

• U • C •

FCTUC FACULDADE DE CIÊNCIAS  
E TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE DE COIMBRA

DEPARTAMENTO DE  
ENGENHARIA MECÂNICA

# **Estudo Experimental e Numérico da Ação do Vento na Propagação de Frentes Convergentes**

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

## **Numerical and Experimental Study of Wind's Action in the Propagation of Junction Fires**

**Autor**

**Maria Carolina Prata Rodrigues**

**Orientadores**

**Domingos Xavier Filomeno Carlos Viegas**

**Jorge Rafael Nogueira Raposo**

**Júri**

<b>Presidente</b>	<b>Professor Doutor António Manuel Gameiro Lopes</b> Professor Auxiliar da Universidade de Coimbra
<b>Orientador</b>	<b>Professor Doutor Jorge Rafael Nogueira Raposo</b> Professor Auxiliar da Universidade de Coimbra
<b>Vogais</b>	<b>Professor Doutor Jorge Campos da Silva André</b> Professor Auxiliar da Universidade de Coimbra

**Colaboração Institucional**

---



**Associação para o  
Desenvolvimento da  
Aerodinâmica Industrial**

**Coimbra, Setembro, 2018**



*“E as pessoas nem sonham que quem acaba uma coisa nunca é aquele que a começou, mesmo que ambos tenham um nome igual, que isso só é que se mantém constante, nada mais.”*

José Saramago em O ano da morte de Ricardo Reis, 1984



## Agradecimentos

A realização desta dissertação de mestrado foi uma tarefa, por muitas vezes, desafiante e árdua. Contudo, contei com o apoio de diversas pessoas e entidades às quais não poderia deixar de prestar o meu profundo agradecimento.

Ao Professor Doutor Domingos Xavier Viegas e ao Doutor Rafael Raposo por me terem aceite como orientanda, pela gentileza, pela transmissão de conhecimento, e pelos sábios conselhos.

Ao Abdelraham Abouali por me ter guiado na elaboração do presente trabalho, mostrando, desde o início, disponibilidade e dedicação. Agradeço também pela paciência com que sempre transmitiu todos os conhecimentos requeridos, e sem os quais esta dissertação não seria possível.

Ao Gonçalo Rosa e restante equipa do CEIF pelo acolhimento e pelo apoio, principalmente aquando a realização dos ensaios experimentais.

À Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade de Coimbra, em especial ao Departamento de Engenharia Mecânica por me ter dado todas as ferramentas, tanto a nível técnico como pessoal, para a realização de um trabalho desta dimensão, e que é o culminar de cinco anos de aprendizagem.

Cabe-me também agradecer ao Laboratório de Computação Avançada da Universidade de Coimbra pela disponibilização de recursos e mentoria, que permitiram o estudo de algumas das peças fundamentais deste trabalho.

Um agradecimento muito especial à Laura, por tornar esta reta final menos solitária, mas acima de tudo, pela amizade.

Ao Carlos pelo carinho, e por ter sido uma constante, quando tudo o resto eram variáveis.

Aos meus pais e irmãos, a quem muito devo, e sem os quais não seria possível a realização desta dissertação. Agradeço principalmente por me fazerem querer ser mais e melhor, por me incentivarem a ser curiosa, e pelo apoio incondicional.



## Resumo

Este trabalho tem como objetivo o estudo das frentes convergentes como um tipo de comportamento extremo do fogo, e será assente tanto no desenvolvimento de simulações numéricas como na realização de ensaios experimentais. Ao analisar o comportamento do fogo pretende-se que no futuro sejam possíveis a sua previsão e consequente adoção das medidas necessárias para o seu controlo.

As simulações numéricas foram elaboradas no *Fire Dynamics Simulator* (FDS) e foram baseadas em condições reais. Estas foram aplicadas a diferentes configurações e parâmetros.

Os ensaios experimentais foram realizados num túnel de vento no Laboratório de Estudos sobre Incêndios Florestais (LEIF). O combustível utilizado foi agulhas de pinheiro (*Pinus Pinaster*) com uma carga semelhante à que existiria numa situação real de pinhal e foram igualmente testadas diferentes configurações.

Ambas as metodologias pretendem verificar qual a influência de alguns parâmetros na velocidade de propagação do fogo e noutros fenómenos como a velocidade de escoamento e a temperatura. Esses parâmetros são os ângulos entre as duas frentes (15°, 30° e 40°), a velocidade do vento (0m/s, 1m/s, 2m/s, 3m/s) e a sua direção (mesma da propagação, perpendicular à propagação e oposta à propagação). Foram realizadas combinações entre estes parâmetros.

A finalidade de estudar simulações numéricas em paralelo com ensaios laboratoriais prende-se com a capacidade de poder aprofundar os conhecimentos nas primeiras e validá-las com os segundos.

Por fim, concluiu-se que o vento é de facto um dos fatores determinantes no que diz respeito ao desenvolvimento de frentes convergentes.

**Palavras-chave:** Frentes Convergentes, Simulação Numérica, Comportamento Extremo do Fogo, Incêndios Florestais, Velocidade de Propagação, Modelação do Fogo.



## Abstract

The aim of this paper is the study of junction fires as a type of extreme fire behaviour (EFB). This study will be based on the development of numerical simulations and experimental tests. The main purpose of analysing fire behaviour is his prediction in the future and consequently the adoption of preventive and control means.

The numerical simulations were elaborated on the Fire Dynamics Simulator (FDS) and were based on real conditions. These were applied on different configurations and parameters.

The experimental tests were carried out inside a wind tunnel provided by Fire Research Laboratory of the University of Coimbra (LEIF). The fuel used was pine needles (*Pinus Pinaster*) with a load like the one existent in a pinewood forest. Different configurations were also tested.

Both methodologies intend to verify the influence of some parameters mainly in the rate of spread of the fire, but also in other phenomena like flow speed and temperature. These parameters are the angle between the two fire fronts (15°, 30° and 40°), the wind speed (0m/s, 1m/s, 2m/s and 3m/s), and the wind direction (same as propagation, perpendicular to propagation, opposite to propagation). Those parameters were combined between them.

The purpose of studying numerical simulations in parallel with experimental tests is the ability to study some quantities in a more deepen way and to validate the results.

Finally, it was concluded that wind plays one of the main roles in the development of junction fires.

**Keywords** Junction Fires, Computational Fluid Dynamics, Extreme Fire Behaviour, Wildfires, Rate of Spread, Fire Modelling.



## Índice

Índice de Figuras .....	ix
Índice de Tabelas .....	xiii
Simbologia e Siglas .....	xv
Simbologia.....	xv
Siglas .....	xvi
1. Introdução.....	1
1.1. Motivação .....	1
1.2. Estado da Arte.....	2
2. Frentes Convergentes .....	5
2.1. Definição.....	5
2.2. Comportamento Dinâmico do Fogo .....	6
2.3. Parâmetros que Influenciam a Propagação do Fogo.....	7
2.4. Modos de Transferência de Calor em Incêndios .....	8
3. Metodologia - Simulações Numéricas.....	9
3.1. Fire Dynamics Simulator (FDS).....	9
3.2. Configuração da Simulação .....	10
3.2.1. Domínio.....	10
3.2.2. Tempo da Simulação .....	10
3.2.3. Escolha das Malhas .....	11
3.2.4. Material Combustível / Camada de Combustível.....	11
3.2.5. Ignição .....	12
3.2.6. Condições de Fronteira.....	13
3.2.7. Dispositivos de Controlo .....	13
3.3. Simulações Realizadas.....	14
3.4. Resultados e Discussão .....	15
3.4.1. Variação do Ângulo $\theta$ .....	16
3.4.2. Variação da velocidade do vento $U$ .....	21
3.4.3. Variação da direção do vento $\alpha$ .....	23
4. Metodologia – Ensaios Experimentais .....	25
4.1. Configuração.....	26
4.1.1. Massa de Combustível.....	26
4.1.2. Termopares .....	27
4.1.3. Ignição .....	27
4.2. Velocidade de Propagação (ROS) .....	27
4.2.1. Câmara de infravermelhos (IR).....	27
4.2.2. <i>Fire ROS Calculator</i> .....	28
4.2.3. Velocidade Básica de Propagação ( $R_0$ ) .....	29
4.3. Resultados e Discussão .....	30
4.3.1. Variação do ângulo sem vento.....	31

4.3.2.	Varição do ângulo com velocidade do vento constante .....	34
4.3.3.	Varição da velocidade do vento U.....	37
4.3.4.	Varição da direção do vento $\alpha$ .....	40
5.	Simulações Numéricas vs Ensaio Experimentais .....	43
5.1.	Tempo de Simulação vs Tempo de Ensaio .....	43
5.2.	Mapeamento das frentes de ignição.....	44
6.	Conclusões .....	47
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	49

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. Fotografia de um ensaio representativo de frentes convergentes.....	5
Figura 2.2 Esquema demonstrativo do problema em estudo.....	7
Figura 3.1. Representação do domínio e respetivos eixos.....	10
Figura 3.2 Representação esquemática dos pontos de ignição.....	12
Figura 3.3 Disposição dos dispositivos nas coordenadas equivalentes aos ensaios experimentais.....	14
Figura 3.4 Posição do V no domínio e suas dimensões.....	15
Figura 3.5. (a) Mapeamento FC_S1 $\theta=15^\circ$ da frente de ignição com intervalo de tempo de 5s (b) Evolução da temperatura ao longo do tempo para o teste FC_S1.....	16
Figura 3.6 . (a) Mapeamento FC_S2 $\theta=30^\circ$ da frente de ignição com intervalo de tempo de 5s (b) Evolução da temperatura ao longo do tempo para o teste FC_S2.....	16
Figura 3.7 . (a) Mapeamento FC_S3 $\theta=40^\circ$ da frente de ignição com intervalo de tempo de 5s (b) Evolução da temperatura ao longo do tempo para o teste FC_S3.....	17
Figura 3.8 Velocidade de propagação a variar com D/L na coordenada $x_1$ para os diferentes ângulos $\theta$ ( $L=6m$ ).....	17
Figura 3.9 Evolução de $U_x$ e temperatura com o tempo para as diferentes posições para o caso FC_S2 $\theta=30^\circ$ (a) E1 (b) E2 (c) E3 (d) E4 (e) E5 .....	18
Figura 3.10 Evolução da velocidade de propagação segundo o eixo x e temperatura com o tempo para as diferentes posições para o caso FC_S1 $\theta=15^\circ$ (a) E1 (b) E2 (c) E3 (d) E4 (e) E5 .....	20
Figura 3.11 Evolução de $U_x$ e da temperatura com o tempo para as diferentes posições para o caso FC_S3 $\theta=40^\circ$ (a) E1 (b) E2 (c) E3 (d) E4 .....	20
Figura 3.12 (a) Mapeamento FC_S4 $\theta=30^\circ$ e $U=1$ m/s da frente de ignição com intervalo de tempo de 3s (b) Evolução da temperatura ao longo do tempo para o teste FC_S4.....	21
Figura 3.13 (a) Mapeamento FC_S5 $\theta=30^\circ$ e $U=2$ m/s da frente de ignição com intervalo de tempo de 3s (b) Evolução da temperatura ao longo do tempo para o teste FC_S5.....	21
Figura 3.14 (a) Mapeamento FC_S6 $\theta=30^\circ$ e $U=3$ m/s da frente de ignição com intervalo de tempo de 3s (b) Evolução da temperatura ao longo do tempo para o teste FC_S6.....	22
Figura 3.15 Velocidade de propagação a variar com a D/L na coordenada $x_1$ para as diferentes velocidades do vento U (S4 – 1m/s, S5 – 2m/s, S6 – 3m/s).....	22

Figura 3.16 (a) Mapeamento FC_S7 $\theta=30^\circ$ , $U=2$ m/s e $\alpha=180^\circ$ da frente de ignição com intervalo de tempo de 5s (b) Evolução da temperatura ao longo do tempo para o teste FC_S7 .....	23
Figura 3.17 (a) Mapeamento FC_S8 $\theta=30^\circ$ , $U=2$ m/s e $\alpha=90^\circ$ da frente de ignição com intervalo de tempo de 5s (b) Evolução da temperatura ao longo do tempo para o teste FC_S8 .....	23
Figura 3.18 Velocidade de propagação a variar com a distância D/L na coordenada $x_1$ para as diferentes direções do vento $\alpha$ (S5 - $0^\circ$ , S7 - $180^\circ$ , S8 - $90^\circ$ ).....	24
Figura 4.1 Fotografia do túnel de vento com uma das configurações.....	26
Figura 4.2 Fotografia da plataforma elevatória sobre o leito de combustível.....	28
Figura 4.3 Imagem com o objeto de calibração obtida através do espectro visível da câmara IR.....	28
Figura 4.4 Fotografia da mesa para a realização do $R_0$ com a caruma distribuída e o fio ..	29
Figura 4.5 Fotografia da realização de um ensaio $R_0$ .....	29
Figura 4.6 (a) Mapeamento FC_E01 $\theta=15^\circ$ da frente de ignição com intervalo de tempo de 19s (b) Evolução da temperatura ao longo do tempo para o teste FC_E01 nos diferentes termopares .....	31
Figura 4.7 (a) Mapeamento FC_E02 $\theta=30^\circ$ da frente de ignição com intervalo de tempo de 25s (b) Evolução da temperatura ao longo do tempo para o teste FC_E02 nos diferentes termopares .....	31
Figura 4.8 (a) Mapeamento FC_E03 $\theta=40^\circ$ da frente de ignição com intervalo de tempo de 25s (b) Evolução da temperatura ao longo do tempo para o teste FC_E03 nos diferentes termopares .....	31
Figura 4.9 Variação da velocidade máxima e média de propagação com o ângulo $\theta$ .....	32
Figura 4.10 Evolução da velocidade de propagação com D/L para os diferentes testes com diferentes ângulos $\theta$ (E01 – $15^\circ$ , E02 – $30^\circ$ , E03 – $40^\circ$ ) .....	32
Figura 4.11 Distância adimensional percorrida ao longo do tempo nos diferentes testes com diferentes ângulos $\theta$ (E01 – $15^\circ$ , E02 – $30^\circ$ , E03 – $40^\circ$ ) .....	33
Figura 4.12 (a) Mapeamento FC_E04 $\theta=15^\circ$ e $U=2$ m/s da frente de ignição com intervalo de tempo de 1s (b) Evolução da temperatura ao longo do tempo para o teste FC_E04 nos diferentes termopares .....	34
Figura 4.13 (a) Mapeamento FC_E05 $\theta=30^\circ$ e $U=2$ m/s da frente de ignição com intervalo de tempo de 2s (b) Evolução da temperatura ao longo do tempo para o teste FC_E05 nos diferentes termopares .....	34
Figura 4.14 (a) Mapeamento FC_E06 $\theta=40^\circ$ e $U=2$ m/s da frente de ignição com intervalo de tempo de 3s (b) Evolução da temperatura ao longo do tempo para o teste FC_E06 nos diferentes termopares .....	34
Figura 4.15 Variação da velocidade máxima e média de propagação com o ângulo $\theta$ , sobre influência do vento $U=2$ m/s.....	35

Figura 4.16 Evolução da velocidade de propagação com D/L para os diferentes testes com diferentes ângulos $\theta$ e $U=2\text{m/s}$ (E04 – $15^\circ$ , E05 – $30^\circ$ , E06 – $40^\circ$ ) .....	36
Figura 4.17 Distância adimensional percorrida ao longo do tempo nos diferentes testes com diferentes ângulos $\theta$ e $U=2\text{m/s}$ (E04 – $15^\circ$ , E05 – $30^\circ$ , E06 – $40^\circ$ ).....	36
Figura 4.18 (a) Mapeamento FC_E07 $\theta=30^\circ$ e $U=1\text{m/s}$ da frente de ignição com intervalo de tempo de 3s (b) Evolução da temperatura ao longo do tempo para o teste FC_E07 nos diferentes termopares.....	37
Figura 4.19 (a) Mapeamento FC_E08 $\theta=30^\circ$ e $U=3\text{m/s}$ da frente de ignição com intervalo de tempo de 1.5s (b) Evolução da temperatura ao longo do tempo para o teste FC_E08 nos diferentes termopares.....	37
Figura 4.20 Variação da velocidade máxima e média de propagação para as diferentes velocidades do vento $U$ .....	38
Figura 4.21 Evolução da velocidade de propagação com o tempo para as diferentes velocidades do vento $U$ e $\theta=30^\circ$ (E02 – $0\text{m/s}$ , E07 – $1\text{m/s}$ , E05 – $2\text{m/s}$ , E08 – $3\text{m/s}$ ).....	38
Figura 4.22 Distância adimensional percorrida ao longo do tempo nos diferentes testes com diferentes velocidades do vento $U$ e $\theta=30^\circ$ (E02 – $0\text{m/s}$ , E07 – $1\text{m/s}$ , E05 – $2\text{m/s}$ , E08 – $3\text{m/s}$ ) .....	39
Figura 4.23 Fotografia do ensaio FC_E08 demonstrando fenómenos de vorticidade .....	39
Figura 4.24 (a) Mapeamento FC_E09 $\theta=30^\circ$ , $U=2\text{ m/s}$ e $\alpha=180^\circ$ da frente de ignição com intervalo de tempo de 25s (b) Evolução da temperatura ao longo do tempo para o teste FC_E09 nos diferentes termopares .....	40
Figura 4.25 (a) Mapeamento FC_E10 $\theta=30^\circ$ , $U=2\text{ m/s}$ e $\alpha=90^\circ$ da frente de ignição com intervalo de tempo de 1.5s (b) Evolução da temperatura ao longo do tempo para o teste FC_E10 nos diferentes termopares .....	40
Figura 4.26 Fotografias ensaio FC_09 (a) Vista de lado (b) Vista de topo.....	41
Figura 4.27 Evolução da velocidade de propagação com o tempo para as diferentes direções do vento $\alpha$ e $\theta=30^\circ$ (E09 – oposta , E05 – igual, E10 –perpendicular , E02 – sem vento).....	41
Figura 4.28 Distância adimensional percorrida para as diferentes direções do vento $\alpha$ e $\theta=30^\circ$ (E09 – oposta , E05 – igual, E10 –perpendicular) .....	42
Figura 5.1 Mapeamento da frente de ignição, $\theta=30^\circ$ (esq) FC_S1, intervalo de tempo 5s (dir) FC_E01 intervalo de tempo 25s .....	44
Figura 5.2 Mapeamento da frente de ignição, $\theta=30^\circ$ e $U=2\text{m/s}$ (esq)FC_S5, intervalo de tempo 3s (dir) FC_E05, intervalo de tempo 2s .....	44
Figura 5.3 Mapeamento da frente de ignição, $\theta=30^\circ$ , $U=2\text{m/s}$ e $\alpha=180^\circ$ (esq)FC_S7, intervalo de tempo 5s (dir) FC_E09, intervalo de tempo 25s .....	44
Figura 5.4 Mapeamento da frente de ignição, $\theta=30^\circ$ , $U=2\text{m/s}$ e $\alpha=90^\circ$ (esq)FC_S8, intervalo de tempo 5s (dir) FC_E10, intervalo de tempo 1,5s .....	45



## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 3.1 Dimensões do domínio em metros .....	10
Tabela 3.2 Referências e parâmetros das simulações realizadas .....	15
Tabela 4.1 Referências e parâmetros dos ensaios laboratoriais realizados .....	25
Tabela 4.2 Velocidades máximas de propagação para as diferentes direções do vento $\alpha$ ..	41



---

## SIMBOLOGIA E SIGLAS

### Simbologia

$\alpha$  – Ângulo entre o eixo do V e U

$\varepsilon$  – Emissividade

$\sigma$  – Constante de Stefan-Boltzmann

$\theta$  – Ângulo entre as duas frentes de fogo

$D$  – Distância percorrida pelo fogo

$D'$  – Distância percorrida pelo fogo adimensional

$D_0$  – Distância básica

$h$  – Coeficiente de convecção

$L$  – Comprimento total do V

$q_c''$  – Fluxo de calor por convecção

$q_r''$  – Fluxo de calor por radiação

$R$  – Velocidade de propagação

$R'$  – Velocidade de propagação adimensional

$R_0$  – Velocidade básica de propagação

$t$  – Tempo

$t_0$  – Unidade básica de tempo

$U$  – Velocidade do vento

$U_x$  – Velocidade do escoamento segundo x

$U_y$  – Velocidade do escoamento segundo y

$U_z$  – Velocidade do escoamento segundo z

$x$  – Coordenada em relação ao eixo  $O_x$

$y$  – Coordenada em relação ao eixo  $O_y$

$z$  – Coordenada em relação ao eixo  $O_z$

## **Siglas**

CFD – *Computational Fluid Dynamics*

DEM – Departamento de Engenharia Mecânica

FCTUC – Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra

FDS – *Fire Dynamics Simulator*

IR – *Infrared Spectrum*

LEIF – Laboratório de Estudos sobre Incêndios Florestais

LES – *Large-Eddy Simulation*

MPI – *Message Passing Interface*

NIST – *National Institute of Standards and Technology*

ROS – *Rate of Spread*

SMV – *Smoke View*

# 1. INTRODUÇÃO

Neste capítulo será abordada a motivação que levou à realização deste trabalho, bem como algumas noções básicas sobre o tema e respetivas conclusões obtidas em trabalhos anteriores, para melhor enquadramento do estudo que ora se apresenta.

## 1.1. Motivação

A presente dissertação tem como principal motivação a continuação do estudo que se tem vindo a realizar pela Universidade de Coimbra no âmbito do comportamento extremo do fogo.

Portugal, tem sido nas últimas décadas, e em particular no ano de 2017 afetado por incêndios florestais. Estes trouxeram enormes perdas a nível da nossa floresta, habitações, empresas, e com uma maior relevância, vidas humanas. O propósito deste documento será contribuir para o estudo deste tipo de comportamento extremo do fogo conhecido como frentes convergentes. Este tipo de comportamento, quando combinado com fatores atmosféricos, como é o caso do vento, traz uma maior complexidade e dificuldade de previsão. Assim, pretende-se que ao conhecer melhor o comportamento do fogo, num futuro, se possa prever de uma maneira mais eficaz e evitar as perdas acima mencionadas.

Alguns estudos neste âmbito científico, nomeadamente a nível experimental, já foram produzidos no passado. No entanto, no trabalho experimental, existem muitas quantidades que não são passíveis de ser medidas, assim como muitos comportamentos a nível interno do fogo que dificilmente poderão ser totalmente cognoscíveis. Por tal, esta dissertação pretende complementar os trabalhos anteriores com as simulações numéricas e também a relevância do vento para este objeto de estudo.

As simulações numéricas são essenciais neste estudo, na medida que possibilitam visualizar e aferir os fenómenos intrínsecos ao desenvolvimento e propagação do fogo. A metodologia para este trabalho irá assentar em dois pilares fundamentais: simulações numéricas e ensaios experimentais. As simulações numéricas irão possibilitar a criação de modelos físicos para este comportamento do fogo ao mesmo que permitirão perceber os

fenómenos que ocorrem na sua propagação e por fim, estudar casos de muito grande escala, o que não seria possível fazer através de apenas ensaios experimentais.

Os ensaios experimentais vão ter essencialmente a função de validar as simulações numéricas, sendo que será necessário comparar os valores obtidos por estas duas metodologias.

No decorrer deste documento serão definidas as frentes convergentes, descritas as condições de simulação e de ensaio. Por fim, serão apresentados os resultados e as suas conclusões.

## 1.2. Estado da Arte

O tipo de comportamento do fogo que irá ser tratado neste trabalho, é considerado um comportamento extremo. Pelo que é necessário explicitar o significado de comportamento extremo do fogo. Este pode ser definido pela existência de mudanças significativas na velocidade de propagação e/ou intensidade do fogo, que irão tornar o seu controlo e previsão praticamente impossíveis face ao conhecimento existente atualmente (Viegas, 2012).

As frentes convergentes podem ser entendidas como duas frentes de fogo lineares, que se intersectam num ponto e formam um pequeno ângulo entre si. Foi mostrado por Raposo *et al* (2009) que neste ponto, os fenómenos de transferência de calor (convecção e radiação) aumentam significativamente devido à elevada concentração de energia que existe no ponto de intersecção. Este comportamento irá levar a um aumento muito rápido e repentino da velocidade de propagação do fogo. Esta velocidade atingirá um máximo, sendo que a partir desse ponto, essa voltará a decrescer (Raposo *et al*, 2009). Outros parâmetros também se irão alterar, tais como o comprimento das chamas e a taxa de libertação de calor (Maynard, Princevac, & Weise, 2016).

Para o estudo das frentes convergentes foi criado um modelo por Raposo (2016) que apresenta uma aceleração acentuada na fase inicial até atingir a velocidade máxima, podendo ser modelada através de outro tipo de comportamento como é o do fogo eruptivo. As frentes de fogo na fase inicial do seu desenvolvimento comportam-se de uma maneira muito semelhante a este tipo de fogo.

O rápido avanço do fogo no ponto de intersecção entre as duas frentes tem como consequência, na situação limite, a formação de uma linha reta que une as duas frentes. Esta alteração de geometria resulta da existência de um fluxo na direção contrária ao desenvolvimento, que faz com que haja uma desaceleração no avanço do fogo.

Ao longo do tempo, as perdas por fluxo convectivo vão se tornando menos relevantes, sendo o fogo posteriormente governado por processos radiativos. Estes processos vão diminuindo também com o decorrer do tempo, o que resulta na diminuição da velocidade de propagação.

Em trabalhos anteriores (Raposo, 2016), foram realizados e/ou analisados testes em pequena/média escala (laboratório), em grande escala (no campo), e em muito grande escala (acontecimentos reais). Nestes estudos foram utilizadas três ferramentas para medir a nível experimental (laboratório e campo) a velocidade de propagação, a temperatura, e a pressão. Para aferir a velocidade de propagação fez-se uso de câmaras de infravermelhos; para a temperatura utilizaram-se a termopares; e para a pressão usaram-se tubos de Pitot. Quando foram realizados os referidos testes, as condições eram ideais, isto é, as duas ignições eram feitas exatamente ao mesmo tempo, com um ângulo pré-definido, com um combustível bem caracterizado e com condições ambientais permanentes.

Como conclusões destes trabalhos acerca deste tema (Raposo, 2016; Viegas *et al.*, 2013), pode-se evidenciar:

- A geometria da frente do fogo pode influenciar a velocidade de propagação;
- A velocidade de avanço do fogo aumenta com o declive;
- O combustível presente não influencia de maneira significativa o padrão do fogo;
- À medida que se aumenta o ângulo entre as duas frentes, o desenvolvimento do fogo será mais lento. Os valores máximos de velocidade de propagação foram obtidos quando experimentados ângulos menores;
- Não existem diferenças relevantes entre os resultados obtidos por ensaios laboratoriais e ensaios de campo. Assim, deste modo poder-se-ão utilizar ensaios laboratoriais para conceção de modelos, que serão válidos para todas as escalas.
- A rápida aceleração inicial é uma consequência dos fluxos convectivos gerados pela própria frente de fogo e pela configuração das duas frentes que convergem num determinado ângulo.

A influência do vento, apesar de ser um fator essencial na forma como o fogo se desenvolve não foi tida em consideração nos estudos de Raposo (2016). Assim, é essencial fazer variar este fator nas diferentes direções e espetros de velocidade, para melhor compreender e estimar a sua influência. Esse estudo será realizado no presente trabalho.

## 2. FRENTES CONVERGENTES

Este capítulo tem como objetivo aprofundar alguns conceitos que foram abordados no estado da arte, nomeadamente o conceito de frentes convergentes.

### 2.1. Definição

Como já foi referido de uma forma breve na introdução deste trabalho, frentes convergentes podem ser definidas por duas frentes de fogo que se intersectam num ponto e que formam um determinado ângulo entre si  $\theta$ , como representado na Figura 2.1. Quando tal acontece, a velocidade de propagação é muito superior ao que seria esperado. Isto deve-se essencialmente aos processos convectivos, em primeiro lugar, e depois aos processos radiativos (Raposo, Jorge *et al.*, 2014). No ponto de união entre as duas frentes existe uma elevada concentração de energia, que originará os processos acima descritos.

Aquando o cruzamento entre as duas frentes no ponto de convergência, irão decorrer duas fases distintas. Em primeiro lugar ocorrerá um rápido aumento da velocidade de propagação até atingir um máximo, que segundo Raposo (2016), se pode modelar através do fogo eruptivo. Este comportamento (Viegas, 2006), ocorre essencialmente quando existe declive no terreno ou desfiladeiro. É caracterizado principalmente por um aumento súbito da velocidade de propagação do fogo. Em segundo lugar irá ocorrer uma desaceleração do fogo, principalmente devido ao aumento da área da frente, até ocorrer a sua extinção.



Figura 2.1. Fotografia de um ensaio representativo de frentes convergentes

## 2.2. Comportamento Dinâmico do Fogo

O fenómeno das frentes convergentes, tendo em conta as bruscas mudanças de velocidade de propagação são um exemplo muito claro de um comportamento dinâmico do fogo (Thomas, Sharples, & Evans, 2017). O fogo tem um comportamento dinâmico pois está diretamente relacionado com o tempo cronológico e é um produto da interação do fogo com o meio ambiente. As correntes de convecção criadas pelo fogo vão inclusive alterar o ambiente que o rodeia.

No passado defendeu-se a existência de um triângulo do fogo, que englobava os parâmetros que influenciavam o comportamento do fogo: a meteorologia, o combustível, e a topografia. A meteorologia afeta a inflamabilidade e a combustibilidade do leito combustível. A velocidade e direção do vento, bem como a temperatura do ambiente seriam fatores condicionantes para a propagação do fogo. Em particular, a influência do vento será analisada no presente trabalho. A topografia é definida pelo desenho do terreno, isto é, inclinação e concavidade. A combustibilidade do leito prende-se essencialmente com o tipo de material, com a sua altura, com a sua porosidade, humidade, dimensão das partículas, a sua densidade, entre outras características.

Viegas (2006), relativamente ao triângulo do fogo defendeu que também se deveria adicionar outro parâmetro, o tempo. Defendendo assim o quadrado do fogo constituído por: meteorologia, topografia, combustibilidade do leito, e tempo. Quando existe uma ignição no leito, as chamas irão propagar-se com uma velocidade inicial. À medida que ocorre a combustão do leito, esta irá libertar calor e produzir correntes de convecção que terão um sentido ascendente, que resultam nas chamas e na coluna de fumo. Esta corrente vertical tem também como consequência uma corrente horizontal, paralela ao solo, que irá em direção à zona de combustão. Assim, a velocidade de propagação aumenta, e como resultado da chegada de oxigénio à zona da reação, esta irá tornar-se mais intensa, aumentando a altura das chamas e velocidade. A este processo chama-se autoalimentação (Viegas *et al.*, 2011).

A velocidade do vento  $U$  também é sem dúvida um dos parâmetros com mais potencial para alterar a propagação do vento, nomeadamente a velocidade de propagação do fogo. Um dos fenómenos descritos por Viegas (2005), é o feedback positivo. Assim, o vento ao transportar oxigénio para a zona da reação, irá também induzir fluxo convectivo. Este

fenômeno intensifica o processo de combustão e, como consequência, o comprimento das chamas e a velocidade de propagação do fogo.

A direção do vento  $\alpha$  também tem influência na sua propagação. Quando a direção do vento é a mesma da propagação, existe um aumento significativo da velocidade desta última. No entanto, quando a direção do vento é contrária à da propagação, a velocidade mantém-se praticamente constante (Viegas, 2006) Estes últimos aspetos serão estudados com mais pormenor no presente trabalho.

A Figura 2.2 representa um esquema com os parâmetros que irão variar neste trabalho: ângulo entre as duas frentes  $\theta$ , velocidade do vento  $U$  e direção do vento (ângulo entre  $\alpha$  e  $U$ ). A direção  $x_1$  diz respeito à linha central do V.

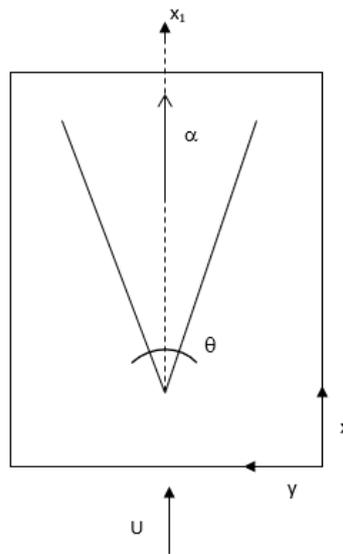


Figura 2.2 Esquema demonstrativo do problema em estudo

### 2.3. Parâmetros que Influenciam a Propagação do Fogo

Existem inúmeros parâmetros que influenciam o comportamento do fogo, sendo que para este caso em particular, os mais importantes são o ângulo inicial entre as duas frentes, o declive da colina, e o tipo de combustível (Raposo, 2016).

Este estudo irá fazer variar os ângulos ( $15^\circ$ ,  $30^\circ$  e  $40^\circ$ ), dado o impacto que esta variação tem no comportamento deste tipo de fogos.

O tipo de combustível devido às características intrínsecas que possui, tanto da perspectiva macroscópica (composição do leito, altura, carga de combustível, porosidade) como da microscópica (composição química, estado vegetativo, dimensão característica), é um fator determinante nos incêndios florestais. A humidade presente no combustível

contribui em grande parte para esse resultado, sendo assim uma das quantidades aferidas durante os testes, como irá ser demonstrado mais à frente. O teor de humidade pode afetar a inflamabilidade, a combustibilidade, a intensidade da propagação, e a ocorrência de focos secundários (Viegas, 2006). Apesar disso, no presente estudo, devido às limitações de tempo, iremos apenas considerar um tipo de combustível, agulhas de pinheiro.

O declive representa um fator relevante na medida em que as chamas do fogo ao subirem uma encosta irão fazer um ângulo relativamente pequeno com o solo, e assim aumentar a sua velocidade. Porém, quando um fogo desce uma encosta, as chamas inclinam-se para a região que já foi queimada. Neste caso, a velocidade pode ser comparada com a velocidade básica de propagação (Viegas, 2006).

O que acontece na realidade é uma combinação de todos estes fatores, o que torna o seu estudo e previsão num trabalho complexo e moroso.

## 2.4. Modos de Transferência de Calor em Incêndios

Os processos de transmissão de calor são a base da propagação do fogo. Existem três tipos de transmissão de calor: condução, convecção e radiação. Apesar de existir transferência de calor por condução na madeira, esta tem valores desprezáveis, e, portanto, raramente é tomada em consideração. A convecção, como já foi referido, tem um papel determinante na propagação, sendo principalmente relevante quando a direção de propagação é a mesma dos fluxos convectivos, por consequência do declive e do ângulo formado entre o fluxo e o terreno. Por fim, a radiação, devido às altas temperaturas presentes no fogo, também é um processo de grande relevância.

A convecção representa fluidos em movimento, e pode ser traduzida pela Lei de Newton,  $q_c'' = h(T_2 - T_1)$ . Sendo  $h$ , o coeficiente de convecção.

A radiação é representada pela Lei de Stefan-Boltzmann,  $q_r'' = \varepsilon\sigma T^4$ . Em que  $\varepsilon$  representa a emissividade do material e  $\sigma$  a constante de Stefan-Boltzmann. Pela equação consegue-se aferir as elevadas taxas de radiação que ocorrerão, pois, o fluxo de calor é proporcional à quarta potência da temperatura absoluta (Incropera, Bergman, Lavine & DeWitt, 2011)

---

### 3. METODOLOGIA - SIMULAÇÕES NUMÉRICAS

O objetivo deste capítulo prende-se com a explicitação do software utilizado bem como uma descrição pormenorizada dos parâmetros que é necessário introduzir no programa e que pretendem caracterizar a situação a estudar.

As simulações numéricas no âmbito desta tese foram realizadas através do software *Fire Dynamics Simulator* (FDS) (Mcgrattan & Mcdermott, 2016) e também através do *Smokeview* (SMV)(Forney, 2010), que serão expostos de seguida.

Por fim, serão apresentadas as simulações realizadas no âmbito deste estudo e os seus resultados.

#### 3.1. Fire Dynamics Simulator (FDS)

O software designado por *Computational Fluid Dynamics* (CFD) foi desenvolvido através de uma colaboração do *National Institute of Standards and Technology* (NIST) sediado nos Estados Unidos, e do *VTT Technical Research Centre of Finland*.

O fogo é tratado como um processo com três dimensões e que evolui com o tempo. O programa FDS resolve numericamente o modelo matemático *Large-Eddy Simulation* (LES), este soluciona as equações de Navier-Stokes para baixas velocidades ( $Ma < 0.3$ ) e para condições de turbulência. Este software permite demonstrar os fenómenos de fumo e de transferência de calor e massa.

O modelo utilizado para a combustão considera um único passo de uma reação química controlada com recurso a três componentes: ar, combustível e produtos.

Este programa pode ser bastante pesado e moroso em termos de cálculo devido à complexidade das equações inerentes ao mesmo, pelo que existe a possibilidade de dividir o domínio computacional em diversas malhas (MPI – *Message Passing Interface*). Cada uma destas malhas está destinada a um processo independente. Os processos estão numerados a partir do número 0 que terá como respetiva malha, o número 1.

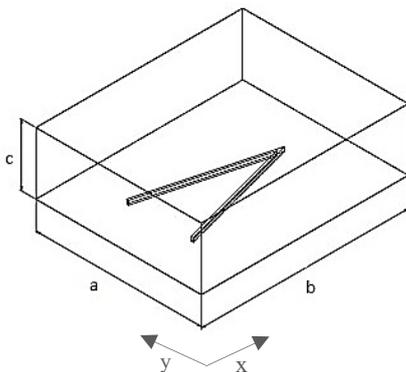
No caso do presente trabalho recorreu-se a um *Cluster* do Laboratório de Computação Avançada da Universidade de Coimbra (Navigator). Este supercomputador possui nodos, e cada nodo possui dois CPUs. Cada CPU corresponde a 12 *cores* possibilitando o cálculo de 12 malhas diferentes.

## 3.2. Configuração da Simulação

As simulações realizadas no FDS são controladas por um ficheiro de texto terminado na extensão *.fds*. Este ficheiro foi editado com recurso apenas a um editor de texto.

### 3.2.1. Domínio

O domínio considerado nas simulações consiste num paralelepípedo com as seguintes medidas representadas na Figura 3.1 e na Tabela 3.1.



	metros
<b>a</b>	8
<b>b</b>	10
<b>c</b>	3

Figura 3.1. Representação do domínio e respetivos eixos      Tabela 3.1 Dimensões do domínio em metros

Este domínio foi baseado nas dimensões do túnel de vento, onde foram realizados os ensaios experimentais. Desta forma, pretendia-se que esta condição fosse semelhante para as duas metodologias.

### 3.2.2. Tempo da Simulação

Em primeiro lugar é necessário definir o tempo da simulação. Este corresponde ao tempo previsto para queimar todo o leito de combustível. A escolha deste tempo tem de ser um compromisso entre o tempo necessário para se verificar o fenómeno anterior e o tempo necessário para que o *Cluster* corra o programa.

Um aumento no tempo de simulação resulta num enorme aumento no tempo necessário para obter resultados, podendo revelar-se incomportável.

O intervalo de tempo inicial envolvido na integração das equações é calculado de forma automática a partir do número de nós da malha, que será explicado a seguir, e da velocidade característica do fluxo, sendo automaticamente ajustado ao longo da simulação-

### 3.2.3. Escolha das Malhas

Um dos processos mais importantes para otimizar o tempo necessário para obter resultados fiáveis no FDS é precisamente a escolha das malhas. O programa cria uma *structred mesh*.

Em primeiro lugar, considerando o domínio existente, divide-se o mesmo em várias partes. Estas divisões são feitas consoante a geometria da frente a estudar em cada simulação e no tempo que é despendido para resolver cada parcela dessas divisões.

Em segundo lugar, é necessário definir o refinamento da malha. O refinamento da malha consiste em avaliar quantas células irão caber numa determinada área. No caso do presente estudo, foi avaliado o número de células por metro. Quanto mais volumes de controlo, isto é, células, melhores serão os resultados, pois se aproximarão mais do domínio real. Para este trabalho foram adotadas células com 2,5cm, ou seja 40 por metro.

Após definidos estes dois parâmetros, será preciso dividir o domínio em vários pequenos domínios para que estes corram individualmente, acelerando assim muito o processo. Este processo, denominado MPI, é um processo de computação paralela. Assim, cada malha será designada para cada um dos processadores do *Cluster*. Idealmente, as áreas que contêm mais complexidade serão mais pequenas, para que contenham um número menor de células, e assim equilibrar o tempo que demoram a correr com outras de menor complexidade. Através deste método, cada malha será trabalhada num *core*. Na realização deste trabalho foram consideradas, por simulação, à volta de 180 malhas, ou seja, 180 *cores*.

### 3.2.4. Material Combustível / Camada de Combustível

O combustível utilizado no presente trabalho consiste em agulhas mortas de pinheiro (caruma) provenientes da espécie *Pinus Pinaster*, muito comum em Portugal. É necessário conhecer as propriedades deste material. Uma das propriedades mais importantes

em termos de fenômenos de liberação de calor, é o poder calorífico, tendo este um valor de cerca de 20 000 kJ/kg (Santoni, Bartoli, Simeoni, & Torero, 2014).

As partículas no FDS são modeladas como partículas de Lagrange e considerando uma forma cilíndrica. Estas partículas são distribuídas igualmente por todo o domínio. O programa considera os processos de degradação termal, pirólise e a liberação de gases de combustão. No entanto, não considera a redução do volume da partícula após a combustão.

O material em estudo é de uma maneira simplificada, uma mistura entre celulose (principal constituinte da caruma) e uma percentagem de água. Para efeitos de estudo e simplificação foi considerada uma percentagem de 10%, na medida que este valor corresponde a um valor médio dos obtidos em laboratório. É necessário também definir as características geométricas das agulhas de pinheiro. As suas dimensões foram obtidas a partir de um estudo efetuado no LEIF, onde foram utilizadas duas amostras de 100g de caruma. Para cada uma das amostras foram contadas o número de agulhas e retiradas 10 unidades ao acaso. Nessas 10 unidades foram medidos o comprimento, o diâmetro e a massa. De seguida fez-se uma média para cada valor, e posteriormente entre as duas amostras, resultando nas propriedades adotadas para o presente estudo. Assim, considerou-se um comprimento médio de 12 cm e um diâmetro de 0.16 cm.

A densidade das agulhas de *Pinus Pinaster* é de 511 kg/m<sup>3</sup> (Santoni et al., 2014) e considera-se que a reação ocorre apenas num passo. A temperatura a que as agulhas iniciam a liberação de gases que serão comburidos, é de 200°C (Font *et al.*, 2009). A temperatura considerada para a ignição é de 400°C (Chandler *et al.*, 1983).

### 3.2.5. Ignição

Tendo em conta que o objeto de estudo consiste em duas frentes de fogo que se irão unir num ponto, é fácil verificar que a ignição terá de ser constituída por duas linhas que corresponderão a essas duas frentes. Em termos de geometria, tal será semelhante à Figura 3.2, dependendo do ângulo entre as duas frentes, e do seu comprimento.

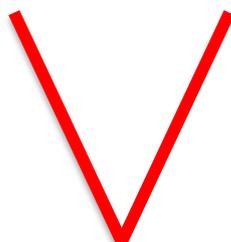


Figura 3.2 Representação esquemática dos pontos de ignição

Como já foi visto anteriormente, o domínio é constituído por múltiplos volumes de controlo, a que foi dado o nome de células. Assim, estas linhas que corresponderão às frentes de fogo também serão constituídas por células sucessivas. Para este efeito é importante definir quais as dimensões pretendidas para a ignição e a quantidade de calor que iremos introduzir nessa célula. Terá de ser suficiente para que o material escolhido, as agulhas de pinheiro, entrem em combustão. A acrescentar a estes parâmetros, também é necessário definir o tempo em que se vai aplicar o calor às áreas escolhidas. Este terá também de ser suficiente para que a propagação se inicie. Apesar de já existirem alguns trabalhos que nos permitam ter uma noção destas quantidades, os valores foram apurados por tentativa e erro. A geometria da ignição, em particular as coordenadas que indicam as células constituintes das linhas, foram determinadas através de um programa desenvolvido no Matlab.

### 3.2.6. Condições de Fronteira

As condições de fronteira são determinantes para este tipo de questões. Queremos que estas se aproximem o mais possível das condições reais. O programa assume, por defeito, que as condições de fronteira são sólidos mantidos à temperatura ambiente. Assim, são definidas as “paredes” do domínio como abertas, ou seja, permitem trocas com o exterior. Nas simulações em que se considera determinada velocidade do vento, uma das condições de fronteira permitirá a entrada do mesmo no domínio.

### 3.2.7. Dispositivos de Controlo

No *input file* também são colocados dispositivos. Estes dispositivos têm como principal função monitorizar algumas quantidades como a temperatura, as velocidades de escoamento ( $U_x$ ,  $U_y$ ,  $U_z$  e  $|U|$ ), a taxa de transferência de calor, e a pressão.

Foram feitos dois tipos de simulações, fazendo variar o número de dispositivos e as quantidades a aferir. Em primeiro lugar, com vista a fazer o mapeamento da propagação do fogo, foi criada uma rede de dispositivos muito próximos uns dos outros (2cm), para aumentar a precisão da representação do mapeamento. Através do mapeamento, é possível de uma maneira grosseira visualizar se os resultados são os esperados ou não. Para além disso, podemos ter uma noção da velocidade de propagação. Este mapeamento baseia-se na temperatura na qual as agulhas de pinheiro começam a arder (400°C), sabendo que nesse

momento o conjunto de dispositivos que apresentarem temperaturas superiores serão as coordenadas que representam a frente do fogo, para um determinado intervalo de tempo definido pelo utilizador.

Em segundo lugar, foram colocados dispositivos que correspondem aos presentes nos ensaios experimentais. Neste caso, serão cinco, que irão aferir as velocidades do escoamento ( $U_x$ ,  $U_y$ ,  $U_z$  e  $|U|$ ), temperatura, taxa de libertação de calor, e pressão. Com estes dados pretende-se comparar os resultados das simulações com os dos ensaios experimentais. Desta maneira, como já foi referido anteriormente, tem-se como objetivo validar os resultados das simulações numéricas. Estes dispositivos, representados na Figura 3.3, estarão segundo a direção  $x_1$  e espaçados 1 metro.

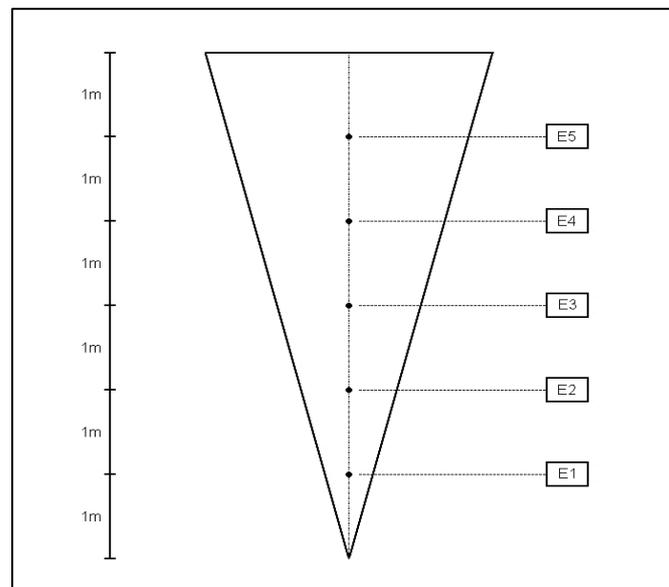


Figura 3.3 Disposição dos dispositivos nas coordenadas equivalentes aos ensaios experimentais

### 3.3. Simulações Realizadas

No decorrer deste trabalho foram realizadas oito simulações. Nestas pretendeu-se estudar essencialmente a influência da velocidade do vento e da sua direção, como se poderá verificar na seguinte Tabela 3.2:

Teste (Ref.)	$\theta$ (°)	U (m/s)	$\alpha$ (°)
FC_S1	15	0	-
FC_S2	30	0	-
FC_S3	40	0	-
FC_S4	30	1	0
FC_S5	30	2	0
FC_S6	30	3	0
FC_S7	30	2	180
FC_S8	30	2	90

Tabela 3.2 Referências e parâmetros das simulações realizadas

Atendendo ao tipo de fogo que se pretende estudar e o domínio, a Figura 3.4 representa a configuração adotada.

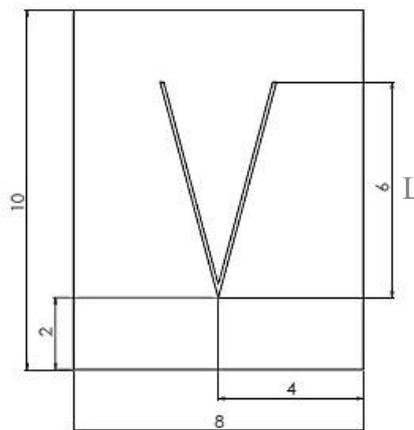


Figura 3.4 Posição do V no domínio e suas dimensões

Estas simulações foram todas replicadas em testes no laboratório, com o objetivo anteriormente descrito. Foram verificadas algumas semelhanças e diferenças entre estas duas metodologias, que serão discutidas mais à frente.

### 3.4. Resultados e Discussão

Através das simulações numéricas foram produzidos diversos tipos de resultados que serão alvo de análise: mapeamento, velocidade de propagação, velocidade de escoamento segundo a direção  $Ox$  (direção da propagação), e temperatura.

O mapeamento produzido por um programa Matlab resulta numa imagem com diversas cores que demonstra o avanço do fogo num determinado intervalo de tempo. Este mapeamento é um resultado dos dispositivos medidores da temperatura, como abordado anteriormente. A temperatura de referência considerada para o mapeamento é de 400°C.

A velocidade média de propagação também foi obtida através de um programa Matlab que analisava o tempo que demorava os dispositivos situados em linha reta no meio do V a atingir a temperatura de referência (400°C). A partir desses valores de tempo e conhecidas as distâncias, calculou-se uma média da velocidade de propagação.

A velocidade de escoamento  $U_x$ , o módulo da velocidade do escoamento e a temperatura são outputs do próprio *Fire Dynamics Simulator*.

### 3.4.1. Variação do Ângulo $\theta$

Foram realizadas três simulações para os ângulos  $\theta$  de 15°, 30° e 40°. Estas simulações não consideraram o vento.

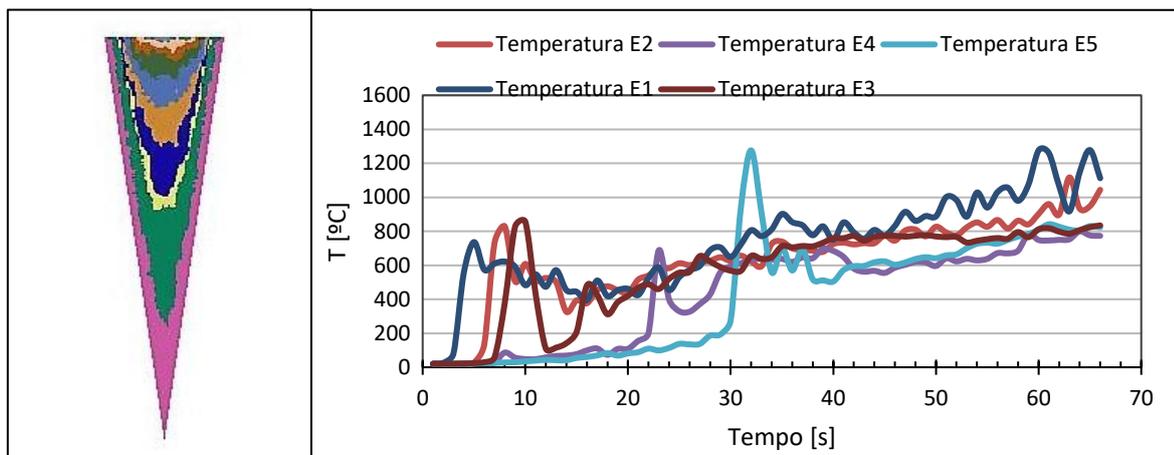


Figura 3.5. (a) Mapeamento FC\_S1  $\theta=15^\circ$  da frente de ignição com intervalo de tempo de 5s (b) Evolução da temperatura ao longo do tempo para o teste FC\_S1

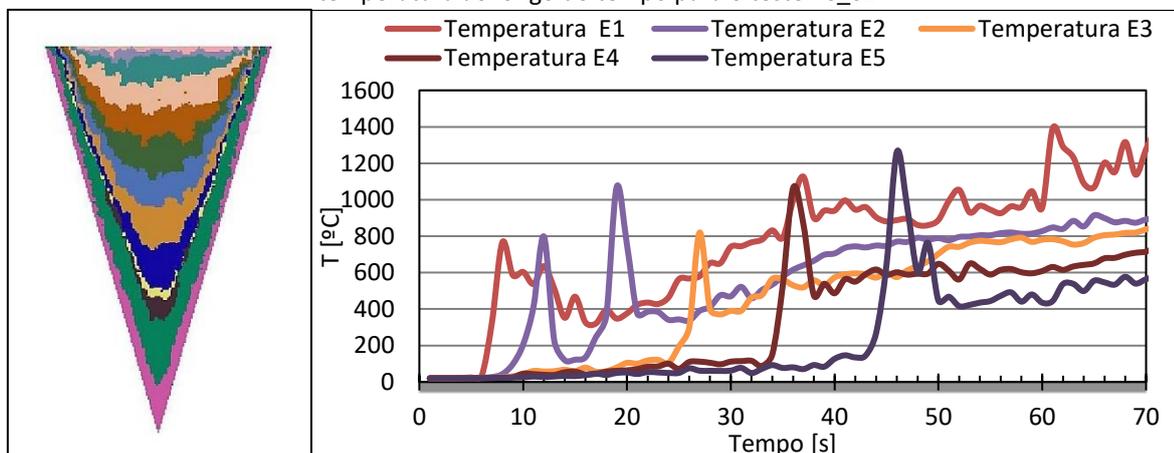


Figura 3.6 . (a) Mapeamento FC\_S2  $\theta=30^\circ$  da frente de ignição com intervalo de tempo de 5s (b) Evolução da temperatura ao longo do tempo para o teste FC\_S2

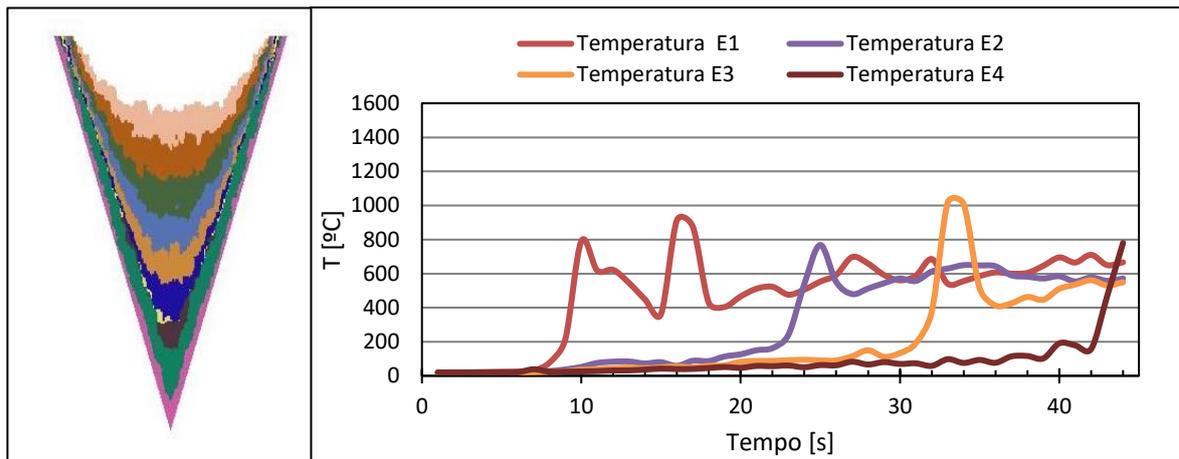


Figura 3.7 . (a) Mapeamento FC\_S3  $\theta=40^\circ$  da frente de ignição com intervalo de tempo de 5s (b) Evolução da temperatura ao longo do tempo para o teste FC\_S3

Observando os mapeamentos realizados para os três ângulos, sabendo que estes têm o mesmo intervalo de tempo (5s), conclui-se, como era esperado, que um aumento do ângulo leva a uma velocidade de propagação do fogo mais baixa.

Nos gráficos de temperatura *versus* tempo, pôde-se constatar que os picos correspondem à passagem do fogo por cada sensor. No teste FC\_S1, como se pode notar na Figura 3.5 o fogo atinge os três primeiros sensores nos primeiros 10 segundos. Assim, é possível aferir que a velocidade inicial para este caso é de facto mais elevada.

No teste FC\_S3, a propagação não atingiu todo o leito de combustível e como consequência não cruzou o sensor E5. Isto deveu-se às limitações de tempo e de cálculo neste tipo de complexas simulações. No entanto, crê-se que os quatro primeiros sensores são suficientes para aferir conclusões.

Em todos os testes, verifica-se um aumento ou uma manutenção da temperatura após o pico representativo da chegada do fogo àquela posição. Este acontecimento não é coerente com a realidade, pois o que será visto no capítulo seguinte, é uma descida da temperatura pouco tempo após a passagem do fogo. O erro poderá ser uma consequência de o programa continuar a considerar que ainda há combustível a queimar.

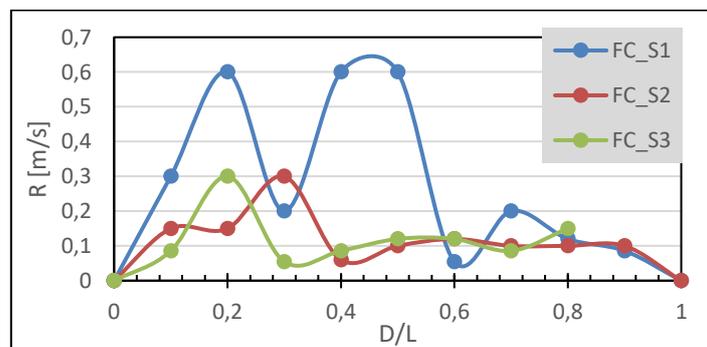


Figura 3.8 Velocidade de propagação a variar com D/L na coordenada  $x_1$  para os diferentes ângulos  $\theta$  ( $L=6m$ )

Analisando a Figura 3.8, verifica-se que a velocidade de propagação para os três ângulos demonstra um comportamento oscilatório, sendo este mais severo para o caso de  $\theta=15^\circ$ . Além disso, confirma-se que para o ângulo menor, a velocidade de propagação é muito superior. Para os testes FC\_S2 e FC\_S3, as diferenças não são muito perceptíveis e o máximo atingido é igual para ambos testes, sendo este atingido mais perto do ponto de convergência no caso dos  $40^\circ$ .

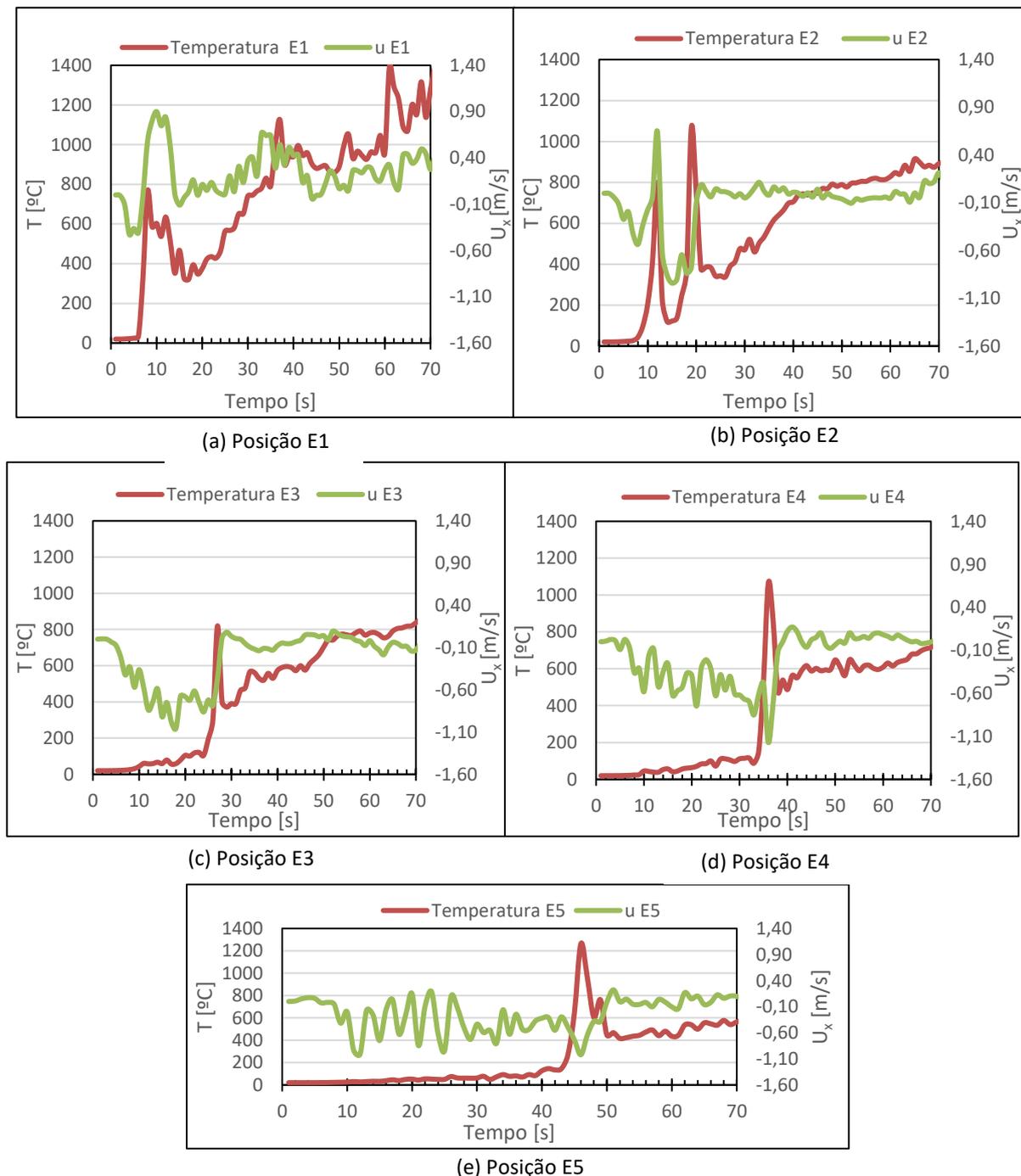
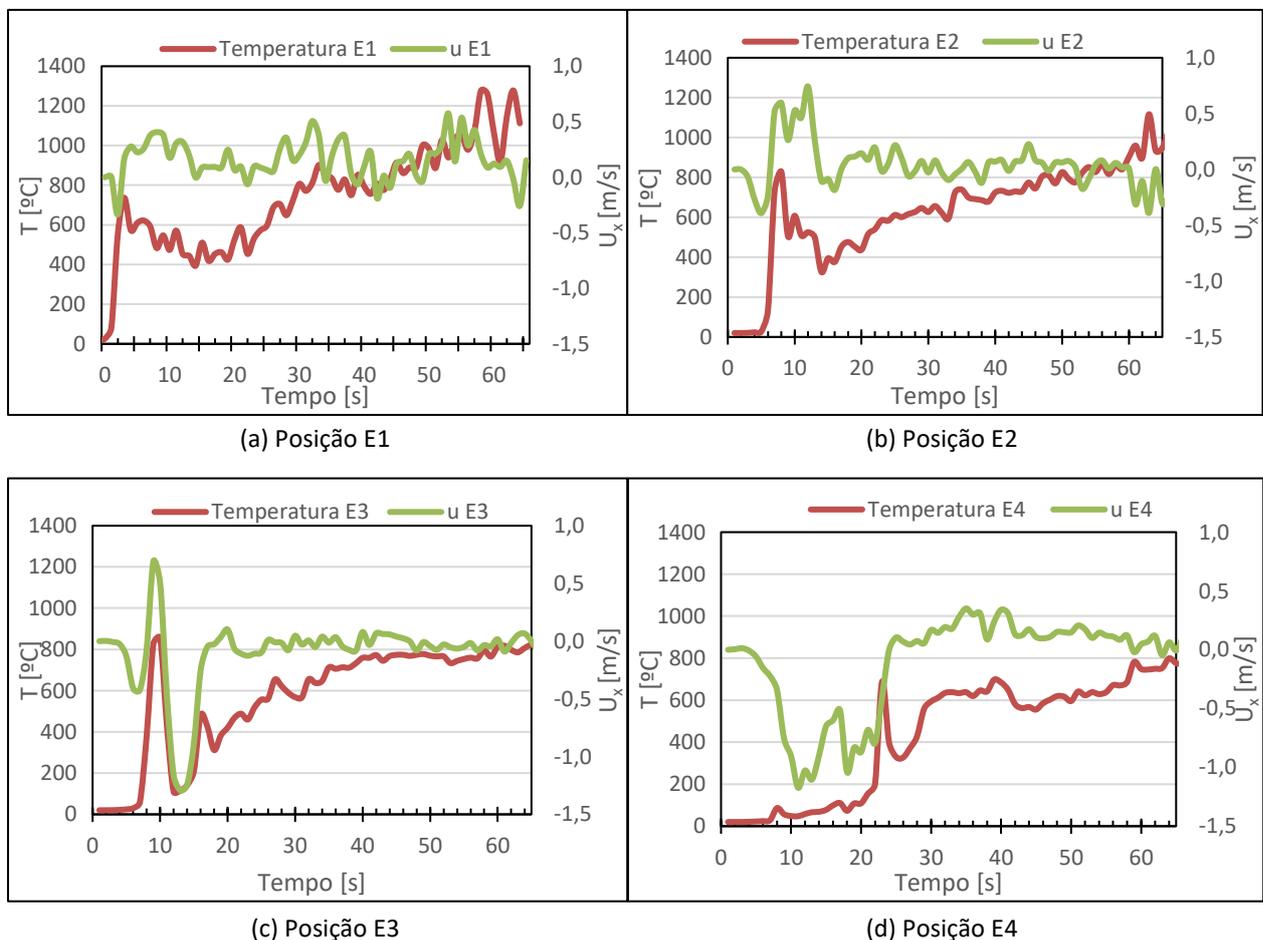


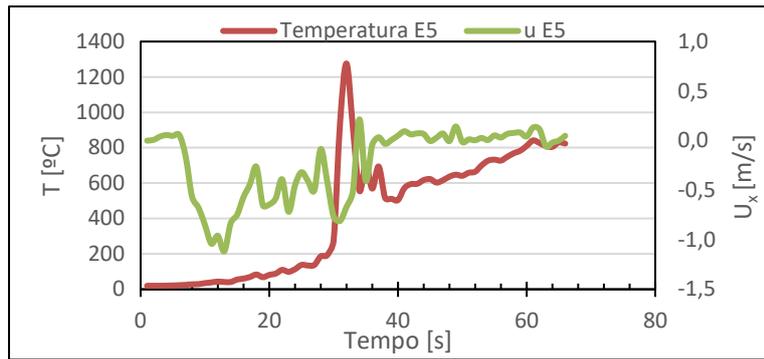
Figura 3.9 Evolução de  $U_x$  e temperatura com o tempo para as diferentes posições para o caso FC\_S2  $\theta=30^\circ$   
 (a) E1 (b) E2 (c) E3 (d) E4 (e) E5

No geral, pode-se considerar que a velocidade segundo a direção  $x_1$  (a mesma direção que a propagação), também designada por  $U_x$ , possui um padrão de comportamento. Tome-se atenção que a temperatura está presente nos gráficos para dar uma noção de quando a frente atinge aquela posição onde se encontra o sensor. Assim, sabendo que este teste foi realizado sem vento, a velocidade de escoamento é apenas influenciada pelo fogo e pelos seus fenómenos intrínsecos, nomeadamente a convecção.

De igual modo, observa-se na Figura 3.9 para o caso FC\_S2 que antes de atingir os sensores E1, E2 e E3,  $U_x$  tem um valor negativo. No momento da passagem da frente por aquela posição, o valor sobe para um positivo, caracterizado inclusive por um pico do mesmo. Verifica-se também que, por exemplo, antes de atingir a posição E3, os valores de  $U_x$  são bastante baixos. Uma explicação para este fenómeno é o facto de o escoamento ser na direção da frente do fogo, ou seja, na direção oposta à da propagação.

Nos sensores E4 e E5 observa-se o contrário, isto é, existe um pico negativo de  $U_x$  no momento da passagem da frente do fogo.

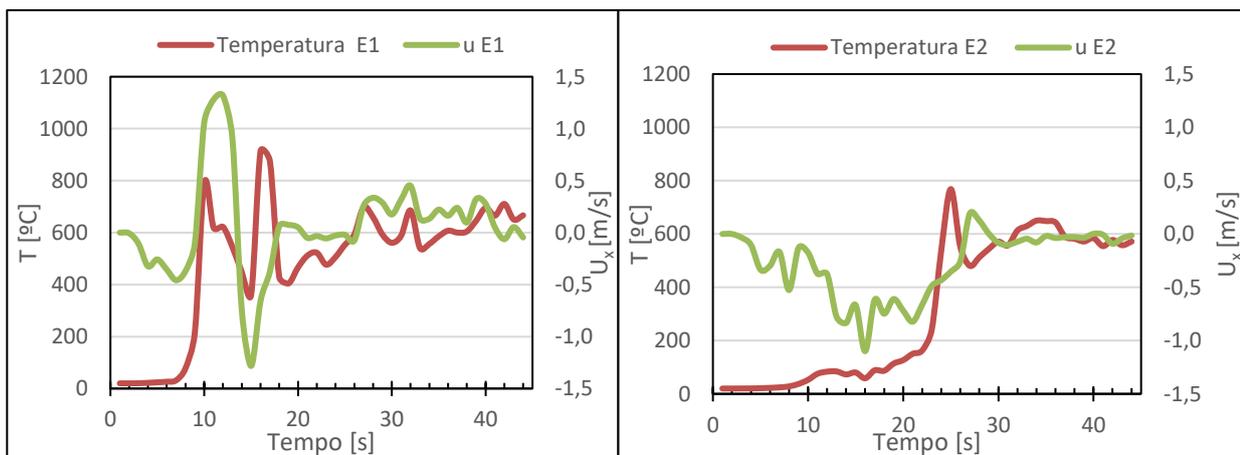




(e) Posição E5

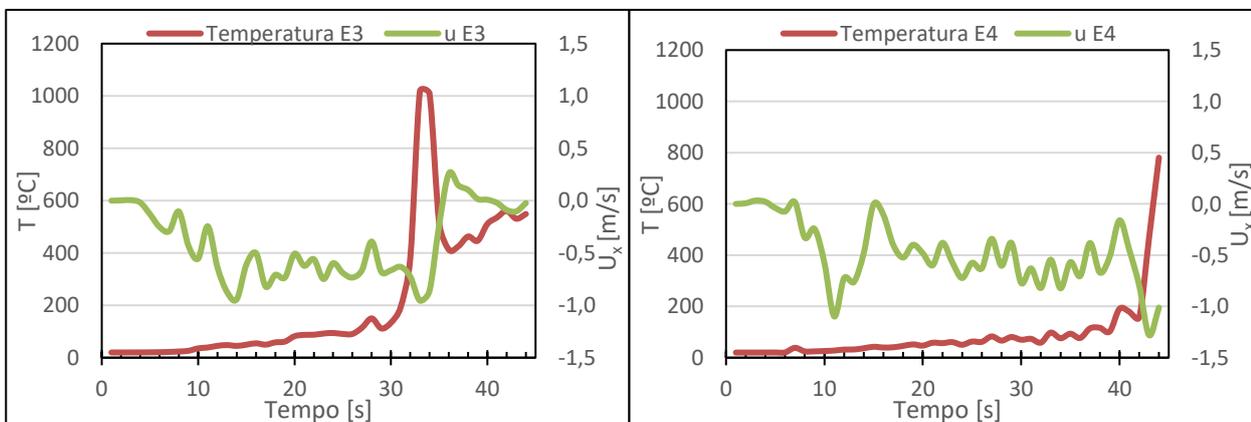
Figura 3.10 Evolução da velocidade de propagação segundo o eixo x e temperatura com o tempo para as diferentes posições para o caso FC\_S1  $\theta=15^\circ$  (a) E1 (b) E2 (c) E3 (d) E4 (e) E5

Ao contrário do que acontecia para o caso FC\_S2, na Figura 3.10 é possível observar que o pico negativo de velocidade na passagem da frente do fogo acontece apenas para a posição E5. Tal como no caso anterior, quando assim é, o pico positivo é atingido uns segundos depois e não simultaneamente como nos primeiros sensores.



(a) Posição E1

(b) Posição E2



(c) Posição E3

(d) Posição E4

Figura 3.11 Evolução de  $U_x$  e da temperatura com o tempo para as diferentes posições para o caso FC\_S3  $\theta=40^\circ$  (a) E1 (b) E2 (c) E3 (d) E4

Observando a Figura 3.11, percebe-se que o pico positivo de  $U_x$  apenas acontece simultaneamente na posição E1. Nas outras posições existe um valor negativo de  $U_x$  na passagem da frente do fogo, sendo mesmo um pico nos sensores E3 e E4.

Assim, de uma maneira geral pode-se assumir que aumentando o ângulo, velocidades negativas de  $U_x$  simultâneas com a passagem do fogo, ocorrem a partir de uma distância menor à origem do V. Os picos negativos explicam a desaceleração do fogo, sendo coerentes com o que foi observado: para maiores ângulos existe uma maior desaceleração.

### 3.4.2. Variação da velocidade do vento U

Foram realizadas três simulações com diferentes velocidades do vento U (1,2 e 3m/s), tomando-se em consideração que vento tem a mesma direção que a propagação ( $\alpha=0^\circ$ ) e  $\theta$  é sempre igual a  $30^\circ$ .

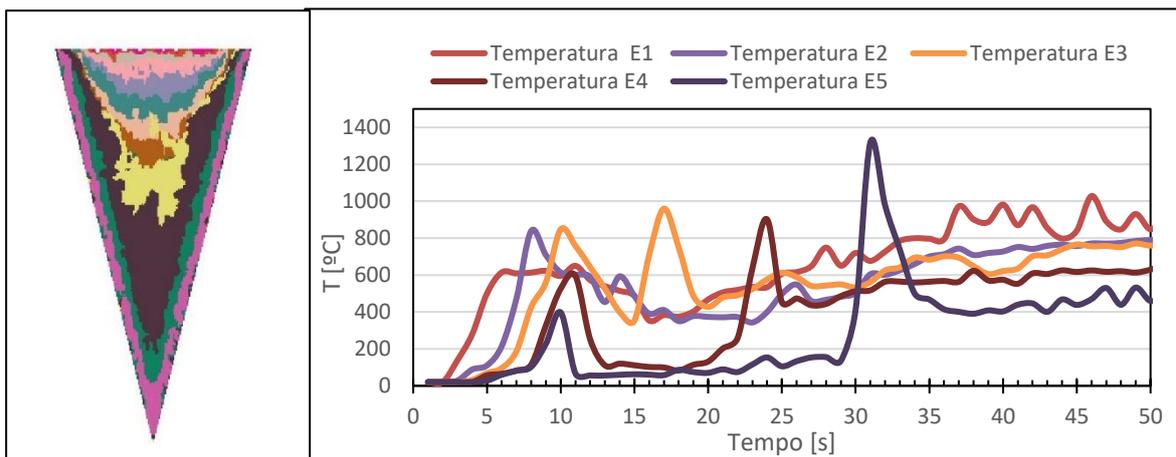


Figura 3.12 (a) Mapeamento FC\_S4  $\theta=30^\circ$  e  $U=1$  m/s da frente de ignição com intervalo de tempo de 3s (b) Evolução da temperatura ao longo do tempo para o teste FC\_S4

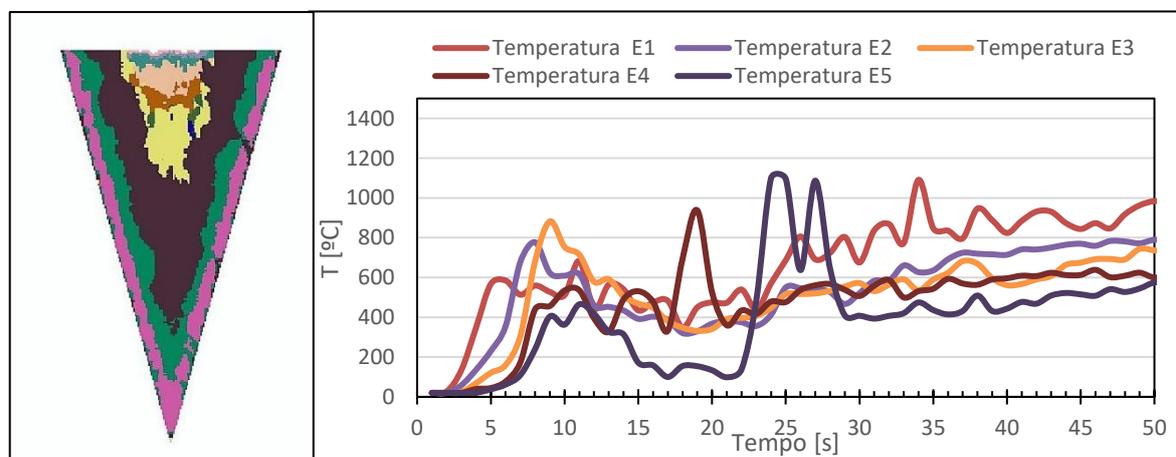


Figura 3.13 (a) Mapeamento FC\_S5  $\theta=30^\circ$  e  $U=2$  m/s da frente de ignição com intervalo de tempo de 3s (b) Evolução da temperatura ao longo do tempo para o teste FC\_S5

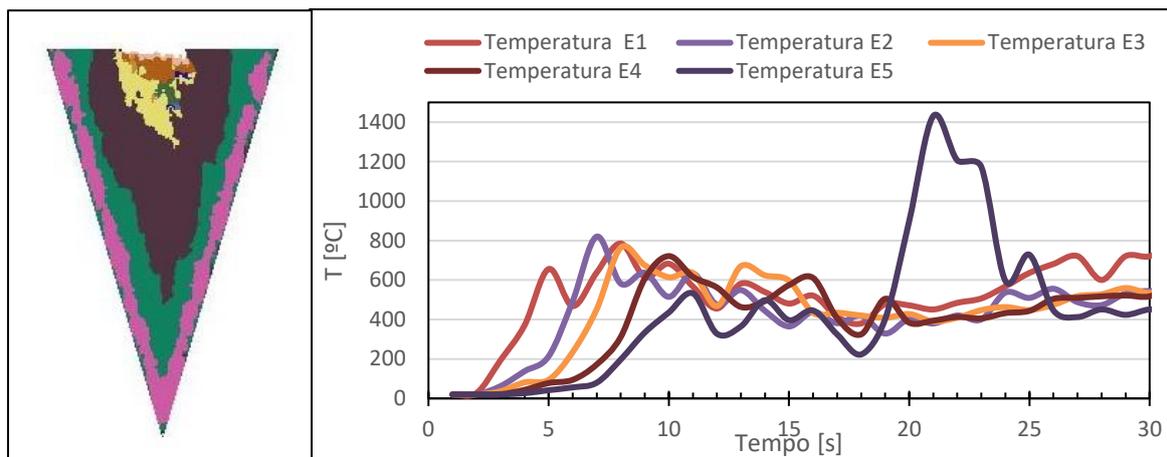


Figura 3.14 (a) Mapeamento FC\_S6  $\theta=30^\circ$  e  $U=3$  m/s da frente de ignição com intervalo de tempo de 3s (b) Evolução da temperatura ao longo do tempo para o teste FC\_S6

Sabendo que todos os mapeamentos expostos nas Figura 3.12, Figura 3.13 e Figura 3.14, e possuem o mesmo intervalo de tempo (3s), observa-se que, à medida que se aumenta a velocidade do vento, a velocidade de propagação também aumenta, como aliás era esperado. Pela necessidade de escolher um intervalo de tempo tão reduzido, percebe-se a rapidez com que estes fogos avançam. Isto deve-se a um fenómeno já explicado anteriormente, o feedback positivo. O vento “alimenta” o fogo, fornecendo-lhe mais oxigénio para a combustão, aumentando assim os processos convectivos, e consequentemente a velocidade de propagação.

Da mesma forma, e em linha com o estudo feito para os diferentes ângulos, nos gráficos representados nas Figura 3.12, Figura 3.13 e Figura 3.14 observam-se os picos de temperatura, que correspondem à passagem da frente do fogo por aquelas coordenadas.

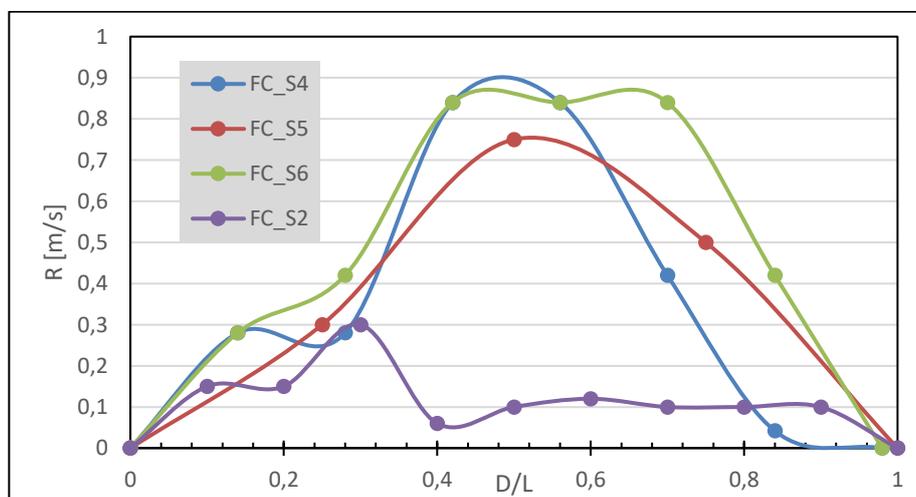


Figura 3.15 Velocidade de propagação a variar com a  $D/L$  na coordenada  $x_1$  para as diferentes velocidades do vento  $U$  (S4 – 1m/s, S5 – 2m/s, S6 – 3m/s)

Examinando a Figura 3.15, verifica-se uma diminuição do comportamento oscilatório, ao comparar com a Figura 3.8. No caso FC\_S4, com  $U=1\text{m/s}$ , observa-se uma pequena aceleração, seguida de uma desaceleração e uma grande aceleração outra vez. No entanto, ao avaliar esta figura, percebemos que os resultados não estão coerentes com o que seria esperado, ou seja, a velocidade máxima de propagação aumentar com o aumento da velocidade do vento. Verifica-se um valor mais baixo para o caso FC\_S5, com  $U=2\text{m/s}$ , o que não é coerente com o esperado e com a observação das Figura 3.12, Figura 3.13 e Figura 3.14. Ainda assim, comparando os três casos (S4, S5 e S6) com o S2, é de realçar a enorme diferença que existe nas velocidades máximas de propagação.

### 3.4.3. Variação da direção do vento $\alpha$

Foram realizadas três simulações para aferir a influência da direção do vento  $\alpha$ . Todas foram realizadas com  $\theta = 30^\circ$  e  $U = 2\text{m/s}$ .

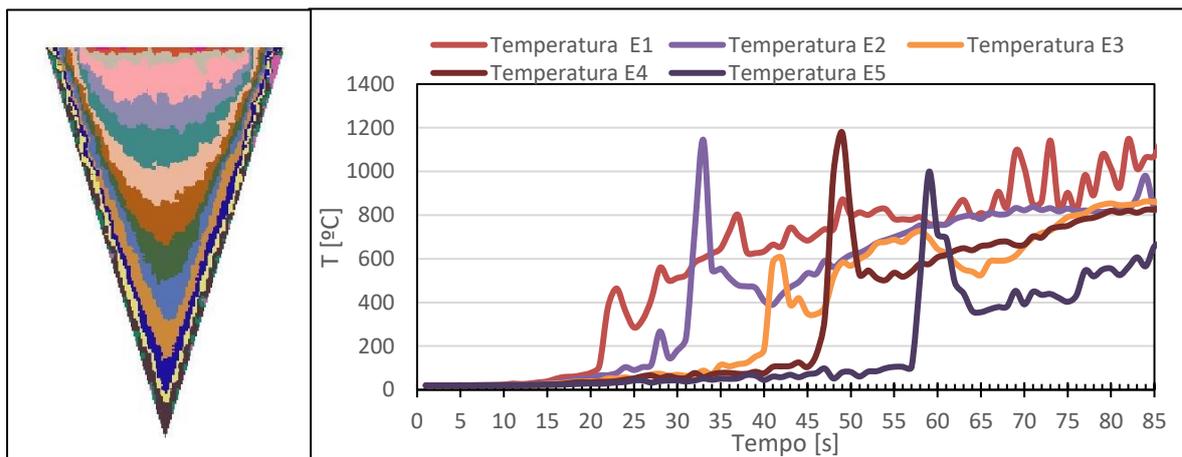


Figura 3.16 (a) Mapeamento FC\_S7  $\theta=30^\circ$ ,  $U=2\text{ m/s}$  e  $\alpha=180^\circ$  da frente de ignição com intervalo de tempo de 5s (b) Evolução da temperatura ao longo do tempo para o teste FC\_S7

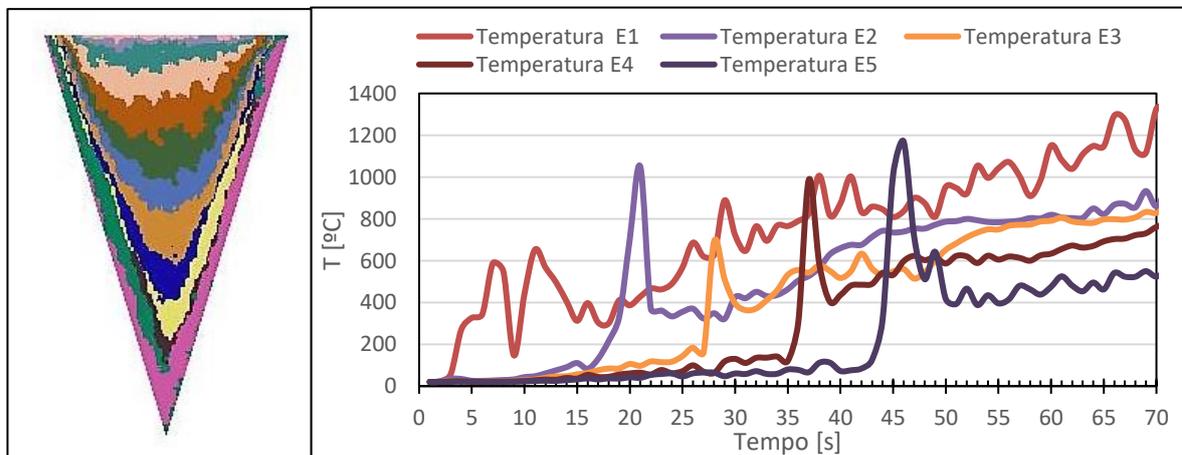


Figura 3.17 (a) Mapeamento FC\_S8  $\theta=30^\circ$ ,  $U=2\text{ m/s}$  e  $\alpha=90^\circ$  da frente de ignição com intervalo de tempo de 5s (b) Evolução da temperatura ao longo do tempo para o teste FC\_S8

Em todos os mapeamentos foi considerado o mesmo intervalo de tempo (5s), o que faz concluir-se que a direção do vento terá uma grande influência no padrão do fogo. Quando a direção do vento é oposta à propagação, como na Figura 3.16, a propagação é feita de uma maneira muito mais lenta. A primeira posição (E1) só é atingida ao fim de perto de 25 segundos.

No caso da direção de propagação perpendicular, o vento tem direção da esquerda para a direita. Nesta situação, ao observar a Figura 3.17, verificamos que não existe simetria, como acontece em todos os casos vistos até agora. Ainda assim, não se pode considerar o desvio muito significativo.

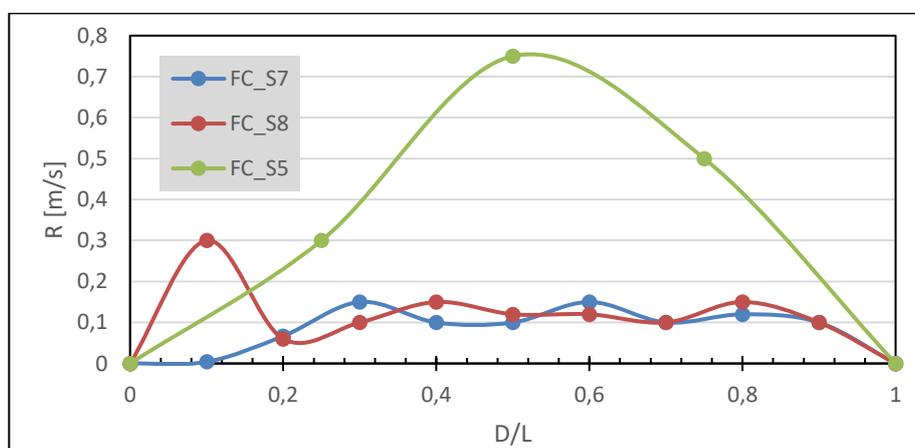


Figura 3.18 Velocidade de propagação a variar com a distância D/L na coordenada  $x_1$  para as diferentes direções do vento  $\alpha$  (S5 -  $0^\circ$ , S7 -  $180^\circ$ , S8 -  $90^\circ$ )

Na Figura 3.18, observa-se a discrepância que existe entre as situações em que o vento é a favor da direção da propagação do fogo, e as que não é. A simulação com  $\alpha=90^\circ$ , relativamente à FC\_S7 ( $\alpha=180^\circ$ ), demonstra uma maior aceleração inicial, seguida de um comportamento semelhante em ambas as simulações. Ambas as situações, com vento perpendicular e na direção oposta demonstram também um comportamento ligeiramente oscilatório, dotado de pequenas acelerações e desacelerações.

## 4. METODOLOGIA – ENSAIOS EXPERIMENTAIS

Os ensaios experimentais desempenham um papel fundamental neste trabalho, na medida que permitem aferir o que de facto acontece na realidade e perceber que diferenças existem entre estes resultados e os provenientes das simulações.

Os ensaios experimentais foram realizados no túnel de vento TC3, que se encontra no Laboratório de Estudos sobre Incêndios Florestais da Universidade de Coimbra (LEIF). As dimensões deste túnel consistem em 8 metros de comprimento e 6 metros de largura. Em ambos os lados existem paredes com 2 metros de altura. Este túnel de vento permite velocidades do vento até 8 m/s. No presente trabalho serão utilizadas as velocidades de 1, 2, e 3 m/s.

Foram realizados dez testes com combinações de configurações e vento (velocidade e direção), representados na Tabela 4.1. Cada um destes testes foi repetido pelo menos uma vez, de forma a obter uma validação dos resultados obtidos. Estes testes estão representados na seguinte tabela.

Teste (Ref.)	$\theta$ (°)	U (m/s)	$\alpha$ (°)
FC_E1	15	0	-
FC_E2	30	0	-
FC_E3	40	0	-
FC_E4	15	2	0
FC_E5	30	2	0
FC_E6	40	2	0
FC_E7	30	1	0
FC_E8	30	3	0
FC_E9	30	2	180
FC_E10	30	2	90

Tabela 4.1 Referências e parâmetros dos ensaios laboratoriais realizados

## 4.1. Configuração

A geometria do leito de combustível está diretamente ligada com o ângulo entre as duas frentes e o vértice do “V” é colocado consoante a direção do vento que se irá utilizar. Assim, o leito de combustível será um triângulo com 6 metros de altura e ângulo de 15°, 30° ou 40°. Existe uma exceção: o teste FC\_E10 considera uma direção do vento perpendicular, ou seja, este tem que se colocar transversalmente à direção do vento. Dado que a largura do túnel é de 6 metros, teve de se considerar um triângulo com apenas 5 metros de altura.



Figura 4.1 Fotografia do túnel de vento com uma das configurações

### 4.1.1. Massa de Combustível

O primeiro passo antes de se iniciarem os testes, é analisar uma pequena amostra de caruma para aferir a percentagem de humidade (% humidade). Esta propriedade varia de acordo com a temperatura, o teor de humidade, e a hora do dia.

Este procedimento realiza-se com o objetivo de substituir a massa de água existente na amostra pelo equivalente em celulose. Assim, começa-se por calcular a percentagem de água que existe na massa seca. De seguida, com a área do leito de combustível e a carga de combustível considerada ( $0.6 \text{ kg/m}^2$ ), afere-se a massa total de caruma necessária.

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

### **4.1.2. Termopares**

Nestes ensaios existiram 5 localizações onde foram aferidas temperatura através de termopares. Estes aparelhos foram colocados de modo a medir as quantidades numa linha reta, a começar no vértice do “V”. O espaçamento entre cada termopar foi de 1 metro. Os termopares estão dispostos como representado na Figura 3.3.

A temperatura, medida através dos termopares, permite averiguar as temperaturas sentidas naquelas coordenadas e o tempo no qual a frente do fogo os atinge. Assim, a partir destes aparelhos também conseguimos calcular de uma maneira grosseira a velocidade de propagação do fogo.

### **4.1.3. Ignição**

Tendo em conta que o comportamento do fogo a estudar se desenrola em duas frentes de fogo que se unem num ponto, a ignição terá de ser realizada por duas pessoas que simultaneamente iniciam o fogo. A ignição é conseguida através de dois fios de lã colocados nos limites das duas faces laterais e que se unem no vértice. Estes fios são embebidos em gasolina.

## **4.2. Velocidade de Propagação (ROS)**

A velocidade de propagação de um fogo é um dos parâmetros mais importantes no estudo do comportamento do fogo pois permite tirar conclusões preliminares sobre o mesmo.

No presente estudo, a velocidade de propagação poderia ser medida através dos termopares, como já foi referido. No entanto, esta quantidade foi determinada com recurso a imagens de uma câmara de infravermelhos que posteriormente são processadas num software, *Fire ROS Calculator* (Abouali, 2017).

### **4.2.1. Câmara de infravermelhos (IR)**

Para a obtenção de imagens foi utilizada uma câmara FLIR ThermaCam SC660. Esta foi posicionada na maior altura possível através de uma plataforma elevatória. A sua

altura durante os testes rondou os 7 metros acima do leito de combustível como representada na Figura 4.2. A câmara foi configurada para captar temperaturas no intervalo 300 – 1500°C.



Figura 4.2 Fotografia da plataforma elevatória sobre o leito de combustível

#### **4.2.2. Fire ROS Calculator**

Este programa tem como base as imagens recolhidas pela câmara de infravermelhos.

Em primeiro lugar, é necessário calibrar a câmara. Esta calibração é feita tirando cerca de 10 fotografias com um cartão que tem um padrão como o representado na Figura 4.3. O cartão irá apresentar posições aleatórias nestas, para que o programa consiga definir os parâmetros para esta câmara.

De seguida, sempre que se ajusta a posição da câmara em relação ao leito de combustível, é necessário obter uma fotografia para a calibração da posição para aquele teste.



Figura 4.3 Imagem com o objeto de calibração obtida através do espectro visível da câmara IR

O programa também possui uma ferramenta que permite a extração dos *frames* a partir dos vídeos, com um intervalo definido, que variou consoante a duração do teste. O ideal é obter entre 15 e 25 *frames* para cada teste. Mas tendo em conta a duração de alguns testes, este valor, por vezes, não foi atingido.

O programa tem como principais *outputs* a velocidade média de propagação e velocidade dinâmica de propagação. Esta última consiste na variação da velocidade de propagação com a distância (D) e com o tempo (t), sendo que entre cada *frame* existe um valor diferente. Com este parâmetro consegue-se aferir em que alturas a velocidade de propagação foi mais alta, e assim entender melhor este tipo de comportamento extremo do fogo. O programa permite ainda a medição da velocidade de propagação do fogo em qualquer direção que o utilizador pretenda. No entanto, para este estudo apenas foi considerada uma: a linha central do V.

#### 4.2.3. Velocidade Básica de Propagação ( $R_0$ )

Antes de se iniciarem os testes, é necessário realizar um teste que funcione como referência. Assim, usando o mesmo combustível (caruma), a mesma carga ( $0.6 \text{ kg/m}^2$ ) numa mesa com  $1\text{m}^2$  e sem vento, calcula-se a velocidade de propagação básica. A mesa está dividida em 10 secções marcadas com fio de algodão como representado na Figura 4.4. As secções estão distanciadas 10 cm umas das outras, como se observa nessa mesma figura. Cada vez que um fio é atingido pela frente do fogo, este parte-se e marca-se o tempo. Assim, consegue-se obter a velocidade básica de propagação. A ignição é feita através de uma frente de fogo linear num dos lados do quadrado.



Figura 4.5 Fotografia da realização de um ensaio  $R_0$



Figura 4.4 Fotografia da mesa para a realização do  $R_0$  com a caruma distribuída e o fio

Com o propósito de minimizar variações nas propriedades do leito de combustível entre outras, as velocidades de propagação irão ser reduzidas a números adimensionais (Viegas & Neto, 1991). Bem como a distância  $D'$ . A velocidade de propagação adimensional ( $R'$ ) é obtida com base na velocidade básica de propagação:

$$R' = \frac{R}{R_0}$$

A distância básica de propagação ( $D_0$ ) consiste na distância percorrida pelo fogo por unidade de tempo ( $t_0$  -um segundo) considerando a velocidade básica de propagação ( $R_0$ ). Assim,

$$D_0 = R_0 \times t_0$$

$$D' = \frac{D}{D_0} = \frac{D}{R_0}$$

### 4.3. Resultados e Discussão

Os ensaios experimentais tiveram como principais resultados as velocidades de propagação (média e dinâmica) obtidas através do tratamento das imagens IR e as temperaturas como produto dos termopares. Os gráficos com exposição das temperaturas serão compostos pelos dados dos cinco termopares (E1, E2, E3, E4, E5) anteriormente descritos.

Para cada um dos testes descritos na Tabela 4.1 foram realizados pelo menos dois ensaios. Em alguns casos foram realizados três. De maneira a validar os resultados obtidos, foi calculado um intervalo de confiança, com um teto de 15%. Quando este valor não foi alcançado, foi realizado um terceiro teste. Para o teste FC\_E09 foi considerado excepcionalmente um intervalo de confiança inferior a 20%.

Esta parte estará dividida em quatro grupos: variação do ângulo sem vento, variação do ângulo com vento, diferentes valores para a velocidade do vento, e diferentes direções do vento.

### 4.3.1. Variação do ângulo sem vento

Foram realizados testes considerando um ângulo  $\theta$  entre as duas frentes de 15°, 30° e 40°. Pretende-se com este grupo de testes aferir a influência deste parâmetro no desenvolvimento do fogo.

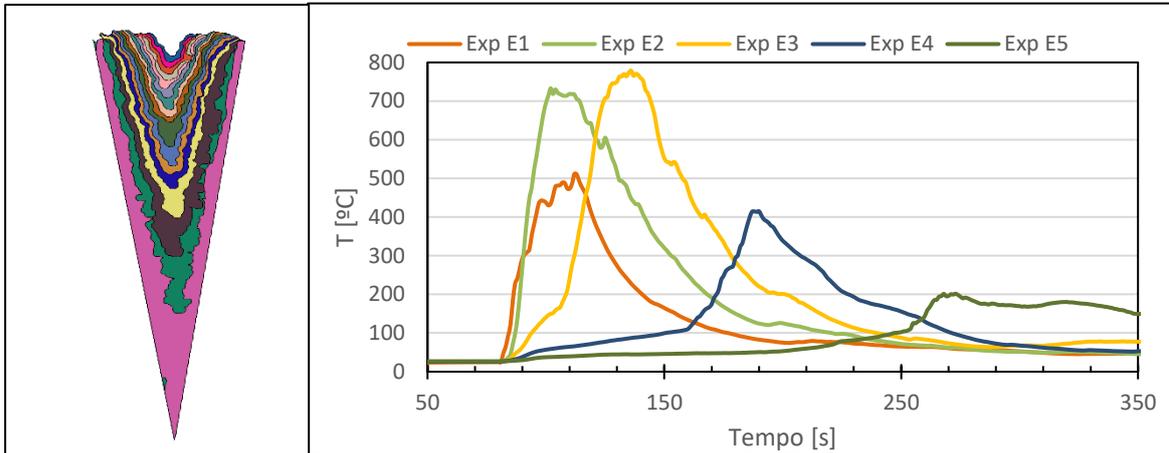


Figura 4.6 (a) Mapeamento FC\_E01  $\theta=15^\circ$  da frente de ignição com intervalo de tempo de 19s (b) Evolução da temperatura ao longo do tempo para o teste FC\_E01 nos diferentes termopares

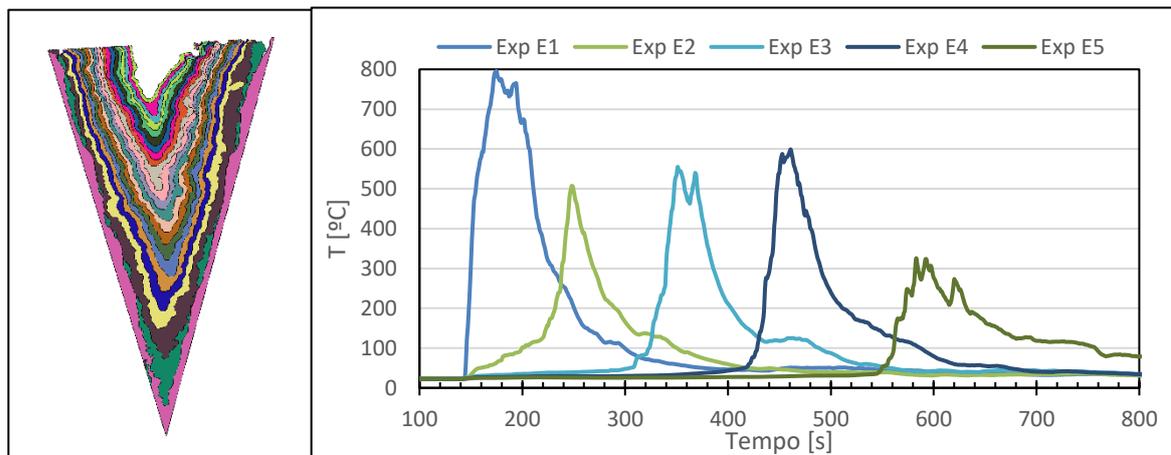


Figura 4.7 (a) Mapeamento FC\_E02  $\theta=30^\circ$  da frente de ignição com intervalo de tempo de 25s (b) Evolução da temperatura ao longo do tempo para o teste FC\_E02 nos diferentes termopares

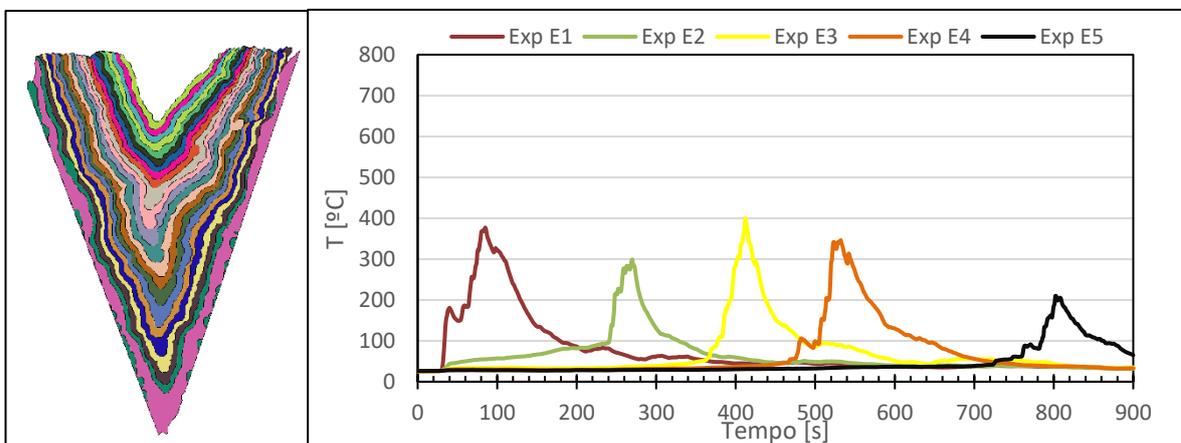


Figura 4.8 (a) Mapeamento FC\_E03  $\theta=40^\circ$  da frente de ignição com intervalo de tempo de 25s (b) Evolução da temperatura ao longo do tempo para o teste FC\_E03 nos diferentes termopares

A partir das Figura 4.6, Figura 4.7 e Figura 4.8 é possível verificar que propagação é mais lenta à medida que o ângulo aumenta. Na Figura 4.6 observa-se que os três primeiros picos de temperatura, ou seja, a passagem da frente por aqueles termopares, ocorre com um intervalo bastante pequeno. Este intervalo vai aumentando com o aumento do ângulo, bem como o tempo do teste. Outro fator a reparar são as temperaturas máximas alcançadas. Na Figura 4.6 e na Figura 4.7, verificamos que atingem perto de 800°C, ao passo que na Figura 4.8, as temperaturas atingem apenas 400°C. Nota-se também que há uma ligeira tendência para a temperatura diminuir à medida que a frente do fogo avança, sendo sempre inferior no termopar E5 relativamente ao E1.

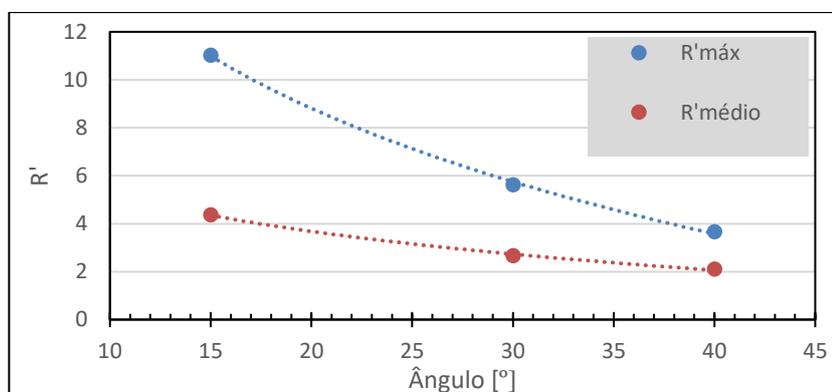


Figura 4.9 Variação da velocidade máxima e média de propagação com o ângulo  $\theta$

Ao observar a Figura 4.9, verifica-se que a velocidade máxima de propagação diminui numa relação inversa com o ângulo. As linhas de tendência consistem em funções polinomiais de grau 2. Ao passarmos de um ângulo de 15° para 40°, observa-se uma diminuição da velocidade máxima de propagação para cerca de um terço. A velocidade média de propagação também diminui com o aumento do ângulo, aproximando-se mais da velocidade máxima para o ângulo de 40°.

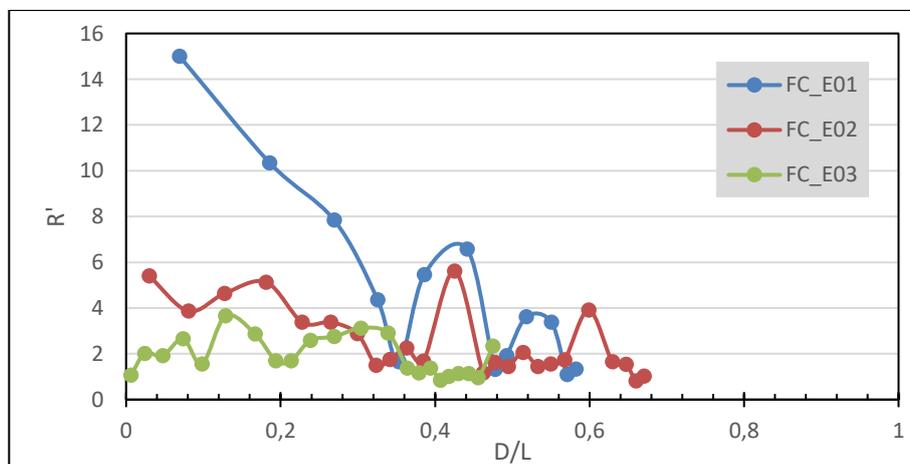


Figura 4.10 Evolução da velocidade de propagação com D/L para os diferentes testes com diferentes ângulos  $\theta$  (E01 – 15°, E02 – 30°, E03 – 40°)

A Figura 4.10 representa as velocidades dinâmicas de propagação para os diferentes testes. A letra L representa o comprimento total do V, 6 metros, e a letra D representa a distância ao ponto de convergência entre as duas frentes. É claro que as velocidades mais altas estão presentes para o menor ângulo, principalmente no início do teste. Isto deve-se à grande concentração de energia que existe no confronto entre as duas frentes. Relativamente ao ângulo de 30°, verificam-se valores ligeiramente superiores se comparados com o ângulo de 40°, nomeadamente no início, vindo estes posteriormente a estabilizar. Observa-se, mais uma vez, um comportamento dotado de acelerações desacelerações sucessivas.

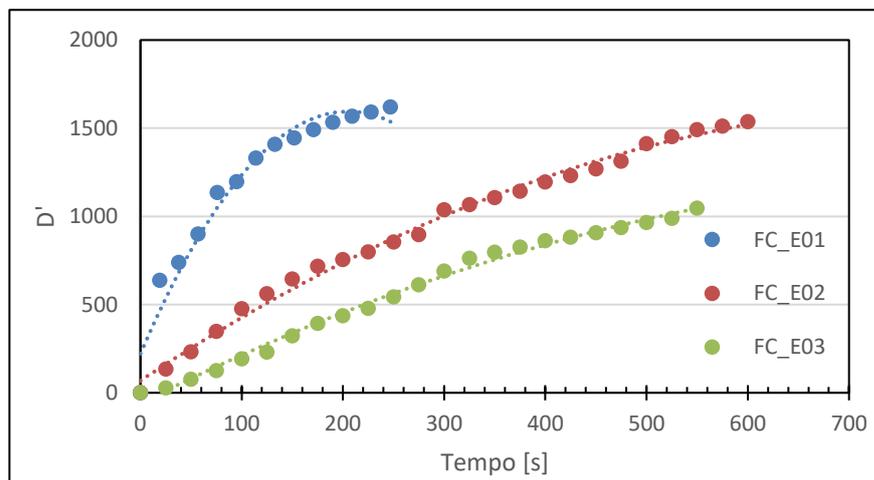


Figura 4.11 Distância adimensional percorrida ao longo do tempo nos diferentes testes com diferentes ângulos  $\theta$  (E01 – 15°, E02 – 30°, E03 – 40°)

Os resultados demonstrados na Figura 4.11 são coerentes com as conclusões retiradas até agora, dado que é possível observar que para um mesmo intervalo de tempo, a distância percorrida no FC\_E01 é muito superior. As linhas de tendência presentes são funções polinomiais de grau 2.

### 4.3.2. Variação do ângulo com velocidade do vento constante

Foram realizados testes para os ângulos  $\theta$  considerados anteriormente ( $15^\circ$ ,  $30^\circ$  e  $40^\circ$ ) mas desta vez considerando uma velocidade do vento  $U$  na direção da propagação de  $2\text{m/s}$ .

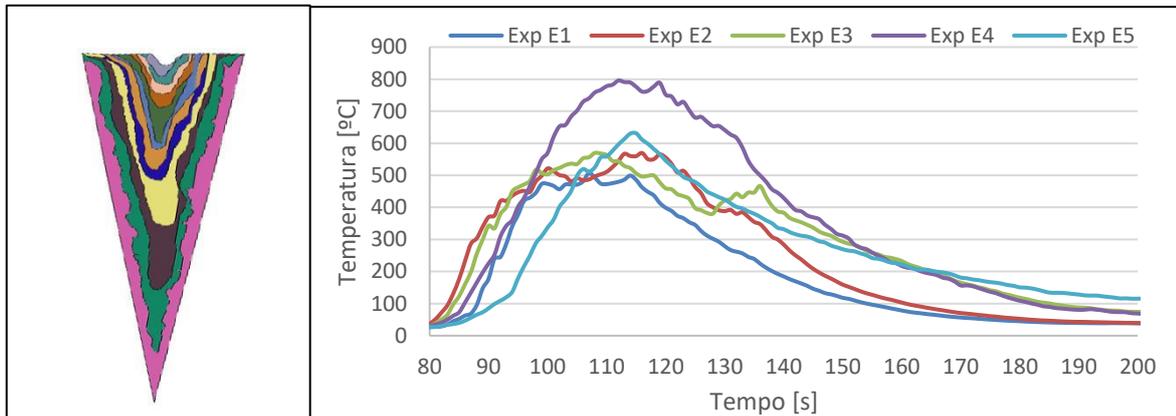


Figura 4.12 (a) Mapeamento FC\_E04  $\theta=15^\circ$  e  $U=2\text{m/s}$  da frente de ignição com intervalo de tempo de 1s (b) Evolução da temperatura ao longo do tempo para o teste FC\_E04 nos diferentes termopares

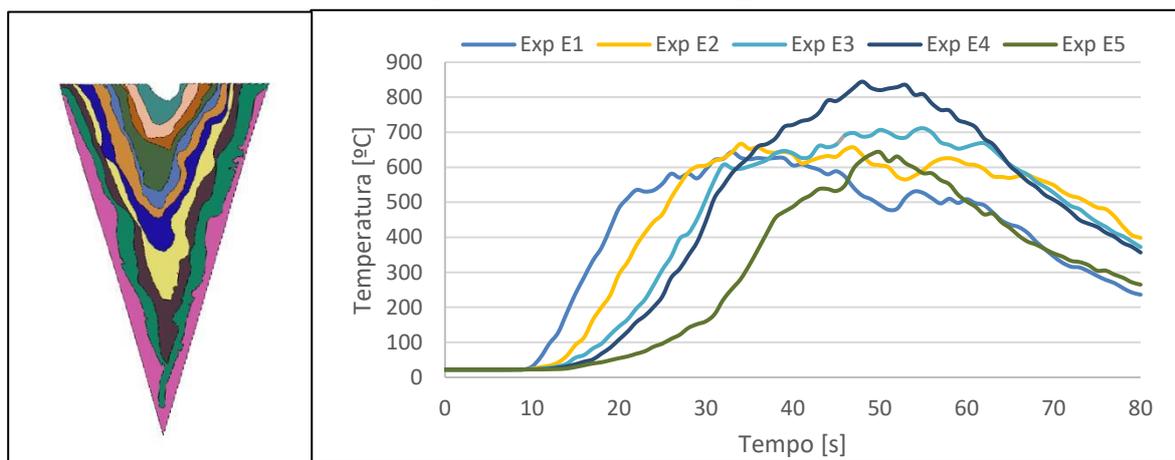


Figura 4.13 (a) Mapeamento FC\_E05  $\theta=30^\circ$  e  $U=2\text{m/s}$  da frente de ignição com intervalo de tempo de 2s (b) Evolução da temperatura ao longo do tempo para o teste FC\_E05 nos diferentes termopares

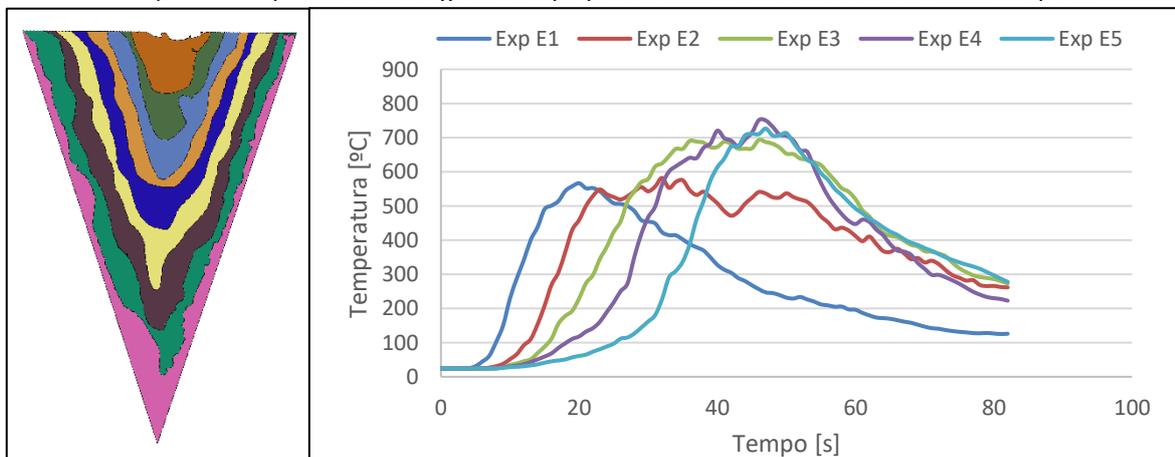


Figura 4.14 (a) Mapeamento FC\_E06  $\theta=40^\circ$  e  $U=2\text{m/s}$  da frente de ignição com intervalo de tempo de 3s (b) Evolução da temperatura ao longo do tempo para o teste FC\_E06 nos diferentes termopares

No ponto anterior foi visto que a velocidade de propagação e as temperaturas máximas aumentam com a diminuição do ângulo. Acrescentando vento, este padrão continua-se a verificar. No entanto, os parâmetros são incrementados devido ao vento que contribui para a alimentação do fogo e um aumento dos processos de convecção. Como consequência, temos uma velocidade de propagação muito superior.

Ao observar a Figura 4.12, a Figura 4.13 e a Figura 4.14, e relativamente ao mapeamento podemos dizer que o seu padrão é bastante semelhante. No entanto, tendo em conta que os intervalos de tempo são respetivamente 1, 2 e 3 segundos, mais uma vez concluímos que a velocidade de propagação diminui com um aumento do ângulo entre as duas frentes.

Na Figura 4.12 em particular observa-se praticamente uma sobreposição em termos temporais dos picos de temperatura de cada termopar, reforçando a ideia da rapidez desta frente de fogo.

Nas figuras acima mencionadas observamos que as temperaturas atingem valores bastante altos na ordem dos 700-800°C.

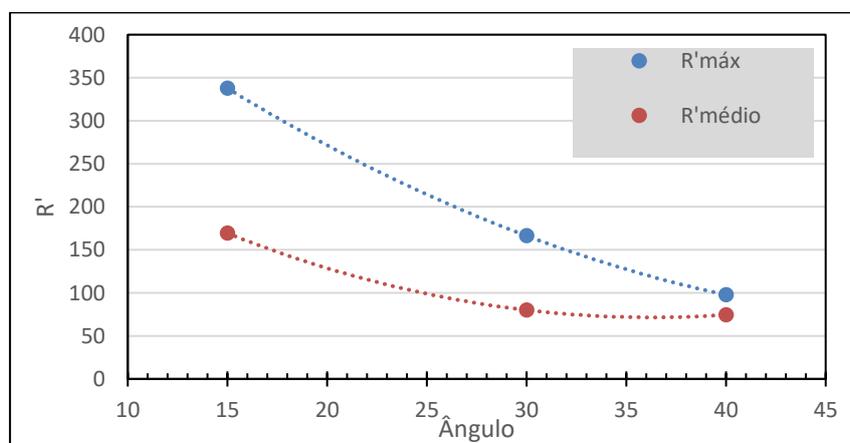


Figura 4.15 Variação da velocidade máxima e média de propagação com o ângulo  $\theta$ , sobre influência do vento  $U=2\text{m/s}$

Comparando a curva da velocidade máxima de propagação representada na Figura 4.15 com a da Figura 4.9, conclui-se que para além da gama de valores ser cerca de 30 vezes mais elevada, também é uma curva mais acentuada. A velocidade de propagação máxima na presença do vento aumenta muito significativamente com a diminuição do ângulo. A velocidade média de propagação também é comparativamente mais acentuada, principalmente entre os 15° e os 30°, tornando-se mais constante para os valores seguintes.

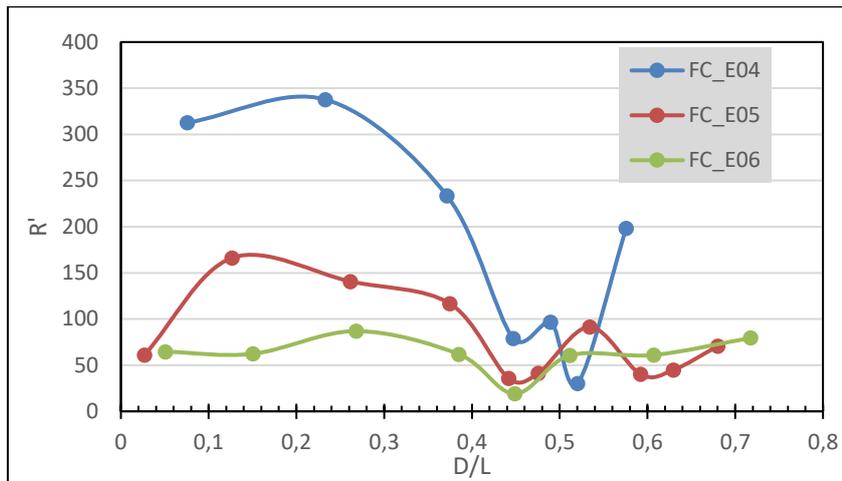


Figura 4.16 Evolução da velocidade de propagação com D/L para os diferentes testes com diferentes ângulos  $\theta$  e  $U=2\text{m/s}$  (E04 – 15°, E05 – 30°, E06 – 40°)

Apesar de os três testes sofrerem a mesma velocidade do vento  $U$ , observa-se na Figura 4.16 que o ângulo continua a ser um fator determinante na velocidade de propagação. O teste FC\_E04 possui elevada velocidade de propagação, principalmente no início, vindo estas a descer, e terminando com um pico. Os testes FC\_E05 e FC\_E06 têm oscilações menores, no entanto, verifica-se o mesmo comportamento de acelerações e desacelerações. Conclui-se, mais uma vez, que aumentando o ângulo, diminuem as velocidades de propagação.

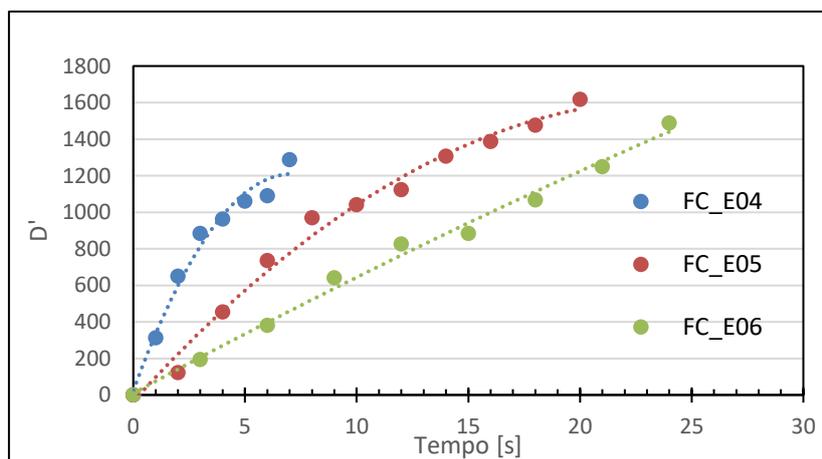


Figura 4.17 Distância adimensional percorrida ao longo do tempo nos diferentes testes com diferentes ângulos  $\theta$  e  $U=2\text{m/s}$  (E04 – 15°, E05 – 30°, E06 – 40°)

Através da Figura 4.17, é possível comprovar o que foi descrito anteriormente. O teste FC\_S04 é o que tem uma maior distância percorrida num menor intervalo de tempo, e conseqüentemente velocidades mais altas de propagação, principalmente no início.

### 4.3.3. Variação da velocidade do vento U

Foram realizados testes fazendo variar a velocidade do vento U (1,2 e 3 m/s) considerando sempre  $\theta=30^\circ$ . O vento propaga-se na mesma direção que o fogo  $\alpha=0^\circ$ .

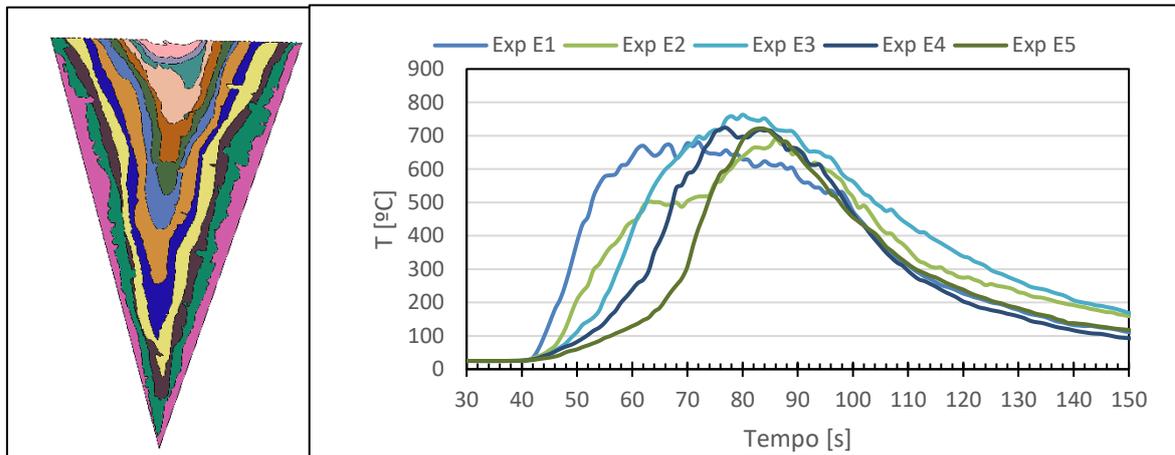


Figura 4.18 (a) Mapeamento FC\_E07  $\theta=30^\circ$  e  $U=1\text{ m/s}$  da frente de ignição com intervalo de tempo de 3s  
(b) Evolução da temperatura ao longo do tempo para o teste FC\_E07 nos diferentes termopares

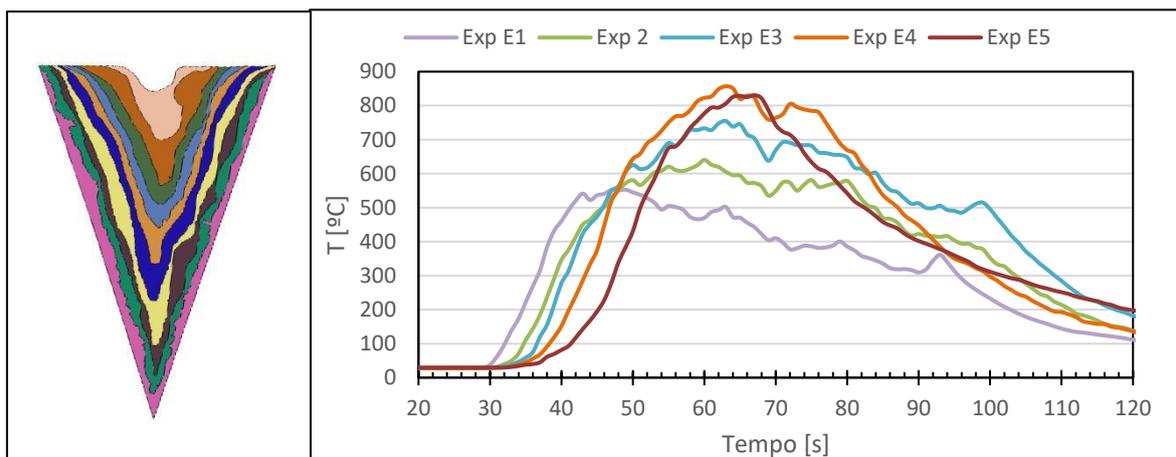


Figura 4.19 (a) Mapeamento FC\_E08  $\theta=30^\circ$  e  $U=3\text{ m/s}$  da frente de ignição com intervalo de tempo de 1.5s  
(b) Evolução da temperatura ao longo do tempo para o teste FC\_E08 nos diferentes termopares

Mais uma vez, os mapeamentos parecem visualmente semelhantes. No entanto, o intervalo de tempo da Figura 4.18 é duas vezes superior ao representado na Figura 4.19. Através destas figuras é possível afirmar de uma maneira grosseira que a velocidade de propagação aumenta também com a velocidade do vento. As temperaturas máximas verificadas são semelhantes para todas as velocidades do vento, rondando os 800 $^\circ\text{C}$ .

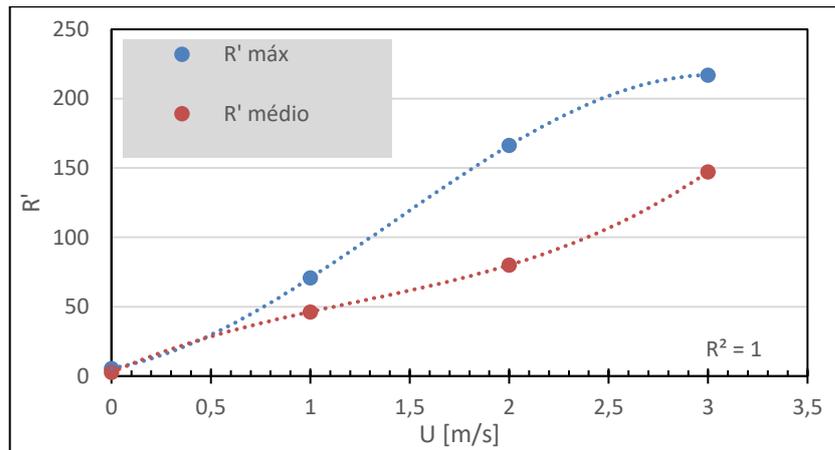


Figura 4.20 Variação da velocidade máxima e média de propagação para as diferentes velocidades do vento U

Na Figura 4.20 observa-se o crescendo da velocidade máxima de propagação com o aumento da velocidade do vento. As linhas de tendência que unem os pontos são funções polinomiais de terceira ordem. Observa-se que de 1m/s para 3m/s, a velocidade máxima de propagação triplica. A velocidade média de propagação é semelhante até a  $U=0,5\text{m/s}$ , sendo depois sempre inferior, mas crescendo igualmente com o aumento do ângulo.

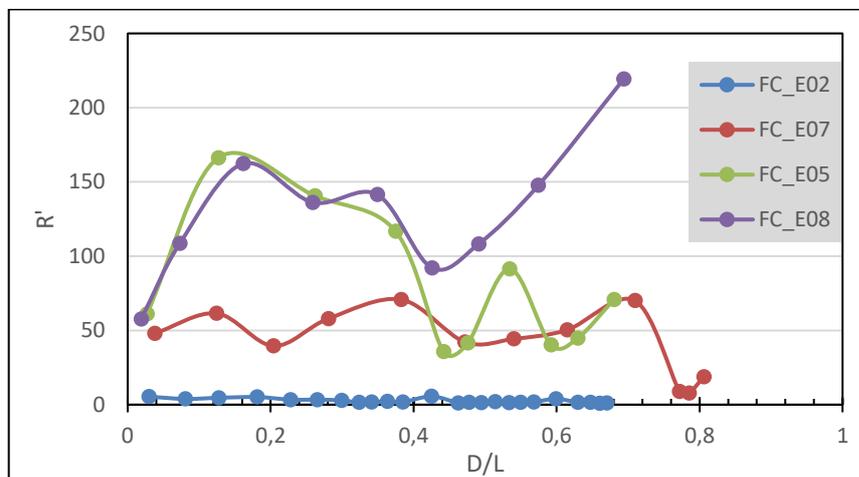


Figura 4.21 Evolução da velocidade de propagação com o tempo para as diferentes velocidades do vento U e  $\theta=30^\circ$  (E02 – 0m/s, E07 – 1m/s, E05 – 2m/s, E08 – 3m/s)

Na Figura 4.21, observa-se que um comportamento semelhante para os FC\_E05 e FC\_E08 no início, seguido de uma aceleração no caso FC\_E08 (o mais extremo) e o uma desaceleração no caso FC\_E05. Consta-te também a influência que a presença de vento tem na velocidade de propagação, sendo nos casos mais extremos, por exemplo  $U=3\text{m/s}$ , cerca

de 150 vezes superior. Um detalhe a notar, é a aceleração final presente nos três testes com vento.

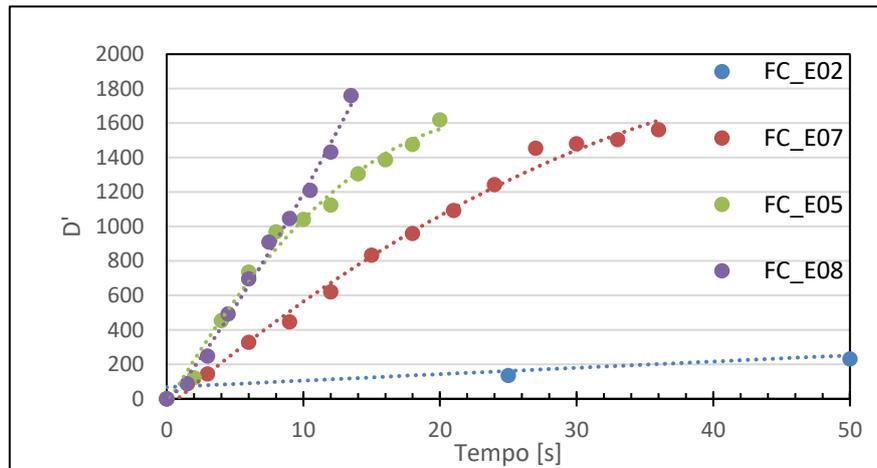


Figura 4.22 Distância adimensional percorrida ao longo do tempo nos diferentes testes com diferentes velocidades do vento  $U$  e  $\theta=30^\circ$  (E02 – 0m/s, E07 – 1m/s, E05 – 2m/s, E08 – 3m/s)

É de notar que na Figura 4.22 se observa uma aceleração inicial semelhante entre o FC\_E05 e FC\_E08. No entanto, o FC\_E05 sofre uma desaceleração, como foi visto na figura anterior.

O caso FC\_E08 é um caso muito extremo, podendo inclusive serem observados na Figura 4.23, fenómenos de vorticidade. Este fenómeno está muito presente neste tipo de comportamento do fogo.



Figura 4.23 Fotografia do ensaio FC\_E08 demonstrando fenómenos de vorticidade

#### 4.3.4. Variação da direção do vento $\alpha$

Foram realizados testes fazendo variar a direção do vento relativamente à sua propagação, tendo sido consideradas as direções: mesma da propagação ( $\alpha=0^\circ$ ), oposta à propagação ( $\alpha=180^\circ$ ) e perpendicular à propagação ( $\alpha=90^\circ$ ). Em todos os testes o ângulo foi de  $30^\circ$  e a velocidade do vento  $U$  de 2m/s.

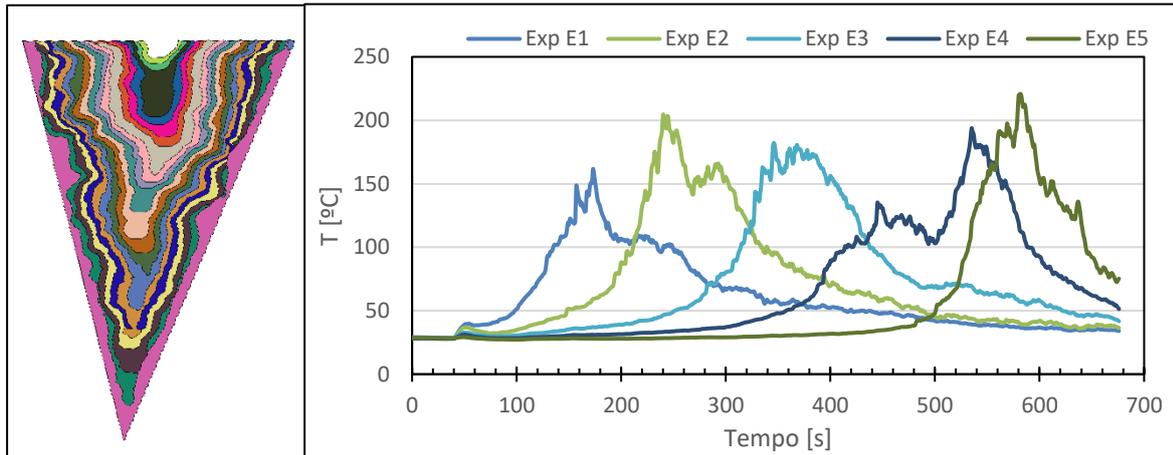


Figura 4.24 (a) Mapeamento FC\_E09  $\theta=30^\circ$ ,  $U=2$  m/s e  $\alpha=180^\circ$  da frente de ignição com intervalo de tempo de 25s (b) Evolução da temperatura ao longo do tempo para o teste FC\_E09 nos diferentes termopares

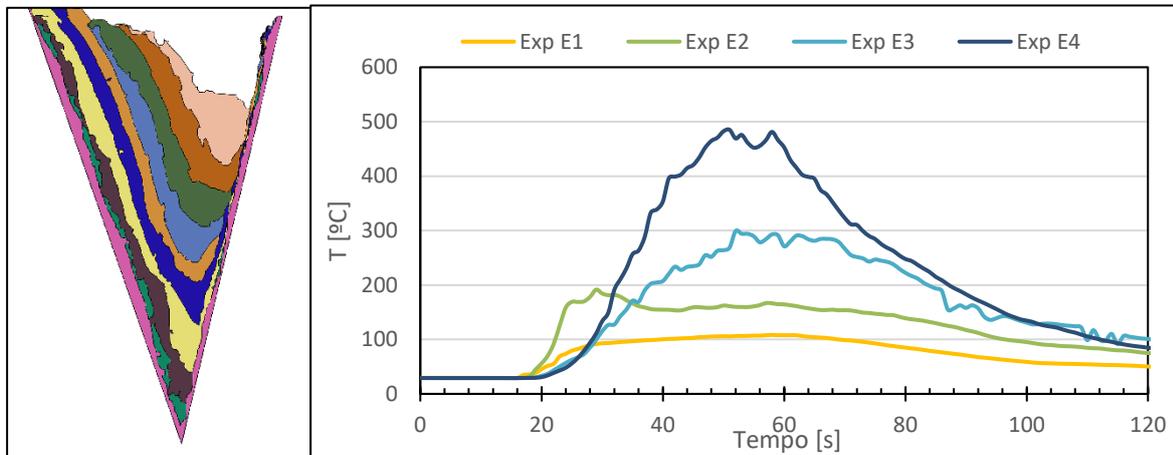


Figura 4.25 (a) Mapeamento FC\_E10  $\theta=30^\circ$ ,  $U=2$  m/s e  $\alpha=90^\circ$  da frente de ignição com intervalo de tempo de 1.5s (b) Evolução da temperatura ao longo do tempo para o teste FC\_E10 nos diferentes termopares

As diferenças nos mapeamentos são muito visíveis nas Figura 4.24 e Figura 4.25, sendo que no teste com a direção do vento perpendicular à da propagação existe uma rotação das frentes de fogo. Do mesmo modo, também é visível a perda da simetria, característica deste tipo de comportamento do fogo. As temperaturas máximas atingidas são muito inferiores aos casos anteriormente vistos, principalmente no caso com vento na direção oposta à propagação.

$\alpha$ [°]	R' máx	R' médio
0	166,28	80,02
180	6,16	3,38
90	99,31	57,22

Tabela 4.2 Velocidades máximas e médias de propagação para as diferentes direções do vento  $\alpha$  com  $U=2\text{m/s}$

Na Tabela 4.2 estão representadas as velocidades de propagação máximas e médias para cada direção do vento. Assim, pode-se considerar que a direção do vento é um fator determinante para o desenvolvimento do fogo. Quando esta é perpendicular, a velocidade atinge um valor considerável, mas ainda assim inferior à situação com a mesma direção do vento. Por outro lado, quando o vento toma uma direção contrária ao sentido de propagação, a velocidade da mesma diminui drasticamente, podendo ser equiparada à velocidade básica de propagação, principalmente ao observar o valor médio. Nesta última situação não se pode considerar que aconteça uma frente convergente, pois como se verifica na Figura 4.26 a frente apesar de se unir num ponto, não demonstra um comportamento extremo.



Figura 4.26 Fotografias ensaio FC\_09 (a) Vista de lado (b) Vista de topo

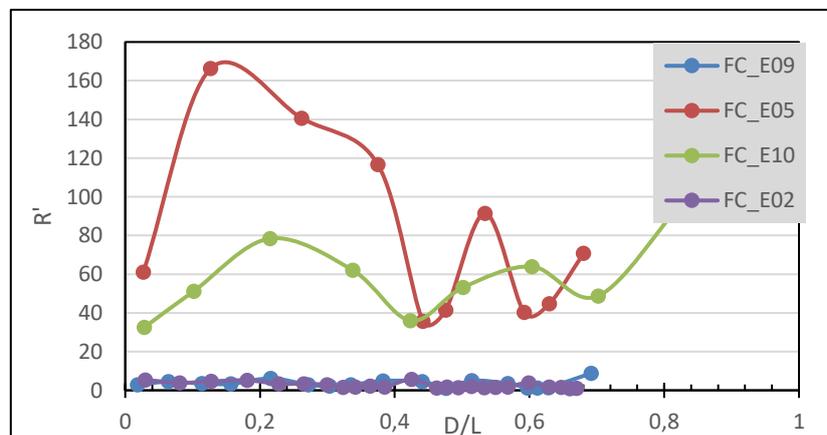


Figura 4.27 Evolução da velocidade de propagação com o tempo para as diferentes direções do vento  $\alpha$  e  $\theta=30^\circ$  (E09 – oposta , E05 – igual, E10 –perpendicular , E02 – sem vento)

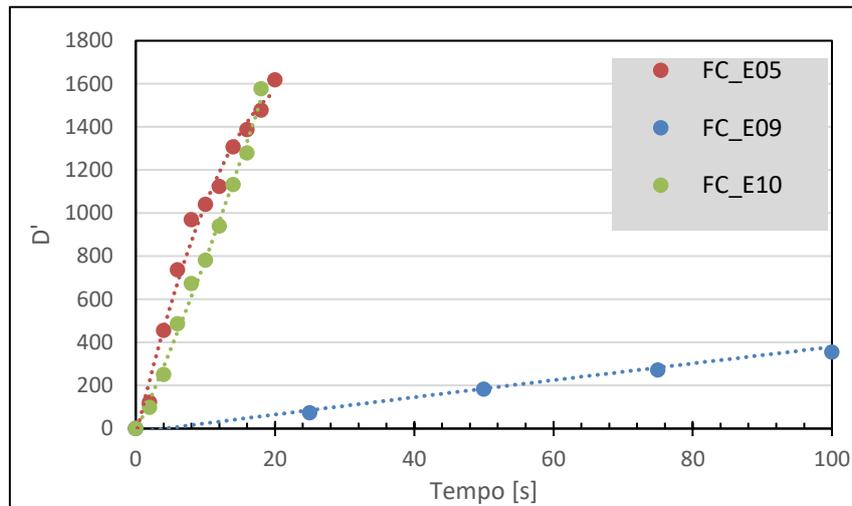


Figura 4.28 Distância adimensional percorrida para as diferentes direções do vento  $\alpha$  e  $\theta=30^\circ$  (E09 – oposta, E05 – igual, E10 – perpendicular)

Na Figura 4.27, é possível observar que o caso com vento na direção oposta tem um comportamento semelhante ao caso sem vento, FC\_E09 e FC\_E02 respetivamente. É também visível que quando a direção do vento é perpendicular ao V, a velocidade de propagação vai ser superior aos testes referidos, mas ainda assim, inferior ao teste FC\_E05, com a direção do vento na direção de propagação. É importante referir que o comprimento do leito de combustível, devido a limitações do túnel de vento, para o caso FC\_E10 tem apenas 5 metros, em vez dos 6 metros presentes em todos os outros testes. Na Figura 4.28 verifica-se que no FC\_E09 a distância percorrida é praticamente linear. Ao passo, que nos testes FC\_E05 e FC\_E10 observa-se o aumento da velocidade no início, característica deste tipo de comportamento.

---

## 5. SIMULAÇÕES NUMÉRICAS VS ENSAIOS EXPERIMENTAIS

Um dos objetivos principais deste trabalho era a comparação entre os resultados provenientes de simulações numéricas e de ensaios no laboratório. Esta comparação pretendia de alguma maneira validar o modelo existente para as simulações, de maneira a que no futuro se conseguisse extrapolar estas simulações para situações com dimensões demasiado grandes para serem reproduzidas em laboratório.

Ao longo da produção deste trabalho, foram realizados inúmeros ajustes ao ficheiro de *input* para o FDS. No entanto, algumas características não conseguiram ser equiparadas às propriedades experimentais, dando origem a resultados de certa forma não paralelos à realidade. Neste capítulo irão ser discutidas as principais diferenças e semelhanças entre os resultados produzidos pelas simulações e pelos ensaios experimentais sublinhando que a referência será sempre a realidade experimental.

### 5.1. Tempo de Simulação vs Tempo de Ensaio

Este ponto pretende fazer uma comparação entre o tempo na simulação e o tempo observado experimentalmente para que todo o combustível se tivesse queimado. Este parâmetro é um dos mais discordantes entre as duas metodologias, sendo que o tempo obtido através dos ensaios experimentais foi, na maior parte dos casos, muito superior. A diferença foi diminuindo à medida que os ensaios se tornavam mais rápidos, como é o caso do FC\_E07 e FC\_E08.

A principal consequência desta discrepância é visível na velocidade de propagação calculada através das simulações. Nesta observa-se um fator multiplicativo relativamente às velocidades de propagação resultantes dos ensaios experimentais. As velocidades de propagação provenientes das simulações em alguns casos foram mais de dez vezes superiores às relatadas para o mesmo caso nos ensaios experimentais.

## 5.2. Mapeamento das frentes de ignição

O mapeamento das frentes de ignição também foi uma das bases deste trabalho. Nas figuras seguintes são dados três casos exemplificativos que comparam simulações com ensaios experimentais, para os mesmos parâmetros.

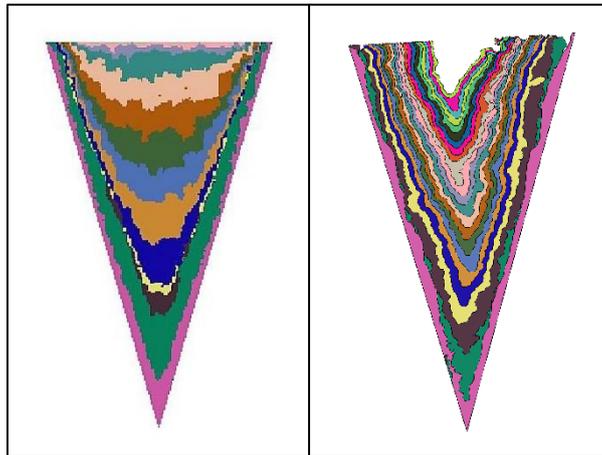


Figura 5.1 Mapeamento da frente de ignição,  $\theta=30^\circ$  (esq) FC\_S1, intervalo de tempo 5s (dir) FC\_E01 intervalo de tempo 25s

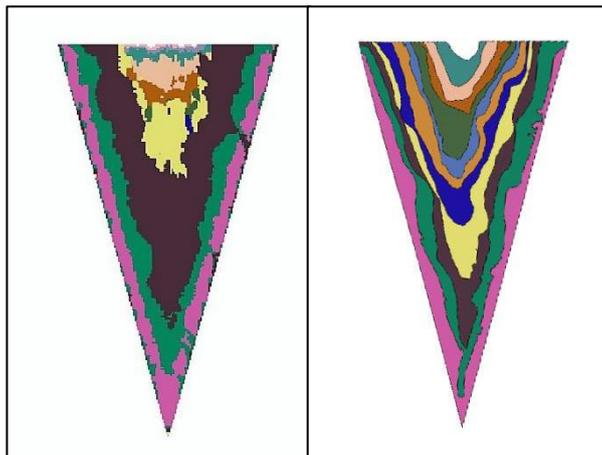


Figura 5.2 Mapeamento da frente de ignição,  $\theta=30^\circ$  e  $U=2\text{m/s}$  (esq)FC\_S5, intervalo de tempo 3s (dir) FC\_E05, intervalo de tempo 2s

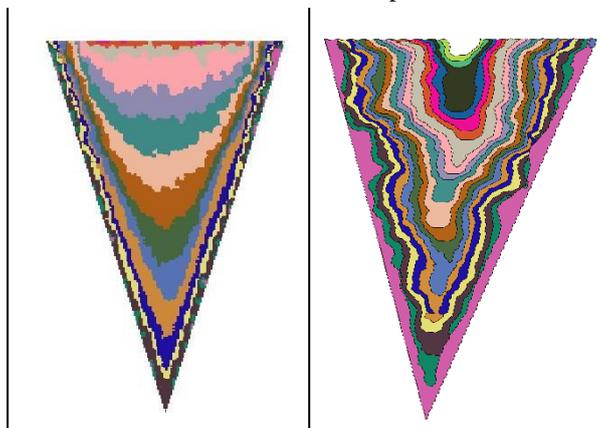


Figura 5.3 Mapeamento da frente de ignição,  $\theta=30^\circ$ ,  $U=2\text{m/s}$  e  $\alpha=180^\circ$  (esq)FC\_S7, intervalo de tempo 5s (dir) FC\_E09, intervalo de tempo 25s

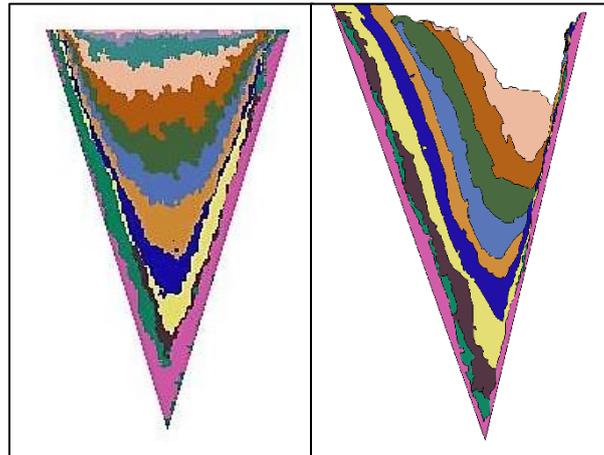


Figura 5.4 Mapeamento da frente de ignição,  $\theta=30^\circ$ ,  $U=2\text{m/s}$  e  $\alpha=90^\circ$  (esq)FC\_S8, intervalo de tempo 5s (dir) FC\_E10, intervalo de tempo 1,5s

Ao observar as Figura 5.1, Figura 5.2 e Figura 5.3 verifica-se o que foi falado anteriormente no que diz respeito à diferença entre as velocidades de propagação nas simulações e nos ensaios experimentais. Existem, no entanto, algumas semelhanças, no que diz respeito à simetria relativamente ao centro do V. A Figura 5.4 revela mais discrepância no padrão de comportamento, não se verificando na simulação o desvio que ocorre na realidade.

Apesar das visíveis diferenças entre as duas metodologias, o padrão de comportamento e as proporções entre os diferentes testes são muitas vezes semelhantes. Assim, é possível retirar algumas conclusões a partir das simulações, já que, como foi visto no capítulo anterior foram comprovadas com as conclusões dos ensaios experimentais.



## 6. CONCLUSÕES

Este trabalho tinha como objetivo o estudo de um tipo de comportamento extremo do fogo, que consiste em duas frentes que convergem num determinado ponto, formando determinado ângulo entre si. Uma das características principais das frentes convergentes, são as velocidades anormais de propagação, sendo estas muito elevadas.

As frentes convergentes apresentam um comportamento dinâmico, pois sofrem grande alteração ao longo do tempo. Fatores como o ângulo inicial entre as duas frentes, o declive da colina, o tipo de combustível e a presença de vento, modificam o desenvolvimento deste tipo de fogos. Neste trabalho, foi estudada pormenorizadamente a influência do ângulo entre as duas frentes e da presença do vento.

No que diz respeito ao vento, existem mecanismos que explicam o aumento de velocidade de propagação como é o caso do feedback positivo, levando à conclusão de que o comportamento extremo das frentes convergentes é uma consequência dos intensos fenómenos de convecção existentes.

O estudo realizado assentou em duas metodologias para o seu desenvolvimento: simulações numéricas e ensaios experimentais. Foram realizados oito simulações e dez tipos de ensaios laboratoriais. Em ambos foi variado o ângulo entre as duas frentes (15°, 30° e 40°), a velocidade do vento (1, 2 e 3 m/s) e a direção do vento (mesma da propagação, oposta à propagação, perpendicular à propagação).

As simulações foram realizadas no programa *Fire Dynamics Simulator* (FDS) e incluíram o desenvolvimento de um modelo que pretendia caracterizar os parâmetros existentes numa situação real deste tipo de fogo, como o domínio, o combustível, a geometria das frentes, a ignição e as condições de fronteira. Para a determinação de algumas quantidades foram “colocados” dispositivos de controlo.

Foram retiradas algumas conclusões a partir da análise das simulações numéricas:

- A velocidade de propagação diminui numa razão inversa com o ângulo entre as duas frentes;
- Aumentando o ângulo entre as duas frentes, velocidades negativas de  $U_x$ , simultâneas com a passagem do fogo, ocorrem a partir de uma distância menor à origem do V;

- A velocidade de propagação aumenta com a velocidade do vento;
- A direção do vento tem influência no padrão de comportamento do fogo;
- Quando a direção do vento é oposta à da propagação, a sua velocidade é semelhante às mesmas condições, mas sem vento.

Os ensaios experimentais foram realizados no Laboratório de Estudos sobre Incêndios Florestais com recurso a um túnel de vento. O combustível utilizado foi agulhas de *Pinus Pinaster* (caruma). Cada ensaio foi realizado pelo menos duas vezes. A velocidade de propagação foi obtida com recurso a imagens *IR*.

As conclusões foram concordantes com as retiradas da análise das simulações, podendo ainda acrescentar:

- A temperatura sentida na frente de fogo no início do teste vai diminuindo com o avanço da mesma;
- As temperaturas máximas presentes aumentam com a diminuição do ângulo;
- Estão presentes fenómenos de vorticidade;
- A velocidade de propagação, no geral, tem um comportamento oscilatório, sofrendo várias acelerações e desacelerações ao longo do tempo.

De uma maneira geral, as conclusões retiradas das simulações numéricas estão de acordo com o que foi observado no trabalho experimental, dado que o padrão de comportamento foi manifestamente semelhante. No entanto, existem lacunas no desenvolvimento das simulações tendo-se verificado velocidades de propagação muito superiores às verificadas nos ensaios.

Refletindo sobre as velocidades de propagação obtidas ao longo deste estudo, podemos considerar que algumas terão problemas de escala. Tendo em conta que foram realizadas em média escala, e que dificilmente seriam extrapoladas para acontecimentos reais, pois as velocidades tiveram valores muito elevados. Esta questão necessita de ser atentamente revista.

No futuro, seria interessante aprofundar os conhecimentos sobre este tipo de simulações numéricas, refinando os seus parâmetros para que possam ser criados modelos de análise e de comparação para outros casos existentes, melhorando a capacidade de previsão para os incêndios. A investigação com recurso a este método é muito benéfica pois pode revelar muitos fenómenos intrínsecos ao comportamento do fogo, que de outra forma não conseguiriam ser aferidos.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Chandler, C., Cheney, P., Thomas, P., Trabaud, L., & Williams, D. (1983). *Fire in forestry* vol. 1. New York, *United States: John Wiley and Sons*.
- Abouali, A. (2017). Fire ROS Calculator. <https://doi.org/10.5281/ZENODO.898160>
- Font, R., Conesa, J. A., Moltó, J., & Muñoz, M. (2009). Kinetics of pyrolysis and combustion of pine needles and cones. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 85(1–2), 276–286. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2008.11.015>
- Forney, G. (2010). Smokeview – A Tool for Visualizing Fire Dynamics Simulation Data. Volume I: User’s Guide, I. Retrieved from [http://fds-smv.googlecode.com/svn/trunk/FDS/trunk/Manuals/%5CnAll%7B\\_%7DPDF%7B\\_%7DFiles/SMV%7B\\_%7DUser%7B\\_%7DGuide.pdf](http://fds-smv.googlecode.com/svn/trunk/FDS/trunk/Manuals/%5CnAll%7B_%7DPDF%7B_%7DFiles/SMV%7B_%7DUser%7B_%7DGuide.pdf)
- Incropera, F. P., Bergman, T. L., Lavine, A. S., & DeWitt, D. P. (2011). *Fundamentals of Heat and Mass Transfer. US Patent 5,328,671*. <https://doi.org/10.1073/pnas.0703993104>
- Maynard, T., Princevac, M., & Weise, D. R. (2016). A study of the flow field surrounding interacting line fires. *Journal of Combustion*, 2016. <https://doi.org/10.1155/2016/6927482>
- Mcgrattan, K., & Mcdermott, R. (2016). Fire Dynamics Simulator User’s Guide. <https://doi.org/10.6028/NIST.SP.1019>
- Raposo, Jorge; Viegas, Domingos X.; Xie, Xiaodong; Almeida, Miguel; Naian, L. (2014). Analysis of the jump fire produced by the interaction of two oblique fire fronts: Comparison between laboratory and field cases, 4–6.
- Raposo, J. R. N. R. (2016). *Extreme Fire Behaviour Associated to Merging of Two Linear Fire Fronts*. Universidade de Coimbra.
- Santoni, P. A., Bartoli, P., Simeoni, A., & Torero, J. L. (2014). Bulk and particle properties of pine needle fuel beds – influence on combustion. *International Journal of Wildland Fire*, 23(8), 1076–1086. <https://doi.org/10.1071/WF13079>
- Thomas, C. M., Sharples, J. J., & Evans, J. P. (2017). Modelling the dynamic behaviour of junction fires with a coupled atmosphere-fire model. *International Journal of Wildland Fire*, 26(4), 331–344. <https://doi.org/10.1071/WF16079>

- Viegas, Domingos Xavier; Rossa, Carlos; Ribeiro, L. M. (2011). *Incêndios Florestais*. Verlag Dashöfer Portugal.
- Viegas, D., Raposo, J., & Figueiredo, A. (2013). Preliminary analysis of slope and fuel bed effect on jump behavior in forest fires. *Procedia Engineering*, 62, 1032–1039. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2013.08.158>
- Viegas, D. X. (n.d.). *Extreme Fire Behaviour*, (v).
- Viegas, D. X. (2005). A mathematical model for forest fires blowup. *Combustion Science and Technology*, 177(1), 27–51. <https://doi.org/10.1080/00102200590883624>
- Viegas, D. X. (2006). Modelação do Comportamento do Fogo. In J. S. Pereira (Ed.), *Incêndios Florestais em Portugal: Caracterização, Impactes e Prevenção* (p. 288). Lisboa: ISA Press.
- Viegas, D. X. (2006). Parametric study of an eruptive fire behaviour model. *International Journal of Wildland Fire*, 15(2), 169–177. <https://doi.org/10.1071/WF05050>
- Viegas, D. X., & Neto, L. P. C. (1991). Wall shear-stress as a parameter to correlate the rate of spread of a wind induced forest fire. *International Journal of Wildland Fire*, 1(3), 177–188. <https://doi.org/10.1071/WF9910177>

