



FCTUC FACULDADE DE CIÊNCIAS
E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE COIMBRA

DEPARTAMENTO DE
ENGENHARIA MECÂNICA

O efeito do vento e do declive em fogos de junção

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

The effect of wind and slope in junction fires

Autor

Diogo Lopes Rodrigues

Orientadores

Professor Doutor Domingos Xavier Filomeno Carlos Viegas

Doutor Jorge Rafael Nogueira Raposo

Júri

Presidente	Professor Doutor Jorge Campos da Silva André Professor Auxiliar da Universidade de Coimbra Doutor Miguel Abrantes de Figueiredo Bernardo de
Vogais	Almeida Investigador da Universidade de Coimbra (ADAI) Professor Doutor Domingos Xavier Filomeno Carlos
Orientador	Viegas Professor Catedrático da Universidade de Coimbra

Coimbra, Setembro, 2016

“A mente que se abre a uma nova ideia jamais volta ao seu tamanho inicial.”

Oliver Wendell Holmes

Aos meus pais e ao meu irmão.

Agradecimentos

Quando penso em todas as pessoas que me ajudaram, direta ou indiretamente, a atingir os meus objetivos e a concretizar esta etapa da minha formação académica, este espaço torna-se seguramente limitado e curto, não me permitindo agradecer, como desejava, a todas essas pessoas. Desta forma, deixo aqui apenas algumas palavras, com um profundo sentimento de agradecimento e de reconhecimento.

Ao Professor Doutor Domingos Xavier Viegas, meu orientador nesta dissertação, agradeço sobretudo pela oportunidade que me deu quando me aceitou como seu orientando. Agradeço ainda pela amabilidade, pela partilha de conhecimento e pela disponibilidade que sempre demonstrou.

Ao Doutor Jorge Nogueira Raposo, meu coorientador, pela disponibilidade e pelo acompanhamento incansável, principalmente nos trabalhos experimentais e respetiva análise de resultados.

À Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, em especial ao Departamento de Engenharia Mecânica e à ADAI, que tornaram possível a realização desta dissertação.

Aos meus colegas de laboratório e a toda a equipa do CEIF, pelo sentido de entreatajuda e companheirismo, fatores muito importantes na realização desta dissertação e que me permitiram que cada dia fosse encarado com especial motivação.

Aos meus amigos, pelos conselhos fundamentais e por estarem sempre prontos a ajudar, especialmente nos momentos mais difíceis.

À minha família, em especial aos meus pais e ao meu irmão, por me terem ajudado em tudo o que puderam, permitindo que me focasse totalmente na realização desta dissertação. Agradeço-lhes também por serem os alicerces desta casa que vou construindo, por estarem sempre presentes e por serem a força que me faz sempre querer chegar mais longe. Sem eles, nada disto seria possível, por isso, mais uma vez, agradeço-lhes profundamente.

Resumo

O objetivo desta dissertação é o estudo do fenómeno do fogo de junção, um tipo de comportamento do fogo que ocorre quando duas frentes se encontram, fazendo entre si um determinado ângulo. O trabalho focou-se principalmente nos efeitos do vento e do declive na velocidade de propagação do fogo de junção.

Para caracterizar os efeitos das variáveis acima referidas no fogo de junção, foram elaborados dois programas experimentais distintos: no primeiro, foram realizados vários ensaios de queima de 3 combustíveis diferentes, fazendo-se variar o ângulo de inclinação da mesa de ensaios entre 0 e 40°; no segundo, realizado no túnel de vento do CEIF, foram realizados ensaios de queima usando caruma (*Pinus pinaster*) e fazendo variar a velocidade do vento entre 1 e 5 m/s.

Palavras-chave: Fogo de junção, encontro de frentes, efeito do vento, efeito do declive, comportamento extremo do fogo, incêndio florestal.

Abstract

The objective of this dissertation is the study of the junction fire phenomena, which occurs when two fire fronts intersect, making a certain angle between them. The main focus of the work is the understanding of the role of slope and wind on the fire's rate of spread.

In order to characterize the effects of slope and wind on junction fires, two different types of experimental tests were performed. Tests using 3 different kinds of fuels were performed, varying the slope between 0 and 40°. Experiments on CEIF's wind tunnel, using pine needles (*Pinus pinaster*) were also performed, varying wind speed between 1 and 5 m/s.

Keywords Junction fire, fire merging, role of wind, role of slope, extreme fire behavior, forest fire.

Índice

Índice de Figuras	xi
Índice de Tabelas.....	xiii
Simbologia e Siglas.....	xv
Simbologia.....	xv
Siglas.....	xvi
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Motivação.....	1
1.2. Enquadramento teórico.....	2
1.2.1. Enquadramento geral	2
1.2.2. Comportamento do fogo	3
1.2.3. Comportamento eruptivo	7
1.2.4. Fogo de junção.....	8
1.2.5. Efeito do vento e do declive	9
2. FOGO DE JUNÇÃO	15
2.1. Definição do problema	15
2.2. Ocorrência de fogos de junção	17
2.3. Modos de transferência de calor	18
2.3.1. Convecção.....	18
2.3.2. Radiação.....	19
3. ENSAIOS EXPERIMENTAIS	21
3.1. Introdução.....	21
3.2. Ensaio de campo: Gestosa	22
3.2.1. Preparação do ensaio.....	22
3.2.2. Aquisição de dados.....	23
3.3. Ensaio laboratoriais com declive.....	24
3.3.1. Programa experimental	24
3.3.2. Preparação do ensaio.....	26
3.3.3. Aquisição de dados.....	27
3.3.4. Velocidade básica de propagação (R_0).....	28
3.4. Ensaio laboratoriais com vento	28
3.4.1. Programa experimental	29
3.4.2. Preparação do ensaio.....	30
3.4.3. Aquisição de dados.....	31
4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	33
4.1. Efeito do declive	33
4.1.1. Velocidade de propagação (R'_D)	33
4.1.2. Velocidade de escoamento (U).....	37
4.2. Efeito do vento	40
4.2.1. Velocidade de propagação (R'_D)	40

4.2.2. Comparação com os ensaios de frentes lineares	41
4.3. Análise comparativa dos efeitos do vento e do declive	44
5. CONCLUSÃO	49
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	51

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Exemplos de tipos de propagação do fogo em incêndios florestais: (a) fogo de solo (retirado de https://www.nps.gov/features/yell/slidefile/fire/wildfire88/groundfire/Images/12116.jpg), (b) fogo de superfície (retirado de https://www.nps.gov/ngpfire/Photos/graham01b.jpg) e (c) fogo de copas (retirado de https://summitvoice.files.wordpress.com/2011/06/fire9.jpg).	5
Figura 2.1. Evolução do fogo no ensaio CF97 ($\alpha=40^\circ$); o tempo entre <i>frames</i> é de 4 segundos.	15
Figura 2.2. Representação esquemática do problema em estudo.	16
Figura 3.1. Parcelas dos ensaios da Gestosa 2016.	22
Figura 3.2. Cápsulas de explosivos utilizados no ensaio da Gestosa.	23
Figura 3.3. Mesa Desfiladeiro Grande DE4.	24
Figura 3.4. Mesa para a realização do ensaio de determinação do R_0	28
Figura 3.5. Túnel de vento do LEIF.	29
Figura 3.6. Leito retangular de caruma preparado para um ensaio no túnel de vento.	31
Figura 4.1. Variação de R'_D em função de t'_m para vários declives e combustíveis.	34
Figura 4.2. Variação de R'_M em função de α para vários combustíveis.	35
Figura 4.3. Variação de t'_M em função de α para vários combustíveis.	35
Figura 4.4. Variação de x_M em função de α para vários combustíveis.	36
Figura 4.5. Variação de t_M/t_{total} em função de α para vários combustíveis.	37
Figura 4.6. Variação de U em função do tempo para vários combustíveis.	39
Figura 4.7. Variação de R'_D em função do tempo, para os ensaios realizados com vento e o ensaio sem vento com declive nulo. O gráfico do ensaio CF98 é o único que deve ser lido no sistema de eixos secundário.	40
Figura 4.8. Variação de R'_D em função da distância x_D	41
Figura 4.9. Variação dos parâmetros adimensionais (velocidade de propagação do fogo) em função da velocidade do vento U_w	43
Figura 4.10. Variação dos parâmetros temporais em função da velocidade do vento U_w , para os ensaios em “V”.	44
Figura 4.11. Variação de R'_M em função do declive e da velocidade do vento.	46
Figura 4.12. Variação de t_M em função do declive e da velocidade do vento.	47
Figura 4.13. Variação de x_M em função do declive e da velocidade do vento.	47

Figura 4.14. Variação de R'_M/R'_{med} em função do declive e da velocidade do vento. 48

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1.1. Tempo de residência para diferentes combustíveis.	7
Tabela 3.1. Plano de ensaios com declive e sem vento.	25
Tabela 3.2. Plano de ensaios com vento.	30
Tabela 4.1. Dados relativos aos ensaios realizados no túnel de vento.	42
Tabela 4.2. Dados relativos aos ensaios com declive, para o combustível PP.	45
Tabela 4.3. Dados relativos aos ensaios com vento, para o combustível PP.	45

SIMBOLOGIA E SIGLAS

Simbologia

<i>Símbolo</i>	<i>Unidades</i>	<i>Definição</i>
dV	V	Diferença de potencial
L1	-	Linha de fogo 1
L2	-	Linha de fogo 2
m _c	kg	Massa total de combustível
m _f	%	Teor de humidade de um combustível
PP	-	Leito de caruma (<i>Pinus pinaster</i>)
R' _D	-	Velocidade de propagação do ponto D (adimensional)
R' _M	-	Velocidade de propagação máxima (adimensional)
R' _{M(R)}	-	Velocidade de propagação máxima (adimensional) para um ensaio retangular
R' _{med}	-	Velocidade média de propagação do fogo (adimensional)
R ₀	m/s	Velocidade básica de propagação
R _D	m/s	Velocidade de propagação do ponto D
R _M	m/s	Velocidade de propagação máxima
ROS (ou R)	m/s	<i>Rate of spread</i> (velocidade de propagação)
SH	-	Leito de mato
ST	-	Leito de palha
t'	-	Tempo adimensional
t ₀	s	Tempo de residência
t _m	s	Tempo médio entre 2 instantes consecutivos
t _M	s	Tempo necessário para se atingir a velocidade máxima de propagação
t _{total}	s	Tempo total do ensaio
U	m/s	Velocidade do escoamento induzido pelo fogo

U_w	m/s	Velocidade do vento
x_D	cm	Distância do ponto D à origem num dado instante
α	°	Ângulo de inclinação (declive)
θ_0	°	Ângulo inicial entre as frentes de fogo

Siglas

ADAI – Associação para o Desenvolvimento da Aerodinâmica Industrial

CEIF – Centro de Estudos sobre Incêndios Florestais

DEM – Departamento de Engenharia Mecânica

FCTUC – Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra

IR – *Infra red* (infravermelho)

LAI – Laboratório de Aerodinâmica Industrial

LEIF – Laboratório de Estudos sobre Incêndios Florestais

1. INTRODUÇÃO

Neste capítulo introdutório aborda-se a questão motivacional por trás da realização da presente dissertação. De seguida, faz-se o enquadramento teórico do tema em estudo, abordando a questão do comportamento do fogo, o trabalho já realizado acerca do fogo de junção e a investigação sobre os efeitos do vento e do declive no comportamento do fogo em geral.

1.1. Motivação

O presente documento surge na sequência do trabalho realizado pela equipa do CEIF sobre os fogos de junção, motivado inicialmente pelos incêndios de Camberra, Austrália, ocorridos no ano de 2003. Esses incêndios, dos quais resultaram inúmeros danos materiais e a perda de vidas humanas, foram extensivamente investigados, em particular pela equipa do CEIF. Dessa investigação concluiu-se que os mesmos tiveram características fora do comum, desafiando o conhecimento até então existente sobre o comportamento do fogo, ao expor um fenómeno mal compreendido ou mesmo desconhecido, segundo Viegas *et al.* (2012^a). De acordo com testemunhos e provas recolhidas no local, a propagação do fogo associada à convergência do mesmo foi extremamente rápida, formando-se um tornado de fogo no espaço entre as duas frentes que convergiram. O fogo chegou a propagar-se a uma velocidade de 27 km/h, valor considerado bastante elevado para um fogo de superfície, conforme Viegas *et al.* (2013). Este comportamento foi justificado por diversos fatores: a inclinação do terreno, a não-uniformidade da vegetação e o forte vento que se fazia sentir, com velocidades médias na ordem dos 30 a 40 km/h nos períodos de maior intensidade do fogo, conforme Sharples *et al.* (2012).

A motivação para o estudo desta temática surge por duas razões: por um lado, a possibilidade de explorar um tema inovador, no qual, obviamente, ainda estão a ser dados os primeiros passos, é algo extremamente aliciante para alguém que inicia um trabalho desta natureza; por outro lado, a utilidade do tema para a sociedade em geral é outro fator determinante, já que um conhecimento profundo do comportamento do fogo, nas mais diversas circunstâncias, é essencial para melhorar o combate aos incêndios florestais, aumentando a segurança de todos os intervenientes. De referir ainda que, na tese de

Doutoramento levada a cabo sobre esta temática (Raposo, 2016), se considera que existem ainda questões que podem ser alvo de trabalho futuro, nomeadamente a influência do vento ou de topografias complexas do terreno no fenómeno da convergência de frentes de fogo.

Finalmente, o estudo do comportamento do fogo é de grande interesse para o nosso país, que todos os anos se debate com um elevado número de incêndios florestais. Aliás, a nível europeu, os incêndios florestais ocorrem principalmente nos países do Sul devido às suas características climáticas: temperaturas médias anuais elevadas, poucos dias de chuva e grandes áreas com matérias combustíveis (Boboulos e Purvis, 2009). O estudo do comportamento do fogo em condições extremas, como é o caso da presente dissertação, tem vindo a ser objeto de interesse da comunidade científica nos últimos anos e pode ajudar a evitar mais tragédias associadas aos incêndios.

1.2. Enquadramento teórico

1.2.1. Enquadramento geral

O comportamento do fogo, de um modo geral, é um fenómeno que tem vindo a ser estudado nos últimos 90 anos. Sullivan (2009^a) considera que os estudos realizados por Hawley (1926) e Gisborne (1927, 1929) foram pioneiros nesta matéria, lançando a ideia de que o entendimento dos processos subjacentes aos incêndios florestais poderia advir de métodos experimentais, ideia que é posteriormente explorada nos trabalhos de Curry e Fons (1938, 1940) e Fons (1946), que trouxeram uma abordagem física rigorosa à medição e modelação do comportamento do fogo. Segundo Sullivan (2009^a), os anos 50 e 60 foram especialmente prolíficos na investigação sobre incêndios, na sequência de estudos relacionados com os efeitos de bombardeamentos em massa e dos danos colaterais causados por armas nucleares, no período pós Segunda Guerra Mundial.

Rothermel (1972) desenvolve um modelo semi-empírico para prever a propagação do fogo em incêndios florestais, que por sua vez serviu de base para inúmeros modelos de previsão de comportamento do fogo, alguns desenvolvidos quase 30 anos depois, o que mostra a importância do trabalho deste autor. Sullivan (2009^a) sugere ainda que os avanços tecnológicos dos últimos anos contribuíram para um interesse crescente na modelação do comportamento de incêndios florestais.

Em relação à interação entre chamas, Finney e McAllister (2011) referem que o comportamento de um incêndio florestal pode mudar drasticamente na presença de outro fogo que se encontre próximo, reconhecendo a importância de compreender e prever essas mudanças.

Grumer e Strasser (1965) e Huffman *et al.* (1969) concluem que a aproximação de frentes de fogo gera um aumento da taxa de propagação das mesmas. Kamikawa *et al.* (2005) referem no seu trabalho que a convergência de chamas torna o fogo mais destrutivo e fora de controlo, dificultando o combate às chamas e levando à possibilidade de formação de tornados de fogo, fenómeno que se enquadra no chamado comportamento extremo do fogo. Morvan *et al.* (2009) fazem a simulação numérica da interação entre duas frentes de fogo em condições semelhantes às que ocorrem em operações de supressão do fogo (por exemplo, a utilização de um contrafogo para auxiliar a extinção de um incêndio). Uma das conclusões tiradas pelos autores é a de que a convergência de duas frentes causa um aumento rápido da intensidade da linha de fogo, sendo máximo o valor da taxa de calor libertado durante o processo de convergência; os autores também observam uma grande variação na velocidade de propagação do fogo a partir do momento em que se inicia a interação entre as frentes. Morvan *et al.* (2013), num estudo semelhante ao anterior, analisam a interação entre duas frentes de fogo (sendo uma delas um contrafogo) usando simulações numéricas em 3D, concluindo que a interação entre as mesmas começa para distâncias entre os 10 e os 20 metros. Wang *et al.* (2015) analisam a taxa de queima e a altura das chamas na junção de *pool fires* (“piscinas” de combustível líquido), concluindo que essa junção provoca um aumento de 50 a 100% em ambos os parâmetros. Todos estes estudos apontam, assim, para uma alteração comportamental do fogo quando se dá a interação entre chamas, podendo essa mudança, no caso dos incêndios florestais, conduzir ao chamado comportamento extremo do fogo (que se definirá na próxima subsecção, intitulada “Comportamento do fogo”).

1.2.2. Comportamento do fogo

Nesta secção serão apresentadas algumas ideias base para a compreensão do comportamento do fogo em geral, de acordo com Viegas *et al.* (2011), exceto onde mencionado.

Um incêndio florestal é um fenómeno bastante complexo e que depende de diversas variáveis. O comportamento do fogo é o principal condicionador de tudo o que

envolve um incêndio, desde a prevenção até ao combate às chamas, pelo que a compreensão do mesmo é de extrema importância. Apesar dos esforços desenvolvidos nesse sentido, a verdade é que os incêndios ainda são considerados fenómenos de difícil previsão e análise, sendo ainda parcial o conhecimento acerca dos mesmos.

Em relação à propagação do fogo num incêndio, esta pode dar-se de diversos modos:

- Fogo de solo ou subterrâneo: relacionado com a queima de matéria orgânica que se encontra abaixo do nível do solo (como troncos, raízes ou ramos); normalmente, estes materiais ardem de forma lenta (baixa velocidade de propagação) e sem chama (Viegas, 1998), como ilustra a Figura 1.1(a);
- Fogo de superfície: relacionado com a queima de combustíveis vivos e mortos que se encontram junto ao solo, como herbáceas, arbustos e pequenas árvores, e que se caracteriza por velocidades de propagação ligeiramente maiores que no caso anterior; é uma situação que pode derivar da anterior, em casos particulares (Viegas, 1998);
- Fogo de copas: situação que normalmente deriva da anterior, caso as condições sejam favoráveis, e que consiste na propagação do fogo à copa (folhagem) das árvores, num processo que envolve maiores quantidades de energia libertada e alturas de chama mais elevadas.

Importa ainda definir outros conceitos que estão intimamente ligados ao comportamento do fogo. São eles:

- Fogo eruptivo: fogo que inicialmente se propaga com uma velocidade considerada normal, velocidade essa que depois sofre um aumento repentino e vai aumentando de forma contínua; está normalmente associado a declives acentuados do terreno (Viegas, 2006);
- Focos secundários: relacionado com a libertação de partículas incandescentes, que são transportadas pelas correntes de convecção produzidas pelo fogo e pelo próprio vento e que podem gerar uma nova ignição a poucos metros ou até a quilómetros do local onde foram libertadas;

- Fogo de junção: fenómeno que implica a interação de frentes de fogo a distâncias relativamente curtas e fazendo um ângulo relativamente pequeno entre si, resultando num aumento repentino da velocidade de propagação, seguido de uma diminuição contínua até à extinção; caracteriza-se ainda pela elevada libertação de energia.

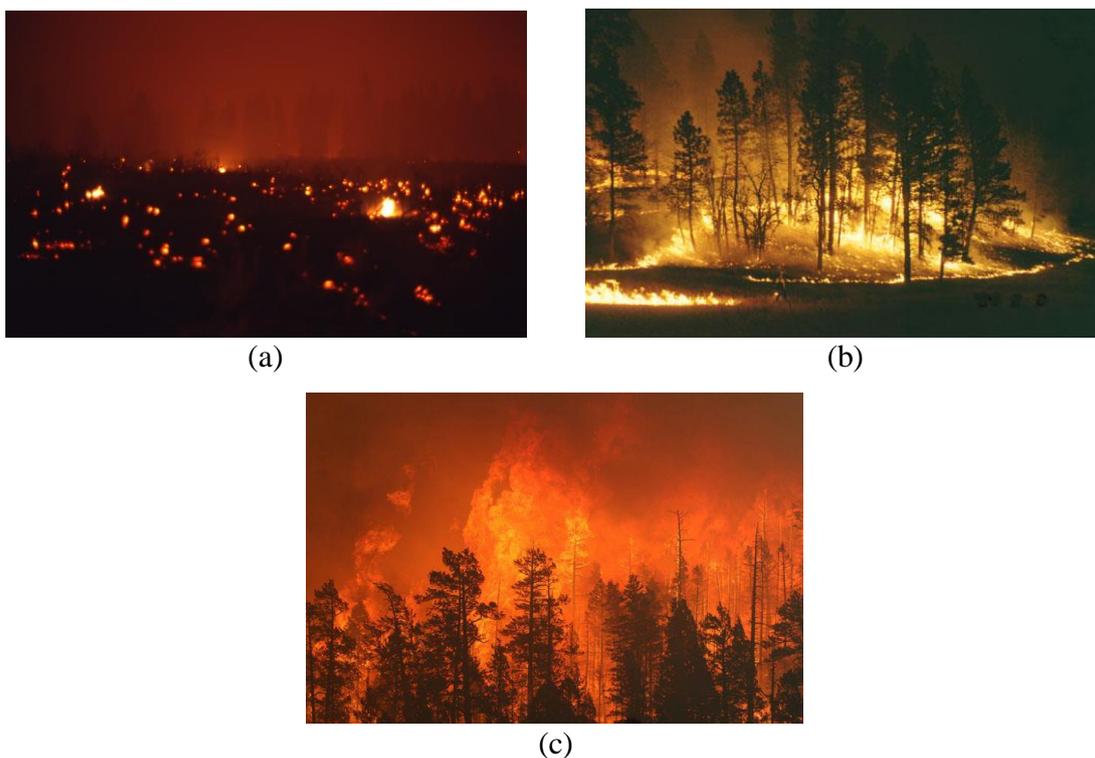


Figura 1.1. Exemplos de tipos de propagação do fogo em incêndios florestais: **(a) fogo de solo** (retirado de <https://www.nps.gov/features/yell/slidefile/fire/wildfire88/groundfire/Images/12116.jpg>), **(b) fogo de superfície** (retirado de <https://www.nps.gov/ngpfire/Photos/graham01b.jpg>) e **(c) fogo de copas** (retirado de <https://summitvoice.files.wordpress.com/2011/06/fire9.jpg>).

Além desta classificação, importa referir outra, baseada na dinamicidade do fogo e que divide o comportamento do mesmo em duas formas distintas: comportamento normal e comportamento extremo. Um fogo pode ser classificado como normal quando tem uma velocidade de propagação relativamente baixa e praticamente independente do tempo, podendo ser extinto em segurança com recurso a meios de combate considerados tradicionais. Por outro lado, o comportamento extremo caracteriza-se por velocidades de propagação e taxas de libertação de energia muito elevadas, normalmente crescentes com o tempo; o combate às chamas através de métodos tradicionais é ineficaz.

O comportamento normal, comportamento extremo ou a transição de um para o outro são ditados pelos fatores que influenciam a propagação de um incêndio florestal. Esses

fatores, numa abordagem clássica, são três, que compõe o chamado “triângulo do fogo”: o combustível, a topografia e a meteorologia. Viegas (2006) propõe a adição do tempo como quarto fator, dado o cariz dinâmico do comportamento do fogo, transformando o triângulo num “quadrado do fogo”.

Em relação ao combustível, este pode ser classificado como qualquer material vegetal com capacidade para iniciar e propagar um incêndio. Algumas das suas propriedades, como a composição química, a inflamabilidade e o teor de humidade, influenciam o processo de combustão, com repercussões, por exemplo, na velocidade de propagação do fogo e na intensidade de energia libertada.

Por seu lado, a topografia tem influência fundamentalmente através do ângulo de inclinação média do terreno (α) e da curvatura do mesmo. Viegas (1998) afirma que quanto maior for o ângulo de inclinação, maior será a velocidade de propagação de uma frente de fogo que se propaga encosta acima, sendo que essa velocidade é praticamente independente da inclinação se o fogo se propagar encosta abaixo, sendo de resto esta a conclusão a que chega Van Wagner (1988).

A meteorologia engloba um conjunto de fatores que podem influenciar a iniciação e a propagação de um incêndio. Viegas (1998) considera que os mais importantes são a temperatura do ar, a humidade do ar, a precipitação, a radiação solar, a estabilidade atmosférica e o perfil vertical de velocidade e direção do vento. Todos esses fatores afetam, por exemplo, a inflamabilidade do combustível, nomeadamente através da sua influência no teor de humidade do mesmo. Por exemplo, o teor de humidade baixa consideravelmente se a temperatura do ar e o nível de radiação solar forem elevados, podendo-se atingir níveis para os quais a probabilidade de ocorrência de um incêndio é perigosamente alta. Ainda assim, é consensual que o vento tem um papel preponderante na propagação do fogo num incêndio florestal, conforme Viegas (1998). A variação do vento no tempo e no espaço torna a sua definição extremamente complexa, pelo que é habitual considerar-se a sua velocidade e direção a dez metros de altura como convenção, podendo-se assim caracterizar as condições meteorológicas de um dado local.

Por último, o tempo é um fator que, apesar de ser negligenciado por vários autores, é considerado fundamental na análise feita em Viegas (2006). O autor considera que os incêndios florestais se propagam de forma dinâmica uma vez que o seu comportamento depende explicitamente do tempo, apesar de muitos modelos de previsão assumirem

condições de fronteira permanentes (não variáveis com o tempo) para determinar as propriedades de propagação do fogo. Um desses exemplos é o modelo semi-empírico de Rothermel (1972).

1.2.3. Comportamento eruptivo

Nesta subsecção é feita uma breve referência ao comportamento eruptivo do fogo. Este tipo de comportamento ocorre na presença de um declive ou em desfiladeiros. Viegas (2006) refere que a velocidade de propagação de uma frente de fogo aumenta continuamente quando o declive é acentuado ou quando o desfiladeiro é bastante cerrado. Viegas (2005) desenvolve um modelo matemático que estima o valor instantâneo da velocidade de propagação. Essa velocidade depende de vários parâmetros, entre eles R_0 (velocidade básica de propagação), t_0 (tempo de residência) e outros coeficientes que dependem do leito de combustível considerado. A velocidade básica de propagação R_0 é a velocidade de uma frente linear, num dado combustível, em condições de vento e declive nulos; depende da estrutura e da composição do leito de combustível, mas depende ainda mais do teor de humidade (Viegas, 2006). O tempo de residência serve de medida das propriedades dinâmicas do combustível, como se fosse um “tempo de relaxação”, e pode ser caracterizado pela duração da reação de combustão num determinado local do leito de combustível. Combustíveis mais leves ardem mais depressa, respondendo rapidamente a alterações do meio. Os valores do tempo de residência para três combustíveis diferentes podem ser consultados na Tabela 1.1.

Tabela 1.1. Tempo de residência para diferentes combustíveis.

Combustível	Tempo de residência t_0 (s)
Palha (ST)	42.8
Caruma (PP)	54.2
Mato (SH)	65.6

O modelo proposto por Viegas (2005) assume que existe uma relação unívoca entre a velocidade de referência do vento (U) e a velocidade de propagação (R). Assume também como sendo unívoca a relação entre dU e dR , para um determinado intervalo de tempo dt . Estas hipóteses são a base explicativa dos fenómenos por trás da fase de aceleração num fogo de junção, segundo Raposo (2016).

1.2.4. Fogo de junção

Mais recentemente, Viegas *et al.* (2012^a) observam que a interação entre duas frentes de fogo convergentes, fazendo um ângulo relativamente pequeno entre si, conduz a velocidades de propagação do fogo extremamente elevadas, nunca antes observadas. Este fenómeno, que os investigadores do CEIF apelidam de “*jump fire*”, já foi também observado em incêndios reais e estudado através de experiências laboratoriais, conforme Viegas *et al.* (2012^b). Através desses ensaios, verifica-se que, de facto, o fogo pode atingir velocidades de propagação muito elevadas num curto espaço de tempo, provocando uma destruição fora do comum, o que se enquadra naquilo a que se chama comportamento extremo do fogo. No local de convergência, verificou-se que o ponto de interseção das frentes de fogo sofre um aumento repentino da velocidade de propagação, diminuindo depois gradualmente até à extinção do fogo. Os autores apontam a combinação da transferência de calor por convecção e por radiação como explicação para este súbito aumento de velocidade, desenvolvendo um modelo analítico que traduz esse efeito de concentração de energia que ocorre na zona de convergência. No trabalho já mencionado, os testes laboratoriais foram efetuados em condições de declive nulo.

É importante referir que a designação “*jump fire*” foi posteriormente substituída por “*junction fire*”, que significa “fogo de junção”, para evitar possíveis confusões com o fenómeno associado à projeção de partículas (“*spot fires*”), que pode ocorrer num incêndio e que por vezes é referido como “*fire jumps*”.

Viegas *et al.* (2012^a) observam ainda que os valores da velocidade rotacional das linhas de fogo são fundamentalmente negativos, ao contrário do que havia sido concluído para outro tipo de fogos, onde esses valores eram positivos em geral. Os autores justificam esta diferença com a elevada concentração de energia que se verifica na vizinhança do ponto de interseção das frentes de fogo e com o mecanismo de transporte de energia ao longo das linhas de fogo, que será diferente do mecanismo estudado em Viegas e Rossa (2009), segundo aqueles. Por fim, outra importante observação feita pelos mesmos autores é a de que o ângulo entre as frentes de fogo aumenta com o decorrer da combustão (com maior rapidez para ângulos iniciais inferiores), tendendo para 180° (linha horizontal) para todos os valores do mesmo.

Sharples *et al.* (2013) fazem a modelação numérica da junção de linhas de fogo e apresentam uma abordagem diferente ao fenómeno do fogo de junção, com o objetivo de

explicar o rápido avanço do ponto de interseção das frentes de fogo convergentes. Os autores consideram a curvatura da linha de fogo como sendo uma medida da acumulação de energia, numa abordagem puramente geométrica, e que a frente de fogo se propaga com uma velocidade, na direção normal, que é função dessa mesma curvatura. Com esta abordagem, os autores obtêm resultados concordantes com os apresentados por Viegas *et al.* (2012).

Raposo *et al.* (2014) comparam os dados obtidos em ensaios de laboratório, em ensaios de campo e em incêndios reais de larga escala no que toca ao fenómeno dos fogos de junção, concluindo que o fogo apresenta um comportamento idêntico em todas as situações. Segundo os autores, tal facto mostra que os mecanismos que explicam o fenómeno são independentes da escala de análise.

Thomas *et al.* (2015) efetuam ensaios numéricos para analisar a relação entre a velocidade de propagação do fogo (*rate of spread* ou ROS) e a curvatura da frente de fogo proposta por Sharples *et al.* (2013), utilizando configurações geométricas semelhantes às utilizadas por Viegas *et al.* (2012). Para tal, utilizam um modelo chamado WRF-Fire, que é uma combinação do modelo atmosférico WRF proposto por Skamarock *et al.* (2005) com o modelo semi-empírico de Rothermel (1972).

1.2.5. Efeito do vento e do declive

A interação entre o vento, a topografia e o fogo pode produzir uma série de efeitos significativos na propagação do fogo (Sharples *et al.*, 2010). Como já foi referido anteriormente, quanto maior for o ângulo de inclinação do terreno, maior será a velocidade de propagação de uma frente de fogo que se propaga encosta acima, sendo que essa velocidade é praticamente independente da inclinação se o fogo se propagar encosta abaixo. Isto acontece porque, ao descer uma encosta, as chamas tendem a inclinar-se para a zona onde o combustível já está queimado, diminuindo a contribuição da radiação para a propagação do fogo. Obviamente, o contrário acontece quando o fogo se propaga encosta acima. Por seu lado, o vento tem uma influência na propagação do fogo que é semelhante à do declive do terreno, com a diferença de que, no caso do vento, o fogo pode ter intensidades consideravelmente maiores (Viegas, 1998). Muitas vezes, a propagação do fogo é conduzida pela influência mútua do declive e do vento, como aliás refere Viegas (2004). Contudo, existem também estudos que analisam os efeitos de cada fator separadamente, como se

demonstrará de seguida, até porque a complexidade do fenómeno em questão é elevada (Viegas, 2004).

Um dos primeiros estudos sobre a influência do vento é efetuado por Grumer e Strasser (1965), que fazem experiências laboratoriais com o intuito de provar que, em incêndios de larga escala, se criam ventos devido ao próprio tamanho do fogo, capazes de aumentar a taxa de queima até valores iguais aos observados em tempestades de fogo geradas após a detonação de uma bomba nuclear. Os dados recolhidos neste estudo mostram também que a taxa de queima aumenta em uma ordem de grandeza devido ao vento, seja qual for a sua natureza (os autores fazem a distinção entre vento induzido pelo próprio fogo e vento artificial imposto).

O modelo proposto por Rothermel (1972) inclui a contribuição do vento e do declive do terreno na propagação do fogo através de coeficientes adimensionais, que são função do vento, do declive e das propriedades do combustível. O autor refere ainda, com base em resultados experimentais, que alguns leitos de combustíveis muito dispersos (e, portanto, mais difíceis de arder) conseguem sustentar uma propagação rápida do fogo na presença de vento.

Weise e Biging (1994) estudam o efeito combinado do vento e do declive na propagação do fogo, focando-se na influência da velocidade do vento e do ângulo de inclinação do terreno na velocidade de propagação do fogo e na altura das chamas. É referido que os dados recolhidos neste estudo são utilizados não com o intuito de criar um novo modelo de propagação do fogo mas sim para validar modelos já existentes, entre eles o de Rothermel (1972). Os autores afirmam que a velocidade do vento e o declive podem ser vistos como duas forças que atuam nas chamas e na sua velocidade de propagação; contudo, essas forças nem sempre são simultaneamente favoráveis à propagação do fogo. Se o vento for a força dominante, uma de duas coisas acontece: ou o vento transfere calor para o combustível (uma vez que inclina as chamas na sua direção) e as chamas avançam, ou o vento impede o fogo de se propagar ao arrefecer o combustível por queimar (mesmo em situações nas quais o declive aumenta a transferência de calor por radiação).

Weise e Biging (1996) continuam o seu trabalho de investigação do efeito do vento e do declive no comportamento do fogo, fazendo, desta vez, ensaios laboratoriais num túnel de vento de teto aberto e ângulo de inclinação variável. Neste estudo, os autores focam-

se na variação da altura e do ângulo de inclinação das chamas. Os autores concluem que o declive do terreno afeta o ângulo de inclinação das chamas.

Morandini *et al.* (2001) falam da contribuição da transferência de calor por radiação a montante da frente de fogo sob a influência do vento e do declive, fazendo previsões e comparando-as com dados recolhidos após a realização de ensaios laboratoriais. Os parâmetros estudados são a ROS, o perfil de temperaturas e a forma das frentes de fogo. Na primeira série de ensaios é estudado o declive apenas e é utilizada caruma (*Pinus pinaster* e *Pinus halepensis*) como combustível. Na segunda série de ensaios, realizada num túnel de vento do Instituto Superior Técnico (Lisboa), o vento e o declive são estudados em simultâneo; o ângulo de inclinação é mantido constante e faz-se variar a velocidade do vento. Os autores concluem que os efeitos radiativos por si só podem explicar os dados obtidos até um certo valor de declive e de velocidade do vento, a partir dos quais os efeitos convectivos não podem ser desprezados (20° de inclinação para um fogo que se propague encosta acima e ventos na ordem dos 2 m/s). Os ensaios mostram que a curvatura e a ROS da frente de fogo aumentam com o aumento do declive.

Ferragut *et al.* (2004) desenvolvem um modelo numérico bidimensional para a simulação da propagação do fogo, no qual são tidos em conta os efeitos do vento, do declive, da radiação e do teor de humidade do combustível, considerados pelos autores como os mais importantes fatores que influenciam a propagação do fogo. Os cálculos numéricos são feitos com um quadrado de 3 por 3 m e o combustível utilizado é a caruma de pinheiro (*Pinus pinaster*) com uma carga de 1 kg/m². A ignição é feita ao centro do quadrado, sendo que a frente de fogo se propaga formando um círculo no leito de combustível. Num primeiro caso, sem considerar o vento e o declive, os autores concluem que há um valor do teor de humidade acima do qual o fogo não se propaga, para um dado combustível. Num segundo caso, já assumindo o efeito do vento e do declive e considerando uma topografia tipo desfiladeiro, os autores referem que o declive e o vento atuam no termo referente à radiação de uma forma semelhante, ou seja, que os seus efeitos na propagação do fogo são semelhantes. É referido que o vento pode ter dois efeitos distintos: o primeiro no termo convectivo; o segundo no ângulo de inclinação das chamas, aumentando ou diminuindo os efeitos radiativos. Os resultados obtidos numericamente estão, segundo os autores, razoavelmente concordantes com o descrito por Viegas *et al.* (2002).

Viegas (2004) estuda os efeitos do declive e do vento na propagação do fogo, apresentando métodos matemáticos para a vectorização desses parâmetros e comparando-os com resultados experimentais. É referido que as altas temperaturas que se fazem sentir junto de uma frente de fogo são acompanhadas por diferenças de densidade que induzem um escoamento, fenómeno conhecido como convecção natural e que é aumentado na presença de declive. Por outro lado, a convecção induzida pelo vento é considerada forçada e a sua magnitude depende do campo de velocidade junto ao leito de combustível. O autor refere também que o vetor local que representa a ROS é igual à soma dos vetores que representam a contribuição do vento e do declive para a velocidade de propagação, como considerado em Rothermel (1983).

Morandini *et al.* (2006) investigam os efeitos do vento nas propriedades de uma frente de fogo, usando mato mediterrâneo como combustível. Uma das principais conclusões deste estudo é o facto de a turbulência ter um papel preponderante na propagação do fogo, uma vez que afeta a forma da chama, a temperatura e a emissão de radiação. Contudo, os autores referem que o estudo é apenas uma primeira abordagem, sendo necessário realizar mais testes com outras configurações, por forma a obter conclusões mais gerais acerca da interação entre fogo e vento.

Butler *et al.* (2007) estudam o efeito do declive na velocidade de propagação do fogo. Os dados apresentados sugerem três regimes de queima diferentes. No primeiro, para leitos de combustível com 2.5 cm de altura, a velocidade de propagação aumenta abruptamente com o declive a partir dos 25°, passando a haver uma frente de fogo mais coerente (em vez de uma queima individual das partículas de combustível, como acontece para declives abaixo desse valor). Segundo os autores, esta mudança sugere uma alteração nos mecanismos responsáveis pela propagação do fogo, com os efeitos radiativos e convectivos a passarem a fornecer energia suficiente para produzir uma frente de fogo mais uniforme. Aumentando a altura do leito de combustível para 7.6 cm forma-se sempre uma frente de fogo uniforme, tendo-se registado a velocidade de propagação mínima para um fogo que se propaga encosta abaixo (declive negativo), com um declive de -16°. Entre os -16 e os 10°, a velocidade de propagação do fogo aumenta linearmente com o declive, independentemente do grau de compactação do leito de combustível. Entre os 10 e os 25°, a velocidade de propagação aumenta e os leitos mais compactos queimam mais rapidamente. Acima dos 25°, os leitos menos compactos são os que apresentam maior velocidade de

propagação e a velocidade de propagação aumenta linearmente com o declive, mas com uma proporção muito maior que anteriormente. Por fim, para leitos de 15 cm de altura, as observações são semelhantes às anteriores. Os autores concluem que os leitos menos compactos oferecem menor resistência à convecção (que acaba por ser o mecanismo de transferência de energia dominante), resultando daí as velocidades de propagação mais elevadas.

Boboulos e Purvis (2009) fazem um estudo sobre os efeitos do vento e do declive na ROS, usando dois tipos de combustível: *Pinus pinaster* e *Pinus halepensis*. Os autores concluem que o caso mais grave de propagação do fogo ocorre quando o fogo se propaga encosta acima com vento nessa direção; com 30° de inclinação e ventos de 4 m/s, a velocidade de propagação do fogo aumentou quase 40 vezes quando comparada com a velocidade básica de propagação R_0 (medida em condições de declive e velocidade do vento nulos, conforme se explicará no capítulo 3).

Sharples *et al.* (2010) estudam o comportamento do fogo em situações atípicas devido à interação do vento e da topografia com o fogo. Os ensaios experimentais, realizados no LEIF (Laboratório de Estudos sobre Incêndios Florestais, situado na Lousã), são feitos numa plataforma com uma configuração tipo cume, com o vento (velocidade de propagação igual a 4 m/s) a soprar perpendicularmente num dos lados e a ignição pontual a ser feita no lado contrário. É referido que é gerado um fluxo de ar (“*separated flow*”) na presença de vento devido à configuração acima descrita, o que acaba por induzir um rápido avanço lateral da frente de fogo quando esta chega ao topo do cume. Esse avanço é entre 2 a 12 vezes mais rápido que no caso em que não existe vento.

2. FOGO DE JUNÇÃO

Neste capítulo apresentam-se alguns conceitos que se consideram essenciais para a total compreensão do fenómeno do fogo de junção. É feita a definição geral do problema, seguida de uma breve referência a situações onde o fogo de junção pode ocorrer. Por fim, faz-se uma alusão aos mecanismos de transferência de calor envolvidos.

2.1. Definição do problema

O fogo de junção é um comportamento específico do fogo que ocorre quando duas frentes se encontram, fazendo um determinado ângulo entre elas. Como já foi referido, nestas condições, a velocidade de propagação do fogo é incrementada significativamente devido aos fenómenos energéticos que ocorrem na zona de convergência, pelo que o fenómeno pode ser introduzido naquilo a que se chama comportamento extremo do fogo. Aquando da ocorrência deste fenómeno, o combate às chamas torna-se perigoso para os operadores no terreno, tornando até ineficazes os chamados métodos tradicionais de combate a incêndios. Nesse sentido, importa entender este tipo de comportamento do fogo de maneira profunda, com o objetivo de dotar os intervenientes no combate aos incêndios de conhecimentos que lhes permitam tomar decisões cada vez mais acertadas. Na Figura 2.1 é possível observar a rápida evolução de um fogo de junção.

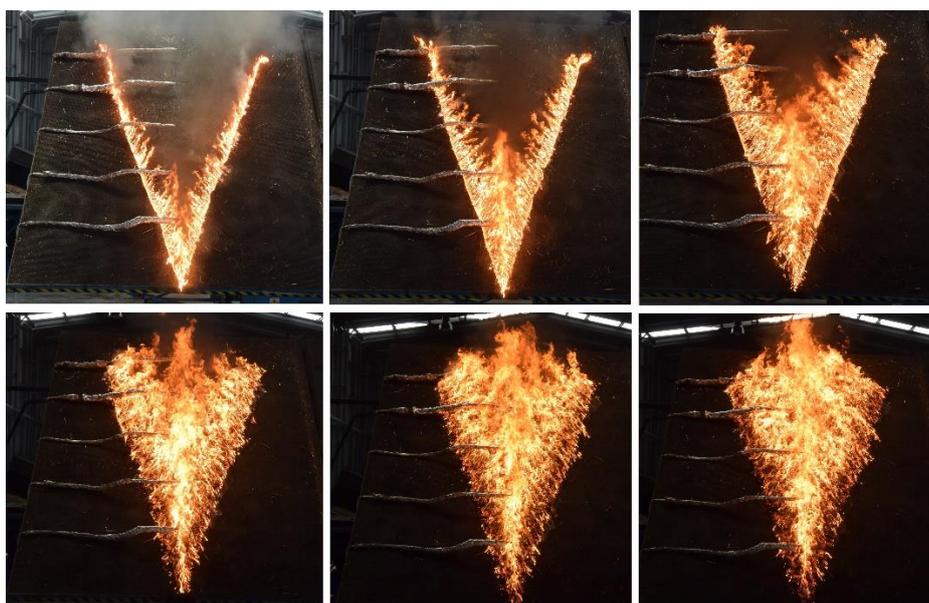


Figura 2.1. Evolução do fogo no ensaio CF97 ($\alpha=40^\circ$); o tempo entre *frames* é de 4 segundos.

Considere-se o caso genérico descrito em Viegas *et al.* (2013): duas linhas de fogo (L1 e L2), retas e convergentes, fazem entre si um ângulo θ_0 e interseccionam-se no ponto D, que inicialmente coincide com a origem de um referencial cartesiano. O eixo OX é paralelo ao plano inclinado e constitui uma linha de simetria entre as duas linhas de fogo. As duas frentes propagam-se no leito de um dado combustível, fazendo um ângulo α com o plano horizontal. A representação esquemática do problema pode ser vista na Figura 2.2. A definição do ponto D é essencial uma vez que, ao haver convergência das frentes, esse ponto avança com elevada velocidade de propagação, tendendo a formar uma frente reta de fogo. Poderia pensar-se que as linhas se fechavam uma em direção à outra, mas não é isso que acontece, já que o avanço lateral é muito menor que o avanço do ponto D, como se pode observar na Figura 2.1. Dadas as condições de simetria anteriormente referidas, os dados relativos à velocidade de propagação do ponto D, que avança segundo o eixo OX, são importantes para compreender a evolução do fogo. O fenómeno do fogo de junção pode ser dividido em duas fases distintas: aquando da convergência das frentes, a velocidade de propagação do ponto D aumenta repentinamente até atingir um valor máximo, constituindo a fase de aceleração; depois, essa velocidade vai diminuindo gradualmente até à extinção do fogo, constituindo a chamada fase de desaceleração (Viegas *et al.*, 2012^a).

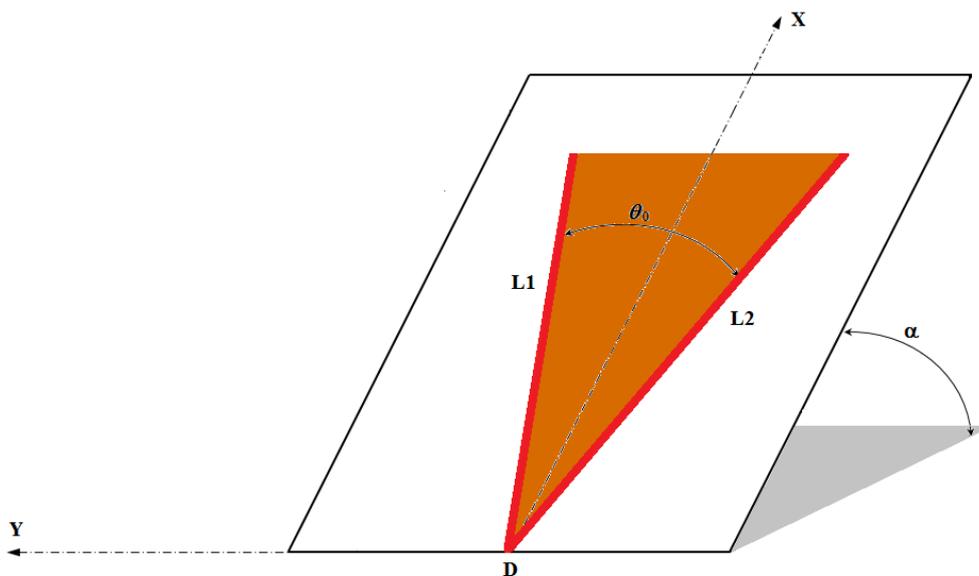


Figura 2.2. Representação esquemática do problema em estudo.

Definido o problema, é necessário abordar alguns parâmetros essenciais para a sua análise. A partir da definição da posição instantânea do ponto D (x_D) em vários instantes de tempo, é possível definir a velocidade de propagação desse ponto (R_D) da seguinte forma:

$$R_D = \frac{dx_D}{dt} \quad (2.1)$$

As velocidades assim calculadas, com os dados recolhidos após a realização de ensaios experimentais (ver capítulo 3), foram associadas a um tempo médio (t_m) entre os dois instantes considerados. A velocidade de propagação do fogo é diferente consoante o combustível queimado. Com o objetivo de comparar resultados relativos a combustíveis diferentes, é comum usar-se um parâmetro adimensional referente à velocidade de propagação, que é definido por

$$R'_D = \frac{R_D}{R_0} \quad (2.2)$$

em que R_0 é a velocidade básica de propagação associada a um determinado combustível em condições de declive e vento nulos (ver capítulo 3, subsecção 3.4.4.). A velocidade máxima de propagação adimensional é:

$$R'_M = \frac{R_M}{R_0} \quad (2.3)$$

Foi ainda definido um tempo adimensional de acordo com o que está estabelecido no modelo proposto por Viegas (2006). Assim, o tempo adimensional t' é dado por:

$$t' = \frac{t}{t_0} \quad (2.4)$$

Por fim, importa ainda fazer referência ao modelo energético que define o problema do fogo de junção. No âmbito da presente dissertação, não se explorará esse modelo, pelo que se sugere a consulta de Viegas *et al.* (2012^a).

2.2. Ocorrência de fogos de junção

Os incêndios de Camberra, no ano de 2003, estão na base da investigação sobre os fogos de junção. Doogan (2006) descreve os acontecimentos relativos a esses incêndios, referindo que os 2 fogos que deflagravam ter-se-ão, a certa altura, encontrado, criando um fogo de junção de enormes dimensões. Esse fogo ter-se-á, então, propagado com uma

velocidade substancialmente superior à que tinha anteriormente, na ordem dos 27 km/h, o que é um valor extremamente elevado. Para melhor compreensão dos acontecimentos, sugere-se a consulta de Doogan (2006), Sharples *et al.* (2012) e McRae (2003).

O caso de Camberra mostra que um fogo de junção pode realmente ocorrer num incêndio florestal, evidenciando mais uma vez a importância do estudo deste fenómeno. A sua ocorrência é possível mesmo em incêndios de dimensões menores, o que não pode ser desprezado em situações de combate às chamas. Para além disso, é importante perceber que este fenómeno pode ocorrer noutras situações que, possivelmente, não seriam tão óbvias e nas quais a intervenção humana tem um papel preponderante. São exemplo disso as operações de supressão do fogo com recurso a um contrafogo, que podem criar as condições ideais para a convergência de duas frentes de chamas.

2.3. Modos de transferência de calor

Os principais modos de transferência de calor, segundo Bergman *et al.* (2011), são a condução, a convecção e a radiação. A condução desempenha um papel pouco relevante na propagação do fogo quando comparada com os outros dois mecanismos, pelo que será aqui desprezada. Viegas (1998) considera ainda um outro mecanismo chamado transporte de massa, que não será aqui abordado uma vez que está associado essencialmente ao transporte de partículas incandescentes, que tem pouco interesse para o estudo que se pretende fazer nesta dissertação.

2.3.1. Convecção

A convecção é um mecanismo de transporte de energia inerente ao escoamento de um fluido que inclui o efeito cumulativo da transferência de energia devida à movimentação aleatória das moléculas (difusão) e ao movimento macroscópico do fluido (advecção), segundo Bergman *et al.* (2011). A convecção pode ser classificada em dois tipos: convecção forçada (quando o escoamento é provocado por uma fonte externa, como uma bomba ou um ventilador) e convecção natural (quando o escoamento é induzido por diferenças de densidade do fluido causadas por variações da sua temperatura).

Pela introdução feita no capítulo 1, é possível constatar que, em muitos estudos, a radiação é considerada o mecanismo mais importante na propagação do fogo, relegando a convecção para segundo plano. Contudo, num fogo de junção, devido à sua configuração em

“V”, a convecção desempenha um papel muito importante. Entre as frentes de fogo, junto ao ponto de convergência, geram-se grandes concentrações de energia e escoamentos significativos. Ambos os fenômenos são altamente favoráveis à propagação do fogo, daí as elevadas velocidades de propagação dos fogos de junção. A convecção é, deste modo, essencial na fase de aceleração do fogo de junção (Raposo, 2016).

2.3.2. Radiação

A radiação térmica consiste em energia emitida por algo que se encontra a uma temperatura diferente de zero. A energia é transportada por ondas eletromagnéticas e não precisa de um meio para se transferir, segundo Bergman *et al.* (2011).

Como já foi referido, a radiação é um dos mecanismos mais importantes na propagação do fogo, já que se atingem temperaturas muito elevadas junto às chamas. É, por exemplo, o mecanismo responsável por aquecer o combustível por queimar quando as chamas se inclinam na sua direção (como acontece num incêndio que se propaga encosta acima), agilizando o processo de queima. Isto quer dizer que a inclinação das chamas (*tilt*) afeta diretamente a eficácia da transferência de calor por radiação.

A radiação e a convecção atuam normalmente em simultâneo; se a convecção criar um escoamento favorável à propagação do fogo, as chamas serão maiores e provavelmente terão tendência a inclinar-se na direção do combustível por queimar, o que também aumentará a transferência de calor por radiação. É isso que acontece num fogo de junção, maioritariamente devido à sua configuração em “V” e principalmente se o fogo se propagar num terreno com declive (Raposo, 2016).

3. ENSAIOS EXPERIMENTAIS

Neste capítulo descreve-se em pormenor todos os ensaios experimentais realizados no âmbito da presente dissertação. É feita a descrição de todo o procedimento experimental para cada caso, bem como os objetivos que se pretendem atingir. De referir que a apresentação e análise dos dados obtidos será feita no capítulo seguinte.

3.1. Introdução

Os incêndios florestais são fenómenos complexos que envolvem uma grande gama de ordens de grandeza a nível temporal e espacial (Viegas *et al.*, 2011). A investigação científica no âmbito dos incêndios florestais tem-se apoiado sobretudo em resultados empíricos. Assim, essa investigação pode ser feita de três maneiras distintas: através de ensaios laboratoriais, através de ensaios de campo ou através do estudo de casos reais (Viegas *et al.*, 2012^b).

Começando pelo estudo de casos reais, não foi realizado qualquer estudo desta natureza no âmbito da presente dissertação. Contudo, como já foi mencionado no primeiro capítulo, o estudo do fenómeno dos fogos de junção tem como ponto de partida os incêndios florestais de 2003, em Camberra, que já foram extensamente investigados. Foi feita ainda uma breve referência a estes incêndios no capítulo 2.

Em relação aos ensaios de campo, estes consistem em realizar experiências em locais de interesse particular, onde são feitas queimas controladas que permitem estudar o comportamento do fogo em condições que podem ser idênticas às que se verificam em incêndios reais. Neste âmbito, foram realizados, no dia 17 de Maio de 2016, os chamados “Ensaio da Gestosa”, que são organizados pela ADAI há já alguns anos. Os ensaios decorreram no campo de testes da Gestosa, pertencente à ADAI, localizado a cerca de 26 km a sudeste de Coimbra. O programa experimental de ensaios deste ano incluía, entre outros, um ensaio numa parcela em “V”, com o objetivo de estudar o fenómeno do fogo de junção.

Por último, os ensaios laboratoriais são de extrema importância, uma vez que, apesar de serem limitados em escala, permitem controlar e medir os parâmetros envolvidos com maior facilidade, ao contrário do que acontece nos ensaios de campo (Viegas *et al.*,

2012^b). Neste sentido, realizaram-se dois programas experimentais com objetivos bem definidos: ensaios com declive (e sem vento) e ensaios com vento (em declive nulo).

3.2. Ensaios de campo: Gestosa

Os ensaios de campo, realizados na Gestosa, incluíam várias experiências, entre as quais uma realizada numa parcela em “V”, com o objetivo de estudar o comportamento do fogo de junção, nomeadamente a velocidade de propagação do ponto de interseção (R_D). A parcela preparada para o ensaio acima referido pode ser observada na Figura 3.1, a verde, com o código “G2016_02”.



Figura 3.1. Parcelas dos ensaios da Gestosa 2016.

3.2.1. Preparação do ensaio

Uma parte da preparação do ensaio foi feita nos dias que antecederam a sua realização. A vegetação (mato) foi cortada até se obter a forma desejada e a área em volta foi queimada de forma controlada, para que o fogo não se propagasse para além da área útil de ensaio aquando da sua realização. No próprio dia, foram colocados os explosivos para a ignição, foram recolhidos dados relativos à meteorologia com recurso a uma estação meteorológica e foram preparadas as câmaras para aquisição de dados.

Como é possível verificar pela Figura 3.1, a inclinação média do terreno (α) é de 40°. Por outro lado, o ângulo entre as frentes (θ_0) é de aproximadamente 36.3°. Dadas as dimensões da parcela, a ignição teve de ser feita com recurso a uma técnica diferente da

utilizada em ensaios laboratoriais (linha embebida em gás-óleo, que tem uma propagação algo lenta para a dimensão da parcela em estudo). Assim, a ignição foi feita com recurso a explosivos, que detonaram ao mesmo tempo, com o objetivo de se obter uma ignição simultânea e praticamente instantânea ao longo das duas frentes de fogo. Os explosivos usados foram do tipo repuxo, com alcance de 2 m e tempo de queima de 20 segundos. Os explosivos foram colocados ao longo das laterais do triângulo, distando em média 2.3 m entre si, desde o topo até meio do comprimento das frentes (aproximadamente); do meio até ao ponto de convergência das frentes, os explosivos foram colocados de metro em metro, aproximadamente. No total, foram utilizadas cerca de 90 cápsulas de explosivos, idênticas às apresentadas na Figura 3.2.



Figura 3.2. Cápsulas de explosivos utilizados no ensaio da Gestosa.

3.2.2. Aquisição de dados

O ensaio foi fotografado com recurso a uma câmara fotográfica digital, utilizando o temporizador para fotografar em intervalos de tempo predefinidos, e foi filmado através de duas câmaras: uma de vídeo e uma de infravermelhos (IR). A câmara IR é uma FLIR ThermaCam SC660. As imagens captadas com esta câmara permitem perceber a distribuição espacial da temperatura na área útil de ensaio e a evolução da frente de fogo ao longo do mesmo.

Infelizmente, existiram alguns problemas de natureza técnica que impediram o pleno sucesso do ensaio. O principal problema foi que alguns explosivos não rebentaram, o

que causou interrupções ao longo das frentes de fogo (não uniformidade das frentes) e impediu o encontro das mesmas no início do ensaio (as frentes de fogo viriam a encontrar-se mais tarde, perto do fim do ensaio). Por outro lado, em virtude da realização de um teste anterior a este, realizado numa parcela adjacente, em que se utilizaram aspersores de água, alguma dessa água, por ação do vento, poderá ter humedecido a vegetação em volta, comprometendo o sucesso do ensaio em “V”, já que não foi observada a intensidade de fogo esperada. Por último, as condições climatéricas de humidade relativa (muito elevada) também não permitiram observar a intensidade de fogo que se desejava, pois tal manteve elevada a humidade dos combustíveis. Por todas as razões aqui apontadas, decidiu-se não incluir os resultados do ensaio da Gestosa na análise feita no capítulo 4.

3.3. Ensaio laboratoriais com declive

Os ensaios laboratoriais com declive (e sem vento) foram realizados no LEIF, situado na Lousã. Todos os testes foram realizados na aba esquerda da mesa Desfiladeiro Grande DE4, que se apresenta na Figura 3.3. A aba esquerda tem dimensões 6 m por 4 m e é possível variar o seu ângulo de inclinação (α) entre os 0 e os 40°.



Figura 3.3. Mesa Desfiladeiro Grande DE4.

3.3.1. Programa experimental

Seguindo o procedimento já adotado pela equipa da ADAI, os ensaios foram catalogados com um código alfanumérico, conforme se pode observar na Tabela 3.1. Uma vez que os ensaios são referentes a frentes convergentes, as letras utilizadas são “CF”

(*Convergent Fronts*), seguidas de um número que designa a ordem de planeamento do ensaio. Como o último ensaio realizado antes deste programa experimental tinha sido o CF87, o primeiro ensaio que aqui se apresenta é, obviamente, o CF88.

O plano de ensaios pode ser consultado na Tabela 3.1. O ângulo entre as frentes (θ) foi mantido nos 30°, por ser o valor que se verificou no incêndio de Camberra. De referir que, nestes ensaios, se utilizaram três tipos de combustíveis: caruma (*Pinus pinaster*, denominado PP), palha (*Avena sativa*, denominado ST) e mato (mistura de *Erica umbelatta*, *Erica australis*, *Ulex minor* e *Chamaespartium tridentatum*, denominado SH). O objetivo seria perceber a influência do tipo de combustível no comportamento do fogo de junção, nomeadamente na evolução da velocidade de propagação do ponto D. Para a caruma (PP), fez-se variar o ângulo α (0, 10, 15, 20, 25, 30 e 40°). Para os restantes combustíveis, o ângulo α foi variado em 0, 20, 30 e 40°. De referir que os ensaios CF89 e CF94 têm exatamente os mesmos parâmetros, uma vez que foi necessário repetir o ensaio devido a alguns problemas técnicos que impediram a obtenção de resultados fiáveis.

Importa frisar que os ensaios foram realizados numa ordem aleatória, para evitar que se gerasse uma tendência nos resultados.

Tabela 3.1. Plano de ensaios com declive e sem vento.

<i>Ref.</i>	<i>Designação</i>	<i>Escala</i>	<i>Combustível</i>	α °	θ °	<i>N.º de tubos de Pitot</i>
1	CF88	Lab.	PP	30	30	5
2	CF89	Lab.	ST	0	30	5
3	CF90	Lab.	PP	20	30	5
4	CF91	Lab.	SH	0	30	5
5	CF92	Lab.	SH	30	30	5
6	CF93	Lab.	SH	20	30	5
7	CF94	Lab.	ST	0	30	5
8	CF95	Lab.	ST	30	30	5
9	CF96	Lab.	ST	20	30	5
10	CF97	Lab.	PP	40	30	5
11	CF98	Lab.	PP	0	30	5
12	CF99	Lab.	PP	15	30	0
13	CF100	Lab.	PP	20	30	0

3.3.2. Preparação do ensaio

Houve necessidade de arranjar uma forma de marcar linhas orientadoras que delimitassem a área útil de ensaio. Para esse efeito, utilizou-se fio de algodão. A área útil de ensaio tinha um formato triangular, com altura de 5 m e base de 2.68 m (aproximadamente), de maneira a respeitar o ângulo de 30° entre as duas linhas de fogo concorrentes.

O teor de humidade (m_f) dos combustíveis depende das condições ambientais, em particular da temperatura e da humidade relativa do ar. Assim sendo, houve a preocupação de registar ambos os parâmetros antes de cada ensaio, utilizando um termohigrómetro. O teor de humidade foi medido antes da realização de cada ensaio (ou antes de, no máximo, 2 ensaios consecutivos com o mesmo combustível) com recurso a um analisador de humidade (Ohaus MB45). Para tal, foi colocada uma amostra de aproximadamente 0.5 g de combustível no analisador, que após 10 minutos indica o teor de humidade do mesmo. Esse valor foi então utilizado para calcular a massa total de combustível necessária (m_c) para a realização do ensaio, com a correção da humidade, bem como a massa de combustível necessária para a realização do ensaio referente à velocidade básica de propagação (R_0), que se detalhará em seguida. Foi possível obter ambos os valores sabendo a área útil de ensaio (aproximadamente 6.7 e 1 m², respetivamente) e a carga de combustível (0.6 kg/m²). Este cálculo é fundamental, uma vez que é necessário “compensar” a massa de água presente no combustível. De referir que o valor adotado para a carga de combustível foi de 0.6 kg/m² em base seca para todos os ensaios, uma vez que é um valor adotado em vários estudos por ser um valor que pode ser facilmente extrapolado para os valores de carga encontrados nas florestas (Raposo, 2016).

Após o cálculo da massa de combustível, procedeu-se à sua pesagem, utilizando uma balança, e à distribuição uniforme do mesmo na mesa, dentro da área definida anteriormente. Por fim, a mesa foi colocada na posição pretendida em termos de inclinação.

O passo seguinte, após verificação de todo o equipamento de aquisição de dados (ver próxima subsecção), é efetuar a ignição. A ignição foi feita com recurso a dois fios de lã embebidos em gasóleo, aos quais se juntaram rastilhos de explosivo, com o objetivo de acelerar a propagação das linhas de fogo e obter uma ignição o mais instantânea possível. A colocação dos fios ao longo dos limites laterais do leito foi feita por dois operadores, de

forma a agilizar o processo. A ignição deve ser feita imediatamente após a colocação dos fios para evitar que o gás oleo evapore, o que iria obviamente comprometer o sucesso do procedimento. Importa salientar que a ignição é particularmente sensível neste tipo de ensaios, dada a necessidade de criar as linhas de fogo de forma instantânea e simultânea, para garantir condições de simetria.

3.3.3. Aquisição de dados

A aquisição de dados nestes ensaios inclui a filmagem com recurso a uma câmara de vídeo digital e a uma câmara IR, a obtenção de fotografias com recurso a uma câmara digital e a obtenção de dados de voltagem.

Os vídeos obtidos com a câmara de vídeo digital, bem como as fotografias digitais, são importantes para posterior verificação do procedimento de preparação do ensaio e análise da evolução do fogo. Por seu lado, as imagens obtidas com a câmara IR (modelo já referido anteriormente) permitem perceber a distribuição espacial da temperatura e a evolução da frente de fogo ao longo de todo o ensaio. Estas imagens são também usadas para estimar a velocidade instantânea de propagação do ponto D (R_D), recorrendo ao *software* MicroStation. Este *software* permite analisar *frames* do vídeo obtido com a câmara IR em intervalos de tempo escolhidos pelo utilizador, de forma a poder definir a posição da frente de fogo naquele instante. Assim, tendo o intervalo de tempo e a posição da frente de fogo, tem-se também a distância percorrida pela mesma e é possível calcular R_D . Mais detalhes sobre este procedimento podem ser consultados em André *et al.* (2013).

Os tubos de Pitot, conforme se pode observar na Figura 3.3, estão colocados ao longo do eixo de simetria da área de ensaio, de metro em metro e a 15 cm da superfície da mesa, de maneira a estarem acima do leito de combustível e dentro das chamas. Os tubos são revestidos com fibra de vidro e folha de alumínio, que servem de isolamento e proteção. Importa salientar que os tubos já se encontravam calibrados. É possível obter os valores da velocidade do escoamento (U) induzido pelo fogo em função da raiz quadrada da diferença de potencial (dV) obtida pelos transdutores de pressão que se encontram no interior dos tubos. Esses transdutores estão ligados a um módulo de entrada da marca *National Instruments* (NI 9205), que está inserido num chassi NI cDAQ-9174. Este módulo de voltagem permite a aquisição de dados do sinal, com uma frequência de 1 Hz, usando o

software *LabView SignalExpress* 2012. Os dados recolhidos foram introduzidos numa folha Excel, obtendo-se os gráficos de U em função do tempo para cada tubo de Pitot.

3.3.4. Velocidade básica de propagação (R_0)

Antes da realização de cada ensaio (ou antes de, no máximo, 2 ensaios consecutivos com o mesmo combustível), foi realizado um pequeno teste para determinar a velocidade básica de propagação correspondente às mesmas condições experimentais desse ensaio. Este pequeno teste é feito numa mesa com dimensões 1 m por 1 m usando o mesmo combustível e a mesma carga (0.6 kg/m^2), em condições de vento e declive nulos. São colocados fios de algodão ao longo da mesa, de 10 em 10 cm. A mesa onde é efetuado este teste pode ser vista na Figura 3.4.

A ignição é feita com recurso à mesma técnica utilizada nos ensaios descritos anteriormente (fio de lã embebido em gasóleo), num dos lados da mesa, de maneira a criar uma frente de fogo linear. O fogo vai cortando os fios de algodão à medida que vai avançando e um operador vai registando os instantes de tempo em que isso acontece, com a ajuda de um cronómetro. Assim, sabendo a distância percorrida pelo fogo e o tempo que demora a chegar a cada fio, é possível obter um conjunto de pontos e ajustar uma reta aos mesmos, cujo declive é o valor da velocidade básica de propagação.



Figura 3.4. Mesa para a realização do ensaio de determinação do R_0 .

3.4. Ensaios laboratoriais com vento

Os ensaios com vento foram realizados no LEIF, no túnel de vento existente no laboratório. O equipamento referido pode ser visto na Figura 3.5.



Figura 3.5. Túnel de vento do LEIF.

3.4.1. Programa experimental

Seguindo a mesma metodologia usada nos ensaios com declive, estes ensaios foram catalogados com um código alfanumérico, conforme se pode observar na Tabela 3.2. Havendo, neste caso, a presença de vento, as letras utilizadas são “CFW”, sendo o “W” referente à palavra inglesa para “vento” (“*wind*”). Os ensaios em forma de retângulo, que se explicarão em seguida, foram catalogados com as letras “CFRW”, sendo o “R” referente a “retangular”. No caso dos números, o primeiro indica a ordem de planeamento do ensaio, sendo o segundo referente à velocidade do vento.

O plano de ensaios pode ser visto na Tabela 3.2. Foram feitos ensaios com leitos de 2 formas distintas: primeiro em “V” (frentes convergentes) e depois em retângulo. Nos primeiros, o ângulo entre as frentes (θ_0) foi mantido nos 30° , pela mesma razão apontada anteriormente. Em relação aos segundos, o objetivo seria comparar a velocidade de propagação do fogo na situação de convergência de frentes com a velocidade do fogo de uma frente linear. Em todos estes ensaios, o combustível utilizado foi a caruma (PP). O objetivo deste programa experimental seria analisar a influência do vento, nomeadamente da sua velocidade, no comportamento do fogo de junção e estabelecer uma comparação com o efeito do declive, que foi estudado anteriormente e também neste trabalho. O parâmetro que foi variado foi, então, a velocidade do vento. Os ensaios foram realizados com ventos de 1, 2, 3, 4 e 5 m/s de velocidade.

Importa frisar que os ensaios foram realizados numa ordem aleatória e não pela ordem que aqui se apresenta, para evitar que se gerasse uma tendência nos resultados.

Tabela 3.2. Plano de ensaios com vento.

<i>Ref.</i>	<i>Designação</i>	<i>Escala</i>	<i>Combustível</i>	<i>Forma do leito</i>	α °	θ_0 °	<i>Velocidade do vento</i> $m.s^{-1}$
1	CFW1-1	Lab	PP	“V”	0	30	1
2	CFW2-2	Lab	PP	“V”	0	30	2
3	CFW3-4	Lab	PP	“V”	0	30	4
4	CFW4-1	Lab	PP	“V”	0	30	1
5	CFW5-3	Lab	PP	“V”	0	30	3
6	CFW6-5	Lab	PP	“V”	0	30	5
7	CFW7-4	Lab	PP	“V”	0	30	4
8	CFRW1-1	Lab	PP	Retangular	0	-	1
9	CFRW2-2	Lab	PP	Retangular	0	-	2
10	CFRW3-4	Lab	PP	Retangular	0	-	4

3.4.2. Preparação do ensaio

Para os ensaios com frentes convergentes houve, mais uma vez, necessidade de arranjar uma forma de marcar linhas orientadoras que delimitassem a área útil de ensaio. Para esse efeito utilizou-se fio de algodão. A área útil de ensaio tinha as mesmas características dos ensaios com declive: um formato triangular, com altura de 5 m e base de 2.68 m (aproximadamente), de maneira a respeitar o ângulo de 30° entre as duas linhas de fogo concorrentes. No caso dos ensaios retangulares foram utilizadas 2 barras de ferro para delimitar lateralmente a área de ensaio, que neste caso tinha dimensões 5 m por 2 m. O leito preparado para um destes ensaios pode ser visto na Figura 3.6.



Figura 3.6. Leito retangular de caruma preparado para um ensaio no túnel de vento.

O teor de humidade (m_f) da caruma foi registado seguindo o mesmo procedimento dos ensaios com declive. Foram também registados os valores da humidade relativa e da temperatura do ar. O valor adotado para a carga de combustível foi, mais uma vez, de 0.6 kg/m^2 em base seca para todos os ensaios. Após o cálculo da massa de combustível, procedeu-se da mesma forma que se descreveu para os ensaios com declive.

Após verificação de todo o equipamento de aquisição de dados (ver próxima subsecção), efetuou-se a ignição e colocou-se o túnel de vento em funcionamento. No caso dos ensaios em “V”, a ignição foi feita utilizando a mesma técnica usada nos ensaios com declive, à exceção da utilização de explosivos. No caso dos ensaios em retângulo, foi colocado apenas um fio no início do leito, com 2 m de comprimento, de forma a criar uma frente de fogo linear. Por sua vez, o túnel de vento foi posto a funcionar ligando os ventiladores, de maneira a criar um escoamento de ar com a velocidade pretendida. De referir que os ventiladores são controlados por um variador de velocidade.

Importa ainda mencionar que foram também realizados os ensaios para determinar a velocidade básica de propagação, cujo procedimento foi idêntico ao descrito na subsecção 3.4.4.

3.4.3. Aquisição de dados

A aquisição de dados nestes ensaios inclui a filmagem com recurso a uma câmara IR e a obtenção de fotografias com recurso a uma câmara digital.

As fotografias digitais são importantes para posterior verificação do procedimento de preparação do ensaio e análise da evolução do fogo. Por seu lado, as imagens obtidas com a câmara IR (modelo já referido anteriormente) permitem perceber a distribuição espacial da temperatura e a evolução da frente de fogo ao longo de todo o ensaio. Estas imagens são usadas para estimar a velocidade instantânea de propagação do ponto D (R_D), recorrendo ao *software* MicroStation, como já foi referido anteriormente.

4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste capítulo apresentam-se os dados recolhidos durante os ensaios laboratoriais e faz-se uma análise dos mesmos, apresentando uma discussão clara e sucinta ao longo de cada secção.

4.1. Efeito do declive

4.1.1. Velocidade de propagação (R'_D)

O efeito do declive na velocidade de propagação R_D (e, conseqüentemente, em R'_D) pode ser analisado através dos dados obtidos após a realização do programa experimental descrito na secção 3.4. Nesses ensaios, o ângulo entre as frentes foi mantido constante nos 30° , pelo que o efeito dessa variável será igual em todos os casos. Os resultados obtidos podem ser consultados na Figura 4.1, onde se representa a velocidade de propagação R'_D em função do tempo adimensional t'_m .

No geral, é possível observar o comportamento já mencionado do fogo de junção, havendo uma fase de aceleração, após a qual se atinge um valor máximo da velocidade de propagação, seguida de uma fase de desaceleração. É certo que, para alguns casos (como por exemplo o ensaio CF92), essa evolução não é tão evidente; isso pode ser explicado, em parte, pela ocorrência de uma ignição não uniforme e irregular das duas frentes de fogo. Observando a filmagem do ensaio, constata-se que, de facto, a ignição não foi instantânea, o que pode explicar a evolução obtida. Por outro lado, o aumento do declive do terreno evidencia a fase de aceleração em detrimento da fase de desaceleração, ou seja, quanto maior o declive, maior e mais prolongada (em relação ao tempo total do ensaio) será a aceleração da velocidade de propagação do ponto D. As características aqui apontadas parecem ser independentes do combustível considerado, com algumas oscilações. Nos ensaios de ST e PP vêem-se fases de aceleração e desaceleração bem definidas; o mesmo acontece para SH, com exceção do ensaio CF92, sendo que essa flutuação pode ser explicada pelo que já foi referido anteriormente.

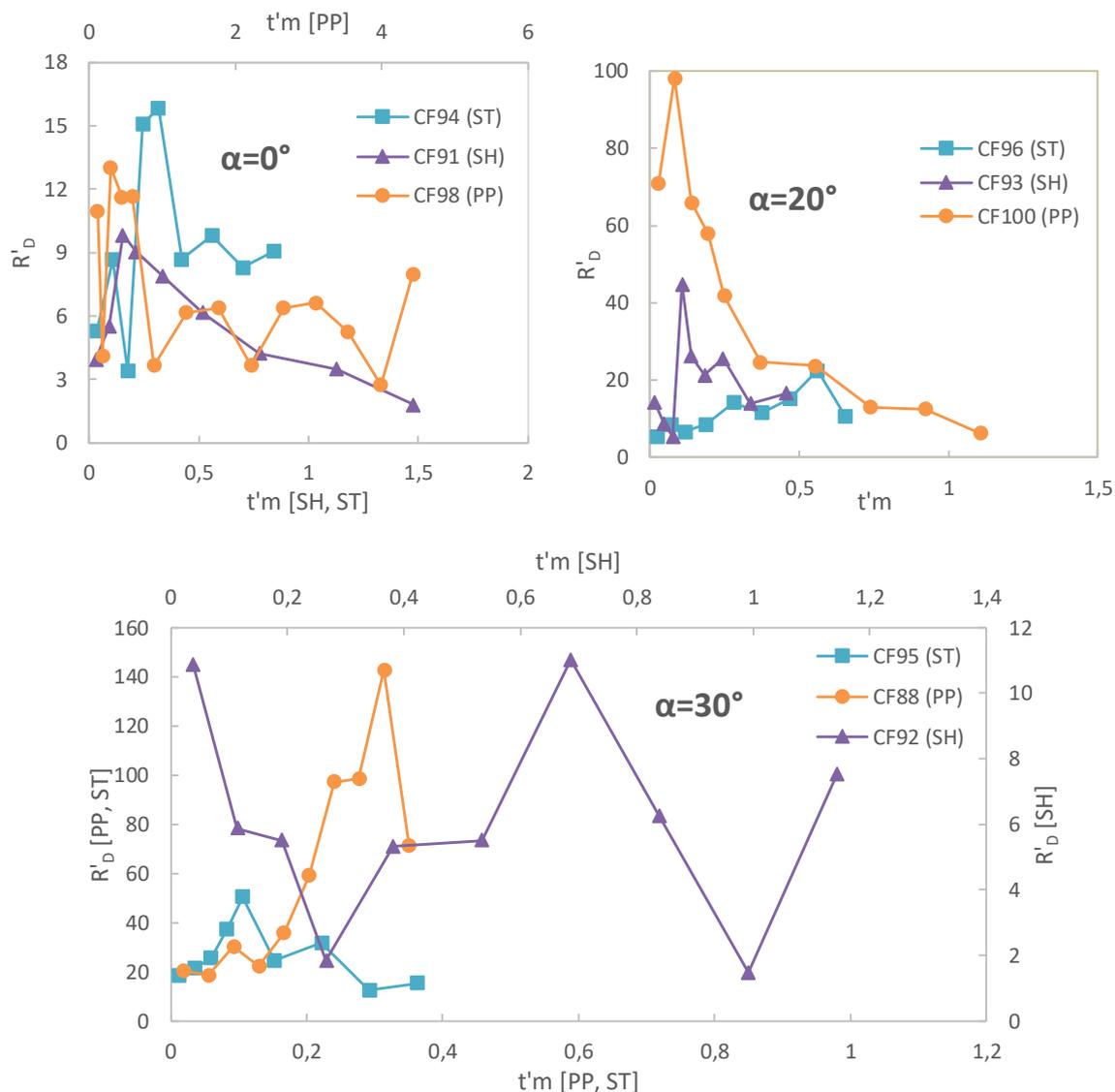


Figura 4.1. Variação de R'_D em função de $t'm$ para vários declives e combustíveis.

O valor máximo da velocidade de propagação segue uma tendência crescente com o aumento do declive, como mostra a Figura 4.2. Seria expectável que essa tendência fosse independente do combustível considerado; contudo, os valores para o combustível SH contrariam essa hipótese. Ainda assim, os resultados não são totalmente conclusivos; seria importante “refinar a malha”, isto é, realizar mais ensaios para os combustíveis ST e SH com mais valores de α , como foi feito para PP. De referir que, para ângulos mais elevados (30 e 40°), a propagação é extremamente rápida e, dadas as dimensões da mesa de ensaios, é possível que não se consiga atingir a velocidade máxima de propagação, o que constitui um entrave à obtenção de dados conclusivos.

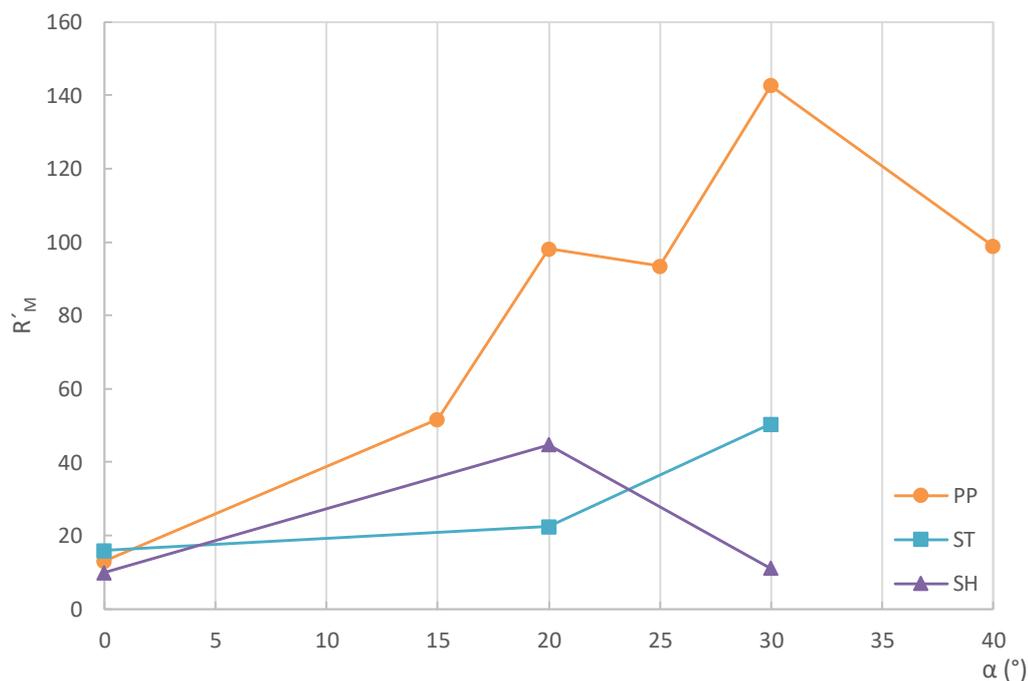


Figura 4.2. Variação de R'_M em função de α para vários combustíveis.

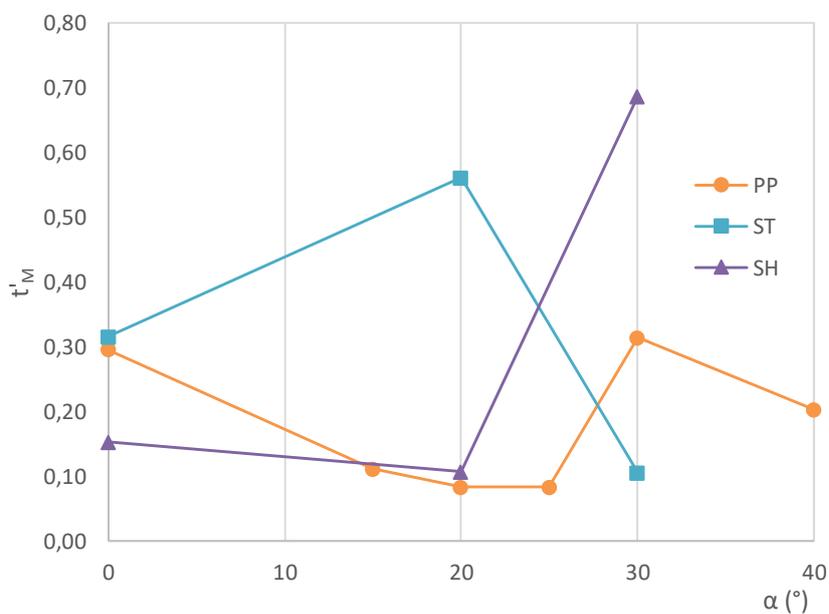


Figura 4.3. Variação de t'_M em função de α para vários combustíveis.

Na Figura 4.3 pode-se observar a evolução de t'_M em função de α . A tendência dos valores de PP e ST é decrescente, o que significa que, para se atingir a velocidade máxima de propagação do ponto D, é necessário menos tempo para declives maiores. O comportamento do combustível SH é oposto: sofre uma ligeira diminuição de 0 para 20°, aumentando de 20 para 30°. O mais importante a retirar deste gráfico é o facto de t'_M variar

numa gama muito pequena (entre 0.1 e 0.5 aproximadamente), podendo assim dizer-se que não depende do declive, mas apenas do combustível, e que é praticamente constante. De referir que, para o combustível SH, o ponto correspondente a 30° se encontra fora da gama referida, pelo que seria importante realizar mais ensaios (inclusive com mais valores de α) para se poder ter uma ideia mais consolidada do que acontece para cada combustível, principalmente para SH e ST.

Na Figura 4.4 mostra-se a variação da distância percorrida pelo ponto D no instante em que se atinge a velocidade máxima de propagação (x_M), para os três combustíveis em estudo. Apesar de algumas flutuações, pode-se afirmar que x_M aumenta com o aumento do declive.

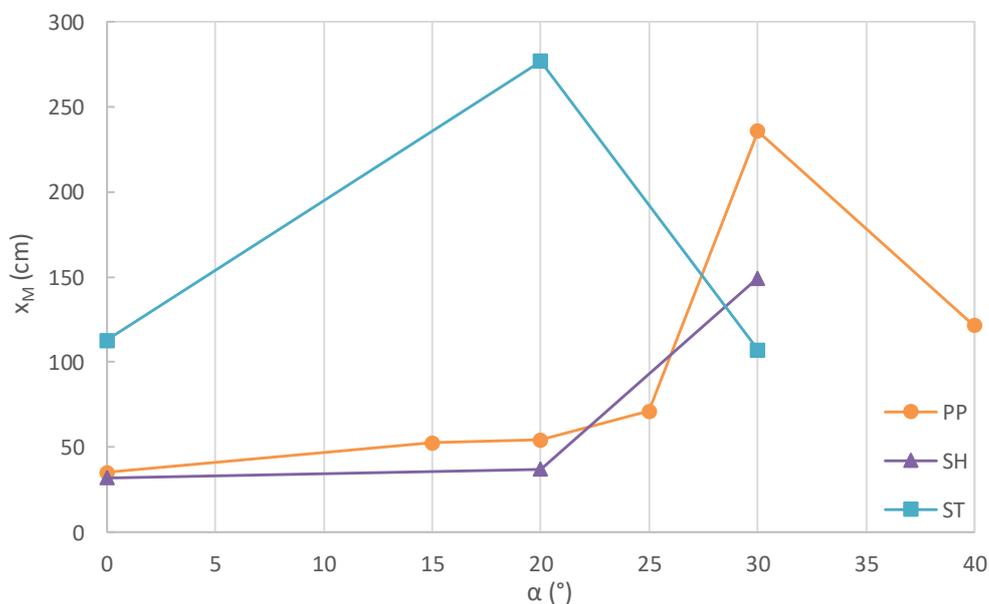


Figura 4.4. Variação de x_M em função de α para vários combustíveis.

Na Figura 4.5 mostra-se a variação de t_M/t_{total} em função do declive para vários combustíveis. É visível uma tendência crescente desta relação com o aumento do declive para todos os combustíveis, à exceção de ST. Contudo, sendo t_M mais ou menos constante para vários valores do declive e t_{total} decrescente com o aumento do declive, o normal seria esta relação aumentar com o aumento do declive. Para obter dados mais conclusivos, será necessário efetuar mais ensaios para diferentes valores de α , sobretudo para ST.

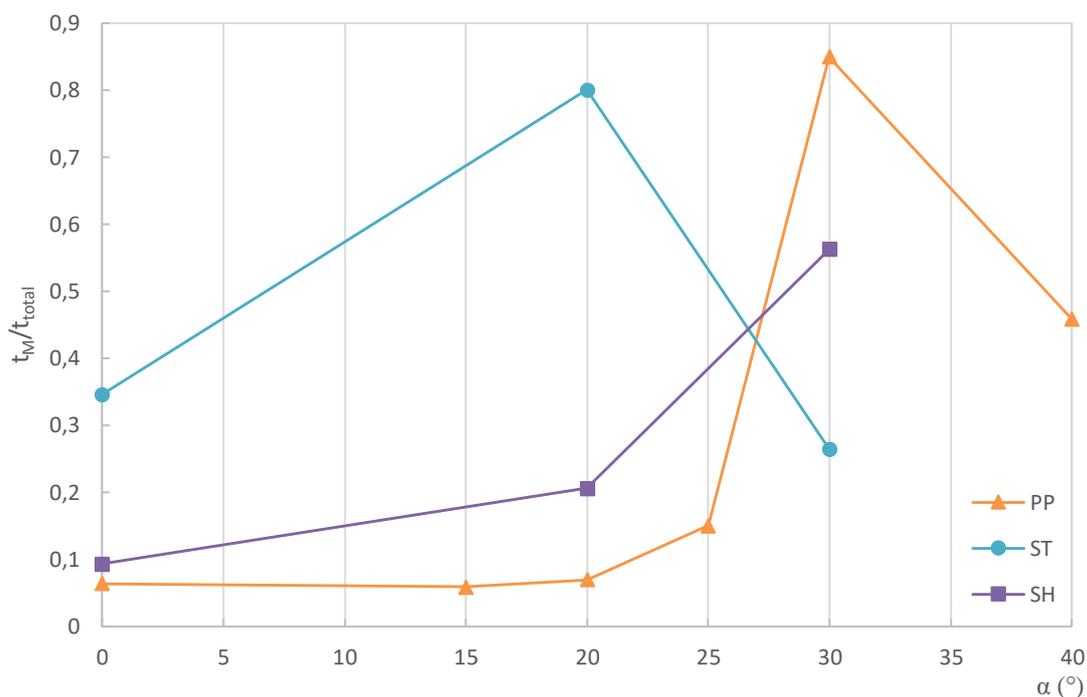
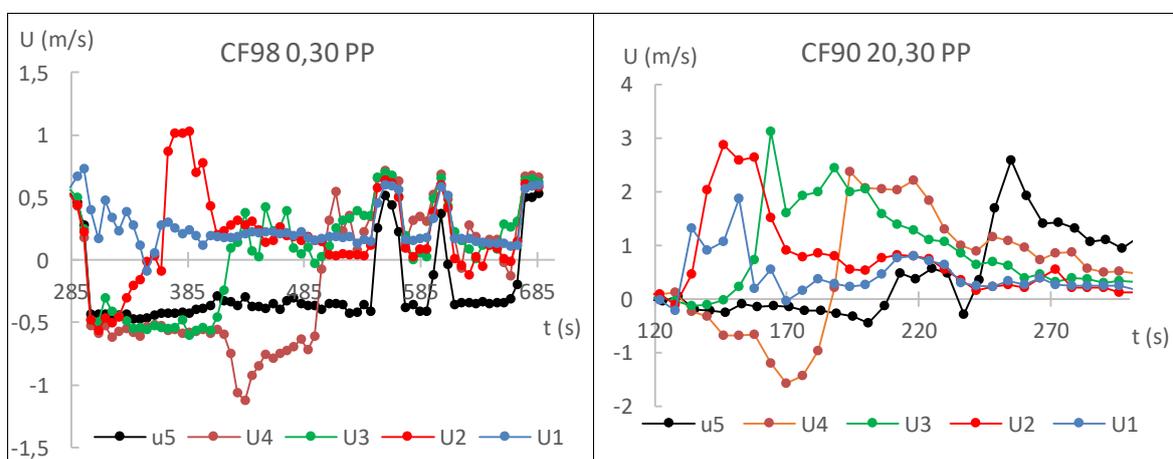
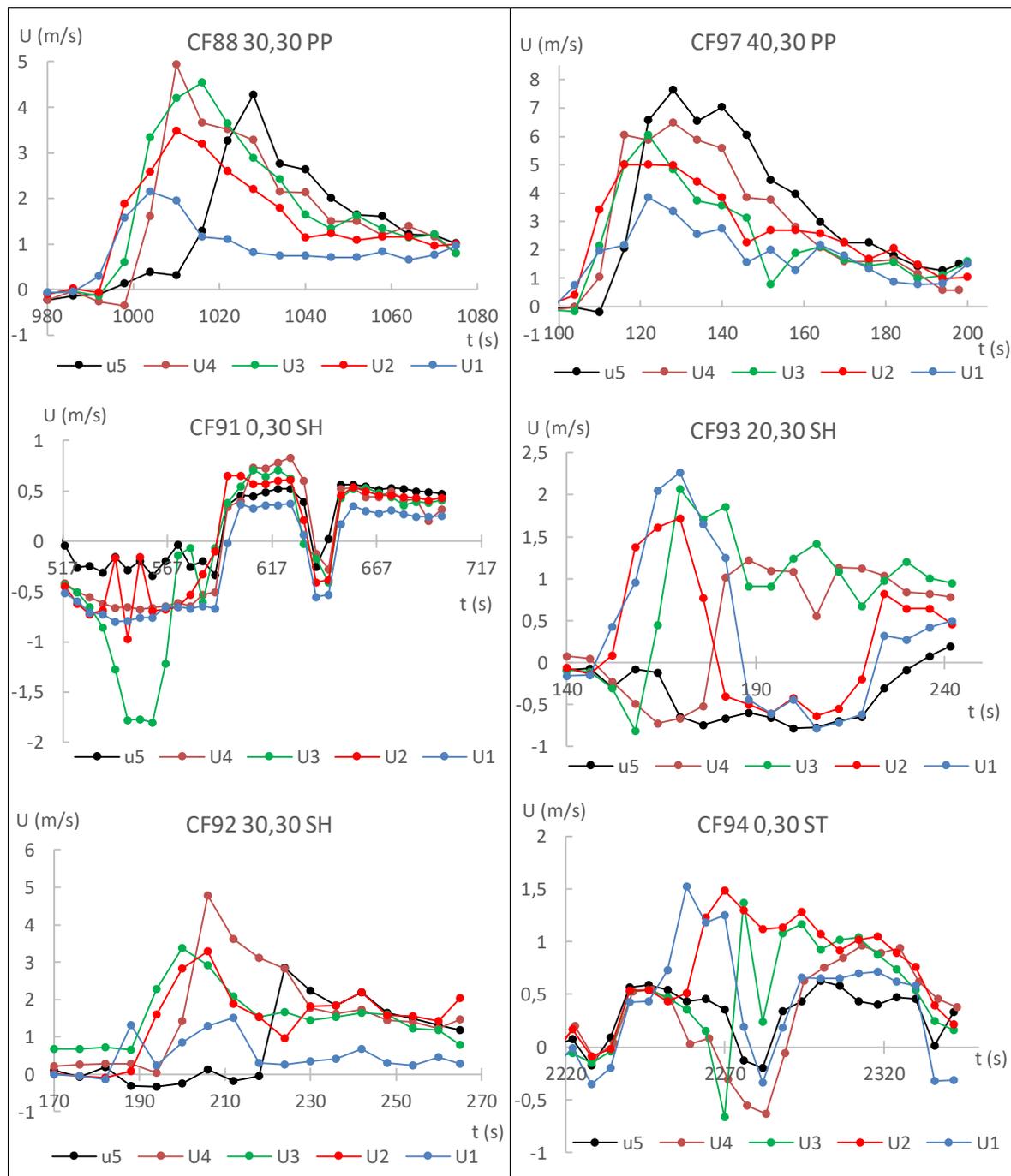


Figura 4.5. Variação de t_M/t_{total} em função de α para vários combustíveis.

4.1.2. Velocidade de escoamento (U)

A velocidade de escoamento foi medida com recurso aos tubos de Pitot colocados estrategicamente na mesa de ensaios, como foi anteriormente exposto. Estes dados são importantes para perceber o papel dos efeitos convectivos na propagação do fogo de junção. O escoamento que aqui se analisa é induzido pelo próprio fogo. De seguida, apresentam-se os gráficos da evolução da velocidade do escoamento em função do tempo. De referir que, nos últimos ensaios realizados, não foi possível obter estes dados devido a uma avaria num dos tubos.





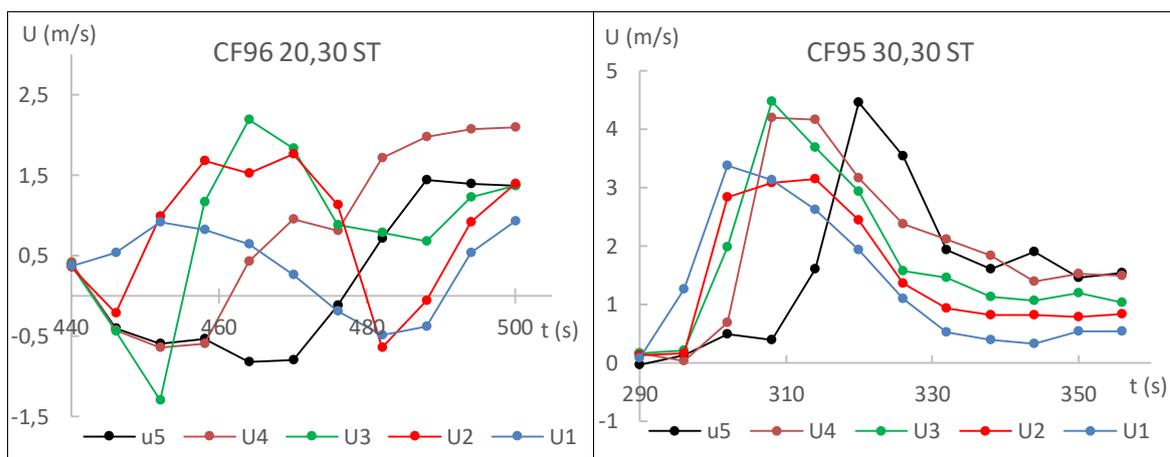


Figura 4.6. Variação de U em função do tempo para vários combustíveis.

O zero da escala do tempo não coincide com o instante em que se iniciou o ensaio, uma vez que a aquisição de dados começa sempre uns instantes antes. Para determinar o instante em que foi feita a ignição, foi colocado um termopar no local de convergência das frentes; os valores de temperatura obtidos começam por ser mais ou menos constantes, aumentando, obviamente, no momento em que é feita a ignição, permitindo então registar o instante inicial do ensaio.

A partir da análise destes gráficos é possível verificar que, para o mesmo combustível, os valores máximos da velocidade de escoamento aumentam com o ângulo α . Isto significa que os efeitos convectivos são tanto maiores quanto maior for o declive, o que está de acordo com o esperado. Os valores máximos registados, por exemplo, para a caruma (PP), ocorrem para o tubo de Pitot P2, P3, P4 e P5 quando o ângulo α é igual a 0, 20, 30 e 40°, respetivamente, o que significa que o escoamento induzido pelo fogo é significativo durante mais tempo. Uma vez que, com o aumento do declive, a fase de aceleração é normalmente mais prolongada que a fase de desaceleração, pode afirmar-se que este escoamento está associado a essa primeira etapa do fogo de junção.

Genericamente, a evolução das curvas é ascendente até atingir um valor máximo de U e depois é descendente, estabilizando sensivelmente no mesmo valor para todas as curvas (ver, por exemplo, os ensaios CF88, CF97, CF92 e CF95). Contudo, foram registadas algumas oscilações incomuns. No ensaio CF98, com declive nulo, os valores da velocidade induzida são muito baixos e observam-se flutuações nos valores da velocidade do escoamento, que correspondem à oscilação associada às chamas. Os valores negativos de U correspondem a escoamento dirigido em sentido contrário à propagação principal. Esta situação é bem visível, por exemplo, no ensaio CF93, com 20° de declive; no sensor situado

a 5 m da origem, o escoamento é essencialmente no sentido negativo; trata-se do escoamento induzido pela frente de chamas, em direção a ela e que irá retardar a aceleração da propagação.

4.2. Efeito do vento

4.2.1. Velocidade de propagação (R'_D)

Após a realização do programa experimental descrito na secção 3.5., foram obtidos os dados que aqui se apresentam. A variação da velocidade de propagação em função do tempo para 5 velocidades do vento distintas está representada na Figura 4.7. O gráfico correspondente ao ensaio sem vento e com declive nulo (CF98) também se encontra representado.

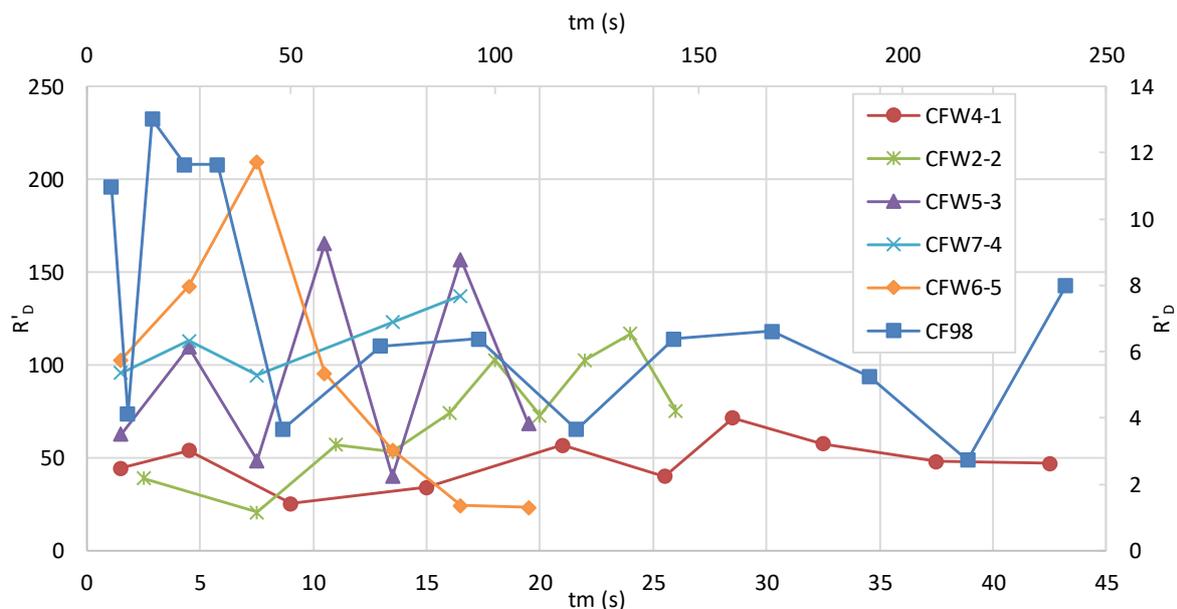


Figura 4.7. Variação de R'_D em função do tempo, para os ensaios realizados com vento e o ensaio sem vento com declive nulo. O gráfico do ensaio CF98 é o único que deve ser lido no sistema de eixos secundário.

Neste gráfico é possível constatar que, quanto maior é a velocidade do vento, mais rápido é o ensaio, ou seja, maior é a velocidade de propagação média do ponto D (tal pode ser visualizado com maior evidência na Figura 4.10). Por outro lado, a tendência da velocidade é crescente em todos os ensaios, sendo que a distinção entre as fases de aceleração e desaceleração se vai esbatendo com o aumento da velocidade do vento, à exceção do ensaio CFW6-5, que parece contrariar essa hipótese. Os dados parecem também indicar que, na presença de vento, a fase de desaceleração perde expressão, havendo uma aceleração quase

contínua do fogo. Tal sucede provavelmente devido à sobreposição da convecção forçada associada ao vento relativamente à convecção natural induzida pelo próprio fogo. Pelo gráfico é ainda possível verificar que a velocidade máxima atingida aumenta com o aumento da velocidade do vento, o que seria expectável.

Na Figura 4.8 apresenta-se a variação de R'_D em função de x_D . Deste gráfico podemos constatar que a distância para a qual se dá a velocidade máxima de propagação aumenta com o aumento da velocidade do vento. A variação da velocidade máxima de propagação do fogo do ensaio com vento de 1 m/s para o de 2 m/s é significativamente maior do que a variação de 2 para 4 m/s, mostrando que há uma espécie de “saturação” do efeito do vento na propagação do fogo de junção.

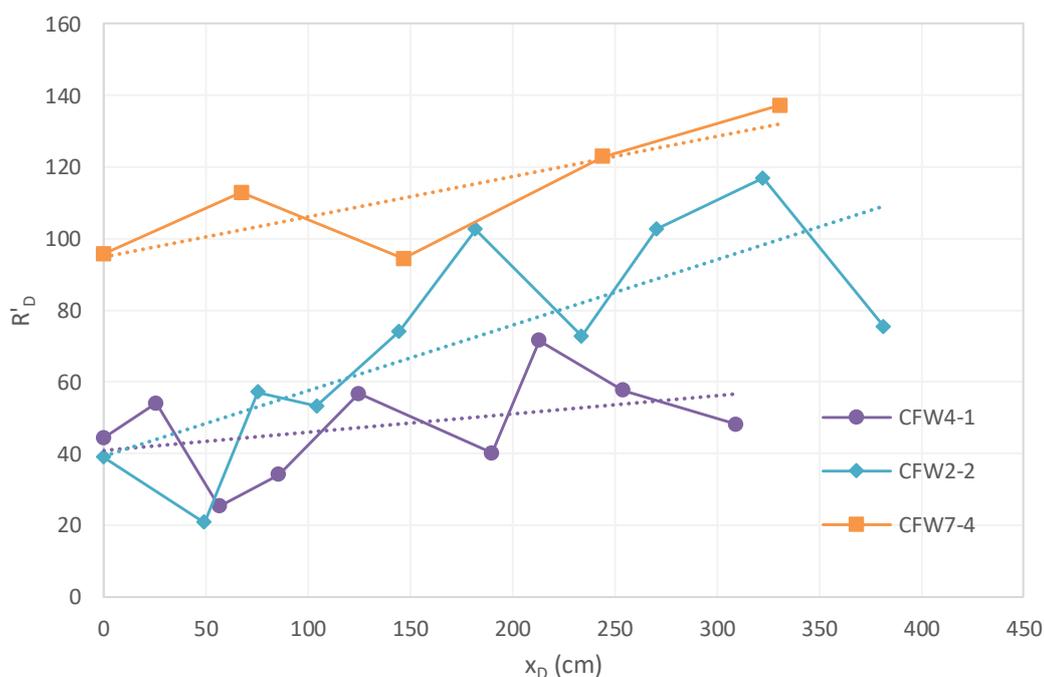


Figura 4.8. Variação de R'_D em função da distância x_D .

4.2.2. Comparação com os ensaios de frentes lineares

Para comparar o comportamento do fogo de junção com o de uma frente linear comum, foram feitos testes com leitos retangulares e ignições lineares, conforme descrito na secção 3.5.1. Na Tabela 4.1 apresentam-se dados importantes para a análise anteriormente referida. O ensaio CFW1-1 foi eliminado desta análise devido a problemas técnicos na aquisição de dados; o ensaio CFW4-1 foi realizado exatamente nas mesmas condições, para substituir o anterior. Na tabela foi incluído o ensaio CF98, que serve como termo de

comparação, uma vez que é um ensaio realizado com caruma (PP) e com velocidade do vento nula. Para a velocidade de 4 m/s, existem 2 ensaios; foram considerados apenas os valores do ensaio CFW7-4, uma vez que apresentam maior consistência em relação aos restantes dados. Importa ainda esclarecer que $R'_M/R'_{M(R)}$ é o quociente entre as velocidades máximas de propagação do ensaio em “V” e do ensaio retangular, para a mesma velocidade do vento.

Tabela 4.1. Dados relativos aos ensaios realizados no túnel de vento.

<i>Designação</i>	U_w (m/s)	R'_M	t_M (s)	t_{total} (s)	t_M/t_{total}	$R'_M/R'_{M(R)}$	R'_{med}	$R'_M/R'_{med(R)}$
CFW1-1	-	-	-	-	-	-	-	-
CFW4-1	1	71,51	28,5	45	0,63	4,16	47,88	9,517
CFW2-2	2	116,84	24	27	0,89	3,80	71,40	7,735
CFW5-3	3	165,28	10,5	21	0,50	-	93,02	-
CFW3-4	4	133,53	16,5	24	0,69	1,90	85,44	3,593
CFW7-4	4	137,20	7,5	18	0,42	1,96	101,23	3,692
CFW6-5	5	209,32	7,5	21	0,36	-	93,02	-
CFRW1-1	1	17,21	15	300	0,05	-	7,51	-
CFRW2-2	2	30,79	22,5	150	0,15	-	15,11	-
CFRW3-4	4	70,17	15	60	0,25	-	37,16	-
CF98 ($\alpha=0^\circ$)	0	13,01	16	252	0,06	-	7,16	-

A partir destes dados foram construídos os gráficos que se apresentam na Figura 4.9 e na Figura 4.10. Começando pelo primeiro, a curva a laranja contém os pontos relativos à velocidade máxima de propagação dos ensaios em “V”, para 0, 1, 2, 3, 4 e 5 m/s de velocidade do vento; dessa curva conclui-se que a velocidade máxima aumenta com o aumento da velocidade do vento. Depois, a curva a verde mostra que o aumento da velocidade do vento faz diminuir a relação entre a velocidade máxima de propagação de um fogo de junção e a velocidade máxima de propagação de uma frente linear, sugerindo que, sob a ação de um vento muito rápido, uma frente linear possa adquirir características semelhantes à do fogo de junção. Isto pode sugerir que a ação do vento sobre o fogo de junção é mais preponderante que a ação do declive. À curva a azul pode aplicar-se um raciocínio semelhante, comparando a velocidade máxima do fogo de junção com a média de uma frente linear.

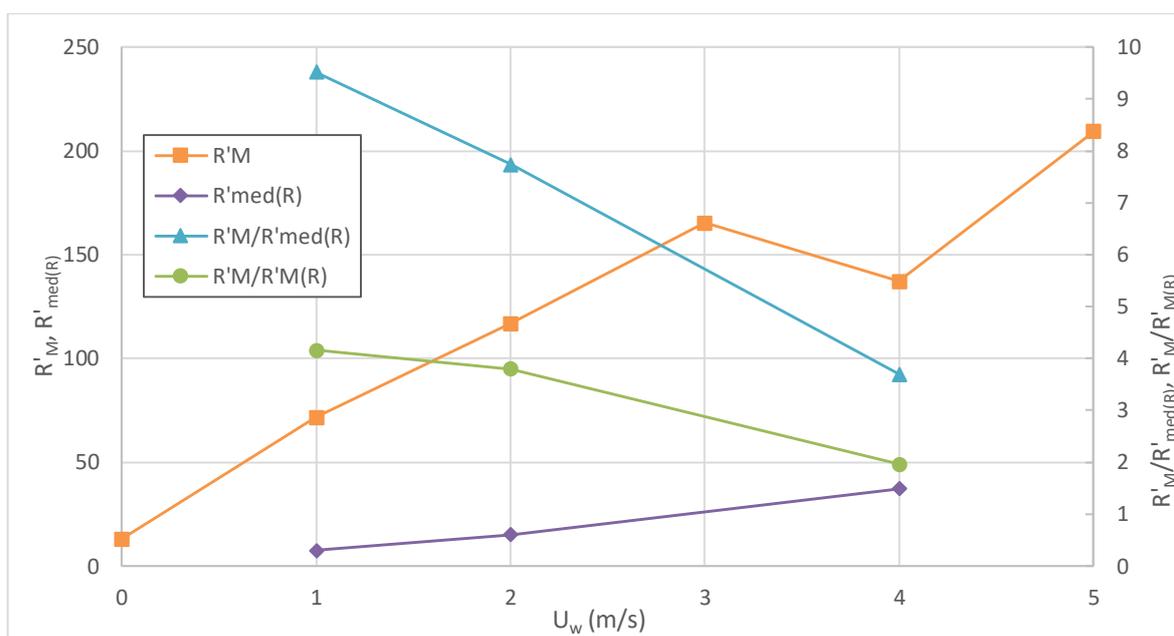


Figura 4.9. Variação dos parâmetros adimensionais (velocidade de propagação do fogo) em função da velocidade do vento U_w .

Por fim, a linha a roxo mostra que a velocidade média de propagação de uma frente linear sob a ação do vento é tanto maior quanto maior for a velocidade do vento, o que seria expectável.

Em relação ao gráfico da Figura 4.10, podem-se tirar as seguintes conclusões:

- O tempo total de queima diminui drasticamente na presença de vento, quando comparado com o tempo de um ensaio sem vento;
- Esse tempo diminui com o aumento da velocidade do vento, ainda que de maneira muito ténue para os valores estudados, mantendo-se praticamente constante;
- O tempo que demora a ser atingido o valor máximo da velocidade de propagação do fogo é mais ou menos semelhante para o combustível estudado, ou seja, é praticamente independente da velocidade do vento, mas o seu valor relativo tendo em conta a duração total do ensaio cresce com o valor da velocidade do vento. O facto de o valor de t_M ser praticamente constante e independente do tempo constitui um resultado importante, uma vez que este parâmetro se encontra associado ao processo de aceleração eruptiva da velocidade de propagação, que para um dado combustível é uma fração do seu tempo de residência t_0 . No

caso das agulhas de *Pinus pinaster* (caruma), o tempo de residência é de cerca de 50 a 60 s e, no modelo eruptivo (cf. Viegas, 2005), o valor de $t'=t/t_0$ a que ocorre a aceleração é de cerca de 0.2 a 0.3, valor este que é confirmado nos presentes ensaios;

- A relação entre o tempo necessário para se atingir a velocidade de propagação máxima e o tempo total do ensaio, para os ensaios em “V”, aumenta significativamente quando existe vento; de 1 para 2 m/s a relação aumenta, diminuindo a partir dos 2 m/s, sendo sempre muito superior ao valor para a situação sem vento. Este comportamento deve-se à redução do tempo necessário para se atingir a velocidade de propagação máxima com o aumento da velocidade do vento.

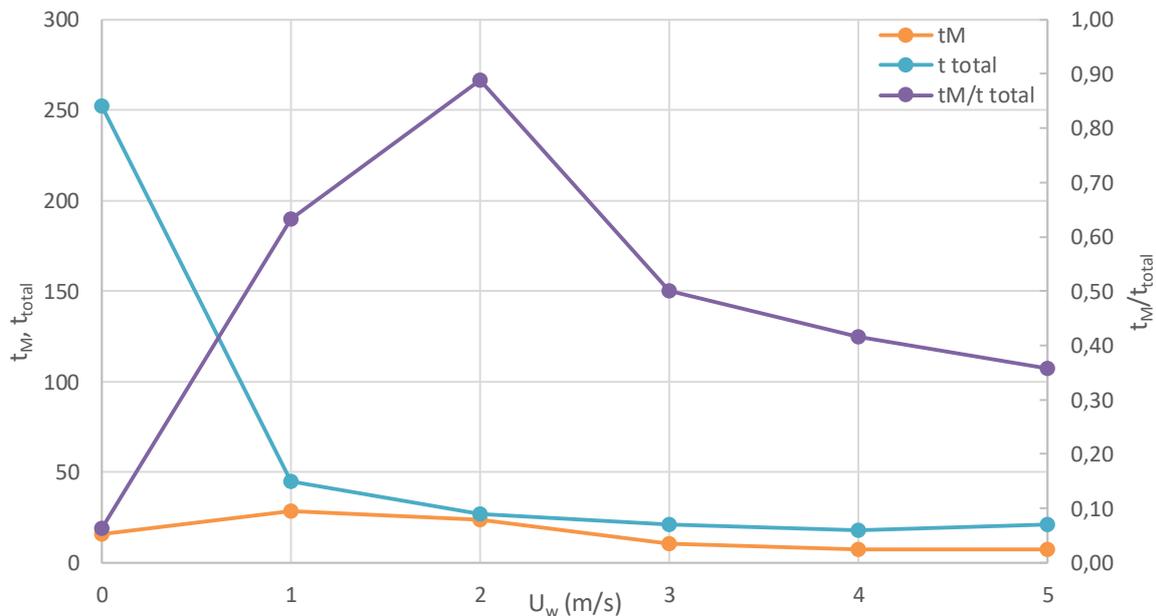


Figura 4.10. Variação dos parâmetros temporais em função da velocidade do vento U_w , para os ensaios em “V”.

4.3. Análise comparativa dos efeitos do vento e do declive

Como já foi referido no capítulo 1, apesar de existirem algumas diferenças, o vento e o declive acabam por influenciar a propagação do fogo de maneira semelhante. Assim sendo, julgou-se interessante fazer esta comparação para o caso dos fogos de junção. Nesta análise serão utilizados apenas os dados referentes aos ensaios com caruma (PP).

Na Tabela 4.2 apresentam-se os dados dos ensaios com declive. Os ensaios CF90 e CF100 foram realizados com os mesmos valores de α , tendo-se obtido resultados algo diferentes. Assim, foram considerados apenas os valores do ensaio CF100, uma vez que apresentam maior consistência em relação aos restantes dados. De referir que os valores das velocidades adimensionais médias para frentes lineares propagando-se num leito com declive (R'_{med}) já tinham sido anteriormente determinados e foram retirados de Raposo (2016), à exceção dos valores assinalados a verde, que foram obtidos por interpolação (ajustando um polinómio do 2.º grau aos valores já conhecidos).

Tabela 4.2. Dados relativos aos ensaios com declive, para o combustível PP.

<i>Design.</i>	α (°)	R'_M	t_M	x_M	R'_{med}	R'_M/R'_{med}
CF98	0	13,01	16	35	1	13,01
CF99	15	51,71	6	52,53	2,46	21,06
CF90	20	36,10	65	143,61	2,67	13,52
CF100	20	98,13	4,5	54,16	2,67	36,75
CF101	25	93,42	4,5	71,20	3,53	26,50
CF88	30	142,71	17	235,81	5	28,54
CF97	40	98,99	11	121,58	5,02	19,72

Na Tabela 4.3 apresentam-se, por sua vez, os dados dos ensaios com vento. Foram considerados nesta análise os valores referentes ao ensaio CFW7-4, e não os do CFW3-4, pelas razões anteriormente apontadas. Neste caso, os valores das velocidades adimensionais médias para frentes lineares sob a ação do vento (R'_{med}) foram obtidos experimentalmente, à exceção dos valores assinalados a verde, que foram obtidos por interpolação e extrapolação (ajustando, uma vez mais, um polinómio do 2.º grau aos valores já conhecidos).

Tabela 4.3. Dados relativos aos ensaios com vento, para o combustível PP.

<i>Design.</i>	U_w (m/s)	R'_M	t_M	x_M	R'_{med}	R'_M/R'_{med}
CF98	0	13,01	16	35	1	13,01
CFW4-1	1	71,51	28,5	212,95	7,51	9,522
CFW2-2	2	116,84	24	322,41	15,11	7,733
CFW5-3	3	165,28	10,5	155,30	25,30	6,533
CFW3-4	4	133,53	16,5	166,65	37,16	3,593
CFW7-4	4	137,20	7,5	330,64	37,16	3,692
CFW6-5	5	209,32	7,5	172,25	50,86	4,112

A partir dos dados destas tabelas foram construídos os gráficos que se apresentam em seguida. Na Figura 4.11 está representada a variação de R'_M em função do ângulo α e da velocidade do vento U_w . Analisando o gráfico, podemos constatar que os valores de R'_M são da mesma ordem de grandeza para os casos do vento e do declive. Pode-se afirmar também que existem alguns valores que podem ser considerados quase correspondentes (por exemplo, o valor de R'_M para 30° de declive é semelhante ao valor de R'_M sob a ação de vento com velocidade igual a 4 m/s). Por fim, é visível a tendência crescente de R'_M em ambos os casos, pelo que se pode concluir que a influência do vento e do declive sobre a velocidade máxima de propagação num fogo de junção é semelhante.

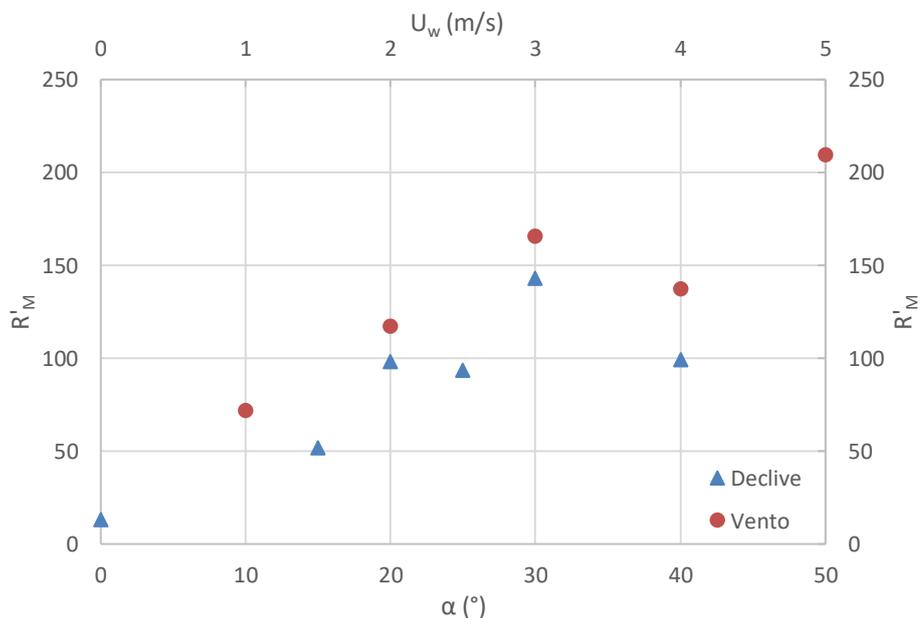


Figura 4.11. Variação de R'_M em função do declive e da velocidade do vento.

Na Figura 4.12 pode-se visualizar a evolução de t_M com o declive e com a velocidade do vento. No caso do vento é possível observar uma tendência descendente de t_M com o aumento da velocidade do vento, o que já não é tão evidente no caso do declive. Contudo, os valores de t_M situam-se (quase) todos numa gama relativamente curta para ambos os casos, o que constitui um resultado importante já que mostra a independência desta variável em relação ao vento e ao declive.

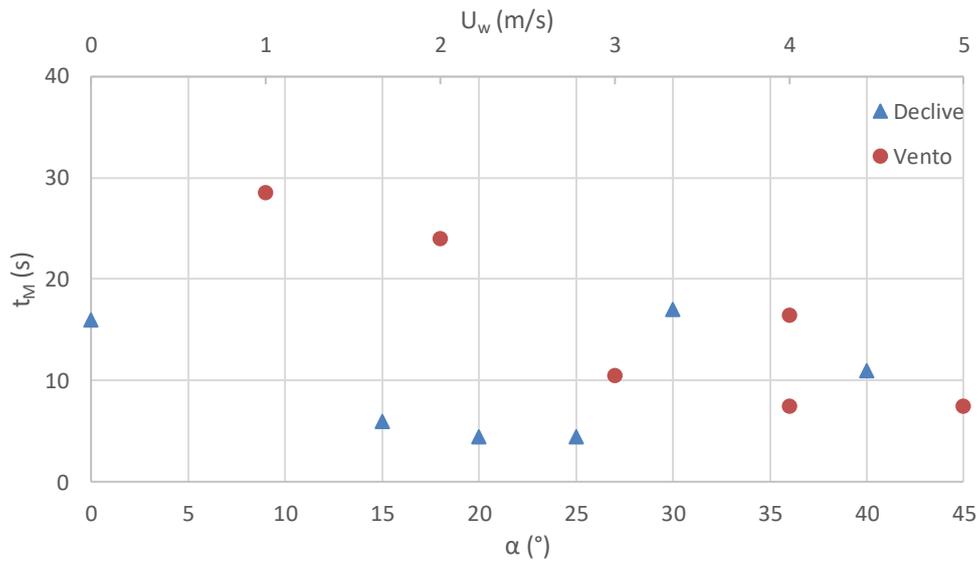


Figura 4.12. Variação de t_M em função do declive e da velocidade do vento.

Na Figura 4.13 pode-se observar a evolução de x_M com o declive e com a velocidade do vento. No caso do vento não é possível observar uma tendência clara dos valores. Por outro lado, no caso do declive, os valores têm uma tendência global claramente crescente. Assim, para este parâmetro, é difícil estabelecer uma relação entre os efeitos do vento e do declive.

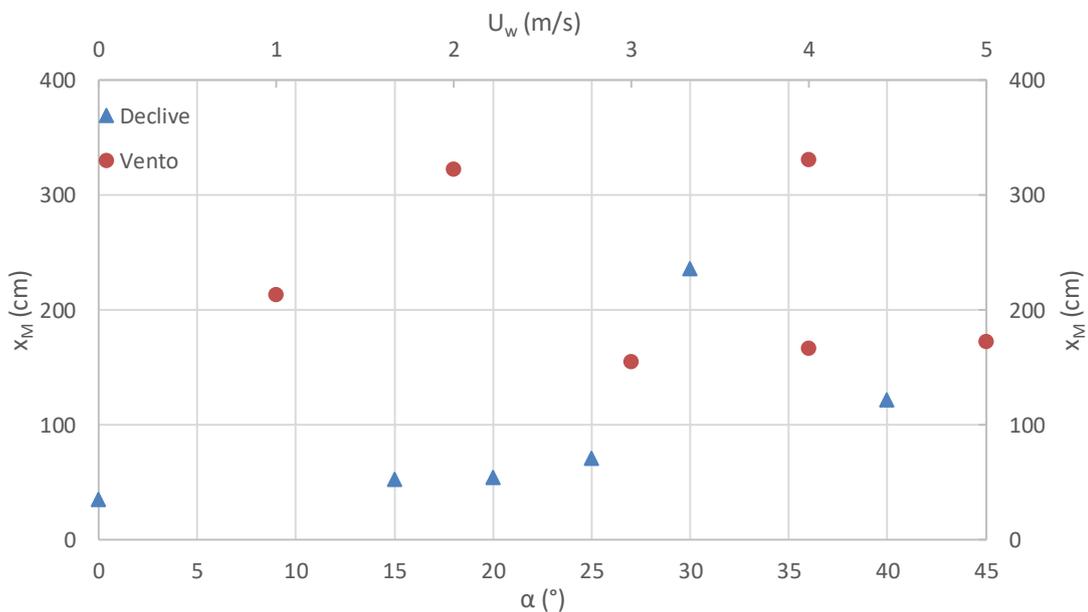


Figura 4.13. Variação de x_M em função do declive e da velocidade do vento.

Na Figura 4.14 pode-se observar a evolução de R'_M/R'_{med} com o declive e com a velocidade do vento. A partir da análise deste gráfico é possível aferir o efeito relativo da

presença de vento ou de declive nos fogos de junção, uma vez que se comparam esses dados com os referentes às frentes lineares. Os resultados aqui exibidos permitem afirmar que o efeito relativo de aceleração, que ocorre devido à configuração geométrica dos fogos de junção, vai-se esbatendo com o aumento da velocidade do vento, ao contrário do que acontece quando existe declive. A explicação para este facto está provavelmente relacionada com o fenómeno convectivo: na presença de vento, a convecção forçada acaba por inibir o efeito da convecção natural gerada pelo próprio fogo.

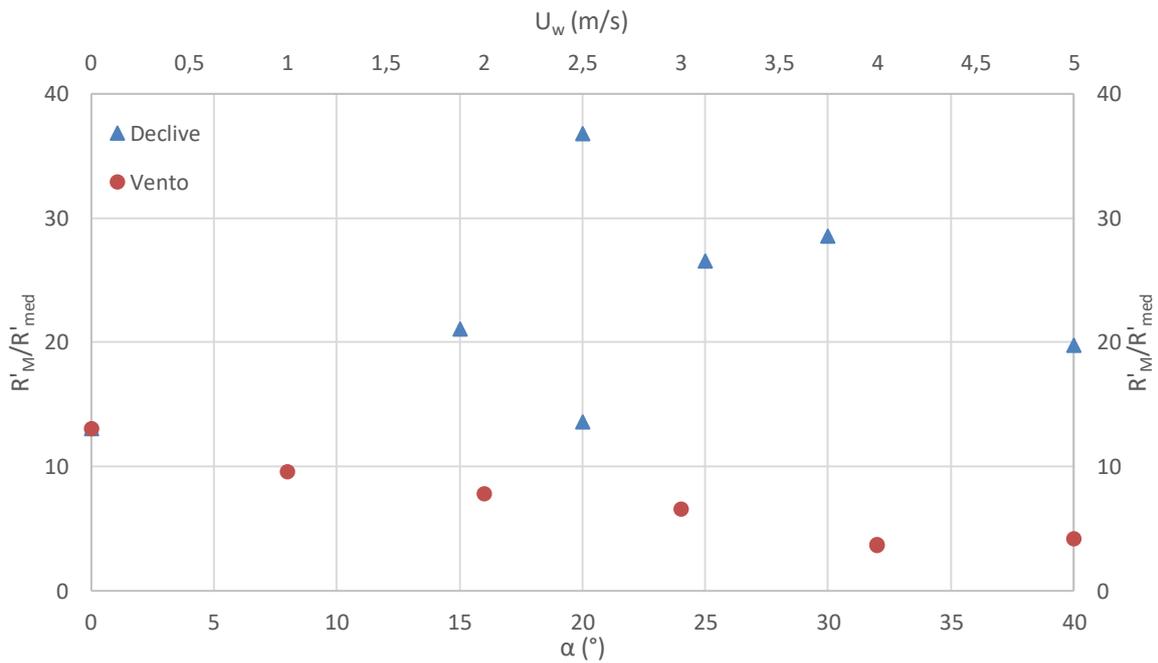


Figura 4.14. Variação de R'_M/R'_{med} em função do declive e da velocidade do vento.

5. CONCLUSÃO

A análise do comportamento do fogo de junção sob o efeito do vento e do declive, nomeadamente a evolução da velocidade de propagação do ponto de interseção de frentes convergentes, foi o propósito da presente dissertação.

Foi feita uma pesquisa sobre o tema, para o enquadrar a nível teórico, e foi explicado o fenómeno do fogo de junção de forma clara e sucinta. Através da definição do problema genérico de duas frentes convergentes, fazendo um ângulo θ_0 entre si, foi possível estudar a velocidade de propagação do ponto D (ponto de interseção das frentes).

Para estudar o problema foi necessário realizar diversos ensaios experimentais, sobretudo em ambiente laboratorial. Nesses ensaios, foram utilizados 3 tipos de combustíveis diferentes (caruma, mato e palha) com uma carga de 0.6 kg/m^2 . O ângulo entre as frentes de fogo foi mantido constante no valor de 30° , por ser o valor verificado no incêndio de Camberra. Os parâmetros que se fizeram variar foram o ângulo de inclinação α (declive), num primeiro grupo de ensaios, e a velocidade do vento noutra grupo. Os valores de α variaram entre os 0 e os 40° , enquanto que a velocidade do vento variou entre os 0 e os 5 m/s .

De referir que os resultados obtidos nos ensaios com declive foram, de forma geral, ao encontro daquilo que se encontra documentado na bibliografia existente. Os ensaios com vento foram realizados pela primeira vez de um modo sistemático no âmbito do presente trabalho. Embora os resultados disponíveis neste momento sejam ainda parcelares – pois terão de ser completados com mais ensaios – permitem estabelecer uma analogia entre o declive e o vento no comportamento dos fogos de junção. Aparentemente, existem algumas diferenças importantes entre o efeito de ambos. No caso dos ensaios com vento, a convecção forçada, associada ao mesmo, parece prevalecer sobre a convecção natural induzida pelo fogo, mesmo para valores relativamente baixos da velocidade do vento. Possivelmente, para valores de $U_w = 0.5 \text{ m/s}$ ou inferiores, poderão ser observados efeitos comparáveis da convecção livre e forçada. Para tal, terão de ser realizados ensaios com medição do campo de velocidades igualmente.

Através dos resultados obtidos foi possível identificar as fases de aceleração e desaceleração típicas deste comportamento do fogo. Constatou-se que a fase de aceleração

está ligada a fenómenos convectivos induzidos pelas próprias chamas. Foi também concluído que a velocidade de propagação de um fogo de junção aumenta com o aumento do declive. A velocidade máxima e o tempo até atingir esse valor também aumentam com o declive.

Em relação ao vento, conclui-se que, com o aumento da sua velocidade, a velocidade máxima de propagação do fogo aumenta e o tempo necessário para queimar todo o combustível diminui.

Por fim, foi feita uma comparação entre o declive e o vento, constatando-se que, apesar de os seus efeitos no comportamento do fogo em geral serem semelhantes, existem algumas diferenças importantes no comportamento dos fogos de junção. Posto isto, é importante realçar que, possivelmente, o número de ensaios efetuados não é suficiente para tirar conclusões realmente sólidas sobre o papel do vento nos fogos de junção, pelo que este deverá ser o principal foco em trabalhos futuros. Ainda assim, considera-se que o trabalho aqui realizado é já um bom ponto de partida.

Pode-se considerar que o trabalho sobre os fogos de junção está ainda numa fase embrionária. Assim sendo, identificam-se aqui alguns pontos que podem ser explorados no futuro:

- Estudar outros parâmetros que possam ajudar a compreender cada vez melhor o fenómeno dos fogos de junção, como a inclinação das chamas (*tilt*), a altura das chamas, etc.;
- Realizar mais ensaios com vento, variando parâmetros como a orientação do vento, o ângulo entre as frentes de fogo e o declive;
- Melhorar o procedimento experimental (utilização de fios de algodão é pouco conveniente uma vez que é necessário colocá-los após cada ensaio; a utilização de explosivos para acelerar as ignições pode ser aperfeiçoada);
- Simular o fenómeno do fogo de junção numericamente;
- Realizar testes de frentes lineares com declive para efeitos comparativos, como foi efetuado para o vento;
- Realizar mais ensaios de campo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. André, J. C. S., Gonçalves, J. C., Vaz, G. C., & Viegas, D. X. (2013). Angular variation of fire rate of spread. *International Journal of Wildland Fire*, 22(7), 970–979.
2. Bergman, T. L., Lavine, A. S., Incropera, F. P., & DeWitt, D. P. (2011). *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*. US Patent 5,328,671.
3. Boboulos, M., & Purvis, M. R. I. (2009). Wind and slope effects on ROS during the fire propagation in East-Mediterranean pine forest litter. *Fire Safety Journal*, 44(5), 764–769.
4. Butler, B. W., Anderson, W. R., & Catchpole, E. A. (2007). Influence of Slope on Fire Spread Rate. In *USDA Forest Service Proceedings* (pp. 75–82).
5. Doogan, M. (2006). The Canberra Firestorm. Inquests and Inquiry into Four Deaths and Four Fires between 8 and 18 January 2003. ACT.
6. Ferragut, L., Asensio, I., & Monedero, S. (2004). Modelling slope, wind and moisture content effects on fire spread. In *European Congress on Computational Methods in Applied Sciences and Engineering (ECCOMAS 2004)* (pp. 1–11).
7. Finney, M. A., & McAllister, S. S. (2011). A review of fire interactions and mass fires. *Journal of Combustion*, 2011.
8. Grumer, J., & Strasser, A. (1965). Uncontrolled fires - Specific burning rates and induced air velocities. *Fire Technology*, 1(4), 256–268.
9. Huffman, K. G., Welker, J. R., & Sliepcevich, C. M. (1969). Interaction effects of multiple pool fires. *Fire Technology*, 5(3), 225–232.
10. Kamikawa, D., Weng, W. G., Kagiya, K., Fukuda, Y., Mase, R., & Hasemi, Y. (2005). Experimental study of merged flames from multifire sources in propane and wood crib burners. *Combustion and Flame*, 142(1-2), 17–23.
11. McRae, R. (2003). The Breath of the Dragon - Observations of the January 2003 ACT Bushfires R.H.D. McRae Emergency Services Bureau, A.C.T., Australia., (January).
12. Morandini, F., Santoni, P. A., & Balbi, J. H. (2001). The contribution of radiant heat transfer to laboratory-scale fire spread under the influences of wind and slope. *Fire Safety Journal*, 36(6), 519–543.
13. Morandini, F., Silvani, X., Rossi, L., Santoni, P.-A., Simeoni, A., Balbi, J.-H., ... Marcelli, T. (2006). Fire spread experiment across Mediterranean shrub: Influence of wind on flame front properties. *Fire Safety Journal*, 41(3), 229–235.
14. Morvan, D., Hoffman, C., Rego, F., & Mell, W. E. (2009). Numerical Simulation of the Interaction Between Two Fire Fronts in the Context of Suppression Fire Operations. *Proceedings of the 8th Symposium on Fire and Forest Meteorology*, (October).

15. Raposo, J., Viegas, D. X., Xie, X., Almeida, M., & Naian, L. (2014). Analysis of the jump fire produced by the interaction of two oblique fire fronts: Comparison between laboratory and field cases. *Advances in Forest Fire Research*, 4(4), 23–30.
16. Raposo, J. (2016). “Extreme Fire Behaviour Associated with the Merging of Two Linear Fire Fronts”. Tese de Doutoramento em Engenharia Mecânica, Departamento de Engenharia Mecânica, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade de Coimbra, Coimbra.
17. Rothermel, R. C. (1972). *A mathematical model for predicting fire spread in wild land fuels*. USDA Forest Service Research Paper INT-115.
18. Sharples, J. J., McRae, R. H. D., & Wilkes, S. R. (2012). Wind-terrain effects on the propagation of wildfires in rugged terrain: Fire channelling. *International Journal of Wildland Fire*, 21(3), 282–296.
19. Sharples, J. J., Towers, I. N., Wheeler, G., Wheeler, V., & McCoy, J. A. (2013). Modelling fire line merging using plane curvature flow. *20th International Congress on Modelling and Simulation*, (December), 256–262.
20. Sharples, J. J., Viegas, D. X., Rossa, C. G., & McRae, R. H. D. (2010). Small-scale observations of atypical fire spread caused by the interaction of wind, terrain and fire. *Proceedings of the VI International Conference on Forest Fire Research*.
21. Skamarock, W. C., Klemp, J. B., Dudhia, J., Gill, D. O., Barker, D. M., Wang, W., & Powers, J. G. (2005). A description of the advanced research WRF version 2 (No. NCAR/TN-468+ STR). National Center For Atmospheric Research Boulder Co Mesoscale and Microscale Meteorology Div.
22. Sullivan, A. L. (2009^a). Wildland surface fire spread modelling, 1990–2007. 1: Physical and quasi-physical models. *International Journal of Wildland Fire*, 18(4), 349–368.
23. Sullivan, A. L. (2009^b). Wildland surface fire spread modelling, 1990–2007. 3: Simulation and mathematical analogue models. *International Journal of Wildland Fire*.
24. Thomas, C. M., Sharples, J. J., & Evans, J. P. (2015). Pyroconvective interaction of two merged fire lines: curvature effects and dynamic fire spread, 312–318.
25. Viegas, D. X., Rossa, C., & Ribeiro, L. M. (2011). *Incêndios Florestais*. Lisboa: Verlag Dashöfer Portugal.
26. Viegas, D. X. (2005). A Mathematical Model For Forest Fires Blowup. *Combustion Science and Technology*, 177(1), 27–51.
27. Viegas, D. X., Pita, L. P., Matos, L. e Palheiro, P. (2002). Slope and wind effects on fire spread. *Int. Forest Fire Research and Wildland Fire Safety*, Luso, Coimbra, Viegas (eds). Millpress, Rotterdam.
28. Viegas, D.X., Raposo, J., & Figueiredo, A. (2013). Preliminary analysis of slope and fuel bed effect on jump behavior in forest fires. *Procedia Engineering*, 62, 1032–1039.

29. Viegas, D. X. (1998). Forest fire propagation. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 356(1748), 2907 – 2928.
30. Viegas, D. X. (2004). Slope and wind effects on fire propagation. *International Journal of Wildland Fire*, 13(2), 143–156.
31. Viegas, D. X. (2006). Parametric study of an eruptive fire behaviour model. *International Journal of Wildland Fire*, 15(2), 169–177.
32. Viegas, D. X., Raposo, J. R., Davim, D. A., & Rossa, C. G. (2012^a). Study of the jump fire produced by the interaction of two oblique fire fronts. Part 1. Analytical model and validation with no-slope laboratory experiments. *International Journal of Wildland Fire*, 21(7), 843–856.
33. Viegas, D. X., Almeida, M., Raposo, J., & Davim, D. (2012^b). Experimental forest fire research. In *15th International Conference on Experimental Mechanics* (Vol. 3128, pp. 1–11).
34. Wagner, C. E. van. (1988). Effect of slope on fires spreading downhill. *Canadian Journal of Forest Research*, 18(6), 818–820.
35. Wang, C., Guo, J., Ding, Y., Wen, J., & Lu, S. (2015). Burning rate of merged pool fire on the hollow square tray. *Journal of Hazardous Materials*, 290, 78–86.
36. Weise, D. R., & Biging, G. S. (1994). Effects of Wind Velocity and Slope on Fire Behavior. *Fire Safety Science*, 4, 1041–1051.
37. Weise, D. R., & Biging, G. S. (1996). Effects of wind velocity and slope on flame properties. *Canadian Journal of Forest Research*, 26, 1849–1858.