. 2023]. Disponível em: <https://g1.globo.com/mundo/noticia>
- [6] SIC NOTÍCIAS – “*Tragédia em Pedrógão Grande*”. [Consult. 3 jul. 2023]. Disponível em: <https://sicnoticias.pt/tragedia-em-pedrogao-grande>
- [7] BARROSO L.B., FERREIRA L.S., e de LIMA R.C.A. – “*Proteção passiva contra incêndios em edificações*”. Revista de Ciência e Inovação, V.5, março de 2020, pág. 75
- [8] DIÁRIO DA REPÚBLICA – “*Decreto-Lei n.º 82/2021, de 13 de outubro*”. Disponível em: <https://files.dre.pt>
- [9] AMBIENTE MAGAZINE – “*FCTUC desenvolve sistema tecnológico de proteção contra incêndios rurais*”. [Consult. 3 jul. 2023]. Disponível em: <https://www.ambientemagazine.com/fctuc>
- [10] NOTÍCIAS UC – “*Sistema tecnológico de proteção contra incêndios rurais testado no concelho de Arganil*”. [Consult. 3 jul. 2023]. Disponível em: <https://noticias.uc.pt>
- [11] MARQUES RODRIGUES, P.L. - “*Análise da eficiência de sistemas de autoproteção de incêndios na interface urbano-florestal*”. Tese de Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica. Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, Coimbra, julho de 2022.
- [12] RUTHVEN, D. M.- “*Principles of Adsorption and Adsorption Process*”. New York: John Wiley & Sons, 1984.

[13] ADAI – “*Atitudes e Comportamentos Face à Prevenção e Combate de Incêndios e a Gestão do Território, Incluindo a Sua Vertente Colaborativa*”. [Consult. 4 jul. 2023].

Disponível em: <https://adai.pt/houserefuge>

[14] ADAI – “*Medição do teor de humidade de combustíveis florestais e avaliação do seu comportamento face às novas realidades climáticas*”. [Consult. 4 jul. 2023]. Disponível em:

<https://adai.pt/mcfire>

[15] ADAI – “*Implantação de estratégias colaborativas para a gestão integrada da floresta e do fogo*”. [Consult. 4 jul. 2023]. Disponível em: <https://replant.pt>

[16] ADAI – “*Intelligent Management of Wildfires*”. [Consult. 4 jul. 2023]. Disponível em:

<https://adai.pt/imfire/pt>

[17] ADAI – “*Sistemas de Proteção de Pessoas e Elementos Críticos Expostos a Incêndios Florestais*”. [Consult. 4 jul. 2023]. Disponível em: <https://firehelp.com>

[18] ULISBOA – “*A vegetação como combustível*”. Lisboa, outubro de 2021. [Consult. 5 jul. 2023]. Disponível em: <https://a-vegetao-como-combustivel-ulisboa>.

[19] BYRAM, G. M. – “*Combustion of Forest Fuels*”. In K. P. Davis (Ed.), *Forest Fire: Control and Use*. New York: McGraw Hill, 1959, pág 79.

[20] VEGA, J.A, CUINAS, P. AND FERNANDEZ, C. - “*Predicting fire behaviour in Galician (NW Spain) shrubland fuel complexes. Proceedings of 3rd International Conference on Forest Fire Research and 14th Conference on Fire and Forest Meteorology*”, Volume II (1998), pp. 713-728