



UNIVERSIDADE D
COIMBRA

Bruno Rodrigues Sampaio

INTERAÇÃO ENTRE FRENTES DE INCÊNDIO
COMPORTAMENTO DO FOGO COM DIFERENTES
TIPOLOGIAS DE FRENTES

VOLUME 1

Dissertação no âmbito do Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica no Ramo de Energia e Ambiente orientada pelo Professor Doutor Domingos Xavier Filomeno Carlos Viegas e Professor Doutor Jorge Rafael Nogueira Raposo e apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Coimbra.

Setembro de 2019

1 2



9 0

FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE
COIMBRA

Interação entre Frentes de Incêndio. Comportamento do fogo com diferentes tipologias de frentes

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

Interaction between fire fronts. Fire behaviour with different types of fronts

Autor

Bruno Rodrigues Sampaio

Orientadores

Professor Doutor Domingos Xavier Filomeno Carlos Viegas

Professor Doutor Jorge Rafael Nogueira Raposo

Júri

Presidente	Professor Doutor Jorge Campos da Silva André Professor Auxiliar da Universidade de Coimbra
Orientador	Professor Doutor Jorge Rafael Nogueira Raposo Professor Auxiliar da Universidade de Coimbra
Vogais	Professor Doutor José Carlos Miranda Góis Professor Auxiliar da Universidade de Coimbra

Colaboração Institucional



**Associação para o
Desenvolvimento da
Aerodinâmica
Industrial**



**Centro de Estudos
sobre Incêndios
Florestais**

Coimbra, Setembro, 2019

*“Our greatest fear should not be of failure... but of succeeding at things in life
that don't really matter.”*

Francis Chan

Agradecimentos

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

Assim sendo, gostaria de começar por agradecer ao Professor Doutor Domingos Xavier Filomeno Carlos Viegas e ao Professor Doutor Jorge Rafael Nogueira Raposo por me aceitarem como seu orientando e por toda a transmissão de conhecimentos durante estes últimos meses.

Agradecer também a toda a equipa do CEIF, em especial ao Doutor Luís Reis e ao Gonçalo Rosa por todos os conselhos dados e pela ajuda prestada aquando da realização dos ensaios experimentais e na posterior a análise dos mesmo.

A todos os meus amigos e colegas da Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade de Coimbra, com especial atenção aos do laboratório, que fizeram parte destes percursos académico, que agora se encerra, e social, que espero que se mantenha por muitos anos.

Por último, agradecer à minha família por todo o apoio incondicional prestado nestes 5 anos, ajuda a ultrapassar cada momento e por me darem muito mais do que eu alguma vez esperaria.

Resumo

O objetivo deste trabalho é o estudo da interação entre frentes de fogo paralelas com vento em duas configurações diferentes (paralelo ou perpendicular em relação às mesmas). Para a realização deste trabalho, considera-se que o fogo apresenta o que se designa de comportamento extremo de fogo e será baseado em ensaios laboratoriais.

É importante a análise deste tipo de fogos para que se possa entender como um fogo pode atuar na realidade e assim seja possível prever melhor o seu comportamento e desta forma seja possível uma melhor resposta por parte dos operacionais para o seu controlo.

Os ensaios laboratoriais foram realizados no Túnel de Combustão 3 pertencente ao Laboratório de Estudos sobre Incêndios Florestais. O combustível selecionado foi a palha de *avena sativa* com uma carga semelhante à que existiria numa situação real de floresta. Foram testadas diferentes configurações de teste para melhor análise.

A metodologia experimental teve como objetivo testar a capacidade de certos parâmetros influenciadores da propagação do fogo para alterar o comportamento do mesmo como a velocidade e direção do escoamento.

Como espectável, verificou-se que o vento é um dos fatores mais importantes no que toca à interação entre frentes de incêndio paralelas deste tipo de configuração.

Palavras-chave: Comportamento Extremo do Fogo, Frentes Paralelas, Incêndios Florestais, Ensaios Laboratoriais, Propagação do Fogo

Abstract

The purpose of this paper is to study the interaction between parallel fire fronts with wind in two different configurations (parallel or perpendicular to the fronts). For this work, it is considered that fire presents what is called extreme fire behaviour and will be based on laboratory tests.

It is important to analyze these types of fires so that it is possible to understand how a fire can act in reality and thus better predict its behaviour and, knowing this, provide a better response from the operators for its control.

The laboratory tests were performed at Combustion Tunnel 3 belonging to the Fire Research Laboratory of the University of Coimbra. The fuel selected was *avena sativa* straw with a load like that which would exist in a real forest situation. Different test configurations were tested for better analysis.

The experimental methodology aimed to test the ability of certain parameters that influence the propagation of fire to change the fire behaviour such as flow velocity and direction.

As expected, wind has been found to be one of the most important factors in the interaction between parallel fire fronts of this type of configuration.

Keywords Extreme Fire Behaviour, Parallel Fronts, Forest Fires, Laboratory Tests, Fire Spread

Índice

[Índice de Figuras] [(remover se não aplicável)].....	viii
[Índice de Tabelas] [(remover se não aplicável)]	x
[Simbologia] e [Siglas] [(remover se não aplicável)].....	xii
[Simbologia] [(remover se não aplicável)].....	xii
[Siglas] [(remover se não aplicável)]	xii
1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1. Motivação	1
1.2. Estado da Arte.....	2
2. Interação entre frentes	4
2.1. Definição.....	4
2.2. Parâmetros influenciadores da Propagação do Fogo	5
2.3. Comportamento Dinâmico do Fogo	6
2.4. Modos de Transmissão de Calor em Incêndios	7
3. Ensaio Experimentais - Metodologia.....	8
3.1. Configuração.....	9
3.1.1. Massa de Combustível.....	9
3.1.2. Ignição	10
3.1.3. Termopares	10
3.2. Velocidade de Propagação	10
3.2.1. Velocidade Básica de Propagação (R_0)	10
3.2.2. <i>Fire ROS Calculator</i>	12
3.2.3. Câmara de Infravermelhos.....	13
4. Tratamento e análise de dados.....	16
4.1. Tipologia do Ensaio – Escoamento Perpendicular	16
4.1.1. Variação da distância de frente com igual velocidade de vento.....	16
4.1.2. Igual distância entre frentes com vento de diferentes velocidades.....	16
4.2. Tipologia do Ensaio – Escoamento Paralelo	16
4.2.1. Variação da distância de frente com igual velocidade de vento.....	17
4.2.2. Igual distância entre frentes com vento de diferentes velocidades.....	20
5. Conclusões.....	25
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	28
[ANEXO A].....	30
[ANEXO B].....	32
[APÊNDICE A].....	34
[APÊNDICE B].....	36

**[ÍNDICE DE FIGURAS] [(REMOVER SE NÃO
APLICÁVEL)]**

Figura 3.1. [Opção para inserir apenas o nome e o número de uma Figura]. 11

[Remover se necessário para garantir que o Índice de Tabelas inicia numa página ímpar]

[Remover se não aplicável.]

[ÍNDICE DE TABELAS] [(REMOVER SE NÃO APLICÁVEL)]

Tabela 2.1. [Legenda desta Tabela (Magalhães, 2006).] **Erro! Marcador não definido.**

Tabela 2.2. [Legenda desta Tabela.] **Erro! Marcador não definido.**

[Remover se necessário para garantir que a Simbologia e Siglas inicia numa página ímpar]

[Remover se não aplicável.]

[SIMBOLOGIA] E [SIGLAS] [(REMOVER SE NÃO APLICÁVEL)]

[Simbologia] [(remover se não aplicável)]

$\mathbf{0}$ – Tensor nulo

α, \dots, z – Escalares no espaço de reais \mathbb{R}

$\mathbf{a}, \dots, \mathbf{z}$ – Tensores no espaço de reais \mathbb{R}^n

E – Módulo de Elasticidade

[Siglas] [(remover se não aplicável)]

ASTM – American Society for Testing and Materials

DEM – Departamento de Engenharia Mecânica

FCTUC – Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra

MIT – Massachusetts Institute of Technology

[Remover se necessário para garantir que o Primeiro Capítulo inicia numa página ímpar]

1. INTRODUÇÃO

1.1. Motivação

O ecossistema em que nos encontramos inseridos é muito dinâmico, isto é, está em constante mudança. A extinção de algumas espécies e a evolução de outras é talvez a maior prova da capacidade de resposta a essa mesma mudança a que estamos sujeitos.

Dentro dos desafios que nos são impostos todos os dias pela Natureza, os desastres naturais, como tornados, cheias, deslizamentos de terra ou incêndios, são talvez os mais desafiantes de estudar não só pela sua capacidade rápida de mudança de condições, mas também pela alteração que provocam na paisagem e na claramente visível e mesurável destruição que provocam. Desta forma, torna-se importante fazer um estudo dos mesmos com o objetivo de podermos melhorar a forma como nos prevenimos e de como responder à sua ocorrência, mas tendo sempre noção que não podemos nem devemos promover a total inoportunidade dos mesmos.

Assim, numa altura em que o número de incêndios tende a aumentar e o seu comportamento tende a ser cada vez mais complexo, o estudo do comportamento do fogo é essencial para que se possa fazer uma melhor prevenção e proteção em caso de incêndio.

A interação dos incêndios resulta, muitas vezes, em fenómenos de comportamento extremo do fogo com grande capacidade de destruição, causando assim grandes perdas não só a nível de área de floresta ardida, mas também de empresas, habitações e, frequentemente, vidas humanas.

Em especial, o ano de 2017 foi um ano avassalador para Portugal em termos de incêndios florestais, uma vez que ocorreram incêndios de grande dimensão fora do período de maior alerta não sendo as autoridades competentes capazes de reagir da forma mais correta por estarem limitadas em termos de meios, tendo assim estes causado grande destruição e perdas de vidas humanas.

O presente trabalho enquadra-se dentro da investigação a realizar no Projeto FIRESTORM. Neste projeto é analisado o comportamento do fogo tendo em conta as mudanças climáticas em curso que criam condições mais frequentes para a ocorrência de secas e ondas de calor que facilitam a incidência de eventos extremos de fogo (EWE).

Na proposta deste projeto é importante referir que o conhecimento existente sobre a junção de incêndios é ainda escasso, apesar de estar associada a alguns dos mais intensos fenómenos de propagação do fogo que foram observados na Natureza. No FIRESTORM iremos considerar as condições básicas de junção de incêndios, tais como linhas e massas de fogo que se aproximam.

1.2. Estado da Arte

De acordo com (Randerson et al. 2012), com as atuais alterações climáticas, tem-se observado e prevê-se a continuação de um aumento da área queimada por parte dos incêndios florestais. Isto é por um lado obviamente preocupante, mas não existe ainda uma comprovada relação entre a área ardida e o número de vítimas causadas por um certo incêndio.

O comportamento do fogo tem duas diferentes forma de classificação: o comportamento normal do fogo e o comportamento extremo do fogo (Viegas *et al.* 2011).

Nesta dissertação considera-se um fogo cujas características permitem classificá-lo como um fogo de comportamento extremo. Assim, segundo (Viegas 2012), o comportamento extremo do fogo pode ser designado por um fogo de muito grande dimensão ou um fogo que se estende por uma grande área por um largo período de tempo, um fogo cuja velocidade de propagação ou taxa de libertação de energia apresenta valores muitos altos e ainda um fogo cuja rápida mudança do seu comportamento abarca uma certo grau de incerteza de previsão e do risco que este realmente representa.

Comportamentos extremos do fogo são exemplos como propagação do fogo em desfiladeiros, os tornados de fogo (Pinto et al. 2017) e o encontro de frentes (Raposo et al. 2018), que é o caso de estudo desta dissertação.

Em termos de interação de frentes, há dois tipos principais: o encontro entre frentes convergentes, algo já começado a ser estudado pelo Centro de Estudos sobre Incêndios Florestais em trabalhos anteriores, e iniciou-se agora um estudo sobre o encontro entre frentes paralelas.

Este tipo de comportamento do fogo tem grande importância de estudo porque devido à libertação de partículas em grande quantidade está também associado ao

surgimento de focos secundários a grande distância do foco inicial, quando estas são transportadas pelo vento (Ellis 2010).

2. INTERAÇÃO ENTRE FRENTES

2.1. Definição

Segundo (Porto Editora) , em termos físicos, interação pode ser definida como uma “ação que se reciprocamente entre duas partículas ou corpos”. Assim já temos uma definição na qual este trabalho se vai centrar.

Como referido anteriormente, este trabalho tem como objetivo estudar o encontro de frentes paralelas, mas antes de haver esse encontro tem que existir uma interação entre as duas frentes.

O estudo a cerca da interação entre frentes de fogo iniciou-se nas últimas quatro ou cinco décadas e, inicialmente, fez-se este estudo pela necessidade de se poder perceber como utilizar o fogo para combater o fogo, ou seja, a utilização de fogo tático (Cruz et al. 2014).

Nos últimos anos, porém tem-se direcionado o rumo da investigação de forma a prever o comportamento do fogo e desta forma evitar que estejam operacionais em terreno no qual o fogo se propagará de forma tão rápida e inesperada que lhes será impossível de combater e a qualquer instante os colocará em risco.

No âmbito deste rumo, tem-se feito um estudo de encontro de frentes convergentes e para o qual já há alguma bibliografia significativa mesmo em termos de casos de estudo de grande escala como ensaios de campo e os tão alarmantes incêndios que ocorreram em Pedrogão grande em junho de 2017.

Nesse ano, houve também outros incêndios dignos de estudo como aqueles em que esta dissertação se inspira, porém, não significa isso que esta dissertação seja uma recriação à escala desses mesmos incêndios. De referir, que os incêndios em questão, ocorreram a 15 de outubro de 2017 e são o Complexo de incêndios de Leiria e o Complexo de incêndios de Quiaios.

2.2. Parâmetros influenciadores da Propagação do Fogo

O comportamento do fogo é influenciado por 3 principais grupos formando estes o cientificamente aceito e conhecido “triângulo do fogo” proposto por BYRAM,1959. Estes grupos são o tipo de combustível, a topografia e a meteorologia.

O comportamento do fogo é influenciado por vários fatores e é devido à existência e interação simultânea de todos estes fatores que torna a previsão do comportamento dos incêndios algo tão difícil. Sendo assim, é de interesse referir que neste trabalho se vai ter em conta o tipo de combustível utilizado e o ângulo que as frentes paralelas fazem em relação ao escoamento (vento).

Quanto ao tipo combustível, existem vários tipos de características que afetam a sua combustibilidade dos quais podemos enunciar a carga de combustível, a altura, a porosidade e a composição do leito, em termos de características macroscópicas, e dimensão característica das partículas, composição química, poder calorífico e teor de humidade, em termos de características microscópicas. Quanto ao teor de humidade do combustível, existe uma forma de atenuar este fator a qual será explicitada posteriormente.

Vem naturalmente também que a topografia em que o fogo se propaga afeta o seu desenvolvimento. As duas características mais importantes a reter em termos da topografia são o declive do solo e a sua concavidade.

No que se refere à meteorologia, o fator mais importante a considerar é a presença de vento ou a sua ausência. O vento é talvez o fator mais difícil de caracterizar em todo o espaço uma vez que devido às suas propriedades, ou seja, varia com muita facilidade e uma medição do seu valor e direção num determinado local não implica que igualdade noutra local mesmo que estes sejam relativamente próximos.

O estudo conjugado do vento com o declive leva a uma característica muito importante em termos de velocidade de propagação do fogo designada por velocidade básica de propagação do fogo. Mais acerca desta característica será abordado posteriormente desta dissertação.

Outro fator que afeta também afeta o comportamento do fogo é o tempo. Em (Viegas 2006), Xavier Viegas defende a existência de um “quadrado do fogo” em vez de um “triângulo do fogo” uma vez que, segundo este, o fogo tem um comportamento dinâmico, isto é, mesmo que as outras propriedades anteriormente descritas se mantenham inalteradas com o tempo, o incêndio apresenta características de propagação diferentes.

2.3. Comportamento Dinâmico do Fogo

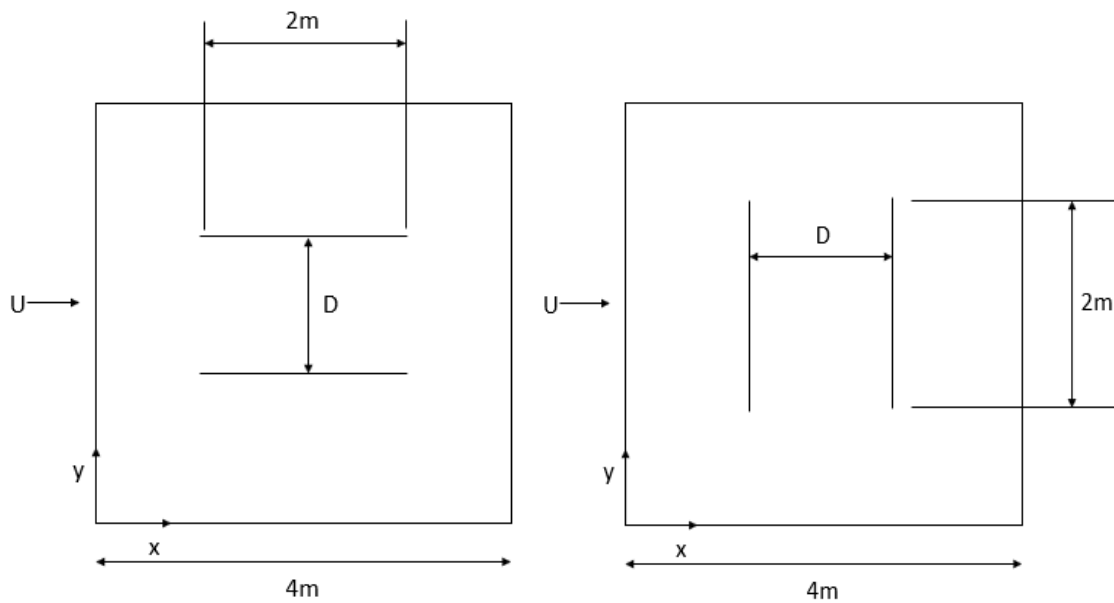
A interação entre frentes de incêndio provoca uma rápida alteração da velocidade de propagação e apresenta por isso um exemplo de comportamento dinâmico do fogo. O fogo apresenta um comportamento dinâmico pois está diretamente relacionado com o tempo cronológico, sendo por isso, o resultado da interação do fogo com o meio ambiente. O fogo cria, inclusive, correntes de convecção que alteram o ambiente que o rodeia.

Aquando de uma ignição no leito, as chamas irão propagar-se com uma certa velocidade inicial. À medida que combustão do leito continua, esta irá libertar calor e induzir correntes de convecção que terão um sentido ascendente resultando em chamas e uma coluna de fumo. Uma consequência desta convecção vertical é uma corrente horizontal, paralela ao leito e que irá em direção à frente de incêndio (zona onde se dá a combustão). Desta forma, há um aumento da velocidade de propagação e chegada de mais oxigénio à zona de combustão. Como consequência da chegada de oxigénio à frente de incêndio, esta irá tornar-se mais intensa, aumentando a altura das chamas e velocidade. Este processo designa-se por autoalimentação.

Segundo (Viegas 2005), a ocorrência de feedback é dos parâmetros com mais potencial para alterar a propagação do fogo. Este processo, ao transportar oxigénio para a zona da reação, irá também induzir fluxo convectivo intensificando assim a combustão, resultando em consequências similares às acima descritas.

(Viegas 2006) Quanto à direção do vento pode-se concluir que quando a direção do vento é a mesma da propagação, existe um aumento significativo da velocidade de propagação. Por outro lado, quando as direções são opostas, a velocidade mantém-se relativamente constante.

Na **Figura 2.3** está representado um esquema com as diferentes configurações testadas nesta dissertação: distância entre as duas frentes (D), velocidade do vento U e direção do vento.



2.4. Modos de Transmissão de Calor em Incêndios

Há três tipos de transmissão de calor: convecção, radiação e condução. Em termos de transmissão de calor durante um incêndio, as componentes de radiação e convecção adquirem valores muito superiores aos da condução, podendo assim esta componente ser desprezada.

Representada por $q_r'' = \epsilon \sigma T^4$, Lei de Stefan-Boltzmann, em que ϵ representa a emissividade do material, σ representa a constante de Stefan-Boltzmann e T a temperatura absoluta, a radiação adquire valores elevados de libertação de calor e torna assim importante o seu estudo em termos de modo de transmissão de calor num incêndio devido ao facto da temperatura ser elevada à quarta potência, (Incropera, Bergman, Lavine & DeWitt, 2011).

A convecção, por outro lado, não atinge valores tão elevados, mas representa a movimentação dos fluidos tendo em conta a diferença de temperaturas em pontos diferentes do fluido. É a existência de correntes de convecção em conjunto com o vento que permite a projeção a elevadas distâncias de partículas incandescentes que podem dar origem a focos de fogo secundários. A convecção é representada pela Lei de Newton, $q_c'' = h(T_2 - T_1)$ e h traduz o coeficiente de convecção do fluido.

3. ENSAIOS EXPERIMENTAIS - METODOLOGIA

De forma a perceber melhor o que se passa na realidade, recorreremos a ensaios experimentais. A utilização desta ferramenta revela-se essencial para uma mais correta análise do comportamento do fogo.

Para este estudo, foi utilizado o Túnel de Combustão 3 que se encontra no LEIF.

Este túnel compreende dimensões de 8 metros de comprimento, 6 metros de largura e, em 2 lados, paredes com 2 metros de altura. Este túnel encontra-se equipado por 2 ventiladores de [capacidade] kW capazes de produzir velocidades de escoamento até 8m/s.

No presente estudo, optou-se por se utilizar velocidades de escoamento de 1, 2,3 e 5 m/s.

As diferentes configurações de ensaios realizados neste estudo encontram-se sumarizadas na Tabela [inserir nº].

Ensaio (Ref.)	Distância entre frentes [m]	Velocidade de escoamento [m/s]	Direção de escoamento [°]
2FrenteD ₁ W ₀ S ₉₀	1	0	90
2FrenteD ₂ W ₀ S ₉₀	2	0	90
2FrenteD ₁ W ₁ S ₉₀	1	1	90
2FrenteD ₂ W ₁ S ₉₀	2	1	90
2FrenteD ₁ W ₂ S ₉₀	1	2	90
2FrenteD ₂ W ₂ S ₉₀	2	2	90
2FrenteD ₁ W ₁ S ₀	1	1	0
2FrenteD ₂ W ₁ S ₀	2	1	0
2FrenteD ₁ W ₂ S ₀	1	2	0
2FrenteD ₂ W ₂ S ₀	1	2	0
2FrenteD ₂ W ₃ S ₀	2	3	0
2FrenteD ₂ W ₅ S ₀	2	5	0

De referir também, que os ensaios 2FrenteD₁W₀S₉₀ e 2FrenteD₂W₀S₉₀ devido a terem velocidade de escoamento de 0 m/s, contêm a mesma informação que para a direção de escoamento de 0°.

3.1. Configuração

A geometria escolhida para os ensaios foi de um leito de 4m x 4m. Este leito foi assim decidido com o intuito de manter as condições simétricas para ambos os tipos de ensaios acima referidos, evitando desta forma leito de combustível até às paredes onde o escoamento apresenta características não tão homogêneas. Nos ensaios com escoamento de 3 e 5m/s, o leito foi aumentado para 4m x 5m.

3.1.1. Massa de Combustível

Como é do conhecimento comum, todos os combustíveis têm uma certa quantidade de humidade. A humidade presente no combustível varia com certos fatores ambientais como por exemplo a temperatura e humidade do ar e, por conseguinte, a hora do dia. Assim, é importante determinar a quantidade exata de humidade presente no combustível para desta forma se poder substituir a massa de água na amostra pela respetiva quantidade de celulose.

Para tal, é necessário em primeiro lugar determinar a percentagem de humidade presente na base seca e com base na equação seguinte calcula-se a massa de combustível total necessário na base húmida.

$$Massa\ Total = Carga \times \left(1 + \frac{\% \text{ humidade}}{100 - \% \text{ humidade}} \right) \times \text{Área do leito}$$

O combustível utilizado nos ensaios apresenta uma carga de combustível com distribuição uniforme de 0,6 kg/m² e uma área de 16 m². Dentro dos tipos de combustível florestais cientificamente válidos, devido a limitações de tempo, foi escolhida a palha de *avena sativa*. A carga de 0,6 kg/m² foi assim escolhida porque é “o valor vulgarmente usado neste tipo de ensaios, uma vez que corresponde a uma carga que facilmente pode ser extrapolada e comparada com a carga de combustível encontrado nas florestas” (Raposo 2016).

3.1.2. Ignição

Para a ignição foram utilizados 2 fios de lã colocados paralelamente entre si e dependendo da configuração do ensaio foram colocados em paralelo com a direção do escoamento ou na perpendicular com a mesma.

De notar que neste estudo se consideram duas frentes de fogo igualmente desenvolvidas e por isso são necessárias duas pessoas para fazer a ignição do fio de algodão em simultâneo.

3.1.3. Termopares

Nos ensaios realizados foi utilizado um tubo de pitot equipado com um termopar colocado estrategicamente de maneira a saber tempo no qual é o pitot é atingido pelo fogo e gama de temperaturas sentidas na localização dos mesmo. Como é de conhecimento geral, a densidade do ar varia conforme a sua temperatura. Esta informação ajuda-nos a perceber melhor como está a ocorrer a convecção do ar em torno das frentes de fogo e conseqüentemente da transmissão de calor que afeta como o fogo se desenvolve.

3.2. Velocidade de Propagação

Em termos do estudo de interação entre frentes de incêndio e do comportamento do fogo, uma das propriedades mais importantes a ter em consideração é a sua velocidade de propagação, que vem do inglês *rate of spread* ou abreviadamente ROS.

Para um cálculo mais rápido e preciso da velocidade de propagação vai ser utilizado o programa FIRE ROS Calculator v.2.5 desenvolvido por (Abouali, A. 2019).

3.2.1. Velocidade Básica de Propagação (R_0)

(Viegas, 2006) A combustibilidade de um leito define-se pela maior ou menor facilidade que este tem para suportar a propagação da frente de chamas.

Assim, existem diversos parâmetros para que nos permitem caracterizar a combustibilidade de um leito como, por exemplo, a taxa de combustão, o tempo de residência ou a altura da chama.

Os parâmetros anteriormente enunciados fazem, porém, mais sentido quando servem para complementar o mais simples dos parâmetros, sendo este, a velocidade básica de propagação ou de avanço R_0 .

De modo a evitar a interferência de outros fatores, as propriedades acima enumeradas serão determinadas em condições básicas o que compreende leito horizontal, frente de chamas linear, largura do leito muito superior à altura das chamas e ausência de vento. Este teste serve para termos uma velocidade de propagação de referência, assim, e para este ter algum valor na análise posterior dos resultados é imprescindível que se utilize o mesmo tipo de combustível (palha de *avena sativa*) com a mesma carga (0.6 kg/m^2) dos ensaios. Para simplificação dos cálculos, usa-se uma mesa de $1\text{ m} \times 1\text{ m}$.

O procedimento deste teste é bastante simples de compreender. A mesa encontra-se dividida em 10 secções distanciadas de 10 cm entre si. Depois de criar o leito de combustível com características iguais ao do ensaio, marcam-se as secções com fio de algodão (inserir fotografia).



Figura 3.1. [Opção para inserir apenas o nome e o número de uma Figura].

A ignição é realizada através de um fio de lã com 1 metro de comprimento de modo a dar início a uma frente de fogo linear. Esta frente ao propagar-se vai queimar o fio de algodão que assim se parte. Cada vez que o fio de algodão se parte marca-se o tempo.

FALAR SOBRE A ADIMENSIONALIZAÇÃO

No âmbito de minimizar as variações nas propriedades do leito de combustível e outras, as velocidades de propagação serão reduzidas a números adimensionais (Viegas and Neto 1991). A velocidade de propagação adimensional (R') é obtida com base na velocidade básica de propagação:

3.2.2. *Fire ROS Calculator*

Este programa utiliza as imagens dos ensaios recolhidas através da câmara de infravermelhos.

Como primeiro passo, é necessário calibrar a câmara. A calibração da câmara é conseguida através de cerca de 10 fotografias, cada uma contendo um cartão, com um padrão, disposto em posições aleatórias diferentes entre si. É através das posições aleatórias que o programa consegue definir os parâmetros da câmara.

A câmara fica assim calibrada para aquela exata posição e altura para um determinado leito, assim sempre que por alguma razão é necessário alterar a posição da câmara, é preciso tirar novas fotografias de calibração.



Os ensaios são gravados pela câmara de infravermelhos em formato de vídeo, mas o programa só é capaz de analisar imagens. Desta forma, o programa está equipado com uma ferramenta que possibilita a extração de *frames* a partir dos vídeos. Como *input*, é necessário indicar o intervalo de tempo em que iniciar e finalizar a extração dos *frames* e o tempo entre *frames*. O ideal é extrair entre 10 e 13 *frames* para cada ensaio.

Os *outputs* de maior importância deste programa são a velocidade média de propagação e a velocidade dinâmica de propagação, sendo este último o de maior interesse, porque tem em conta a variação da distância propagada pelas frentes de fogo entre cada *frame*. Desta forma, conseguimos aferir a velocidade de propagação em cada instante e desta forma podemos fazer uma melhor análise do comportamento deste tipo de fogo.

FALAR DAS DIREÇÕES EM QUE FOI ANALISADA A VELOCIDADE

3.2.3. Câmara de Infravermelhos

Como dito anteriormente, foi utilizada uma câmara de infravermelhos para a captura, em vídeo, dos ensaios realizados. A câmara utilizada foi uma câmara FLIR ThermaCam SC660.

Através do uso de uma plataforma elevatória, foi possível posicionar a uma altura suficiente para captar todo o leito.

Devido às altas temperaturas que se atingem na realização dos ensaios e a necessidade em captar o melhor possível as frentes de fogo, foi selecionado o filtro de intervalo de temperaturas 300-1500°C.



Erro! A origem da referência não foi encontrada.

4. TRATAMENTO E ANÁLISE DE DADOS

Os ensaios experimentais tiveram como principal resultado a velocidade de propagação dinâmica conseguida através do tratamento das imagens de infravermelhos.

Esta análise estará dividida em três grupos: tipologia do ensaio (escoamento perpendicular ou paralelo), distância entre frentes e velocidade do vento.

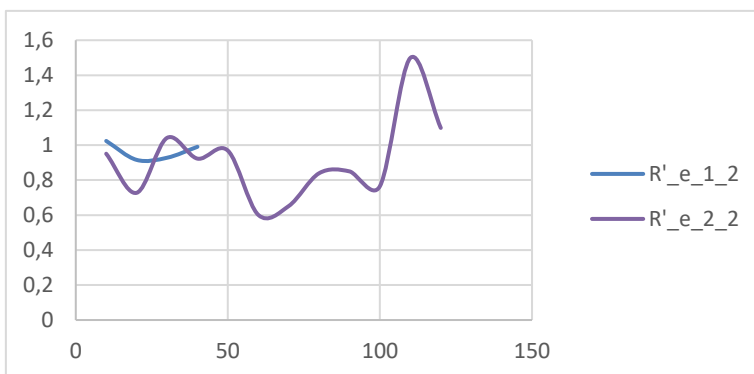
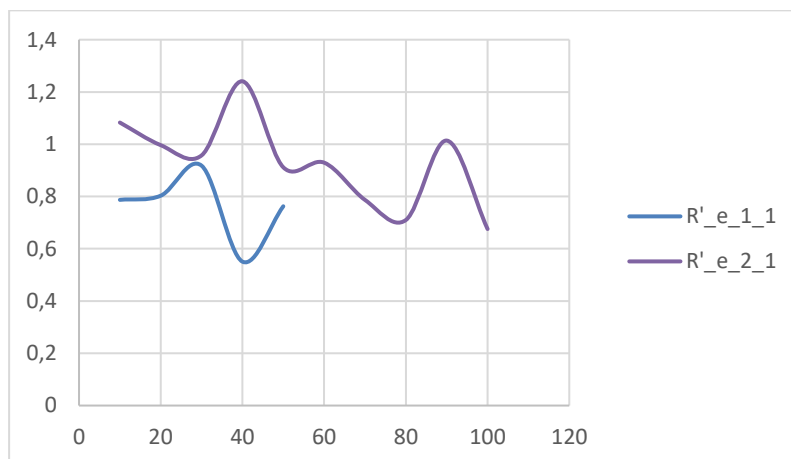
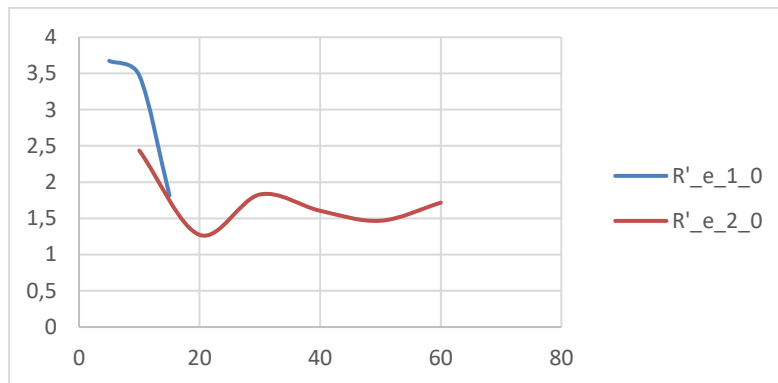
4.1. Tipologia do Ensaio – Escoamento Perpendicular

4.1.1. Variação da distância de frente com igual velocidade de vento

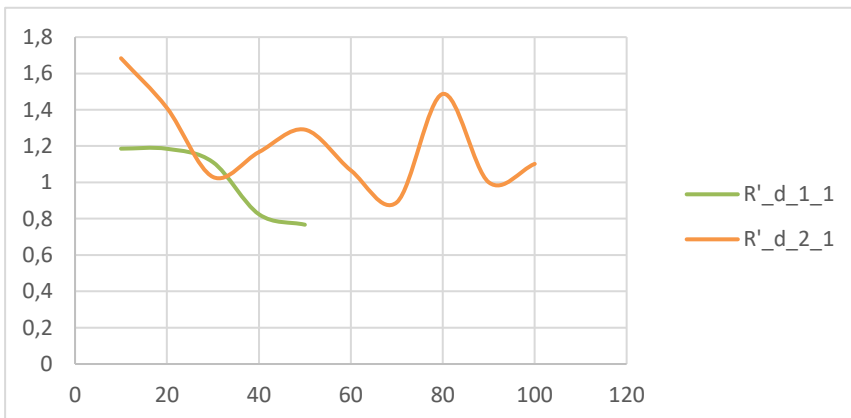
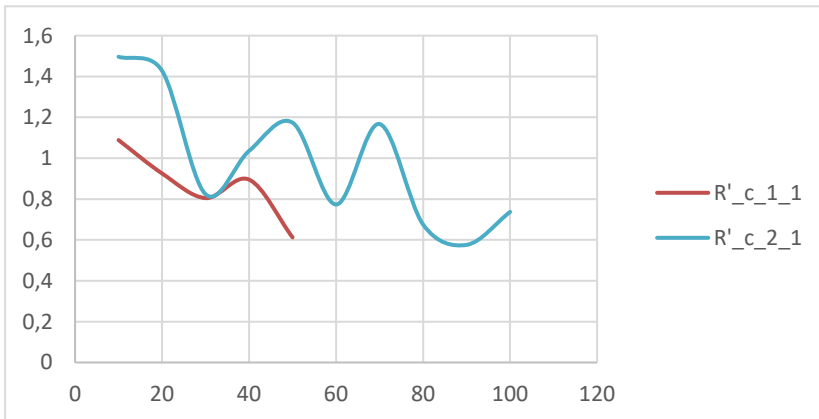
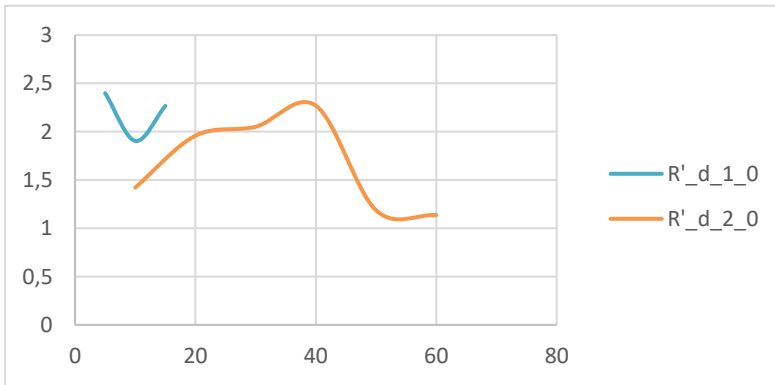
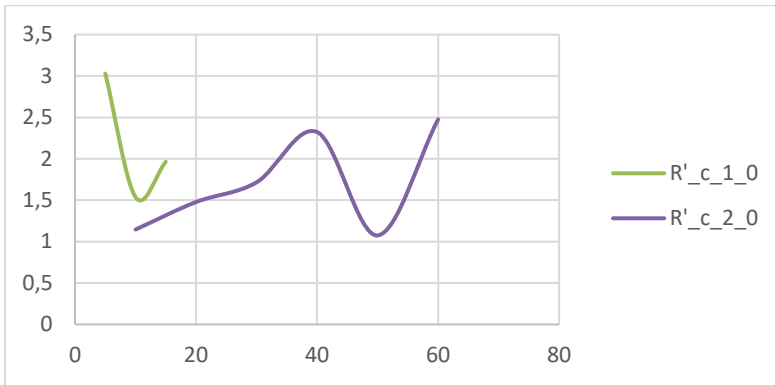
4.1.2. Igual distância entre frentes com vento de diferentes velocidades

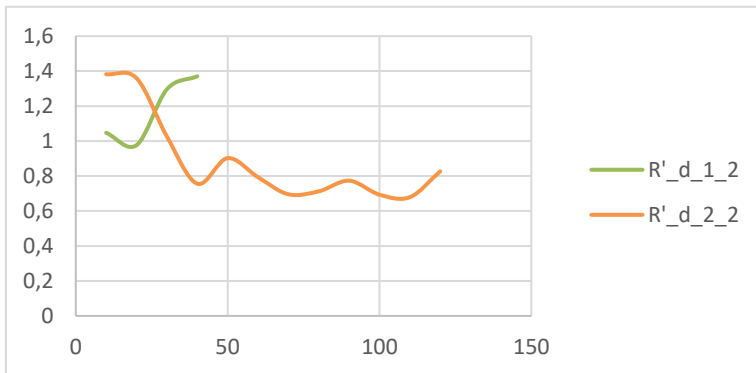
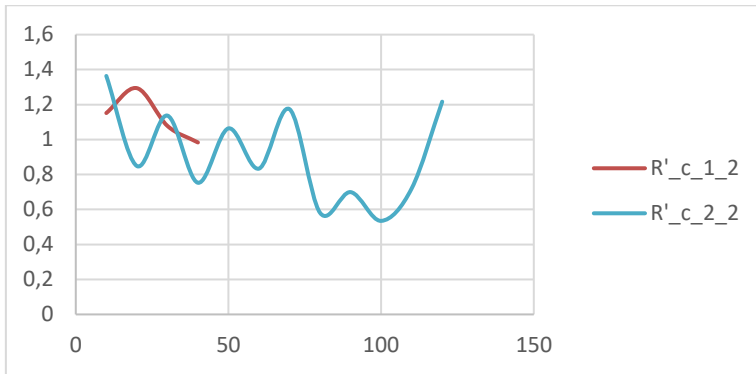
4.2. Tipologia do Ensaio – Escoamento Paralelo

4.2.1. Variação da distância de frente com igual velocidade de vento

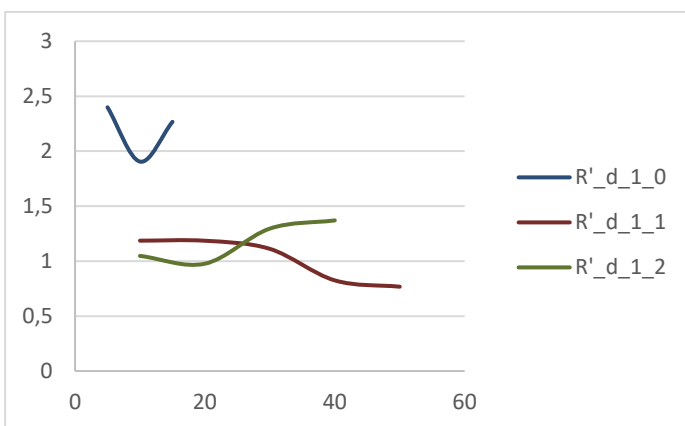
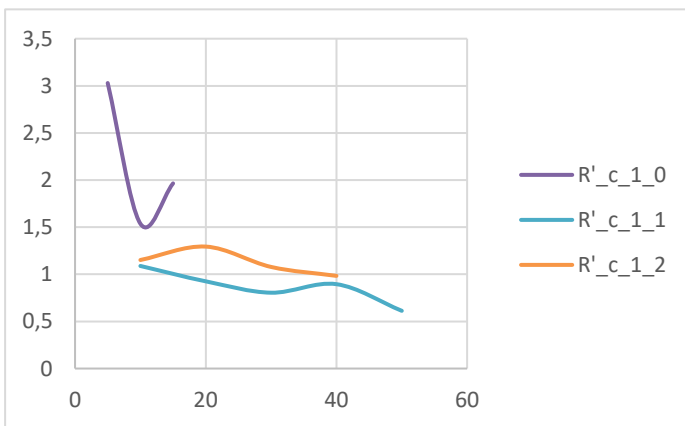
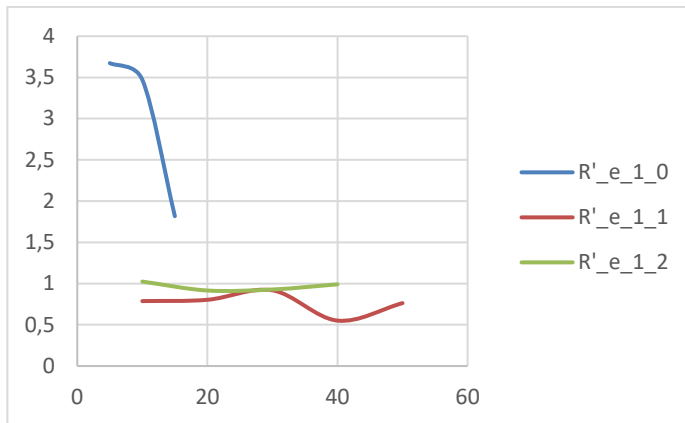


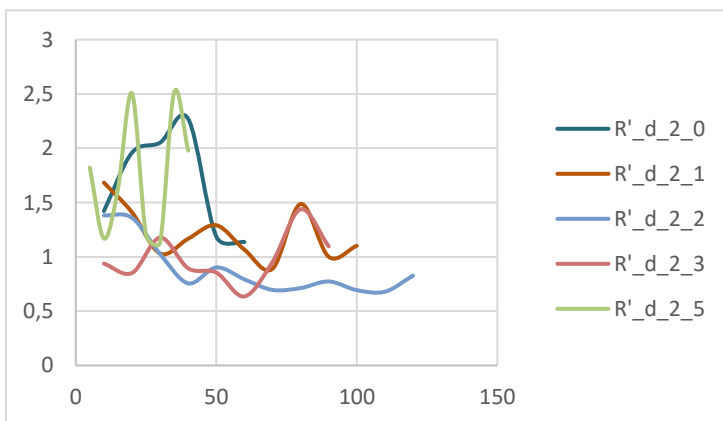
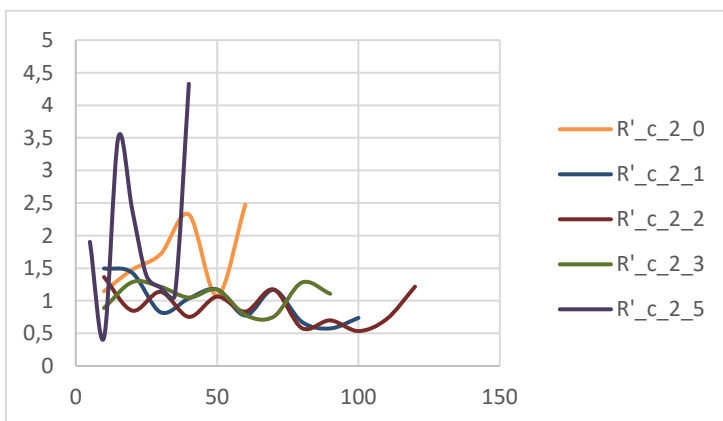
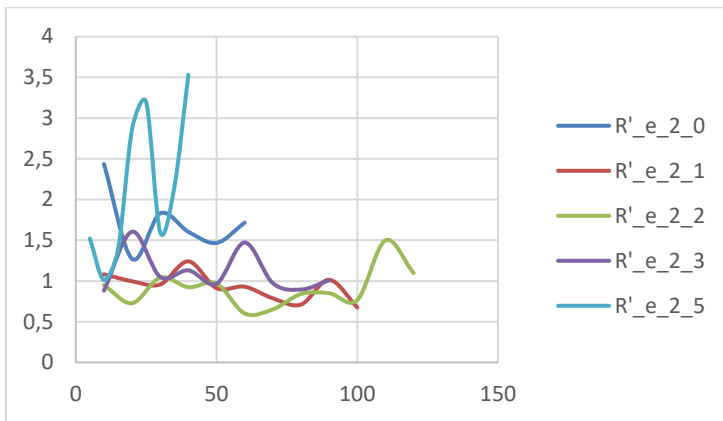
Interação entre frentes





4.2.2. Igual distância entre frentes com vento de diferentes velocidades





[Remover se necessário para garantir que o próximo Capítulo inicia numa página ímpar]

[Remover se necessário para garantir que o próximo Capítulo inicia numa página ímpar]

5. CONCLUSÕES

Esta dissertação tinha como objetivo o estudo da interação entre frentes de incêndio, sendo este tipo de fogo caracterizado por apresentar um comportamento extremo do fogo.

A interação entre frentes de incêndio apresenta um comportamento dinâmico

O estudo aqui apresentado e desenvolvido foi baseado em ensaios experimentais em ambiente laboratorial. Foram feitos 12 tipos de ensaios. A distância entre frentes (1m e 2m), a direção do vento (perpendicular à propagação e no sentido da propagação) e a velocidade do vento (1, 2, 3 e 5 m/s) foram as variáveis presentes neste estudo.

Os ensaios experimentais decorreram no Laboratório de Estudos sobre Incêndios Florestais com recurso ao Túnel de Combustão 3. O combustível selecionado foi palha de *avena sativa*. As velocidades de propagação foram obtidas através do programa Fire ROS Calculator com recurso a *frames* retirados dos vídeos da câmara IR.

Através destes ensaios, pode-se concluir que:

No futuro, seria importante complementar os conhecimentos sobre a interação entre frentes paralelas através de simulações numéricas e com a realização de mais ensaios nomeadamente no sentido perpendicular da direção do vento, onde se observou um comportamento interessante e passível de ser estudado em maior pormenor. Uma verificação da influência dos materiais utilizados em laboratório no resultado final dos ensaios também

seria interessante, uma vez que poderia resultar numa diminuição do tempo entre realização de ensaios.

[Remover se necessário para garantir que o próximo Capítulo inicia numa página ímpar]

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abouali, A. 2019. Fire ROS Calculator. <https://doi.org/10.5281/zenodo.2662142>
- BYRAM, G. M. 1959. Combustion of forest fuels. In *Forest fire: control and use*. Edited by K. P. Davis. McGraw-Hill, New York. pp. 61-89
- Cruz, Miguel G., Andrew L. Sullivan, Rosemary Leonard, Sarah Malkin, Stuart Matthews, Jim S. Gould, William L. McCaw, and Martin E. Alexander. 2014. “Fire Behaviour Knowledge in Australia Spread Prediction Capability and Application.” (June).
- Ellis, P. F. M. 2010. “The Effect of the Aerodynamic Behaviour of Flakes of Jarrah and Karri Bark on Their Potential as Firebrands.” *Journal of the Royal Society of Western Australia* 93(1):21–27.
- Pinto, Cláudia, Domingos Viegas, Miguel Almeida, and Jorge Raposo. 2017. “Fire Whirls in Forest Fires: An Experimental Analysis.” *Fire Safety Journal* 87(November 2016):37–48.
- Randerson, J. T., Y. Chen, G. R. Van Der Werf, B. M. Rogers, and D. C. Morton. 2012. “Global Burned Area and Biomass Burning Emissions from Small Fires.” *Journal of Geophysical Research G: Biogeosciences* 117(4).
- Raposo, J. R., D. X. Viegas, X. Xie, M. Almeida, A. R. Figueiredo, L. Porto, and J. Sharples. 2018. “Analysis of the Physical Processes Associated with Junction Fires at Laboratory and Field Scales.” *International Journal of Wildland Fire* 27(1):52–68.
- Raposo, Jorge Rafael Nogueira Raposo. 2016. “Extreme Fire Behaviour Associated to Merging of Two Linear Fire Fronts.” 110.
- Viegas, Domingos Xavier. 2005. “A Mathematical Model for Forest Fires Blowup.” *Combustion Science and Technology* 177(1):27–51.
- Viegas, Domingos X. 2006. “Parametric Study of an Eruptive Fire Behaviour Model.” *International Journal of Wildland Fire* 15(2):169–77.
- Viegas, Domingos X. 2006. “Modelação do Comportamento do Fogo”. In J. S. Pereira (Ed.), *Incêndios Florestais em Portugal: Caracterização, Impactes e Prevenção* (p. 288). Lisboa: ISA Press.
- Viegas, Domingos Xavier. 2012. “Extreme Fire Behaviour.” *Forest Management:*

Technology, Practices and Impact (v):1–56.

Viegas, Domingos Xavier and Luis Paulo C. Neto. 1991. “Wall Shear-Stress as a Parameter to Correlate the Rate of Spread of a Wind Induced Forest Fire.”

International Journal of Wildland Fire 1(3):177–88.

Viegas, Domingos Xavier, Carlos Rossa, and Luís Mário Ribeiro. 2011. *Incêndios*

Florestais. 1^a. edited by D. X. Viegas. Lisboa: Verlag Dashöfer Edições profissionais Unip., Lda.

[ANEXO A]

[Remover se necessário para garantir que o próximo Capítulo inicia numa página ímpar]

[ANEXO B]

[Remover se necessário para garantir que o próximo Capítulo inicia numa página ímpar]

[APÊNDICE A]

[Remover se necessário para garantir que o próximo Capítulo inicia numa página ímpar]

[APÊNDICE B]