



FCTUC FACULDADE DE CIÊNCIAS
E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE COIMBRA

DEPARTAMENTO DE
ENGENHARIA MECÂNICA

Modelação Experimental e Numérica de Incêndios em Topografia Complexa

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

Experimental and Numerical Modeling of Fires in Complex Topography

Autor

Laura da Costa Carvoeira

Orientadores

Domingos Xavier Filomeno Carlos Viegas

Jorge Rafael Nogueira Raposo

Júri

Presidente	Professor Doutor António Manuel Gameiro Lopes Professor Auxiliar da Universidade de Coimbra
Orientador	Professor Doutor Jorge Rafael Nogueira Raposo Professor Auxiliar da Universidade de Coimbra
Vogais	Professor Doutor Miguel Rosa Oliveira Panão Professor Auxiliar da Universidade de Coimbra

Colaboração Institucional



**Associação para o
Desenvolvimento da
Aerodinâmica
Industrial**



**Centro de Estudos
sobre Incêndios
Florestais**

Coimbra, setembro, 2018

“I believe in hard work and luck, and that the first often leads to the second.”

J.K. Rowling

Agradecimentos

A elaboração do presente trabalho apenas foi possível graças ao contributo de várias pessoas e entidades que, mesmo num curto espaço, não posso deixar de prestar o meu reconhecimento.

Em primeiro lugar agradecer à Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, nomeadamente ao Departamento de Engenharia Mecânica, por ter sido uma verdadeira casa durante 5 anos e onde foi possível a realização deste trabalho. Para além disso, agradecer ao Laboratório de Computação Avançada (LCA) por ter providenciado os recursos necessários à realização deste trabalho.

Ao Professor Doutor Domingos Xavier Viegas e ao Doutor Jorge Raposo por me terem aceitado como sua orientanda e por me terem integrado na sua equipa ao longo de 7 meses.

À equipa do CEIF (Centro de Estudos sobre Incêndios Florestais), em especial ao Gonçalo Rosa e ao Nuno Luís por toda a ajuda prestada nos ensaios experimentais.

Ao Abdelrahman Abouali por toda a orientação dada, todos os conhecimentos transmitidos e toda a ajuda prestada, quer nos ensaios experimentais, quer nas simulações, assim como nas respetivas análises de resultados.

À Carolina, que ao longo de 5 anos foi uma verdadeira companheira e que nesta fase nunca o deixou de ser.

Ao Gonçalo, por acreditar e confiar em mim mais do que ninguém.

À minha família, aos meus pais, avós e tias, por serem a base de tudo isto. Por serem os principais patrocinadores e apoiantes em momentos fáceis e difíceis.

Resumo

O presente trabalho tem como principal objetivo o estudo do comportamento extremo do fogo em duas colinas, tendo em consideração o fenómeno já estudado por vários autores e conhecido *fire channelling*. Este fenómeno acontece na face a sotavento da colina e é caracterizado pelo facto de o fogo exibir uma rápida propagação na direção transversal à do vento, para além da rápida propagação na direção do vento.

O estudo foi repartido em duas fases: a realização de ensaios experimentais e a criação de simulações numéricas.

Na primeira fase, foram realizados nove ensaios experimentais no túnel de vento do Laboratório de Estudos sobre Incêndios Florestais (LEIF), que tiveram como principal objetivo o estudo da influência, no comportamento do fogo, da alteração de alguns parâmetros tais como: os ângulos de inclinação das colinas, o ângulo entre a direção do vento e a linha do cume, o local de ignição e a existência de vento. Nestes ensaios, foram obtidas e analisadas as velocidades de propagação do fogo e tiradas algumas conclusões. Entre estas conclusões, está o facto de o fenómeno *fire channelling*, na primeira colina, não mostrar simetria quando existe um ângulo diferente de 90° entre a direção do vento e a linha do cume.

Na segunda fase, foram criadas simulações numéricas no programa *Fire Dynamics Simulator* (FDS) e que, fazendo a comparação com testes experimentais realizados anteriormente na Universidade de Coimbra, foram tiradas algumas conclusões acerca da sua veracidade. Os resultados destas simulações são apresentados como um mapa de propagação que na sua criação tem como base as frentes de fogo.

Palavras-chave: Comportamento Extremo do Fogo, *Fire Channelling*, Modelação do Fogo, Velocidade de Propagação do Fogo, Frente de Fogo.

Abstract

The main objective of this work is the study of the extreme behavior of fire in two hills, considering the phenomenon already studied by many authors and known as fire channelling. This phenomenon occurs on the leeward face of the hill and is characterized by the fact that the fire exhibits a rapid propagation in the transverse direction of the wind, in addition to the rapid propagation towards the wind.

The study was divided into two phases: experimental tests and the creation of numerical simulations.

In the first phase, nine experimental tests were carried out in the wind tunnel of Laboratório de Estudos sobre Incêndios Florestais (LEIF), whose main objective was to study the influence of changes in some fire parameters such as: the slope angles of the hills, the angle between the direction of the wind and the ridge line, the location of ignition and the existence of wind. In these tests, fire propagation velocities were obtained and analyzed. Among these conclusions is the fact that the fire channeling phenomenon on the first hill does not show symmetry when there is a different angle of 90° between the direction of the wind and the ridge line.

In the second phase, numerical simulations were created in the Fire Dynamics Simulator (FDS) program and, after comparing them with experimental tests carried out previously at the University of Coimbra, some conclusions were drawn about their veracity. The results of these simulations are presented as a propagation map based on fire fronts.

Keywords Extreme Fire Behaviour, Fire Channelling, Fire Modelling, Fire Rate of Spread, Fire Front.

Índice

Índice de Figuras	ix
Índice de Tabelas	xi
Simbologia e Siglas	xiii
Simbologia.....	xiii
Siglas	xiv
1. Introdução.....	1
1.1. Motivação	1
1.2. Problema em Estudo	1
1.3. Estado da Arte.....	2
2. Modelação Experimental.....	5
2.1. Caso de Estudo.....	5
2.1.1. Primeira Configuração.....	5
2.1.2. Segunda Configuração.....	7
2.1.3. Terceira Configuração	8
2.2. Metodologia.....	9
2.2.1. Estruturas para a Realização dos Ensaios.....	9
2.2.2. Propriedades do Combustível.....	10
2.2.3. Ferramentas para o Cálculo da Velocidade de Propagação.....	11
2.3. Análise de Resultados e Discussão.....	15
2.3.1. Efeito da Alteração dos Ângulos α_1 e α_2	15
2.3.2. Efeito da Alteração do Ângulo ϕ	17
2.3.3. Efeito da Alteração do Ângulo γ	24
2.3.4. Efeito da Existência de Vento	30
2.3.5. Efeito da Variação do Local de Ignição	32
3. Modelação Numérica.....	35
3.1. Caso de Estudo.....	35
3.2. Metodologia – <i>Fire Dynamics Simulator</i>	36
3.2.1. Malha Computacional	37
3.2.2. Domínio e Condições de Fronteira.....	37
3.2.3. Combustível.....	38
3.2.4. Sensores.....	39
3.3. Análise de Resultados e Discussão.....	40
4. Conclusões.....	43
Referências Bibliográficas.....	47
Apêndice A.....	49
Apêndice B.....	51

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Vorticidade estudada por Sharples.....	3
Figura 2 - Vista superior da Configuração 1.....	6
Figura 3 - Vista lateral da Configuração 1.....	6
Figura 4 - Vista superior da Configuração 2.....	7
Figura 5 - Vista superior da Configuração 3.....	8
Figura 6 - Túnel de vento do LEIF com colinas.....	10
Figura 7 - Estrutura redonda junta à colina.....	10
Figura 8 - Colina coberta com caruma.....	11
Figura 9 - Exemplo de uma imagem retirada de um dos vídeos filmados pela câmara de infravermelhos (2D28).....	12
Figura 10 - Direções da propagação do fogo.....	12
Figura 11 - Alvo de calibração.....	13
Figura 12 - Mesa para o cálculo do R_0	14
Figura 13 - Fenómeno <i>Fire Channelling</i> (2D12.27.20).....	15
Figura 14 - $R'_{\text{médio}}$ para diferentes valores de α_1 nas direções LDS1 e LLA1.....	16
Figura 15 - $R'_{\text{médio}}$ para diferentes valores de α_1 e α_2 para as direções WUS1 e WUS2.....	16
Figura 16 - Mapa de propagação 2D10 (40s).....	17
Figura 17 - Mapa de propagação 2D12 (35s).....	17
Figura 18 - $R'_{\text{médio}}$ para diferentes valores de ϕ nas direções LDS1 e LLA1.....	18
Figura 19 - $R'_{\text{médio}}$ para diferentes valores de ϕ nas direções WUS1 e WUS2.....	19
Figura 20 - Mapa de propagação 2D16 (30s) (Abouali, Raposo, and Viegas 2018).....	19
Figura 21 - Mapa de propagação 2D26 (20s).....	20
Figura 22 - Mapa de propagação 2D27 (30s).....	20
Figura 23 - Distância adimensional vs tempo para diferentes ângulos ϕ para os testes 2D26.10 e 2D27.20 nas direções WLR1, WLL1, LLR1 e LLL1.....	21
Figura 24 - Velocidade de propagação adimensional vs tempo para diferentes ângulos ϕ para os testes 2D26.10 e 2D27.20 nas direções WLR1, WLL1, LLR1 e LLL1.....	22
Figura 25 - $R'_{\text{médio}}$ em dois tipos de comportamento diferentes no espaço entre as duas colinas.....	23
Figura 26 - Dois tipos de comportamento do fogo distintos no teste 2D26.10.....	23
Figura 27 - $R'_{\text{médio}}$ para diferentes valores de γ nas direções WLA1 e LDS1.....	24
Figura 28 - Mapa de propagação 2D28 (30s).....	25
Figura 29 - Mapa de propagação 2D30 (30s).....	25

Figura 30 - Distância adimensional vs tempo para diferentes ângulos γ para os testes 2D30.5, 2D28.10 e 2D29.20 nas direções WLR1, WLL1, LLR1 e LLL1	26
Figura 31 - Velocidade de propagação adimensional vs tempo para diferentes ângulos γ para os testes 2D30.5, 2D29.10 e 2D30.20 nas direções WLR1, WLL1, LLR1 e LLL1	27
Figura 32 - Distância adimensional vs tempo para diferentes ângulos γ para os testes 2D30.5, 2D28.10 e 2D29.20 na direção WUS2.....	28
Figura 33 - Velocidade de propagação adimensional vs tempo para diferentes ângulos γ para os testes 2D30.5, 2D28.10 e 2D29.20 na direção WUS2.....	28
Figura 34 - Rápida propagação na face WH2 no teste 2D30.5	29
Figura 35 - R' médio para as situações com vento e sem vento em várias direções de propagação	30
Figura 36 - Mapa de propagação 2D31 (30s).....	31
Figura 37 - Mapa de propagação 2D32 (30s).....	31
Figura 38 - Distância adimensional vs tempo para testes com diferentes locais de ignição na direção WUS2	32
Figura 39 - Velocidade de propagação adimensional vs tempo para testes com diferentes locais de ignição na direção WUS2	33
Figura 40 - Disposição das colinas.....	35
Figura 41 - Posição das colinas no domínio.....	38
Figura 42 - Sensores nas colinas	40
Figura 43 - 2D10. Experimental (20s) vs. Simulação (10s).....	40
Figura 44 - 2D16. Experimental (30s) vs. Simulação (10s).....	41
Figura 45 - 2D24. Experimental (30s) vs. Simulação (10s).....	41
Figura 46 - 2D25. Experimental (20s) vs. Simulação (10s).....	41
Figura 47 - Mapa de propagação 2D29 (30s).....	49
Figura 48 - Mapa de propagação 2D3	51
Figura 49 - Mapa de propagação 2D12	51

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Testes a ser realizados para a Configuração 1.....	7
Tabela 2 - Testes a ser realizados para a Configuração 2.....	8
Tabela 3 - Testes a serem realizados para a Configuração 3.....	9
Tabela 4 - Testes numéricos e parâmetros.....	36

SIMBOLOGIA E SIGLAS

Simbologia

D – distância de propagação

D' – distância de propagação adimensional

D₀ – distância básica de propagação

R – velocidade de propagação

R' – velocidade de propagação adimensional

R₀ – velocidade básica de propagação

t₀ – unidade de tempo (1 segundo)

U – vento

V_x – velocidade no eixo OX

V_z – velocidade no eixo OZ

α – ângulo de inclinação

α_1 – ângulo de inclinação da face a barlavento da primeira colina

α_2 – ângulo de inclinação da face a barlavento da segunda colina

β_1 – ângulo de inclinação da face a sotavento da primeira colina

β_2 – ângulo de inclinação da face a sotavento da segunda colina

γ – ângulo entre a linha do cume e a linha perpendicular à direção do vento para a terceira configuração

ω_p – combinação das componentes ω_x e ω_z

ω_x – vorticidade no eixo OX

ω_y – vorticidade no eixo OY

ω_z – vorticidade no eixo OZ

ϕ – ângulo entre a linha do cume e a linha perpendicular à direção do vento para a segunda configuração

Siglas

ADAI – Associação para o Desenvolvimento da Aerodinâmica Industrial

CEIF – Centro de Estudos sobre Incêndios Florestais

CFD – *Computational Fluid Dynamics*

CPU – *Central Processing Unit*

FCTUC – Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra

FDS – *Fire Dynamics Simulator*

LCA – Laboratório de Computação Avançada

LEIF – Laboratório de Estudos sobre Incêndios Florestais

MPI – *Message Passing Interface*

ROS – *Rate of Spread*

1. INTRODUÇÃO

1.1. Motivação

Nos últimos anos, têm vindo a ocorrer anualmente centenas de incêndios florestais em Portugal, que afetam não só a fauna e a flora, mas também fábricas, habitações e as próprias pessoas. Desde o ano 2000 até 2017, verificou-se que estes incêndios tiraram a vida a mais de 160 civis. O ano de 2017 foi o ano mais trágico de todos, como se pôde verificar pelas consequências dos incêndios de 17 de junho e 15 de outubro, como é exemplo o elevado número de vidas perdidas. Esta foi a motivação principal deste estudo, que pretende dar continuidade aos trabalhos já realizados na Universidade de Coimbra, onde o principal objetivo é analisar o comportamento extremo do fogo, porque acontece, se é possível prevê-lo e, desta forma, minimizá-lo, para melhorar a segurança pessoal.

1.2. Problema em Estudo

Este estudo vai ter por base a análise do comportamento extremo do fogo designado por *fire channelling*. Este comportamento já foi analisado por alguns autores, no entanto apenas para uma colina. Assim, o objetivo desta dissertação é estudar este comportamento extremo do fogo, mas para uma configuração mais próxima da realidade, analisando a propagação do fogo em duas colinas. O estudo será, então, dividido em duas partes. Na primeira fase deste estudo serão realizados testes experimentais, para três tipos de configuração com duas colinas. Assim, o comportamento do fogo e as velocidades de propagação em direções específicas serão avaliados e tiradas algumas conclusões. Na segunda fase serão criados modelos de simulação que expliquem o comportamento do fogo, de forma a que seja possível prevê-lo em situações de risco. Estes modelos de simulação irão (ou não) ser validados por testes experimentais, que já foram realizados outrora na Universidade de Coimbra.

1.3. Estado da Arte

No que respeita ao estudo do comportamento do fogo em topografia complexa, vários estudos referem a existência de um processo designado por *fire channelling*. Este processo é caracterizado pelo facto de o fogo exibir uma rápida propagação na direção transversal à do vento, para além da usual rápida propagação na direção do vento. *Fire channelling* acontece na face a sotavento da colina quando ocorre a propagação de fogo na face a barlavento, ou na própria face a sotavento, até à linha do cume e, depois disso, o fogo começa a propagação paralelamente a essa linha. Este comportamento, referido primeiramente por McRae (2004), está relacionado com o facto de na face a sotavento ocorrer uma separação do escoamento atmosférico causada pela vorticidade existente.

Um estudo baseado nos incêndios de janeiro de 2003 na Austrália (Sharples, McRae, and Wilkes 2012), concluiu que a formação da vorticidade que causa a separação depende da rugosidade e inclinação do terreno, assim como da velocidade do vento e da estabilidade da atmosfera. Para além disso foi concluído que três das condições necessárias para que ocorra o fenómeno de *fire channelling* são: inclinações do terreno maiores que 25° e ângulos de até 30° entre o vento e o aspeto topográfico.

Num estudo experimental realizado numa colina 2D (Raposo et al. 2015) testado num túnel de vento, a propagação do fogo na face a barlavento e a sua propagação lateral na linha do cume foram analisadas. Este estudo mostrou que a propagação lateral acontecia no meio da linha do cume e espalhava-se para duas direções (esquerda e direita). Os testes realizados confirmaram uma boa simetria desta propagação.

As características do escoamento complexo numa colina 2D foram estudadas através de simulações (Simpson et al. 2013). Foi demonstrado, então, que a separação do escoamento provocava uma vorticidade horizontal que, ao interagir com a pluma de fogo, gerava vorticidade vertical, e que esta era responsável pelo fenómeno da propagação lateral do fogo. Este fenómeno foi explicado por Sharples que fez uma análise da vorticidade perto da linha do cume.

Sharples estudou a vorticidade formada devido à propagação do fogo, tanto no lado a barlavento como no lado a sotavento, como está representado na Figura 1. Considerando uma colina 2D, cuja linha do cume é perpendicular à direção do vento, podemos tirar algumas conclusões. O vento, cuja direção é positiva no eixo OX e cuja

velocidade é designada por V_x , gera uma vorticidade horizontal ω_y devido à separação do escoamento no lado a sotavento da linha do cume. A interação do escoamento separado com a pluma de fogo que se desloca no eixo OZ, V_z , induz as componentes ω_x e ω_z da vorticidade. Estas componentes combinam-se, produzindo a vorticidade ω_p , representada na Figura 1, que é responsável pelo fenómeno da propagação lateral. Para além disso, é demonstrado que a existência deste fenómeno está mais relacionada com a vorticidade vertical, ω_z , do que com a vorticidade longitudinal, ω_x , e, por esse motivo, Sharples refere que “a transferência de calor por convecção conduzida pela vorticidade vertical é o mecanismo chave para a propagação lateral [do fogo]”. Este comportamento já havia sido confirmado por simulações realizadas anteriormente (Simpson et al. 2013).

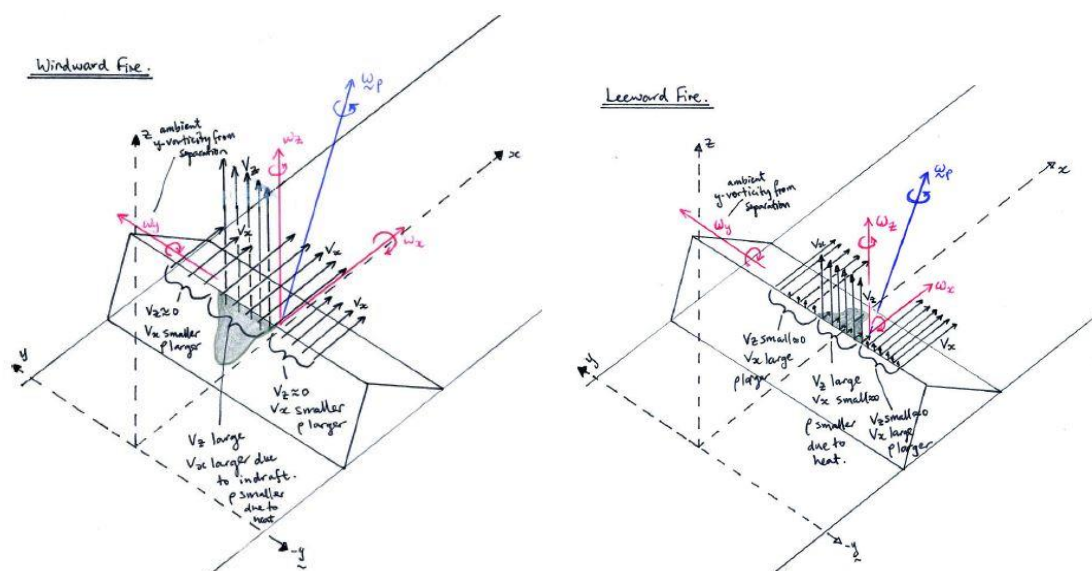


Figura 1 - Vorticidade estudada por Sharples.

2. MODELAÇÃO EXPERIMENTAL

Os ensaios experimentais incidem no estudo do comportamento do fogo em duas colinas. Estes ensaios foram realizados no túnel de vento existente no LEIF. Desta forma, serão calculadas as velocidades de propagação em determinadas direções, através de um programa, e feitas comparações. Para além disso, serão criados mapas de propagação que mostram onde se localiza a frente de fogo ao fim de um determinado tempo.

2.1. Caso de Estudo

De forma a estudar o comportamento do fogo em duas colinas, foram escolhidos 3 tipos de configurações e realizados um total de 9 testes. Cada uma das configurações vai ser descrita nas secções seguintes. Em todas as configurações as colinas têm um comprimento de 4 metros e duas faces: a face a barlavento tem uma largura de 1,5 metros e a face a sotavento tem uma largura de 1 metro.

A nomenclatura dos testes seguiu a seguinte regra: 2DN, onde 2D refere que estamos perante um teste numa colina 2D e N é um número sequencial. Como será visto, a numeração dos testes não irá começar pelo número 1 pois alguns testes com este tipo de colinas já foram realizados na Universidade de Coimbra e a sequência foi continuada. Para além disto, e para facilitar a identificação dos testes na Análise de Resultados, ainda será adicionado um parâmetro característico de cada teste ao nome.

2.1.1. Primeira Configuração

Na primeira configuração as duas colinas são colocadas paralelas entre si e perpendiculares à direção do vento, como mostra a Figura 2. O centro das colinas coincide com o centro do túnel de vento. A Figura 2 representa a vista superior das duas colinas, sendo que a primeira colina está representada a cor vermelha e a segunda colina a cor preta. A letra U representa o vento. As siglas inscritas em cada uma das faces representam essa mesma face:

- WH1 – *Windward Face of Hill 1* – face a barlavento da primeira colina.
- LH1 – *Leeward Face of Hill 1* – face a sotavento da primeira colina.
- WH2 – *Windward Face of Hill 2* – face a barlavento da segunda colina.

- LH2 – *Leeward Face of Hill 2* – face a sotavento da segunda colina.

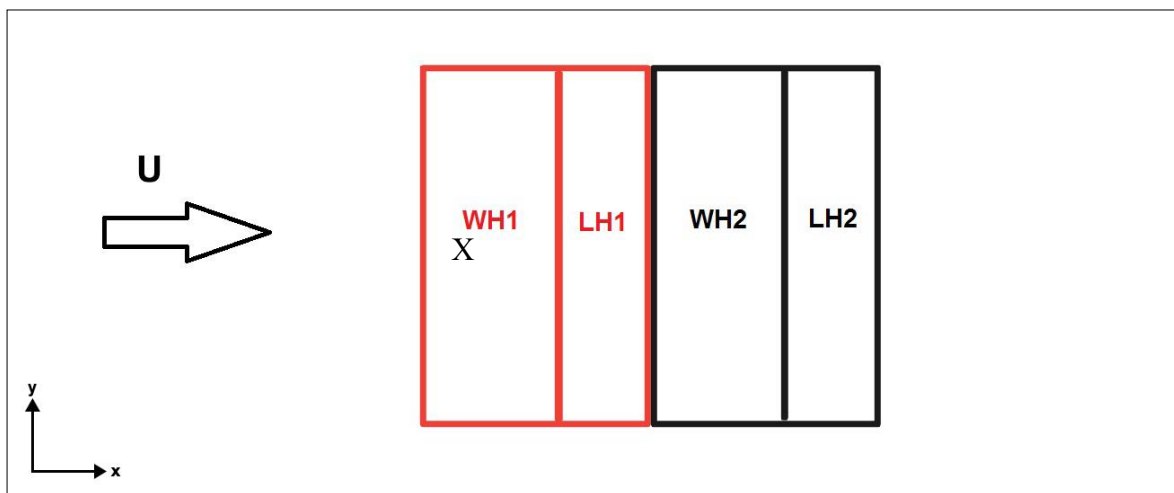


Figura 2 - Vista superior da Configuração 1

A Figura 3 mostra a vista lateral das colinas onde é possível ver os símbolos representativos dos ângulos de inclinação das colinas.

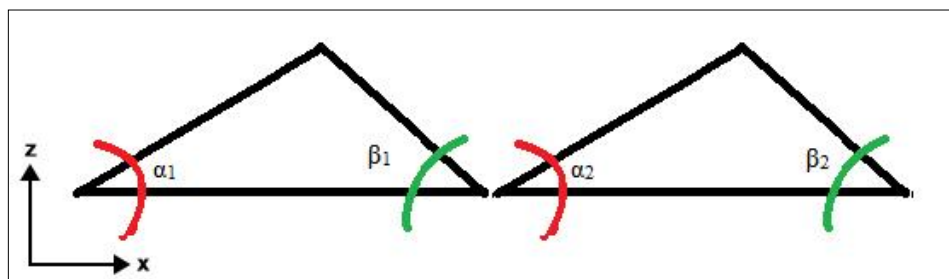


Figura 3 - Vista lateral da Configuração 1

Assim, na Figura 3, α_1 corresponde ao ângulo de inclinação da face a barlavento da primeira colina e β_1 corresponde ao ângulo de inclinação da face a sotavento da primeira colina. Os ângulos α_2 e β_2 correspondem aos mesmos ângulos, mas na segunda colina.

Para esta configuração, onde dois testes vão ser realizados, apenas os ângulos de inclinação das colinas vão ser alterados. A ignição vai ser feita em WH1, o módulo da velocidade do vento será 2 m/s e as colinas vão ser posicionadas lado a lado, sem espaço vazio entre elas. Na Tabela 1 está representado os testes que serão realizados. Quando é referido que a ignição é realizada na face WH1 isto significa que o ponto de ignição é feito a 0,5 m da linha de base e a 1 m da linha do cume, como mostra o X representado na Figura 2. Este parâmetro é válido para todas as configurações.

Tabela 1 - Testes a ser realizados para a Configuração 1

Teste	α_1, α_2
2D10	20°,27°
2D12	27°,20°

2.1.2. Segunda Configuração

Nesta configuração as colinas continuam paralelas entre si, no entanto já não são perpendiculares à direção do vento, como acontecia na primeira configuração. O centro das colinas coincide com a linha média do túnel de vento. Na Figura 4 é possível ver a vista superior, onde o ângulo ϕ aparece representado. A colina a vermelho representa a primeira colina e a colina a preto representa segunda colina. As siglas usadas na Secção 2.1.1 para denominar as faces das colinas continuam válidas para esta configuração e para a configuração seguinte, assim como para os ângulos de inclinação das colinas.

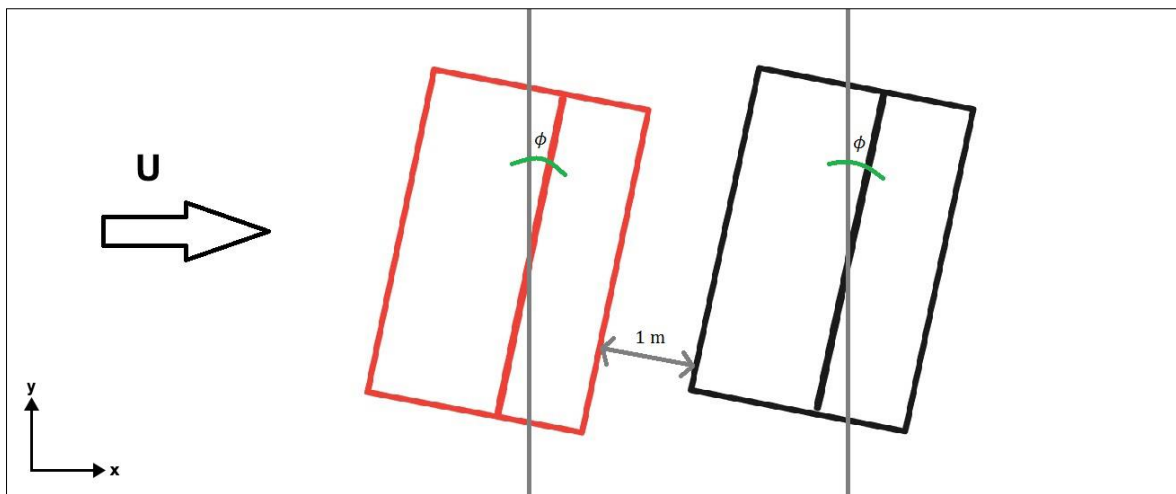


Figura 4 - Vista superior da Configuração 2

Para esta configuração vão ser realizados 2 testes. Em ambos os testes, a ignição é feita em WH1, o módulo da velocidade do vento é 2 m/s, os ângulos de inclinação α_1 e α_2 são ambos 20° e a distância entre as colinas é 1 m, como representado na Figura 4. Apenas o ângulo ϕ será alterado em ambos os testes. A Tabela 2 apresenta os testes que vão ser realizados para esta configuração:

Tabela 2 - Testes a ser realizados para a Configuração 2

Teste	ϕ
2D26	10°
2D27	20°

2.1.3. Terceira Configuração

Na última configuração, as colinas não se encontram paralelas entre si, nem perpendiculares em relação à direção do vento. O centro das colinas coincide com a linha média do túnel de vento. A Figura 5 mostra a posição das colinas e o ângulo γ . A colina a vermelho representa a primeira colina e a colina a preto representa a segunda colina.

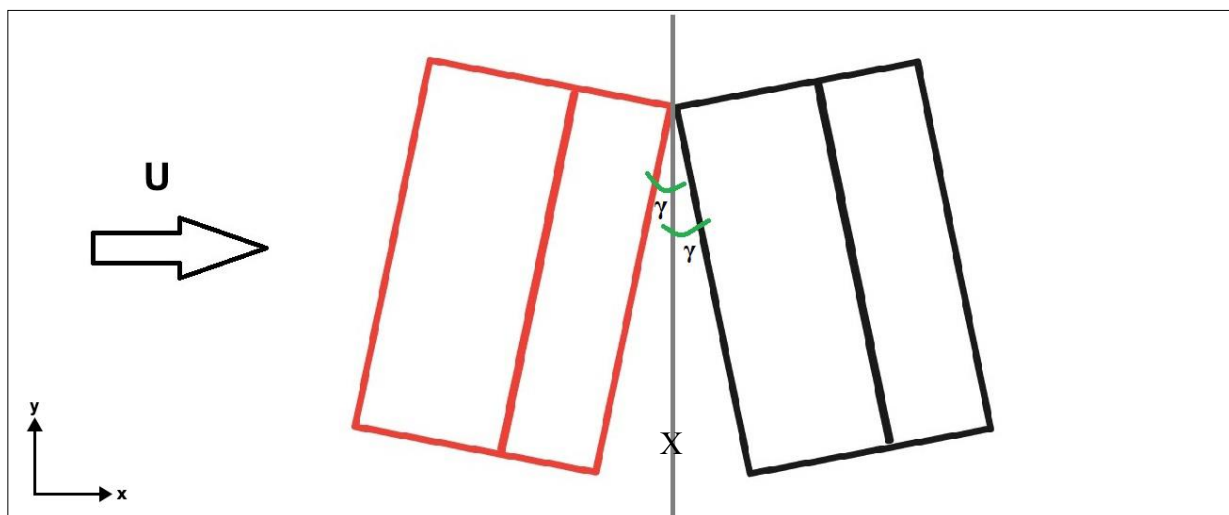


Figura 5 - Vista superior da Configuração 3

Nesta configuração realizar-se-ão 5 testes, onde, entre eles, se faz variar o ângulo γ , o local de ignição e a existência (ou não) de vento. Na Tabela 3 estão representados os testes a ser realizados. Mid indica que a ignição vai ser feita no espaço existente entre as duas colinas, sobre a linha representada a cinzento na Figura 5. O local de ignição está representado com um X na Figura 5.

Tabela 3 - Testes a serem realizados para a Configuração 3

Teste	Ignição	Vento [m/s]	γ
2D28	WH1	2	10°
2D29	WH1	2	20°
2D30	WH1	2	5°
2D31	Mid	2	10°
2D32	Mid	0	10°

2.2. Metodologia

2.2.1. Estruturas para a Realização dos Ensaios

Para a realização dos ensaios, foram utilizadas quatro estruturas de aço iguais. Cada uma destas estruturas tem duas faces, de forma a formarem uma colina, ambas com 2 metros de comprimento, no entanto com larguras diferentes: uma de 1,5 metros (barlavento) e outra de 1 metro (sotavento). Estas faces estão ligadas entre si por articulações que permitem alterar o ângulo de inclinação da colina. Estas estruturas são colocadas duas a duas, de maneira a que formem as duas colinas pretendidas com comprimento de 4 metros.

As colinas foram colocadas no túnel de vento existente no LEIF (Laboratório de Estudos Sobre Incêndios Florestais), que tem uma secção de 6 metros por 8 metros e uma altura de 2 metros, como se pode observar na Figura 6.



Figura 6 - Túnel de vento do LEIF com colinas

Como as estruturas são feitas para que o ângulo possa ser alterado, estas são abertas nos lados, o que pode fazer com que o escoamento se modifique e o comportamento do fogo seja, desta forma, alterado. Para evitar este problema, foram usadas estruturas redondas de forma a tornar o escoamento mais suave, como mostra a Figura 7.



Figura 7 - Estrutura redonda junta à colina

2.2.2. Propriedades do Combustível

As faces das colinas são cobertas com caruma (agulhas de pinheiro) de forma a funcionarem como combustível, como está apresentado na Figura 8. Esta camada de combustível é assumida como homogénea e uniforme em toda a sua distribuição.

A caruma tem uma carga de $0,6 \text{ kg/m}^2$ se estiver seca. No entanto, para evitar erros relativos à existência de humidade no combustível, a humidade existente é medida e é utilizada a seguinte relação:

$$\text{Massa total} = \text{área} \times \text{carga} \times \left(1 + \frac{\% \text{ humidade}}{100 - \% \text{ humidade}}\right) \quad (1)$$



Figura 8 - Colina coberta com caruma

2.2.3. Ferramentas para o Cálculo da Velocidade de Propagação

De forma a medir a velocidade de propagação (ROS – *rate of spread*), os ensaios experimentais foram gravados por uma câmara de infravermelhos, que deteta temperaturas na gama 0°C - 500°C, fixada no ponto mais alto possível. De seguida, foram retiradas imagens desses mesmos vídeos com um intervalo de tempo contante entre elas. Um exemplo destas imagens encontra-se apresentado na Figura 9. Estas imagens foram colocadas e analisadas no software *Fire ROS Calculator* (Abouali 2017), que, para além de realizar a calibração da câmara em utilização através de um alvo de calibração, representado na Figura 11, determina os valores da velocidade de propagação médio e dinâmico ao longo de determinadas direções, representadas na Figura 10 e descritas de seguida:

- WUS – *upslope over the windward face* – direção da velocidade de propagação do fogo durante a subida ao longo da face a barlavento. Direção de uma linha perpendicular à linha do cume, ao longo da face a barlavento.
- LDS – *downslope over the leeward face* – direção da velocidade de propagação do fogo durante a descida ao longo da face a sotavento. Direção de uma linha perpendicular à linha do cume, ao longo da face a sotavento.
- WL – *lateral over the windward face* – direção da velocidade de propagação lateral ao longo da face a barlavento. Direção de uma linha paralela à linha do cume. WLR

corresponde à propagação do lado direito (*right*) e WLL à propagação do lado esquerdo (*left*), ambas relativas ao sentido do vento. WLA corresponde à média entre a velocidade de propagação em WLR e WLL.

- LL – *lateral over the leeward face* – igual à WL mas na face a sotavento.
- GR – *ground* – direção da velocidade de propagação do fogo entre as duas colinas. GR_forward corresponde à propagação na direção do vento e GR_backward corresponde à direção oposta à do vento.

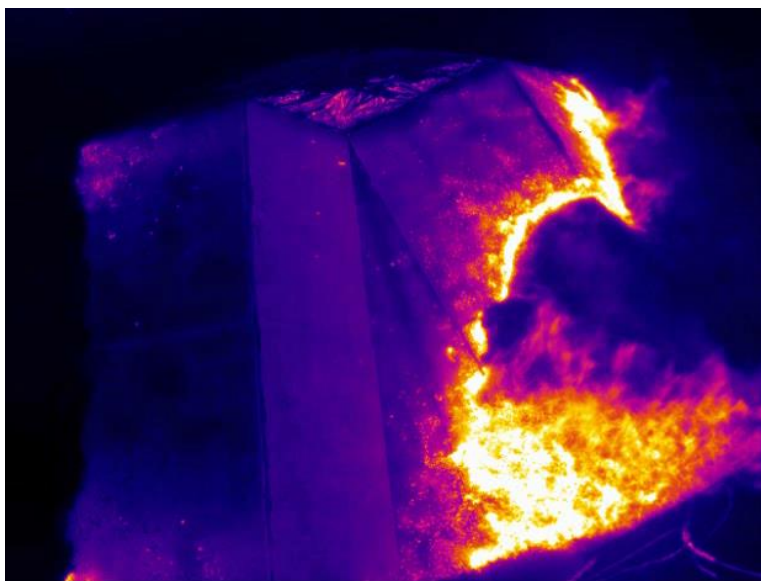


Figura 9 - Exemplo de uma imagem retirada de um dos vídeos filmados pela câmara de infravermelhos (2D28).

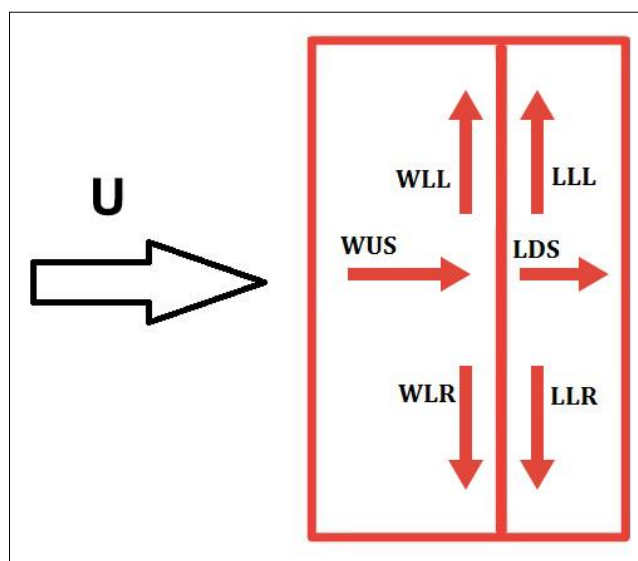


Figura 10 - Direções da propagação do fogo



Figura 11 - Alvo de calibração

A utilização do alvo de calibração é necessária para que o programa calcule corretamente as medidas das faces das colinas. Sabendo que o alvo de calibração possui vários quadrados pretos e brancos (visíveis na Figura 11), cada um com 250 mm de lado, o programa, *Fire ROS Calculator*, consegue calcular as medidas da face onde o alvo de calibração está colocado.

Como já referido anteriormente, a velocidade de propagação foi analisada como média e dinâmica. A velocidade média de propagação é definida como o declive da reta que relaciona as distâncias por onde o fogo passou (a cada distância é atribuído um tempo) e o intervalo de tempo entre essas distâncias (Viegas 2006). A velocidade dinâmica de propagação é definida da mesma forma (declive), mas apenas entre dois pontos consecutivos.

A velocidade básica de propagação, R_0 , é determinada sem vento e sem inclinação, para cada teste, usando a mesma carga de combustível referido anteriormente ($0,6 \text{ kg/m}^2$). Para o cálculo desta velocidade, foi usada uma mesa plana de 1 m^2 ($1 \text{ m} \times 1 \text{ m}$), com vários fios esticados e colocados por cima da camada de combustível, como é possível observar na Figura 12. Estes fios são colocados paralelamente uns aos outros e distanciados de 10 cm. O tempo que o fogo demora a propagar-se de um fio para o outro é contado. Assim calcula-se o declive da reta obtida por estes pontos (distâncias vs intervalos de tempo) e obtém-se o R_0 . Este R_0 é definido da seguinte forma:

$$R_0 = D_0 \times t_0 \quad (2)$$

Onde D_0 representa a distância básica de propagação e t_0 representa uma unidade de tempo (1 segundo).

De forma a minimizar alguns erros (Viegas et al. 1991), foi usado uma velocidade de propagação adimensional R' definida por:

$$R' = R / R_0 \quad (3)$$

Da mesma forma, adotou-se uma distância adimensional D' definida por:

$$D' = D / D_0 \quad (4)$$

Sabendo que $R_0 = D_0$ pois $t_0 = 1s$, a distância adimensional é obtida através da seguinte relação:

$$D' = D / R_0 \quad (5)$$



Figura 12 - Mesa para o cálculo do R_0

Para garantir que os resultados da velocidade de propagação eram os corretos, todos os testes foram repetidos duas vezes e os resultados foram comparados através de um intervalo de confiança (CI) em percentagem. Se este intervalo for inferior a 25%, o resultado é considerado válido. Caso contrário, é realizado um terceiro teste para verificar qual dos dois primeiros testes era o correto.

2.3. Análise de Resultados e Discussão

De forma a analisar os resultados obtidos na modelação experimental, criaram-se 5 grupos de testes distintos.

2.3.1. Efeito da Alteração dos Ângulos α_1 e α_2

Neste grupo serão analisados os testes experimentais **2D10** e **2D12**, de forma a perceber como é que os ângulos de inclinação das colinas α_1 e α_2 fazem alterar o comportamento do fogo, principalmente na segunda colina. O teste 2D10 tem como ângulos de inclinação 20° e 27° , para a primeira e segunda colina, respetivamente, e o teste 2D12 tem como ângulos de inclinação 27° e 20° . Para facilitar a identificação dos parâmetros, chamaremos aos testes 2D10 e 2D12, respetivamente, **2D10.20.27** e **2D12.27.20**.



Figura 13 - Fenómeno *Fire Channelling* (2D12.27.20)

O fenómeno *fire channelling*, que se visualiza na Figura 13, observou-se em ambos os casos e para ambas as colinas. A Figura 14 mostra a variação do $R'_{\text{médio}}$ com as diferentes direções de propagação do fogo na face a sotavento da primeira colina e ângulos α_1 .

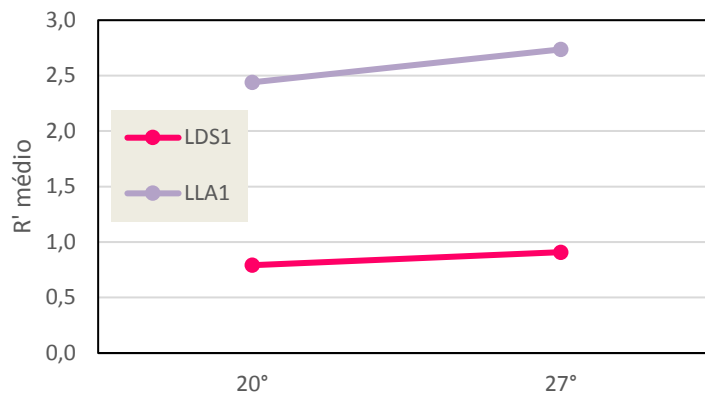


Figura 14 - R' médio para diferentes valores de α_1 nas direções LDS1 e LLA1

É possível observar que, para a primeira colina, os valores são muito semelhantes, embora com ângulos de inclinação diferentes. Para a segunda colina isto não acontece, como é possível observar na Figura 15, onde estão apresentados os resultados da velocidade média de propagação nas direções WUS1 e WUS2, para ambos os testes. Este comportamento também é possível de observar nos mapas de propagação representados na Figura 16 e na Figura 17.

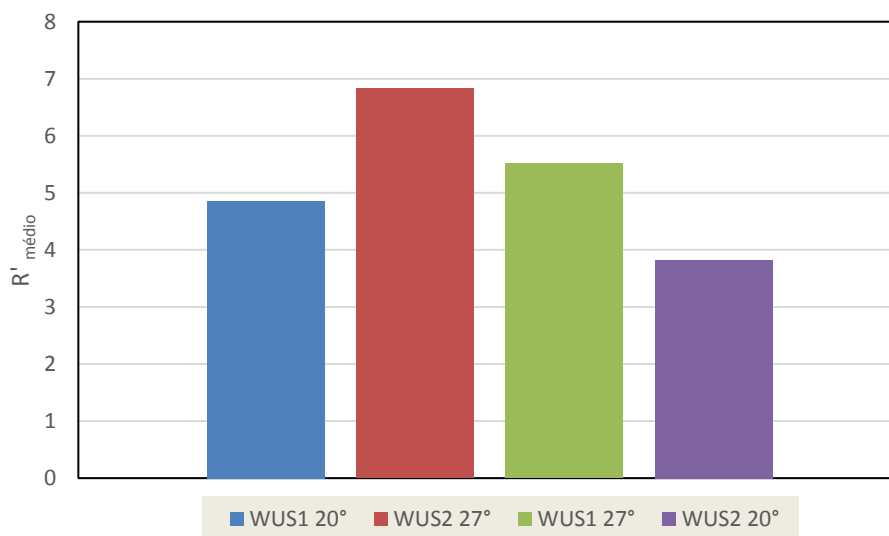


Figura 15 - R' médio para diferentes valores de α_1 e α_2 para as direções WUS1 e WUS2

Na Figura 15, as duas primeiras colunas correspondem ao teste 2D10.20.27, enquanto que as duas últimas correspondem ao teste 2D12.27.20. Verifica-se que as maiores velocidades de propagação acontecem quando o ângulo α aumenta. Para além disso, é possível concluir que a diferença entre as velocidades de propagação na segunda colina é

muito superior à diferença entre as velocidades de propagação na primeira colina, o que leva a concluir que a variação do ângulo α afeta mais o comportamento do fogo na segunda colina no que na primeira colina.

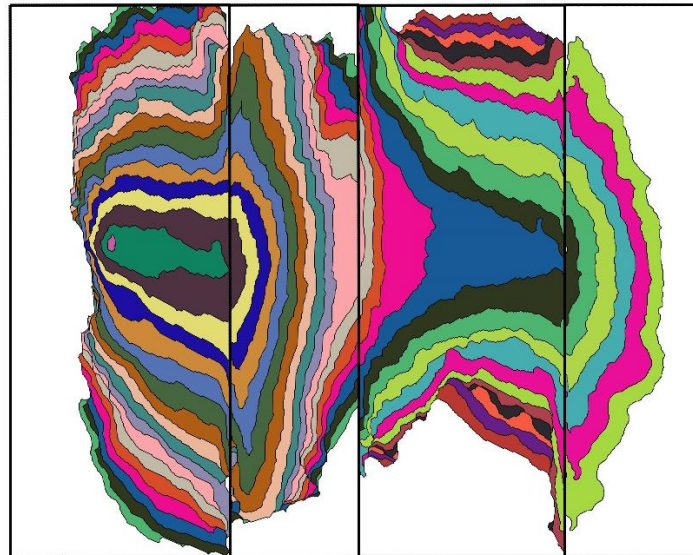


Figura 16 - Mapa de propagação 2D10 (40s)

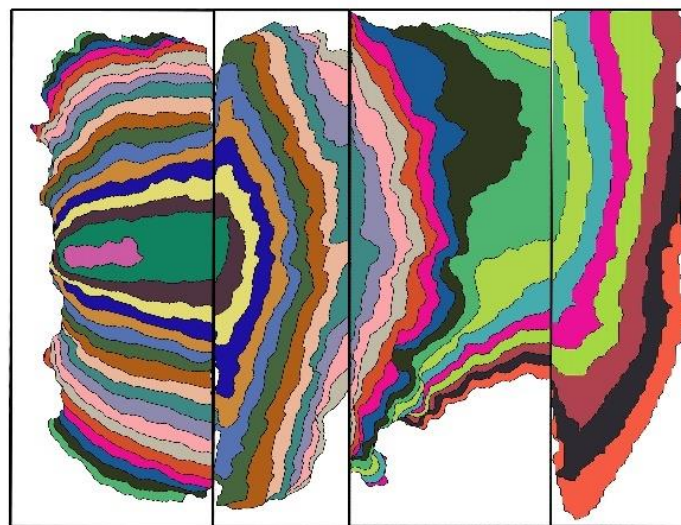


Figura 17 - Mapa de propagação 2D12 (35s)

2.3.2. Efeito da Alteração do Ângulo ϕ

No primeiro grupo de testes, serão analisados os testes **2D16**, **2D26** e **2D27**, de forma a perceber qual o comportamento no fogo nas colinas, tendo em conta a alteração do ângulo ϕ que a colina faz com a direção do vento (0° , 10° e 20° , respetivamente). O teste 2D16 não foi realizado para este estudo, no entanto já havia sido realizado anteriormente

(Abouali et al. 2018), e assim utilizaremos os valores obtidos para fazer a comparação. Os testes 2D26 e 2D27 seguem a configuração descrita na Secção 2.1.2. De forma a facilitar a identificação dos parâmetros, designam-se os testes **2D16**, **2D26** e **2D27**, respetivamente **2D16.0**, **2D26.10** e **2D27.20**.

Através da análise da propagação do fogo, observou-se que nos três testes acontecia o fenómeno *fire channelling* na primeira colina e que, embora diferente, a velocidade de propagação do fogo com a variação do ângulo ϕ era muito semelhante, como se pode ver na Figura 18, que relaciona a velocidade de propagação nas direções LDS1 e LLA1 com o ângulo ϕ .

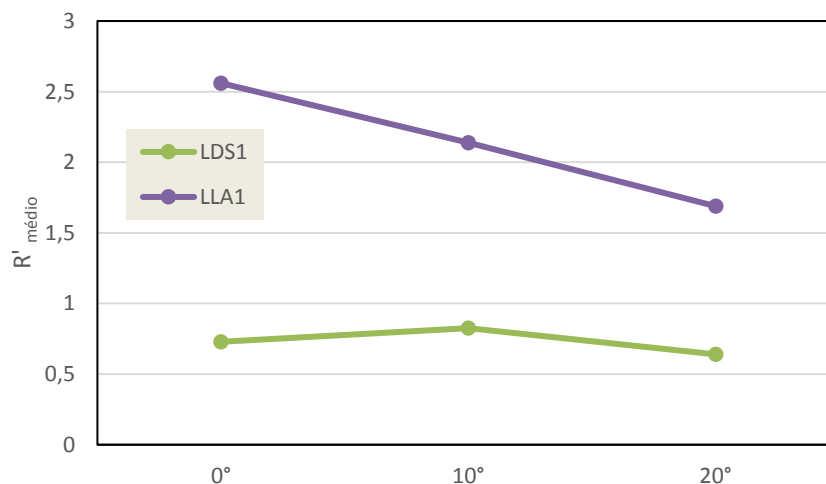


Figura 18 - R' médio para diferentes valores de ϕ nas direções LDS1 e LLA1

Através da análise da Figura 18, observamos que na direção LLA1 o ângulo ϕ influencia o comportamento do fogo, sendo a velocidade de propagação maior quanto menor for o ângulo. Concluimos assim que, na direção LDS1, o ângulo ϕ pouco altera o comportamento do fogo. Quanto ao comportamento do fogo nas faces a barlavento, observa-se que o comportamento na primeira colina é muito diferente do comportamento na segunda colina. Como podemos concluir da Figura 19, que compara a propagação do fogo na direção WH1 e WH2, a velocidade de propagação na segunda colina aumenta significativamente com a alteração do ângulo ϕ . Para além disto, conclui-se também que a diferença entre 0° e 10° é muito superior à diferença entre 10° e 20°.



Figura 19 - R' médio para diferentes valores de ϕ nas direções WUS1 e WUS2

Outro ponto importante que é necessário referir neste grupo é o comportamento lateral do fogo na primeira colina. Embora se tenham obtido valores semelhantes de velocidade de propagação em LLA1 para os três testes, a realidade é que os valores da propagação à esquerda e à direita diferem (tanto na face a barlavento como na face a sotavento). No teste 2D16.0 a propagação é simétrica, como podemos observar pela Figura 20.

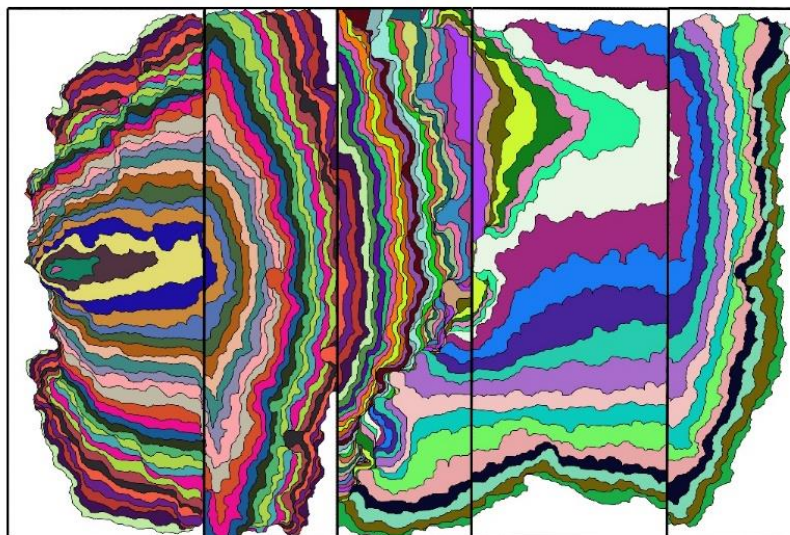


Figura 20 - Mapa de propagação 2D16 (30s) (Abouali et al. 2018)

No entanto, tanto para o teste 2D26.10 como para o teste 2D27.20, observou-se que a propagação lateral na face a barlavento da primeira colina acontece tendencialmente mais para o lado esquerdo do que para o lado direito, como se pode observar na Figura 21,

que apresenta o mapa de propagação do teste 2D26.10, e na Figura 22 que apresenta o mapa de propagação do teste 2D27.20, e que, na face a sotavento, a propagação lateral tem tendência a deslocar-se mais para o lado direito do que para o esquerdo.

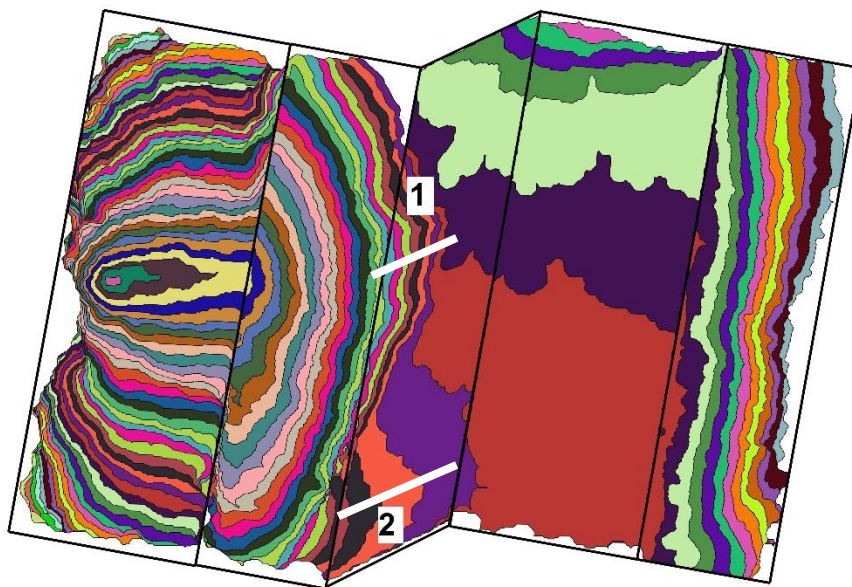


Figura 21 - Mapa de propagação 2D26 (20s)

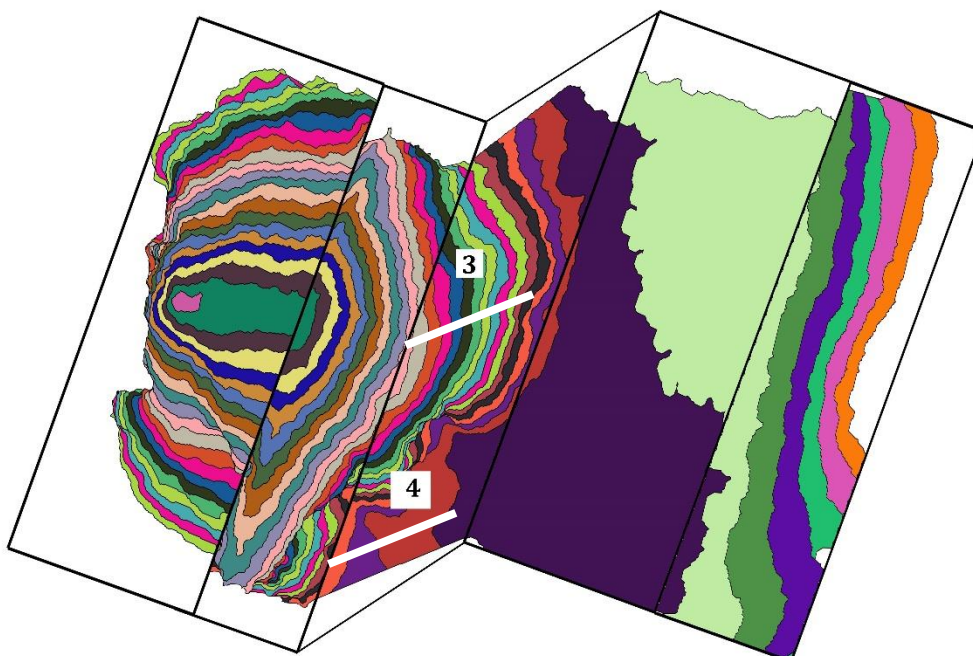


Figura 22 - Mapa de propagação 2D27 (30s)

Na Figura 23 estão representadas a distância adimensional em função do tempo e a velocidade de propagação adimensional em função do tempo, das direções WLR, WLL, LLR e LLL em ambas as colinas, para o teste 2D26.10 e 2D27.20.

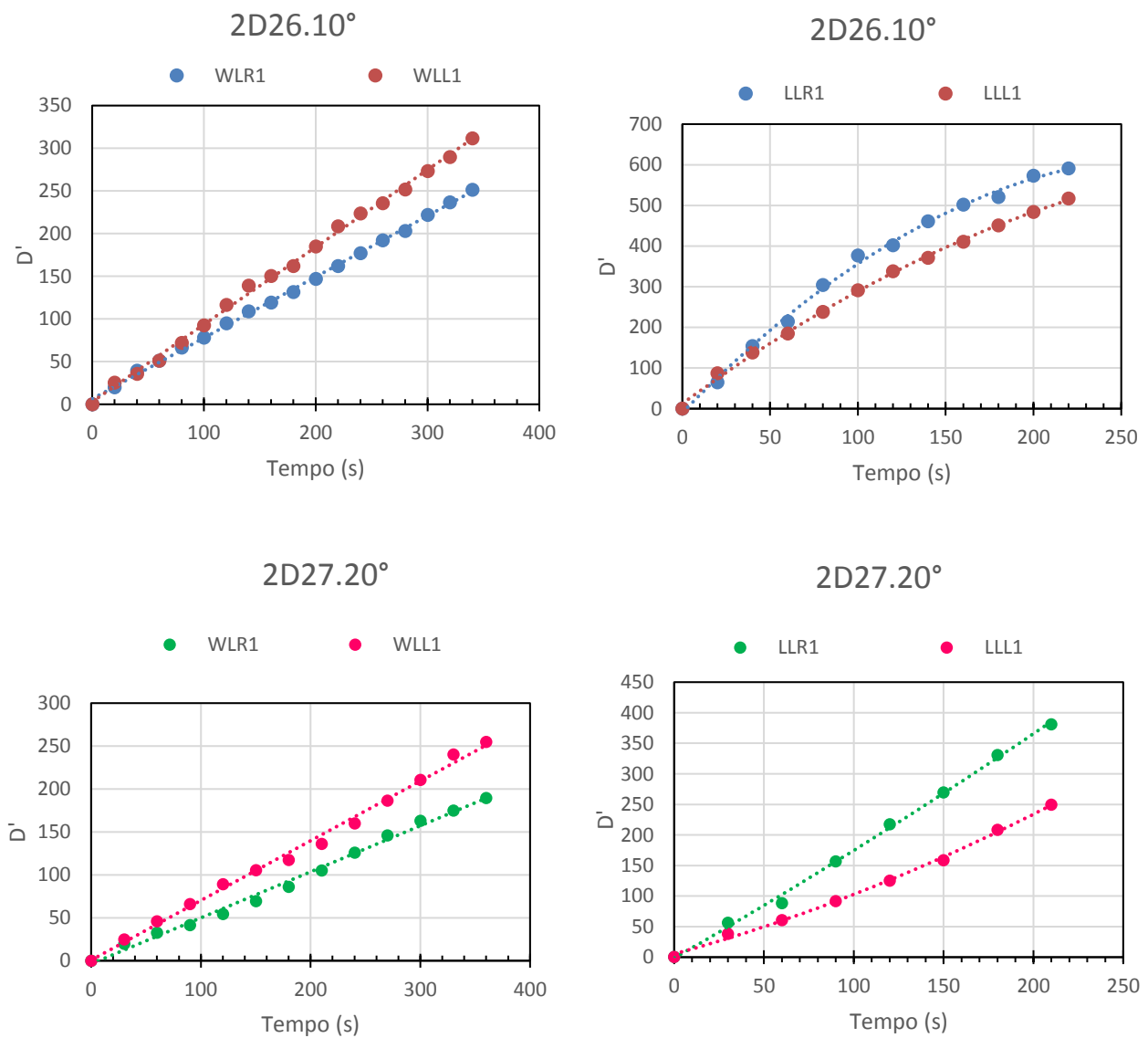


Figura 23 - Distância adimensional vs tempo para diferentes ângulos ϕ para os testes 2D26.10 e 2D27.20 nas direções WLR1, WLL1, LLR1 e LLL1

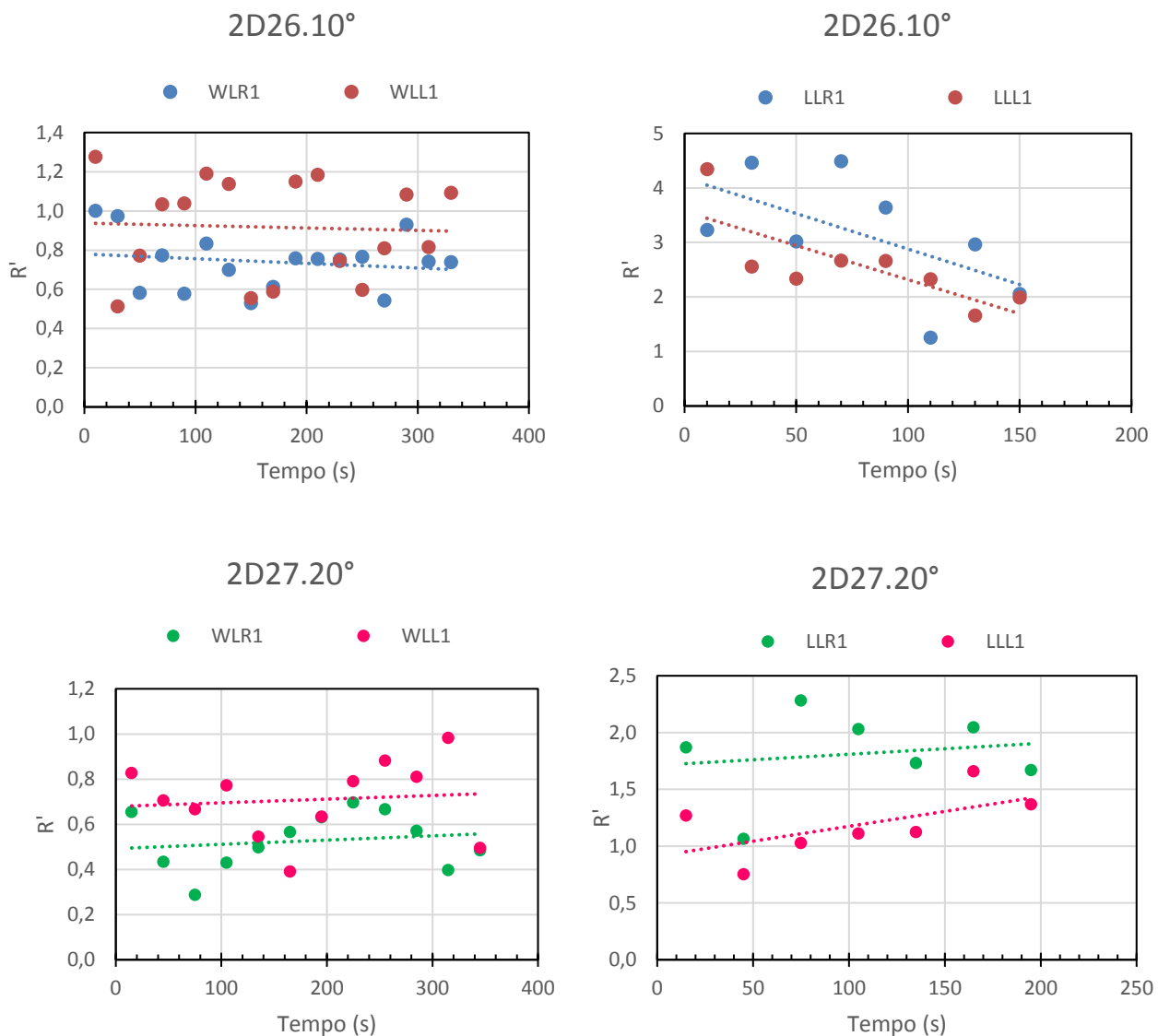


Figura 24 - Velocidade de propagação adimensional vs tempo para diferentes ângulos ϕ para os testes 2D26.10 e 2D27.20 nas direções WLR1, WLL1, LLR1 e LLL1

Analisando a Figura 23 e a Figura 24, podemos observar que a variação da distância adimensional em função do tempo para as direções WLR1 e WLL1 (em ambos os testes) segue uma tendência linear, por outro lado, para as direções LLR1 e LLL1 (em ambos os testes) segue uma linha polinomial de segunda ordem. Para além disso, comprovamos o que já havia sido referido anteriormente: em ambos os testes, na face a barlavento, a velocidade de propagação lateral no lado esquerdo é superior e na face a sotavento, a velocidade de propagação lateral é superior no lado direito.

Na Figura 21 e na Figura 22, observa-se que, no espaço entre as duas colinas, existem dois tipos de comportamento, representados pelos números **1** e **2**, para o teste 2D26.10 e pelos números **3** e **4** para o teste 2D27.20. O primeiro comportamento (**1** e **3**) possui uma velocidade de propagação muito baixa e o segundo (**2** e **4**), uma velocidade de propagação muito elevada. Na Figura 25 está representado o $R'_{\text{médio}}$ do teste 2D26.10 e do teste 2D27.20 nas duas direções acima referidas. As linhas a cor branca na Figura 21 e na Figura 22 mostram a linha onde foi feita a medição da velocidade de propagação.

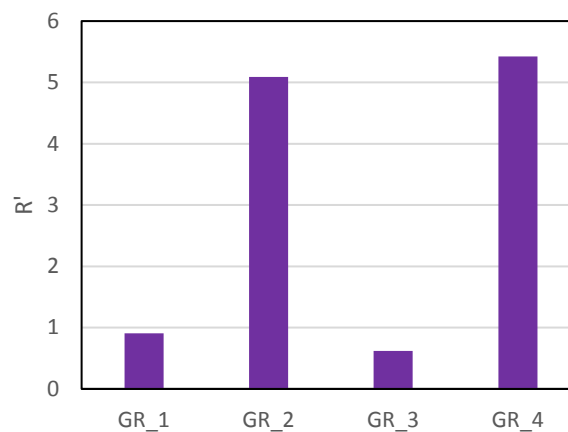


Figura 25 - $R'_{\text{médio}}$ em dois tipos de comportamento diferentes no espaço entre as duas colinas

Através da Figura 25 é possível verificar que no espaço entre as duas colinas existem dois tipos de comportamento. A velocidade de propagação mais elevada é, aproximadamente, 5 vezes maior do que a outra velocidade. Na Figura 26 é possível verificar as duas frentes de fogo descritas anteriormente.



Figura 26 - Dois tipos de comportamento do fogo distintos no teste 2D26.10

Na Figura 21 ainda é possível verificar que, na face a sotavento da segunda colina, volta a existir o fenómeno de *fire channelling*.

Para além disto, é interessante comentar um determinado comportamento obtido, tanto no teste 2D26.10 como no teste 2D27.20. Como já foi referido anteriormente, os testes são repetidos duas vezes. Assim, observou-se que, para ambos os testes, a propagação rápida segundo a face a barlavento da segunda colina, representada na Figura 19, está relacionada com o facto de o fogo estar suficientemente forte para conseguir atingir o canto inferior direito da face a sotavento da primeira colina como se mostra na Figura 21. Na outra repetição, o fogo extinguiu-se antes de chegar ao canto referido e a propagação do fogo na direção a WH2 aconteceu muito mais lentamente.

2.3.3. Efeito da Alteração do Ângulo γ

No terceiro grupo serão analisados três testes cuja diferença entre eles é o ângulo γ . Os testes a ser analisados são **2D28**, **2D29** e **2D30**, cujos ângulos são, respetivamente, 10°, 20° e 5°. De forma a facilitar a identificação dos parâmetros, serão utilizados os nomes **2D28.10**, **2D29.20**, **2D30.5**, como referência aos nomes 2D28, 2D29 e 2D30, respetivamente.

Na Figura 27, estão representadas as velocidades de propagação na primeira colina que, como já havia sido concluído na Secção 2.3.2, não variam muito com o ângulo γ . Efetivamente, no que diz respeito à primeira colina, o ângulo ϕ corresponde ao ângulo γ .

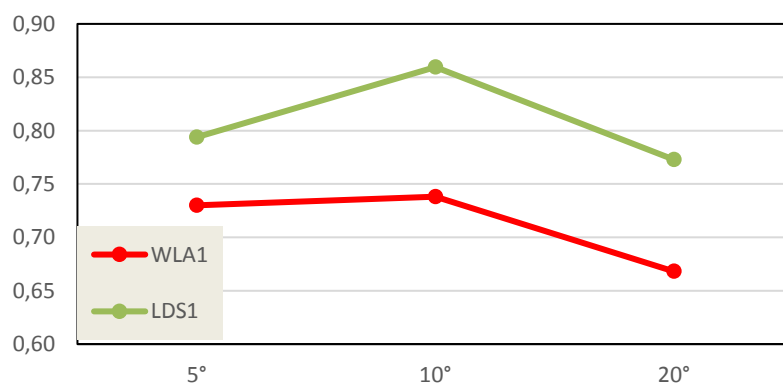


Figura 27 - R'médio para diferentes valores de γ nas direções WLA1 e LDS1

Através da Figura 28 e da Figura 29 é possível analisar que a propagação lateral na primeira colina, tanto no lado a barlavento como a sotavento, não é simétrica, como já havia sido referido na secção 2.3.2.

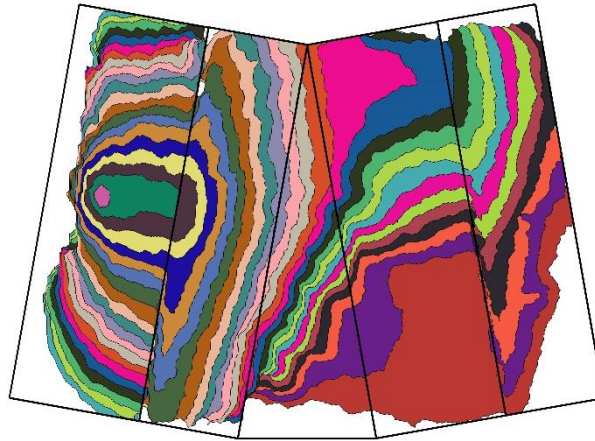


Figura 28 - Mapa de propagação 2D28 (30s)

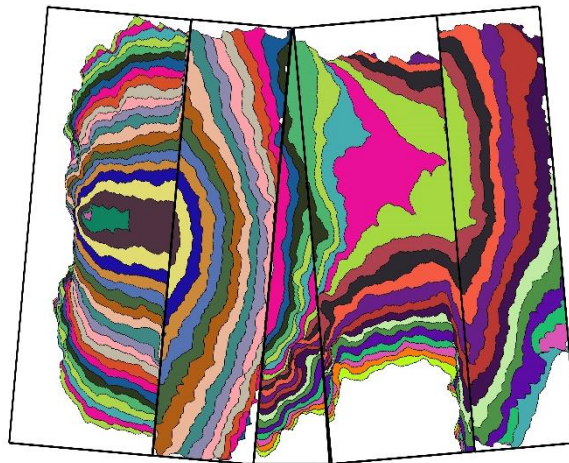


Figura 29 - Mapa de propagação 2D30 (30s)

Desta forma, a Figura 30 e a Figura 31 que apresentam a distância adimensional e a velocidade de propagação adimensional em função do tempo, respetivamente, para os três testes e para as direções WLR1, WLR1, LLR1 e LLL1, mostram o que já havia sido concluído anteriormente: na face a barlavento a propagação é feita tendencialmente para o lado esquerdo e na face a sotavento para o lado direito.

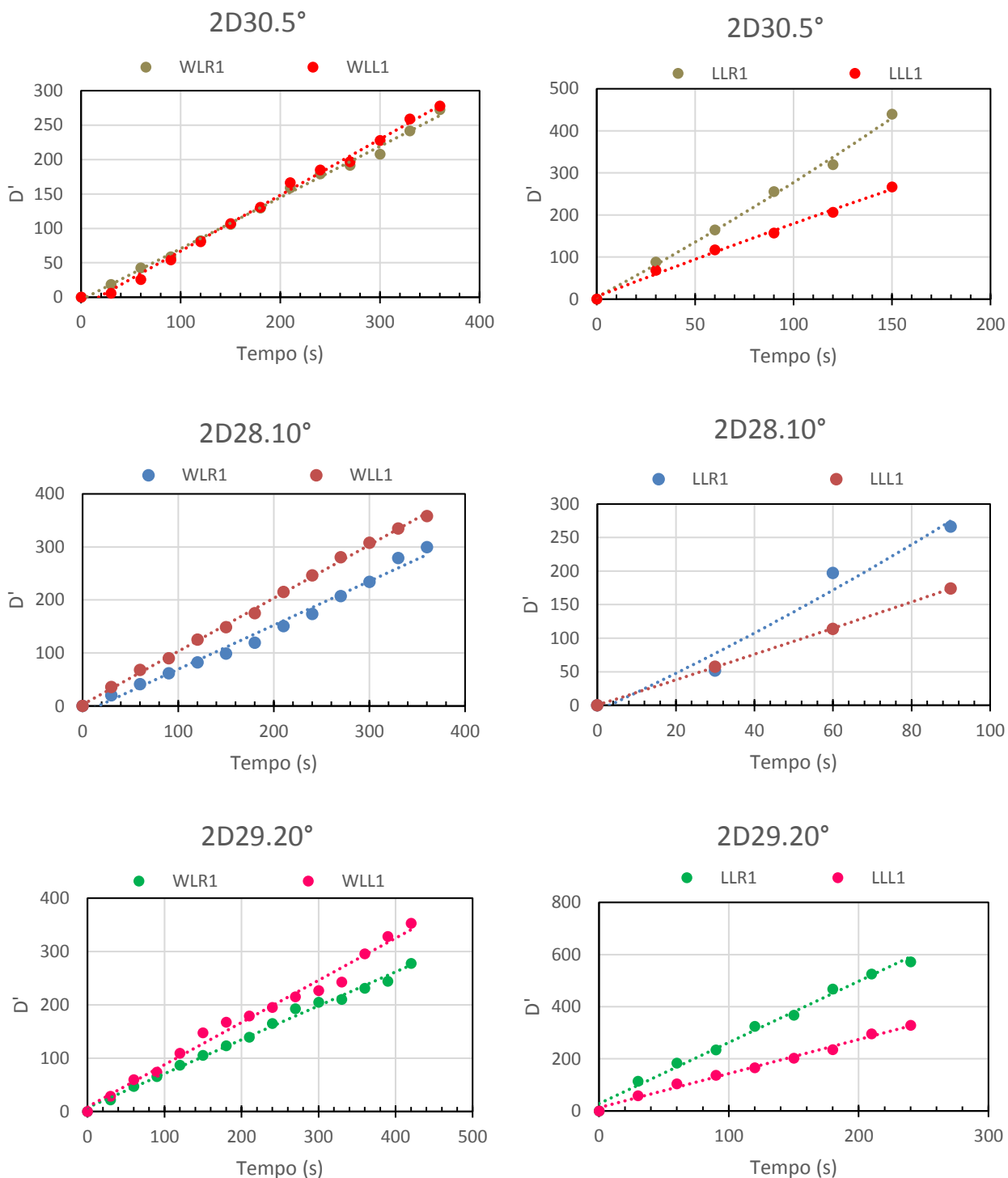


Figura 30 - Distância adimensional vs tempo para diferentes ângulos γ para os testes 2D30.5, 2D28.10 e 2D29.20 nas direções WLR1, WLL1, LLR1 e LLL1

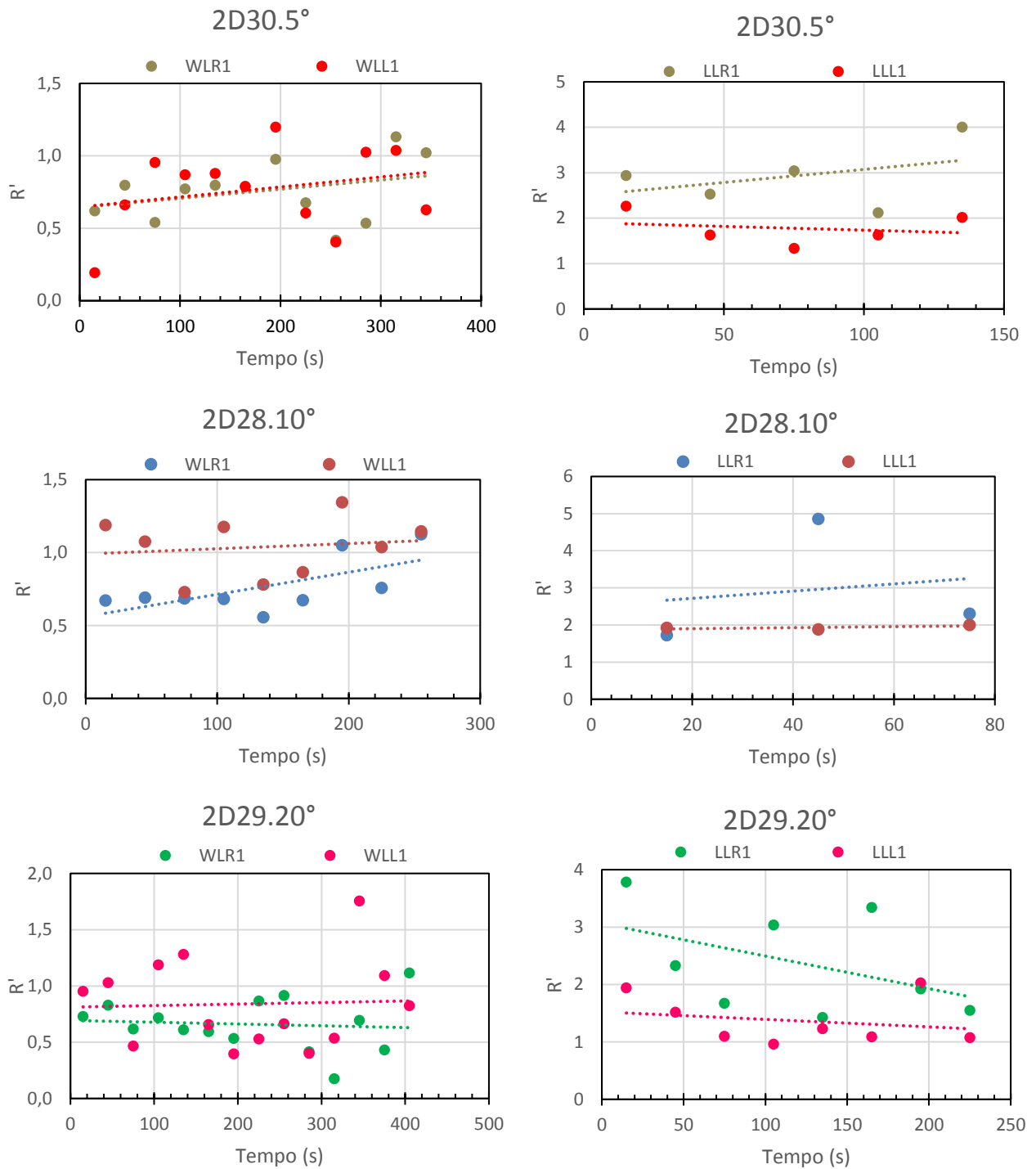


Figura 31 - Velocidade de propagação adimensional vs tempo para diferentes ângulos γ para os testes 2D30.5, 2D29.10 e 2D30.20 nas direções WLR1, WLL1, LLR1 e LLL1

Como foi visto anteriormente, a variação da distância adimensional em função do tempo para as direções WLR1 e WLL1 (em ambos os testes) segue uma tendência linear,

por outro lado, para as direções LLR1 e LLL1 (em ambos os testes) segue uma linha polinomial de segunda ordem.

No entanto, é importante analisar o comportamento na segunda colina, objeto principal deste estudo. Na Figura 32 e na Figura 33, estão representadas a distância adimensional e a velocidade de propagação adimensional, respetivamente, ambas em função do tempo, para a direção de propagação WUS2.

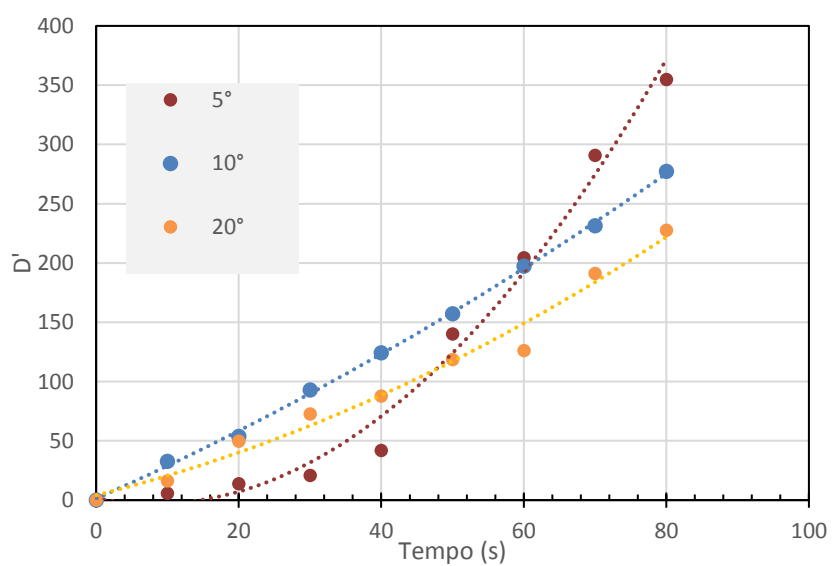


Figura 32 - Distância adimensional vs tempo para diferentes ângulos γ para os testes 2D30.5, 2D28.10 e 2D29.20 na direção WUS2

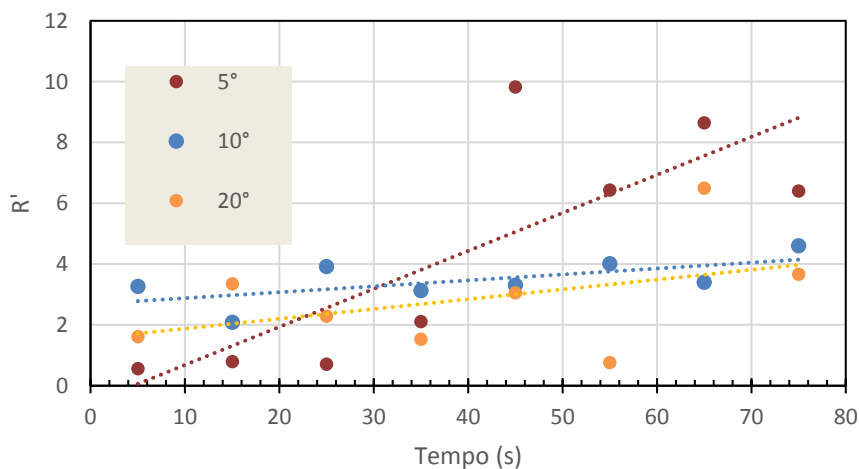


Figura 33 - Velocidade de propagação adimensional vs tempo para diferentes ângulos γ para os testes 2D30.5, 2D28.10 e 2D29.20 na direção WUS2

Para além de ser visível que, para os ângulos de 10° e de 20° , a variação da distância adimensional em função do tempo segue o percurso de uma linha de primeira ordem e que, por isso, a variação da velocidade de propagação com o tempo tende a ser linear, podemos verificar também que, para estes ângulos, a diferença entre as velocidades de propagação na face WH2 não é muito acentuada. No entanto, para 5° , a velocidade de propagação na face em estudo, aumenta mais rapidamente do que para os restantes valores de ângulo γ . Embora a variação da distância adimensional em função do tempo para 5° esteja representada como uma linha polinomial de segunda ordem, podemos assumir que, estamos perante dois comportamentos diferentes ambos com tendência linear. Observamos, através da 28, que um começa em 0s e segue, aproximadamente, até aos 50s, o outro começa nos 50s até aos 80s. A velocidade de propagação no segundo comportamento é muito superior ao do primeiro comportamento. Estes dois comportamentos acontecem pois, como estamos perante um ângulo muito fechado, no início da subida (primeiro comportamento) não existe muita recirculação de ar por ser um espaço muito confinado e, desta forma, a propagação é lenta. À medida que o fogo sobe na colina, a recirculação de ar tende a ganhar cada vez mais força, o que se reflete na rápida propagação do fogo (segundo comportamento), representada na Figura 34.



Figura 34 - Rápida propagação na face WH2 no teste 2D30.5

Para além disto, o comportamento geral do fogo na segunda colina é muito diferente nos testes 2D28.10 e 2D29.20 em comparação com o teste 2D30.5. Tanto no teste 2D28.10, que está representado na Figura 28, como no teste 2D29.20, observa-se que o fogo sobe a face WH2 por dois sítios distintos: primeiro, começa a subir pelo lado esquerdo da

face WH2 onde atinge as velocidades em cima estudadas. De seguida, ainda no espaço entre as duas colinas, o fogo começa a ganhar intensidade, subindo pelo lado direito da face WH2 com uma velocidade de propagação muito mais elevada do que quando subia pelo lado esquerdo. No teste 2D30.5, esta “dupla subida” não acontece: o fogo apenas sobe por um único sítio, como é possível verificar na Figura 29 e na Figura 34, cujos valores da velocidade de propagação se encontram representados acima.

2.3.4. Efeito da Existência de Vento

Neste grupo serão comparados os testes **2D31** e **2D32**, cuja diferença entre eles é a existência (ou não) de vento. Assim, o vento no teste 2D31 tem o valor de 2 m/s e no teste 2D32 é inexistente. De forma a facilitar a identificação dos parâmetros, designaremos o teste 2D31 e 2D32, respetivamente, por **2D31.2** e **2D32.0**. Estes dois testes têm a ignição no centro das duas colinas. Na Figura 35 observam-se as diferenças entre as duas situações, concluindo que a presença de vento é significativamente importante para o aumento da velocidade de propagação, em qualquer direção, nomeadamente na face WH2.

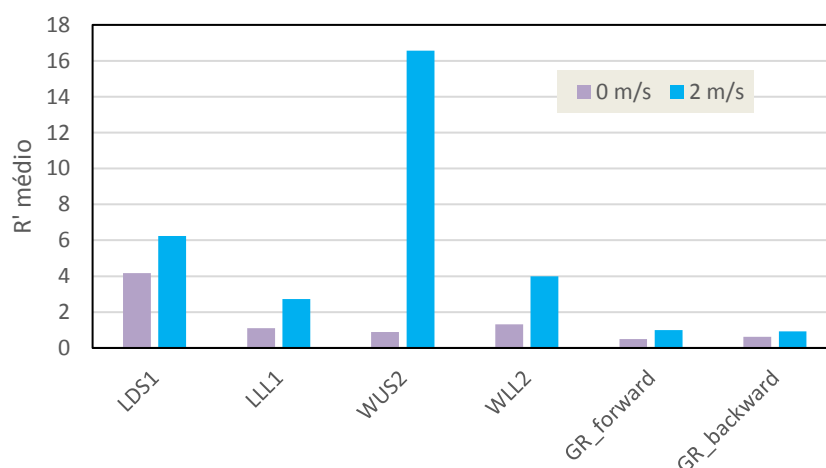


Figura 35 - R' médio para as situações com vento e sem vento em várias direções de propagação

Na Figura 35, GR indica a velocidade de propagação no chão (espaço entre as duas colinas), sendo que *forward* significa a favor do vento e *backward* significa a direção contrária ao vento. Na Figura 36, que representa o mapa de propagação do teste 2D31.2, e na Figura 37, que representa o mapa de propagação do teste 2D32.0, é possível verificar a clara diferença entre os dois testes. Para além das diferenças na velocidade de propagação

serem perceptíveis, observa-se que para o teste com vento (2D31.2) a propagação na face WH1 é muito lenta e quase inexistente pois o fogo está a descer a colina no sentido contrário à direção do vento. No teste sem vento (2D32.0) é possível verificar que, depois da ignição, o fogo sobe mais rapidamente a primeira colina do que a segunda. Isto acontece porque o fogo toma o sentido da colina com maior inclinação. Efetivamente, os ângulos em questão são β_1 e α_2 que têm, respetivamente, os valores de, aproximadamente, 31° e 20° .

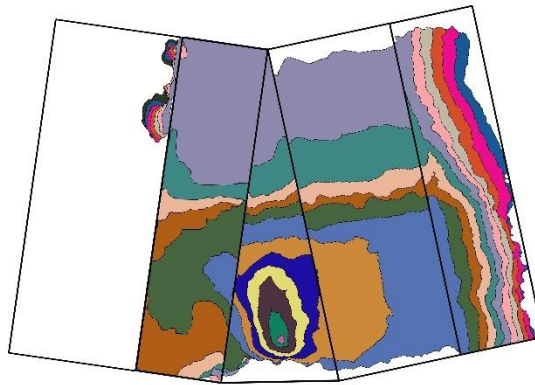


Figura 36 - Mapa de propagação 2D31 (30s)

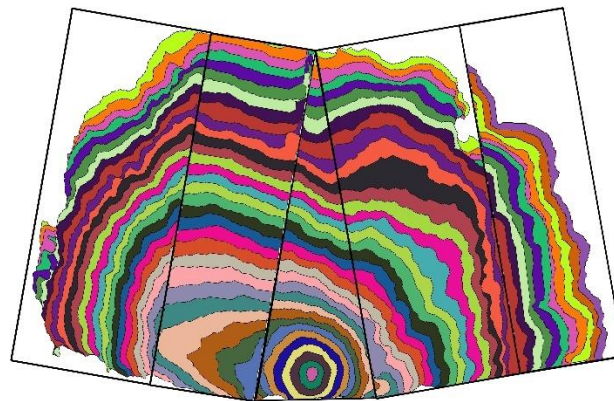


Figura 37 - Mapa de propagação 2D32 (30s)

Observando a Figura 36, observa-se que na face a sotavento da primeira colina, ocorre o fenómeno de *fire channelling* no teste 2D31.2. O fogo inicia a sua propagação subindo a colina e depois começa a propagar-se lateralmente para ambos os lados. No teste 2D32.0, Figura 37, isto não acontece, depois de subir a colina o fogo apenas se propaga lateralmente para um dos lados.

2.3.5. Efeito da Variação do Local de Ignição

Neste grupo analisam-se e comparam-se os testes **2D28** e **2D31**. Nestes dois testes as colinas possuem a mesma configuração e o mesmo valor do módulo da velocidade do vento, no entanto variam no seu local de ignição. No teste 2D28 a ignição é feita em WH1 e em 2D31 a ignição acontece no centro das duas colinas (Mid). Para tornar a identificação dos parâmetros mais fácil designaremos o teste 2D28 e o teste 2D31 por **2D28.WH1** e **2D31.Mid**. É expectável, e confirmado pela Figura 28 e pela Figura 36, que o fogo tenha um comportamento muito diferente nos dois testes, principalmente na face LW2 onde o fogo no teste 2D28 toma o sentido do vento (desce a colina) e no teste 2D31 toma o sentido contrário ao do vento (sobe a colina). À custa disto, o comportamento na face WH1 será também o oposto. Assim, apenas está correto comparar o comportamento na segunda colina. Na Figura 38 e na Figura 39 apresentam--se, respetivamente, a distância adimensional em função do tempo e a velocidade de propagação adimensional em função do tempo, para a direção WUS2.

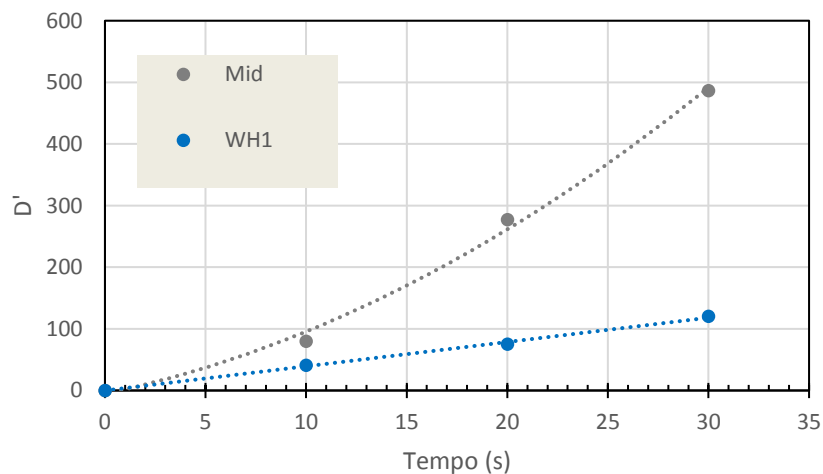


Figura 38 - Distância adimensional vs tempo para testes com diferentes locais de ignição na direção WUS2

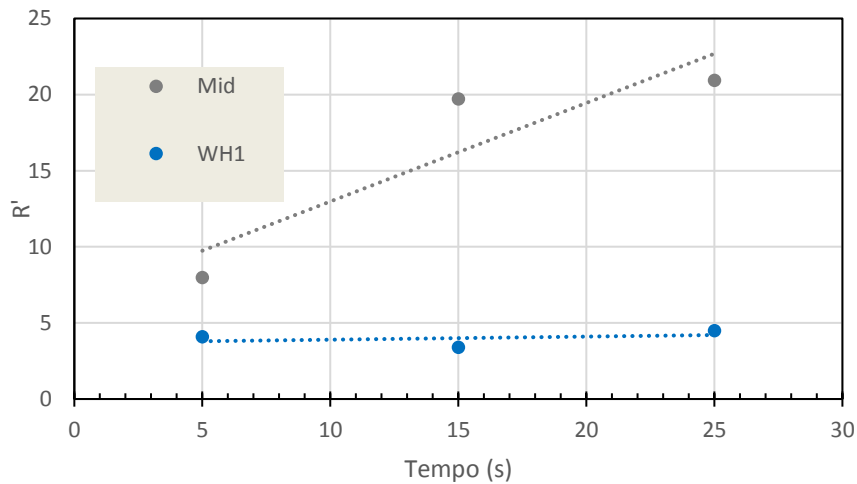


Figura 39 - Velocidade de propagação adimensional vs tempo para testes com diferentes locais de ignição na direção WUS2

Através da Figura 38 é possível concluir que o comportamento do fogo segue uma linha de tendência de segunda ordem para quando a ignição é feita no centro entre as duas colinas e linear quando a ignição é feita na face WH1. Quanto à Figura 39, observamos que, embora os valores de R' oscilem, estes seguem tendencialmente uma reta linear, cujo declive é maior para o caso em que a ignição é feita no centro das duas colinas. Conclui-se, então, que para uma ignição feita no centro das duas colinas, a velocidade de propagação em WH2 é muito superior chegando a ser 4 vezes maior que a velocidade de propagação quando a ignição é feita na face WH1.

3. MODELAÇÃO NUMÉRICA

O objetivo principal da realização de simulações numéricas é analisar o comportamento do fogo em determinados parâmetros que não são possíveis de verificar na análise experimental. No entanto, será necessário comparar a simulação com a análise experimental, para que esses tais parâmetros possam ser considerados válidos.

Assim, o objetivo principal desta parte do trabalho será criar a simulação através de um software e, através de um mapa de propagação, compará-la com a realidade, validando-a ou não.

3.1. Caso de Estudo

Para a realização das simulações numéricas, vai ser estudado o comportamento do fogo em duas colinas, variando alguns parâmetros tais como: o ângulo de inclinação das colinas, a distância entre estas e o local onde é feita a ignição.

Em todos os testes, as colinas são colocadas de forma a que a sua linha do cume fique perpendicular à direção do vento, que toma o valor de 2 m/s, como é possível observar na Figura 40. As colinas são iguais às utilizadas nos testes experimentais, ou seja, duas colinas de 4 metros de comprimento, uma face (a barlavento) com 1.5 metros de largura e outra face (a sotavento) com 1 metro de largura.

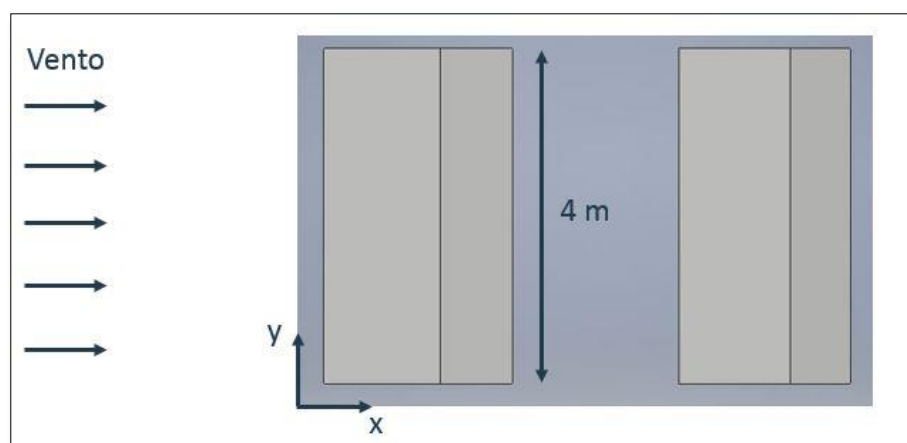


Figura 40 - Disposição das colinas

Na Tabela 4, encontram-se especificados os testes a ser realizados, onde α_1 , α_2 representam os ângulos de inclinação da primeira e segunda colina, respetivamente, **WH1** representa que a ignição é feita na face a barlavento da primeira colina, **Mid** representa que

a ignição é feita entre as duas colinas, no ponto médio, e **Dist** representa a distância entre as colinas (em metros):

Tabela 4 - Testes numéricos e parâmetros

Teste	α_1, α_2	Ignição	Dist [m]
2D3	20°,20°	WH1	0
2D10	20°,27°	WH1	0
2D12	27°,20°	WH1	0
2D16	20°,20°	WH1	1
2D24	20°,20°	WH1	2
2D25	20°,20°	Mid	1

3.2. Metodologia – *Fire Dynamics Simulator*

FDS, *Fire Dynamics Simulator* (Mcgrattan and Mcdermott 2004), é um modelo de *Computational Fluid Dynamics* (CFD) que tem como base resolver numericamente as equações de Navier-Stokes. Este programa destina-se ao estudo de escoamentos ativados termicamente, nomeadamente ao fumo e transferência de calor gerados a partir de fogos.

Com a sua linguagem de programação em Fortran, o FDS tem três fases distintas:

- Na primeira, a partir de um ficheiro de texto, lê os parâmetros de *input* inseridos pelo utilizador;
- Na segunda fase, resolve as equações governantes, encontrando a sua solução numérica;
- Na última fase, apresenta o *output*, escrevendo-o.

Para além destas três fases, o FDS tem a possibilidade de produzir animações visíveis no ecrã do computador, através do programa de visualização *Smokeview*.

A construção do ficheiro de texto onde os parâmetros de *input* são inseridos é, sem dúvida, uma das partes mais desafiantes deste estudo. Por ser um código em Fortran, existem muitos pormenores essenciais nesta linguagem que não devem ser desprezados ou

esquecidos. Nas seguintes secções, é dado ênfase aos parâmetros do ficheiro de texto mais importantes.

3.2.1. Malha Computacional

De forma a resolver as equações diferenciais, é feita uma divisão no domínio de cálculo. Esta divisão pretende que as equações diferenciais se simplifiquem e se transformem em equações algébricas que, embora não exatas mas sim aproximadas, são possíveis de ser resolvidas.

Com esta divisão obtém-se uma ou mais malhas retangulares com células uniformes. Quanto mais dividida (refinada) se encontra a malha, mais aproximadas se encontram as equações algébricas da realidade, no entanto, também mais tempo demora o programa a conseguir resolvê-las. Desta forma, será necessário fazer um balanço entre algo que seja aproximado, mas que seja possível de ser resolvido num tempo razoável.

A cada malha é designado um nome, uma localização no domínio, o número de células existentes em cada coordenada e um *MPI process*. Neste caso, este *MPI process* refere-se ao facto de que para cada malha, apenas será designado um CPU (unidade central de processamento - processador).

As simulações são corridas no supercomputador *Navigator* onde, a cada nodo, correspondem 24 CPUs. Esta informação é necessária quando é desejado começar a correr a simulação e é colocada num ficheiro com extensão *.job* que é utilizado para ordenar que a simulação comece e que o ficheiro de texto seja lido (exemplo: se se dividir o domínio em 100 malhas, temos 100 CPUs, logo 5 nodos em utilização [$100/24=4,16\dots$]).

3.2.2. Domínio e Condições de Fronteira

O domínio que define as simulações realizadas é um paralelepípedo com as dimensões: 10 metros de comprimento (x), 6 metros de largura (y) e 3 metros de altura (z). Sendo que a direção do vento se estende ao longo do comprimento (segundo a direção x) e é perpendicular à largura, podemos afirmar que as colinas se posicionam no domínio com a sua linha do cume paralela à largura e perpendicular ao comprimento, como é possível observar na Figura 41. A posição da primeira colina é também definida: o centro da sua linha

do cume está posicionado em $y = 3$ m e o início da face a barlavento está posicionado em $x = 2$ m.

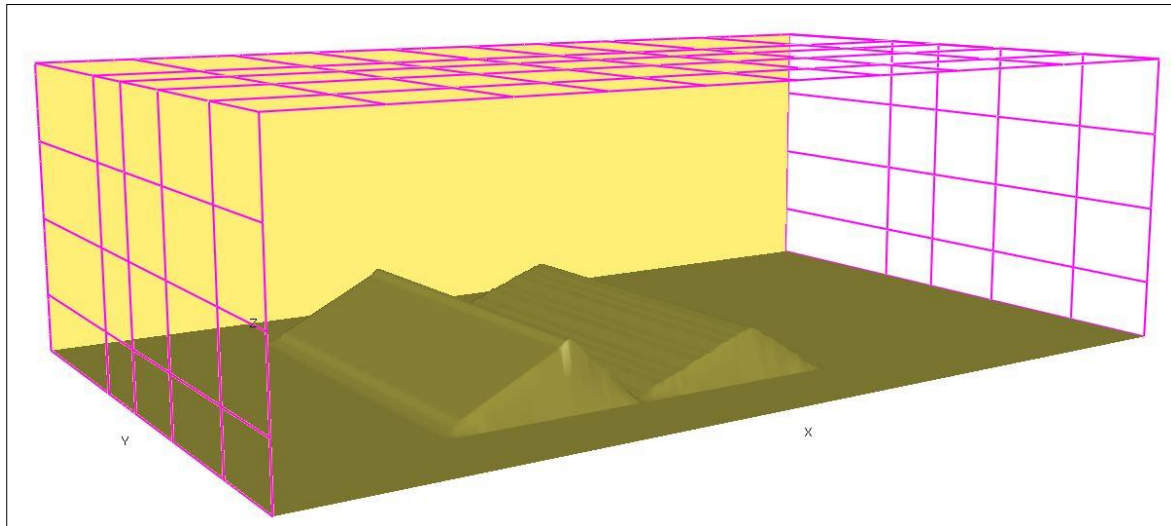


Figura 41 - Posição das colinas no domínio

São três as condições de fronteira existentes no domínio acima referido. A primeira é onde entra o escoamento (vento) que circula a uma velocidade de 2 m/s. A segunda refere-se a uma fronteira “aberta”, ou seja, podem ocorrer trocas para fora do domínio, como por exemplo, libertação de fumo. Esta fronteira representa 2 das faces do paralelepípedo (a face superior e a face paralela à face onde entra o escoamento). A última condição, que representa as 3 faces restantes do paralelepípedo, refere-se a uma parede sólida e inerte (esta condição é usada como predefinição do programa, não precisando de ser explicitada).

3.2.3. Combustível

Para definir o combustível utilizado no programa FDS, foram escolhidas agulhas de pinheiro (caruma) cuja espécie é *Pinus Pinaster*. Para isso, foi definido o seu calor de combustão que é de 20 000 kJ/kg (Santoni et al. 2014). A densidade desta espécie foi considerada 511 kg/m³ (Santoni et al. 2014). A temperatura de referência que corresponde à temperatura a que as agulhas iniciam a libertação dos gases de combustão é de 200° (Font et al. 2009).

Para além disto, é necessário definir os constituintes das agulhas de pinheiro. Assim, assume-se que as agulhas de pinheiro têm como principal constituinte a celulose, mas também possuem uma certa percentagem de água, que, para efeitos deste estudo, foi considerada 10%. A forma das agulhas de pinheiro foi considerada um cilindro de diâmetro 0.16 cm e um comprimento de 12 cm, resultado de um estudo realizado anteriormente no LEIF, onde foram utilizadas duas amostras de 100g de caruma. Para cada uma destas amostras foram retiradas, ao acaso, 10 agulhas e, individualmente, mediram-se os seus diâmetros e comprimentos. De seguida, fez-se uma média para cada uma das quantidades, resultando os valores acima referidos.

3.2.4. Sensores

No ficheiro de *input* foram colocados sensores (*devices*) que têm como função medir algumas quantidades necessárias ao estudo da propagação do fogo, como é exemplo a temperatura, a pressão e a velocidade. Estes sensores são representados como um ponto a cor verde no *Smokeview* como estão demonstrados na Figura 42.

Os sensores em questão para este estudo medem a temperatura e são utilizados para realizar o mapeamento do fogo. Estes sensores estão dispostos no cimo das colinas, posicionados como uma malha e encontram-se a uma distância de 2 cm uns dos outros.

Para fazer o mapeamento, os sensores medem a temperatura que apresentam ao longo da simulação, gravando-a num ficheiro em EXCEL, assim como o *timestep* a que se deu a temperatura. De seguida, utilizando um programa em MATLAB que corre esse ficheiro EXCEL, e, utilizando um *timestep* específico, a temperatura na qual as agulhas de pinheiro começam a arder, 400°C (Chandler et al. 1983), é encontrada, e esses sensores representam a frente de fogo nesse determinado *timestep*. As várias frentes de fogo (uma a cada *timestep*) são representadas numa imagem onde a cada cor está associado um *timestep*. Esta imagem será o objeto de comparação entre a simulação e a realidade.

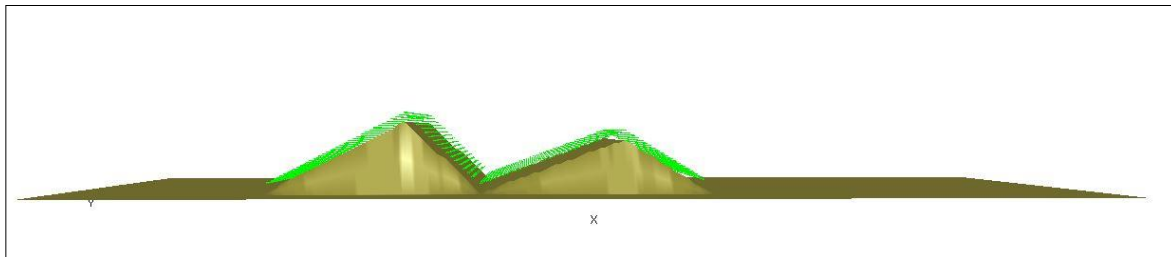


Figura 42 - Sensores nas colinas

3.3. Análise de Resultados e Discussão

Nesta secção, as imagens relativas ao mapeamento obtidas através do programa FDS, irão ser comparadas com resultados anteriormente obtidos experimentalmente (Abouali et al. 2018). Nem todas as simulações realizadas vão ser comparadas, sendo escolhidos para comparação os testes 2D10, 2D16, 2D24 e 2D25. Na Figura 43, na Figura 44, na Figura 45 e na Figura 46 estão representadas lado a lado as imagens correspondentes ao teste experimental (lado esquerdo) e à simulação (lado direito). Na legenda de cada Figura está representado o *timestep* de cada imagem, ou seja, a quanto tempo de propagação corresponde cada cor.

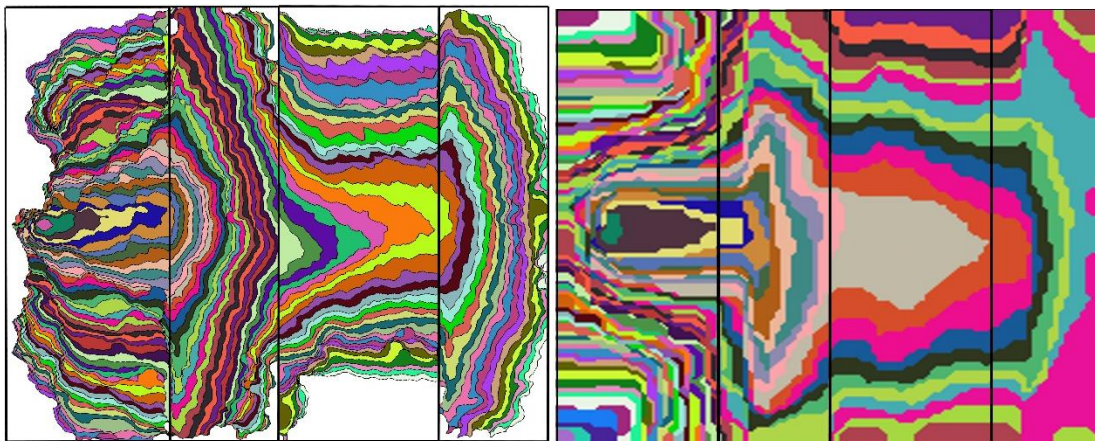


Figura 43 - 2D10. Experimental (20s) vs. Simulação (10s)

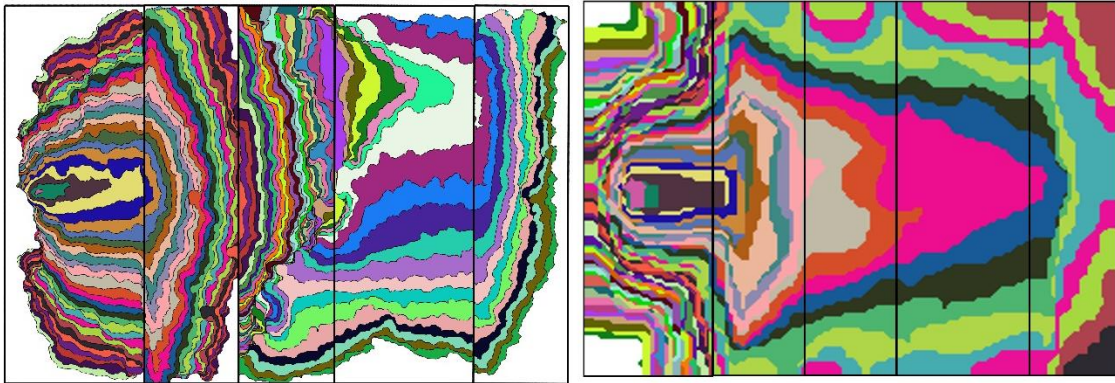


Figura 44 - 2D16. Experimental (30s) vs. Simulação (10s)

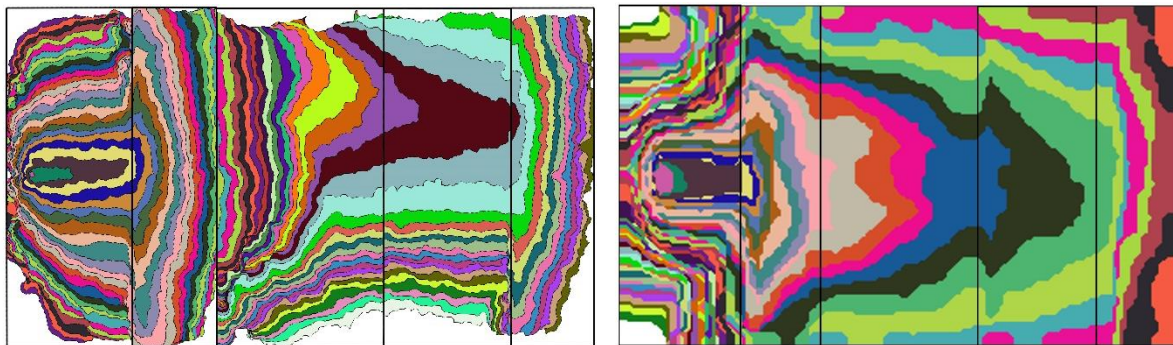


Figura 45 - 2D24. Experimental (30s) vs. Simulação (10s)

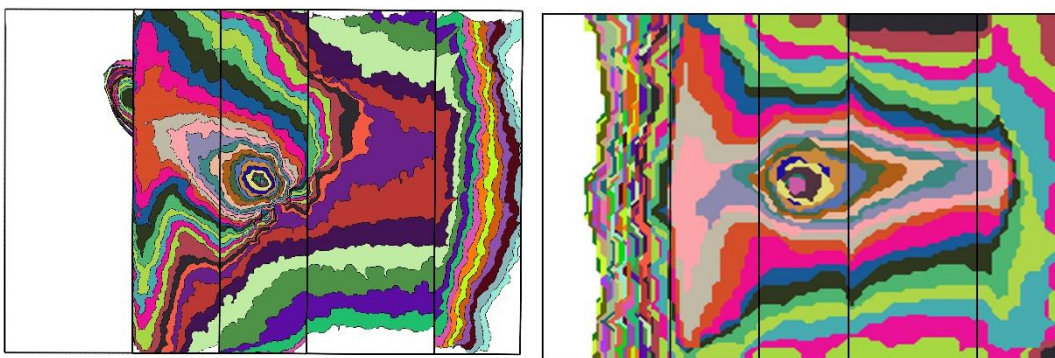


Figura 46 - 2D25. Experimental (20s) vs. Simulação (10s)

Analisando os resultados obtidos, observa-se que na Figura 43, na Figura 44 e na Figura 45 ocorre o fenómeno de *fire channelling* na primeira colina, tanto para os testes experimentais como para as simulações. O fogo exibe uma rápida propagação na direção WUS1 e depois, já na face LH1, começa a propagar-se lateralmente. Para além disto, e para todas as Figuras, é possível ver este comportamento *fire channelling* também na face LH2.

Em todas as Figuras observa-se uma rápida propagação na face WH2, tanto para os testes experimentais como para as simulações. Na Figura 44 e na Figura 45, nas quais existe um espaço entre as colinas de 1 m e 2 m, respetivamente, verifica-se que neste mesmo espaço, o fogo começa por se propagar devagar, mas, à medida que o tempo passa, esta propagação acelera. Este comportamento está presente nos testes experimentais e nas simulações.

Na Figura 46, onde está representado o teste 2D25 cuja ignição é feita no centro das duas colinas, observa-se que tanto no teste experimental como na simulação, o fenómeno *fire channelling* acontece na face LH1.

O comportamento do fogo foi, então, previsto pelo programa FDS. Desta forma, e sabendo que o vento é o principal modificador do comportamento do fogo, é possível concluir que o padrão do vento está correto, assim como o próprio vento induzido pelo fogo, visto que existe uma semelhança muito grande entre o comportamento do fogo nos testes experimentais e o comportamento do fogo nas simulações.

Por outro lado, ao analisarmos as Figuras, reparamos que, embora o comportamento do fogo seja semelhante, a velocidade de propagação do fogo nos testes experimentais e nas simulações é muito distinta. Podemos, claramente, observar que a propagação nas simulações é quase 4 vezes mais rápida do que a realidade.

Desta forma, as simulações não podem ser validadas pelos testes experimentais, não sendo possível tirar conclusões acerca dos seus resultados. No entanto, poderão ser melhoradas. Será necessário, para isso, estudar a causa da rápida propagação do fogo.

Esta rápida propagação do fogo pode estar a ser afetada por dois aspetos diferentes. Em primeiro lugar, pode estar relacionada com os parâmetros relativos à convecção e à força de arrasto, parâmetros estes que foram considerados como *default* no programa FDS. Em segundo lugar, a rápida propagação pode estar relacionada com o facto de o programa admitir que toda a energia libertada na combustão de uma camada de combustível é utilizada para queimar a camada de combustível seguinte, no entanto na realidade, apenas uma parte dessa energia é usada para esse fim, sendo a outra libertada noutras formas de calor.

4. CONCLUSÕES

O propósito da presente dissertação foi o estudo do comportamento extremo do fogo em duas colinas, nomeadamente no que diz respeito ao comportamento já conhecido *fire channelling*. Este comportamento acontece quando o fogo exhibe uma rápida propagação na direção transversal à do vento, para além da usual rápida propagação na direção do vento.

O estudo foi dividido em duas partes: na primeira parte foram realizados ensaios experimentais no LEIF onde foi possível fazer variar alguns parâmetros de forma a perceber de que maneira é que estas variações afetavam o comportamento do fogo; na segunda parte foram realizadas simulações numéricas, através do software *Fire Dynamics Simulator*, que depois foram comparadas com testes experimentais já realizados na Universidade de Coimbra.

De forma a estudar o comportamento do fogo, foram realizados 9 ensaios experimentais com recurso a um túnel de vento. O combustível utilizado para estes ensaios foi caruma (agulhas de pinheiro). Os ensaios foram filmados com uma câmara de infravermelhos e, através dos vídeos obtidos e com recurso ao software *Fire ROS Calculator*, foram determinadas as velocidades de propagação do fogo em determinadas direções específicas. Os parâmetros que foram alterados ao longo de 9 testes são referidos de seguida:

- ângulo de inclinação das colinas (α_1 e α_2);
- ângulo entre a direção do vento e a linha do cume (ϕ);
- local de ignição;
- existência de vento.

Foram retiradas algumas conclusões com base nos ensaios experimentais realizados:

- a alteração do ângulo α_1 pouco altera o comportamento do fogo na primeira colina;
- a alteração do ângulo α_2 afeta a velocidade de subida do fogo na segunda colina, sendo mais elevada quanto maior for o ângulo α_2 ;
- a alteração do ângulo ϕ (ou γ) pouco afeta a velocidade de subida do fogo na primeira colina;

- a velocidade de subida do fogo na segunda colina aumenta significativamente se o ângulo ϕ (ou γ) for diferente de 0° ;
- na primeira colina ocorre o fenómeno *fire channelling*, no entanto a boa simetria da propagação que se verificava para ângulos ϕ (ou γ) de 0° , não se verifica quando o ângulo ϕ (ou γ) é superior a 0° . A propagação na face a barlavento é mais rápida no lado esquerdo e na face a sotavento é mais rápida do lado direito;
- na segunda configuração, conclui-se que quanto menor o ângulo ϕ , maior a velocidade de subida do fogo na segunda colina. No entanto, para ângulos ϕ muito pequenos (como é o caso de 5°), a subida do fogo apresenta dois comportamentos: o primeiro comportamento, em que a velocidade de propagação é lenta e o segundo comportamento, onde o fogo exhibe uma rápida propagação;
- o vento é significativamente importante para o aumento da velocidade de propagação do fogo, em qualquer direção;
- na ausência de vento, o fogo tem tendência a subir a colina com maior inclinação;
- quando a ignição é feita no centro das duas colinas e estamos na presença de vento, o fenómeno *fire channelling* acontece na face LW2;
- quando a ignição é feita no centro entre as duas colinas, a velocidade de subida do fogo na face WH2 é muito superior à velocidade de subida quando a ignição é feita na face WH1.

Na segunda parte do estudo, foram criadas simulações numéricas através do software FDS, onde foi necessário introduzir alguns parâmetros importantes como a divisão da malha computacional, o domínio e as condições de fronteira, as características do combustível e os sensores que são utilizados para fazer o mapa de propagação. O objetivo principal desta parte do estudo era criar as simulações e verificar se se encontravam válidas para que, no futuro, pudessem ser utilizadas para analisar algumas quantidades e comportamentos que não são possíveis de compreender nos testes experimentais. As conclusões retiradas deste estudo são apresentadas de seguida:

- o programa FDS previu corretamente o comportamento do fogo;

- o padrão de vento e o próprio vento induzido pelo fogo estão corretamente definidos;
- a velocidade de propagação nas simulações é muito superior à realidade, logo as simulações não foram validadas;
- no futuro, será necessário estudar os parâmetros relativos à força de arrasto e à convecção, que neste estudo foram considerados como *default*, mas também estudar o facto de o programa não considerar a a energia dissipada na combustão.

O estudo que diz respeito ao comportamento do fogo em incêndios florestais é trabalhoso, demorado e difícil. Desta forma, será importante continuar a investir neste tipo de investigação para ser possível, cada vez mais próximo, prever o comportamento do fogo, nomeadamente em situações extremas. As simulações numéricas são uma mais valia para este tipo de estudo e devem ser, por isso, estudadas ao máximo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abouali, Abdelrahman. 2017. "Fire ROS Calculator."
https://github.com/AAbouali/Fire_ROS_Calculator.
- Abouali, Abdelrahman, Jorge Rafael Raposo, and Domingos Xavier Viegas. 2018. "The Role of Terrain-Modified Wind on Driving the Fire Behaviour over Hills – an Experimental and Numerical Analysis." In *Advances in Forest Fire Research*, ed. Domingos Xavier Viegas. Imprensa da Universidade de Coimbra. (In press).
- Chandler, C., Cheney, P., Thomas, P., Trabaud, L., & Williams, D. (1983). *Fire in forestry vol. 1*. New York, United States: John Wiley and Sons.
- Font, R, J A Conesa, J Moltó, and M Muñoz. 2009. "Kinetics of Pyrolysis and Combustion of Pine Needles and Cones." *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis* 85(1–2): 276–86.
- Mcgrattan, Kevin, and Randall Mcdermott. "Sixth Edition Fire Dynamics Simulator User 's Guide."
- McRae RHD (2004) *Breath os the dragon – observations of the January 2003 ACT Bushfires*. In 'Proceedings of the Conference Bushfire 2004: Earth, Wind and Fire – Fusing the Elements', May 2004, Adelaide. (CD-ROM) (South Australian Department of Environment and Heritage: Adelaide, SA).
- Raposo, J. R. et al. 2015. "Experimental Analysis of Fire Spread across a Two-Dimensional Ridge under Wind Conditions." *International Journal of Wildland Fire* 24(7): 1008–22.
- Santoni, P A, P Bartoli, A Simeoni, and J L Torero. 2014. "Bulk and Particle Properties of Pine Needle Fuel Beds – Influence on Combustion." *International Journal of Wildland Fire* 23(8): 1076–86. <http://dx.doi.org/10.1071/WF13079>.
- Sharples, Jason J., Richard H.D. McRae, and Stephen R. Wilkes. 2012. "Wind-Terrain Effects on the Propagation of Wildfires in Rugged Terrain: Fire Channelling." *International Journal of Wildland Fire* 21(3): 282–96.
- Simpson, Colin C., Jason J. Sharples, Jason P. Evans, and Matthew F. McCabe. 2013. "Large Eddy Simulation of Atypical Wildland Fire Spread on Leeward Slopes." *International Journal of Wildland Fire* 22(5): 599–614.
- Viegas, Domingos X. 2006. "Parametric Study of an Eruptive Fire Behaviour Model." *International Journal of Wildland Fire* 15(2): 169–77.
- Viegas, Domingos Xavier, Luis Paulo C Neto, and Grupo De Mechica. 1991. "Wall Shear-Stress as a Parameter to Correlate the Rate of Spread of a Wind Induced Forest Fire." (3): 177–88.

APÊNDICE A

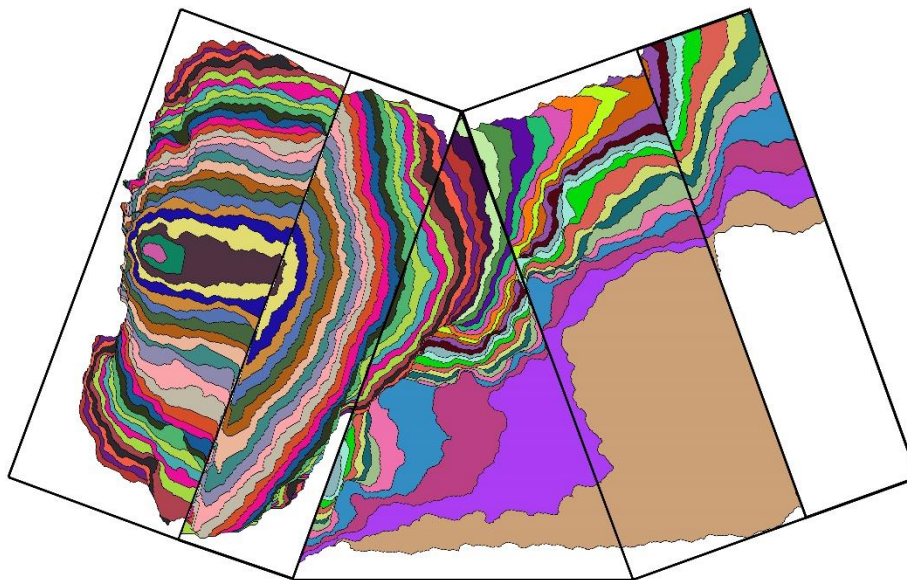


Figura 47 - Mapa de propagação 2D29 (30s)

APÊNDICE B



Figura 48 - Mapa de propagação 2D3

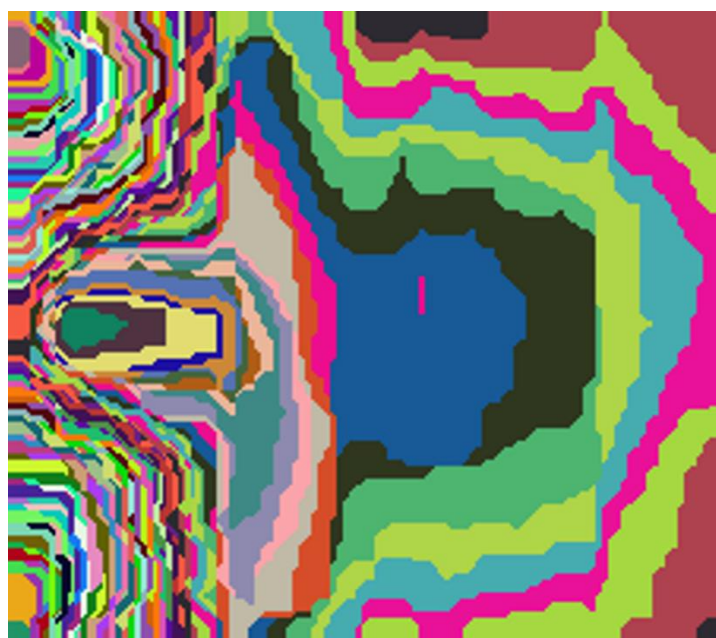


Figura 49 - Mapa de propagação 2D12