



FCTUC FACULDADE DE CIÊNCIAS
E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE COIMBRA

DEPARTAMENTO DE
ENGENHARIA MECÂNICA

Interacção de Focos Secundários com uma Frente de Fogo

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

Autor

João Paulo Rodrigues Abrunheiro

Orientador

Professor Doutor Domingos Xavier Filomeno Carlos Viegas

Júri

Presidente Professor Doutor António Rui de Almeida Figueiredo

Professor Associado com Agregação da Universidade de Coimbra

Vogais Professor Doutor Domingos Xavier Filomeno Carlos Viegas

Professor Catedrático da Universidade de Coimbra

**Professor Doutor José Manuel Baranda Moreira da Silva
Ribeiro**

Professor Auxiliar da Universidade de Coimbra

Colaboração Institucional



**Associação para o
Desenvolvimento da
Aerodinâmica
Industrial**



**Centro de Estudos
sobre Incêndios
Florestais**

Coimbra, Setembro, 2011

Paciência e tempo dão mais resultado que força e raiva.

Jean de La Fontain.

Aos que gostam de mim.

Agradecimentos

A realização do trabalho aqui apresentado só foi possível graças à colaboração e apoio de algumas pessoas, às quais não posso deixar de prestar o meu reconhecimento e sincero agradecimento.

Em primeiro lugar ao Professor Domingos Xavier Viegas por ter aceitado ser meu orientador de tese de mestrado, por toda a disponibilidade e orientação dada durante a realização da mesma. Pelo privilégio de ter sido incluído na sua equipa de investigação, a equipa do CEIF/ADAI, o que possibilitou aprofundar os meus conhecimentos sobre incêndios florestais e ganhar experiência como investigador.

Quero agradecer ao David Davim, investigador da equipa do CEIF/ADAI, pelo tempo disponibilizado para a elaboração dos ensaios laboratoriais, ensinamentos relativamente ao tratamento dos dados recolhidos e esclarecimento de dúvidas. O meu agradecimento ao Ricardo Oliveira e ao Jorge Raposo que me ajudaram nos ensaios laboratoriais. Agradeço também a toda a equipa do CEIF/ADAI pela simpatia e bom ambiente proporcionado.

Aos meus colegas e amigos de curso pela convivência e pelo apoio dado nos bons e maus momentos da vida académica coimbrã.

À minha família agradeço pelo apoio dado durante estes anos assim como aos meus amigos de longa data.

Resumo

O trabalho realizado tem como objectivo o estudo da interacção de um foco secundário com uma frente de fogo em leitos horizontais. Foram realizados ensaios laboratoriais com leitos de combustíveis finos mortos, mais especificamente palha onde se variou a distância entre as ignições.

O estudo teve como suporte a análise das velocidades de propagação do foco secundário e da frente de fogo segundo uma direcção, determinar o ponto de intersecção das frentes de fogo e a medição da altura de chamas para seis ensaios.

Com este trabalho verificou-se que a velocidade de propagação de ambas as frentes é influenciada positivamente, registando-se um maior aumento da velocidade na frente de fogo.

Verificou-se que a distância de intersecção do foco pontual com a frente de fogo corresponde a $di/a = 0,55$. Com base nos ensaios realizados foi elaborado um modelo empírico e para suplemento do mesmo foram apresentadas as alturas médias das chamas para cada ensaio realizado.

A altura média das chamas da frente de fogo é aproximadamente 0,5 m, por outro lado, para o foco pontual verifica-se alturas de chama mais altas no intervalo dos 10 aos 40 segundos.

Palavras-chave: Comportamento do Fogo, Incêndios Florestais, Focos secundários, Foco Pontual, Combate a Incêndios.

Abstract

The work aims to study the interaction of a spot fire with a fire front in horizontal beds. Laboratory tests were carried out with beds of fine dead fuels, more specifically straw where varying the distance between the ignitions.

The study was supported analysis of the propagation speeds of the spot fire and the fire front in a direction, determine the point of intersection of the fronts of fire and flame height measurement for six trials.

With this work it was found that the propagation velocity of both fronts is positively influenced by logging on to a further increase of speed in front of fire.

It was found that the distance from the focus point of intersection with the fire front corresponds to $di/a = 0.55$. Based on tests carried out an experimental model was designed to supplement and were presented the same average heights of the flame for each test performed.

The average height of the flames of the fire front is about 0.5 m, on the other hand, to sharp focus there is higher flame heights in the range from 10 to 40 seconds.

Keywords Fire Behaviour, Forest Fires, Spot Fires, Point Ignition, Fire Suppression.

Índice

Índice de Figuras.....	v
Índice de Tabelas.....	vii
Simbologia e Siglas.....	viii
Simbologia.....	viii
Siglas.....	ix
1. Introdução.....	1
1.1. Motivação e Âmbito do Estudo.....	1
1.1.1. Comportamento do Fogo.....	1
1.1.2. Focos Secundários.....	4
1.1.3. Objectivos.....	6
2. Análise do Problema.....	7
2.1. Montagem Experimental.....	11
3. Metodologia Experimental.....	12
3.1. Preparação do Ensaio.....	12
3.2. Realização do Ensaio.....	14
4. Tratamento de Dados.....	15
4.1. Tratamento de Dados.....	15
5. Resultados e Discussão.....	18
5.1. Condições Gerais de Realização dos Ensaios.....	18
5.2. Variação da Distância das Ignições (a).....	21
5.2.1. Ensaios (a = 1).....	21
5.2.2. Ensaios (a = 2).....	26
5.3. Modelo Empírico.....	30
5.4. Altura das Chamas.....	33
5.5. Variação da Carga.....	36
6. Conclusão.....	38
Referências bibliográficas.....	40
Anexo A.....	42

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Classificação dos incêndios florestais com base na classificação proposta por Viegas (2008).....	2
Figura 2. Mesa DE4.....	7
Figura 3. Esquema da configuração geométrica dos ensaios de frente linear com foco pontual.....	8
Figura 4. Esquema para um ensaio com ignição linear.....	9
Figura 5. Esquema para um ensaio com ignição pontual.....	9
Figura 6. Esquema para um ensaio com ignições linear e pontual.....	10
Figura 7. Montagem experimental.....	11
Figura 8. (a) Analisador de teor de humidade; (b) Balança de medição da carga do combustível.....	13
Figura 9. Foto de medição da velocidade básica de propagação ROS.....	13
Figura 10. Fotogramas de 5 em 5 segundos do ensaio SPFL-DE4-25, deste o instante 0s até aos 55s.....	15
Figura 11. Traçado de contornos do ensaio SPFL-DE4-23, no programa MicroStation.....	16
Figura 12. Traçados do perímetro de fogo para o ensaio SPFL-DE4-23, corrigido pela Macro.....	16
Figura 13. Esquema do processo de tratamento de dados.....	17
Figura 14. Altura Média do Leito para os ensaios realizados.....	18
Figura 15. Temperatura do ar para a realização dos ensaios.....	19
Figura 16. Teor de humidade do combustível (<i>mf</i>) em função da humidade relativa (HR).....	19
Figura 17. Humidade relativa do ar (HR) em função da temperatura do ar.....	20
Figura 18. Teor de humidade (<i>mf</i>) em função da temperatura do ar.....	20
Figura 19. Distância percorrida pela frente de fogo ao longo do tempo.....	21
Figura 20. Distância percorrida pelo foco ao longo do tempo.....	23
Figura 21. Comparação do ensaio de interacção SPFL-DE4-03 com os respectivos ensaios de referência.....	24
Figura 22. Gráfico da variação das velocidades de propagação ao longo da distância percorrida.....	25
Figura 23. Distância percorrida pela frente de fogo ao longo do tempo.....	26
Figura 24. Distância percorrida pelo foco ao longo do tempo.....	27
Figura 25. Comparação do ensaio SPFL-DE4-09 com os respectivos ensaios de referência.....	28
Figura 26. Gráfico da variação das velocidades de propagação ao longo da distância percorrida.....	29
Figura 27. Pontos médios para os ensaios de interacção com $a = 1$	31
Figura 28. Pontos médios para os ensaios de interacção com $a = 2$	31
Figura 29. Modelo empírico de todos os ensaios realizados com uma carga de $0,6 \text{ kg/m}^2$	32
Figura 30. Altura das chamas em metros para as frentes lineares.....	33
Figura 31. Altura das chamas em metros para os focos pontuais.....	34

Figura 32. Altura de chama para o ensaio SPFL-DE4-22. 34

Figura 33. Altura média das chamas em função do teor de humidade. 35

Figura 34. Comparação do ensaio SPFL-DE4-29 com os respectivos ensaios de referência.
 36

Figura 35. Comparação do ensaio SPFL-DE4-29 com os pontos médios dos ensaios para
 $a = 1$ e **$a = 2$** 37

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1. Ensaios realizados com uma carga de 0,6 kg/m² em base seca	10
Tabela 2. Ensaios realizados com uma carga de 0,8 kg/m² em base seca	10
Tabela 3. Parâmetros dos ensaios.	22
Tabela 4. Parâmetros dos ensaios.	23
Tabela 5. Distância onde as frentes de fogo se encontram.	25
Tabela 6. Parâmetros dos Ensaios.....	26
Tabela 7. Parâmetros dos Ensaios.....	28
Tabela 8. Distância onde as frentes se encontram.	29
Tabela 9. Parâmetros dos ensaios e altura média das chamas.	35
Tabela 10. Parâmetros para os ensaios realizados	42

SIMBOLOGIA E SIGLAS

Simbologia

a – Distância entre ignições [m]

F – Ignição pontual

L – Ignição linear

R_i – Velocidade de propagação instantânea [m/s]

R_0 – Velocidade de propagação básica [m/s]

R_1 – Velocidade de propagação da frente linear [m/s]

R_2 – Velocidade de propagação do foco pontual [m/s]

R' – Velocidade de propagação adimensional

ROS – Velocidade de propagação [m/s]

d/a – Distância adimensional

di/a – Distância de intersecção adimensional

m_f – Teor de humidade do combustível [%]

HR – Humidade relativa [%]

T_{ar} – Temperatura do ar [$^{\circ}C$]

m – Declive da recta da equação, $y = mx + b$

b – Constante linear da equação, $y = mx + b$

h – Altura das chamas [m]

Δx – Diferença de posição [m]

Δt – Diferença de intervalo de tempo [s]

dx – Diferença de posição [m]

dt – Diferença de intervalo de tempo [s]

Siglas

ADAI – Associação para o Desenvolvimento da Aerodinâmica Industrial

CEIF – Centro de Estudos sobre Incêndios Florestais

DEM – Departamento de Engenharia Mecânica

FCTUC – Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra

LEIF – Laboratório de Estudos sobre Incêndios Florestais

1. INTRODUÇÃO

1.1. Motivação e Âmbito do Estudo

Todos os anos é relatada na comunicação social a ocorrência de incêndios florestais em território nacional e noutros países, que originam a perda de bens e em certos casos de vidas. A necessidade de perceber o comportamento do fogo levou-o a ser objecto de estudo, para melhor compreensão dos fenómenos a ele associados.

No decorrer de um incêndio florestal, muitas vezes ocorrem projecções de partículas que originam focos secundários (Byram, 1957; Albini, 1979; Beck et al., 2005). A formação de focos secundários é precedida da geração e emissão de partículas, que ascendem na coluna de convecção, sendo as partículas arrastadas pelo vento, ocorrendo combustão da mesma durante a sua trajectória. Na trajectória descendente a partícula pode originar um novo foco de fogo quando entra em contacto com o combustível no solo, caso se reúnam as condições ideais.

O presente trabalho dedica-se ao estudo da propagação inicial destes focos secundários, com o intuito de perceber melhor a dinâmica da interacção destes focos com a frente principal de fogo.

1.1.1. Comportamento do Fogo

Em combustíveis lenhosos a sua combustão está dividida em três fases, apesar de que no avanço de uma frente de chamas elas ocorrem simultaneamente. Numa primeira fase, existe o pré-aquecimento das partículas do combustível que se encontram à frente da frente de chama, que origina um aumento da temperatura das partículas de combustível até que ocorra evaporação da água existente no combustível e o combustível é parcialmente gaseificado. Na segunda fase continua a pirólise acompanhada da queima de fracções voláteis libertadas durante a destilação do combustível. Na última e terceira fase ocorre a queima do carvão, restando resíduos de cinzas (Byram, 1959). Por se tratar de uma reacção química exotérmica durante a combustão liberta-se calor. Para promover a propagação do

fogo é necessário combustível, oxigénio e uma temperatura de ignição para iniciar e manter o processo de combustão. Estes três factores constituem o conhecido “Triângulo do Fogo”, (Byram, 1969). A transferência de calor ocorre por condução, convecção e radiação (Byram, 1957; Beck et al., 2005).

De acordo com André e Viegas (2001) no desenvolvimento de uma frente de fogo existem oito fases: ignição, crescimento, pleno desenvolvimento de um certo regime de propagação, eventual transição de regime de propagação, decaimento das chamas, extinção das chamas, extinção da combustão em brasa e arrefecimento dos resíduos da combustão.

Os incêndios florestais por norma são divididos em três categorias consoante a sua forma de propagação e o tipo de combustível: fogos subterrâneos, fogos de superfícies e fogos de copas. Uma classificação complementar à existente foi proposta por Viegas (2008), classificando o comportamento do fogo em comportamento do fogo normal e comportamento extremo do fogo. O comportamento do fogo normal engloba os fogos subterrâneos e os fogos de superfície, por outro lado os fogos eruptivos, projecções de partículas, fogos de copas e frentes convergentes correspondem ao comportamento extremo do fogo, esquematizado na Figura 1. Percebida a origem e os modos de propagação de um incêndio florestal interessa perceber quais os factores que irão condicionar o comportamento do fogo.



Figura 1. Classificação dos incêndios florestais com base na classificação proposta por Viegas (2008).

Os factores condicionantes do fogo são divididos classicamente em três: combustível, topografia e meteorologia, que constituem o denominado triângulo do comportamento do fogo. Viegas (2006) implementa a variável tempo e deste modo passam a ser quatro os factores que caracterizam o comportamento do fogo e definem deste modo o “quadrado do fogo”.

Um leito combustível pode ser analisado segundo uma perspectiva microscópica tendo em conta as propriedades das partículas do combustível e uma perspectiva macroscópica na qual se analisam as propriedades globais do leito. A perspectiva macroscópica engloba os seguintes conceitos: composição específica do leito, altura do leito, carga do combustível e porosidade do leito. Por outro lado, composição química, estado vegetativo, dimensão característica das partículas, relação superfície/volume, densidade das partículas, calor específico, poder calorífico e teor de humidade correspondem aos conceitos que englobam a perspectiva microscópica (Viegas, 2006). Dos conceitos referidos anteriormente, carga de combustível indica a massa de combustível seco existente por unidade de área, sendo expressa em kg/m^2 . O teor de humidade, m_f , é a relação entre massa de água, m_w , presente na partícula e a massa total, m_s , depois de seca e apresenta-se em percentagem. Esta propriedade depende na sua maioria do equilíbrio entre a partícula e o meio ambiente que a rodeia. Para os combustíveis finos mortos o teor de humidade das partículas adquire maior importância pois é condicionante de diversos aspectos do comportamento do fogo tais como a: inflamabilidade, combustibilidade, intensidade de propagação, transição do fogo para as copas e a ocorrência de focos secundários. A combustibilidade de um leito é caracterizada pela capacidade que o leito tem para a propagação de uma frente de chamas. O principal parâmetro que caracteriza a combustibilidade é a velocidade de propagação básica, R_0 . Sendo R_0 medido num leito combustível horizontal, sem a presença de vento, onde a frente de chamas é linear e para o qual a altura das chamas é muito inferior à largura do leito. A combustibilidade também pode ser caracterizada pela altura das chamas, comprimento das chamas e taxa de combustão para qualquer que seja a topografia e estando ou não na presença de vento (Viegas, 2006).

Relativamente ao factor topografia tem-se em especial atenção ao declive, orientação e concavidade do terreno. Para declives negativos, caso de um frente de fogo a

descer uma encosta, as chamas tendem a inclinar-se para a zona já queimada, deste modo as chamas pouco influenciam no processo de transmissão de calor por radiação que está associado à propagação e que faz com que a velocidade de propagação seja constante. Para declives positivos, caso de um frente de chamas a subir uma encosta, as chamas tendem a inclinar-se sobre o leito combustível que ainda não foi queimado e deste modo propiciam uma maior transferência de calor por radiação que provoca um aumento da velocidade de propagação. Terrenos orientados a sul, como estão sujeitos a maior quantidade de radiação solar durante o dia acabam por influenciar a velocidade de propagação de uma frente de chamas (Viegas, 2006).

A importância do factor meteorologia advém do facto de o teor de humidade do leito combustível ser influenciado pelo ambiente, mais precisamente pela temperatura e humidade relativa do ar, vento, radiação solar e precipitação (Byram, 1959; Viegas, 2006). Destes o mais importante na propagação do fogo é o vento pois a sua velocidade e direcção são influenciados pelas características do terreno e influenciam o comportamento do fogo uma vez que a velocidade de propagação pode aumentar.

A quarta classe, o tempo é englobada porque num incêndio as suas características de propagação alteram-se ao longo do tempo mesmo quando os outros factores permanecem constantes.

1.1.2. Focos Secundários

Nos incêndios florestais de alta intensidade a principal forma de propagação do fogo é através da projecção de partículas (Tarifa et al., 1965). Estas partículas podem ser projectadas a grandes distâncias originando novos focos secundários vários quilómetros à frente do perímetro do incêndio (Tarifa et al., 1965).

O processo de formação de focos secundários descrito anteriormente divide-se em quatro etapas: (1) emissão de partículas, (2) transporte, (3) combustão e (4) ignição.

Assim que a partícula chega à etapa 4, origina o novo foco de incêndio e este poderá evoluir de forma independente ou poderá ser absorvido rapidamente pela frente principal. Isto depende da distância a que a partícula foi projectada, caso seja projectada a grandes distâncias pode originar um novo foco de incêndio, que com o passar do tempo irá se transformar numa nova frente de fogo, deste modo convém actuar sobre os novos focos o mais rápido possível. Durante o combate aos incêndios é preciso muita atenção com a

formação de focos secundários de modo a precaver situações de risco, uma vez que os bombeiros podem ficar encurralados pelo fogo ou serem surpreendidos pelo aumento da velocidade de propagação. Deste modo devem ser montados postos de vigia no terreno de modo a salvaguardar a segurança dos bombeiros.

O crescimento de um foco secundário depende de vários factores, o teor de humidade dos combustíveis, a área do leito, a velocidade do vento, a estabilidade atmosférica e a topografia (McRae, 1999). Segundo Beck et al. (2005) a velocidade de propagação de uma frente de fogo linear é superior à velocidade de propagação de um foco. Numa propagação linear a velocidade é constante, por outro lado no desenvolver de um foco pontual ocorre uma aceleração da velocidade de propagação até que a velocidade de propagação tende a estabilizar. Deste modo uma frente linear percorre uma maior distância que um foco secundário para o mesmo tempo (Beck et al, 2005).

Nos focos secundários, num terreno plano e sem vento, o perímetro do fogo deve manter uma forma circular com centro no ponto de ignição de acordo com Porterie et al. (2007), ou seja o fogo propaga-se de forma circular, o raio da circunferência aumenta com o tempo (Beck et al., 2005; Ventura e Vasconcelos, 2006). Sob o efeito do vento ou do declive assume uma forma elíptica (Beck et al., 2005; Ventura e Vasconcelos, 2006; Porterie et al., 2007).

ESTADO DA ARTE

Este trabalho vem dar continuidade a alguns estudos já realizados. No presente ano foi apresentada uma dissertação de mestrado realizada por Rosa (2010) sobre a interacção entre focos secundários, onde realizou ensaios com dois focos pontuais. No seu estudo variou a distância entre focos e o declive.

Raposo (2010) apresentou uma tese de mestrado cujo estudo foi sobre frentes convergentes. Estes dois trabalhos foram duas teses de mestrado elaboradas por antigos alunos de mestrado do DEM.

Morvan e Méradji (2010) realizaram ensaios de campo com duas frentes de fogo e simularam numericamente a interacção entre duas frentes de fogo.

No seguimento destes três trabalhos surge o trabalho aqui proposto que engloba a interacção de um foco secundário com uma frente de fogo.

1.1.3. Objectivos

O trabalho apresentado teve como objectivo primordial o estudo da interacção de um foco secundário com uma frente de fogo linear, que consistiu na análise da velocidade de propagação em função da distância entre elas. Numa segunda fase variou-se a carga de combustível de forma a verificar a sua influência nesta interacção.

Outro dos objectivos foi a elaboração de um modelo empírico e análise da altura de chamas dos ensaios realizados.

2. ANÁLISE DO PROBLEMA

No estudo da interacção de focos secundários com uma frente de fogo optou-se por iniciar o estudo realizando ensaios laboratoriais com um leito sem vento e sem declive. Deste modo diminui-se os factores condicionantes do fogo, ficando a propagação do fogo dependente de duas classes que definem o “triângulo do fogo”, o combustível e a meteorologia. Foi utilizada a aba esquerda da mesa desfiladeiro grande, também designada por DE4 como demonstra a Figura 2.

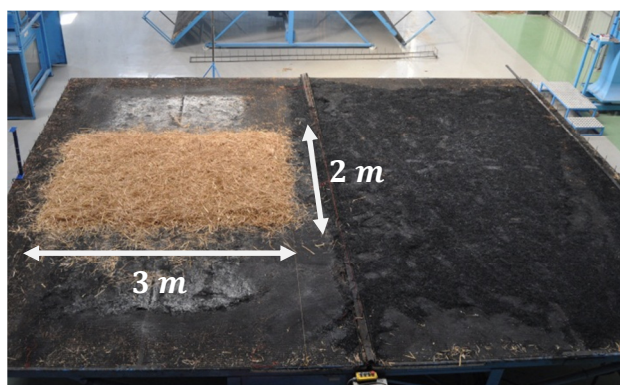


Figura 2. Mesa DE4.

Na realização dos ensaios optou-se por um leito de combustíveis finos mortos, mais especificamente palha, com uma área de 6 m^2 (2 m de comprimento por 3 m de largura), de acordo com a Figura 2. Para os primeiros ensaios foi estabelecido o uso de uma carga de $0,6\text{ kg/m}^2$ em base seca.

Como um dos objectivos tinha como base a análise da variação da velocidade de propagação da frente linear e do foco secundário quando temos a presença dos dois, surgiu a necessidade de fazer ensaios de referência, sendo realizado um novo tipo de ensaio em que se tem unicamente a frente linear a avançar e deste modo temos a sua velocidade de propagação. Da mesma maneira idealizou-se a realização de um ensaio com um foco pontual para ter uma referência da velocidade de propagação de um foco secundário. Com a realização dos três tipos de ensaios completava-se uma série de ensaios, e foi objecto de estudo uma situação com $a = 1\text{ m}$ e outra com $a = 2\text{ m}$, sendo a a

distância entre a ignição linear, L , e a ignição pontual, F . Na Figura 3 está esquematizada a configuração para um ensaio de frente linear com foco pontual.

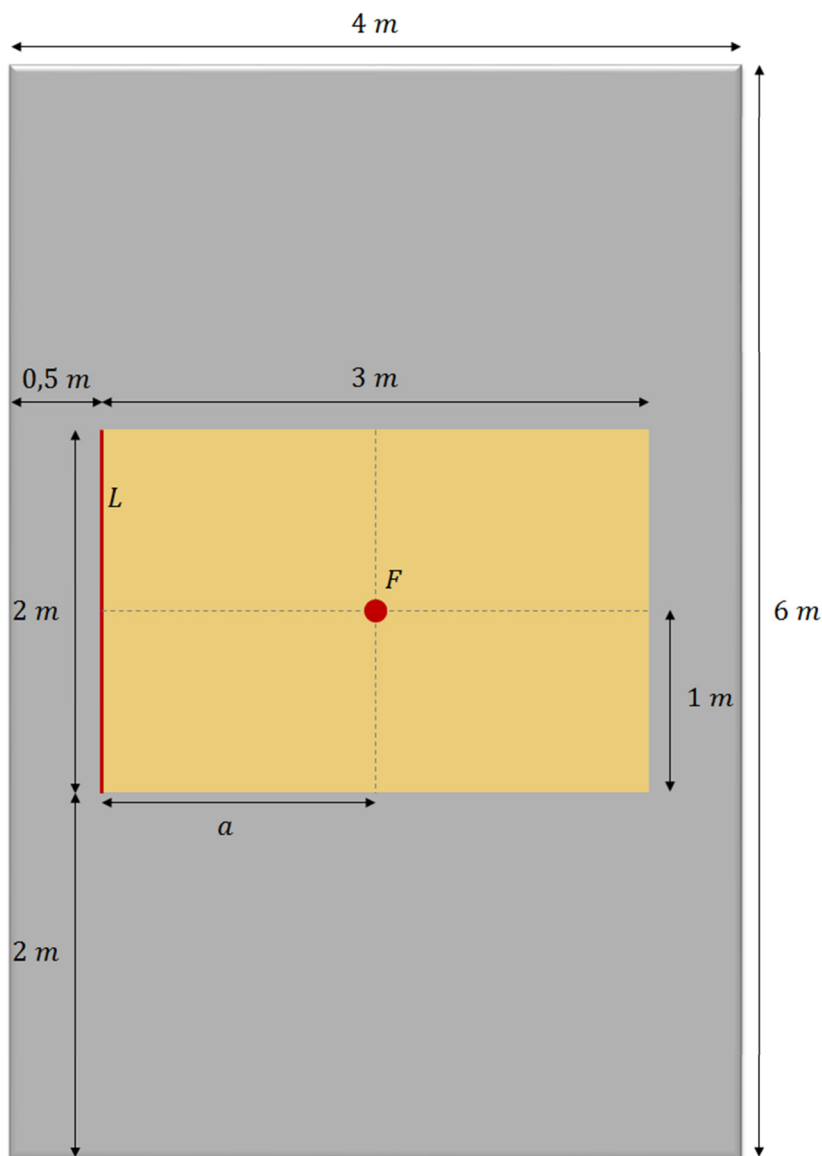


Figura 3. Esquema da configuração geométrica dos ensaios de frente linear com foco pontual.

O ensaio da Figura 4 é um ensaio realizado nas condições básicas, deste modo a sua velocidade de propagação linear, R_1 , vai ser igual à velocidade de propagação básica, R_0 . No entanto o ensaio da Figura 5 não reúne todas as condições básicas pois a sua frente de chama não é linear, deste modo a velocidade de propagação do foco, R_2 , não é igual a R_0 . Estas duas velocidades, R_1 e R_2 correspondem às velocidades de referência para esta série. Deste modo comparando as velocidades de propagação dos ensaios de referência

com as velocidades de propagação, R_1 e R_2 , do ensaio esquematizado na Figura 6, pode-se verificar a influência da distância a , na interação da frente com o foco.

Definidos os tipos de ensaios que compunham uma série, foi estabelecida a meta de realizar três séries para uma distância $a = 1\text{ m}$ e outras três séries para uma distância $a = 2\text{ m}$. Após a conclusão destas seis séries planeou-se a realização de seis repetições semelhantes ao ensaio esquematizado na Figura 6, três para cada uma das situações de a , perfazendo ao todo 26 ensaios (Tabela 1).

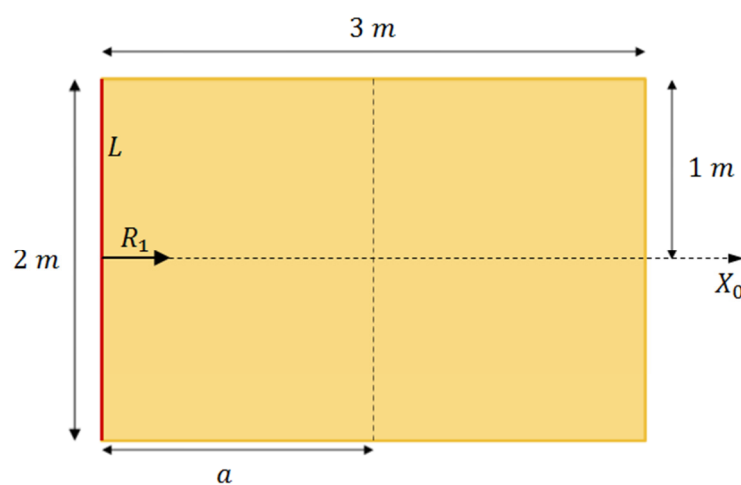


Figura 4. Esquema para um ensaio com ignição linear.

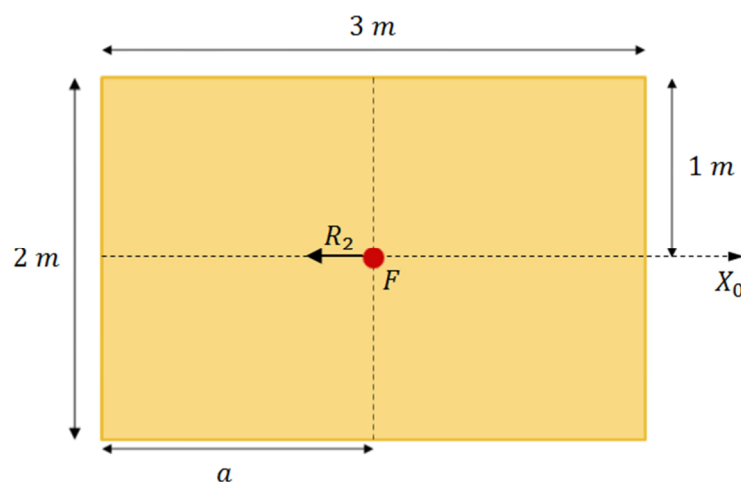


Figura 5. Esquema para um ensaio com ignição pontual.

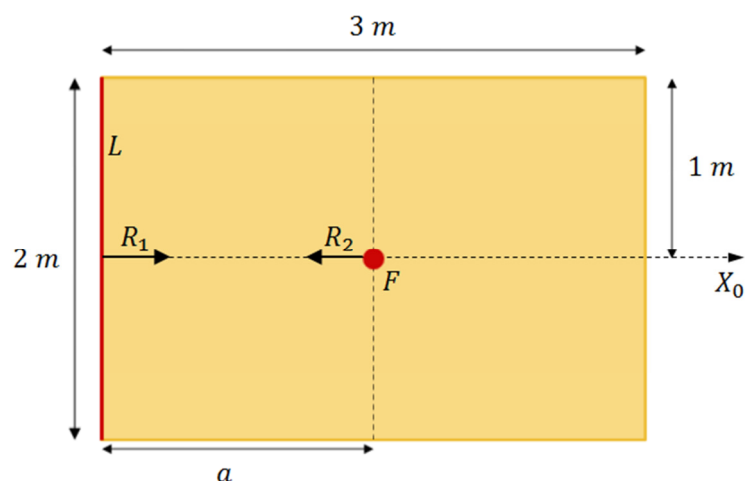


Figura 6. Esquema para um ensaio com ignições linear e pontual.

Tabela 1. Ensaios realizados com uma carga de $0,6 \text{ kg/m}^2$ em base seca

a [m]	Tipo de ignição	Ref. Ensaio: SPFL-DE4
1	L	01; 10; 18
	P	02; 11; 19
	$L + P$	03; 14; 20; 21; 23; 25
2	L	05; 08; 15
	P	07; 13; 16
	$L + P$	06; 09; 17; 22; 24; 26

Por fim foi proposta uma nova fase que englobava a realização de uma série de ensaios mas desta vez com uma carga de $0,8 \text{ kg/m}^2$ em base seca para uma distância $a = 1 \text{ m}$, (Tabela 2).

Tabela 2. Ensaios realizados com uma carga de $0,8 \text{ kg/m}^2$ em base seca

a [m]	Tipo de ignição	Ref. Ensaio: SPFL-DE4
1	L	27
	P	28
	$L + P$	29

A referência adotada para os ensaios foi SPFL-DE4, corresponde a um ensaio de foco secundário com uma frente linear, SPFL, realizado na Mesa Desfiladeiro Grande, DE4. Para o estudo da interação de um foco secundário com uma frente de fogo foram realizados 29 ensaios em laboratório.

2.1. Montagem Experimental

A vertente laboratorial foi realizada no Laboratório de Estudos sobre Incêndios Florestais da Associação para o Desenvolvimento da Aerodinâmica Industrial (CEIF/ADAI) - Universidade de Coimbra, situado na Lousã. Este laboratório dispõe de equipamento ímpar que constitui uma mais-valia a nível internacional.

Como já foi referido anteriormente os ensaios foram realizados na mesa DE4, sendo construído um leito com as dimensões definidas na Figura 3 para cada ensaio que se realizou.

Foi colocada uma câmara fotográfica digital ao nível do leito para serem tiradas fotografias laterais temporizadas das frentes de fogo.

Numa plataforma elevatória foram colocados uma câmara de infravermelhos, (*Flir Systems ThermoCAM SC640* com um espectro de 7,5-13,5 μm), e uma câmara de vídeo visível para realizar filmagens de topo do avanço das frentes de fogo. Na Figura 7 está representada a montagem experimental descrita.



Figura 7. Montagem experimental.

3. METODOLOGIA EXPERIMENTAL

A metodologia descrita em baixo teve a presença de pelo menos três operadores responsáveis por anotar na folha de registo os respectivos nomes, data e referência do ensaio. Dois operadores ficaram responsáveis pelas ignições e um terceiro operador foi responsável pelas filmagens no topo da plataforma.

A metodologia do ensaio está dividida em duas fases: preparação e realização.

3.1. Preparação do Ensaio

A preparação do ensaio principiou com a medição do teor de humidade do combustível. Executou-se a recolha da amostra de combustível, de seguida anotou-se o tipo de combustível, temperatura e humidade relativa do ar. Posteriormente procedeu-se à medição do teor de humidade do combustível no Analisador de Teor de Humidade (A&D MX-5 com 0,1% de precisão), ver Figura 8 (a), de acordo com o protocolo proposto por Rossa (2009).

Feita a medição do teor de humidade do combustível iniciou-se a preparação do leito. O passo seguinte passou pela conversão do valor do teor de humidade para base seca e determinação do peso total de combustível a utilizar posteriormente no ensaio, recorrendo uma tabela em formato Excel. De seguida fez-se a pesagem do combustível na Balança (A&D HW-100KGL com 20 g de precisão) com auxílio do recipiente apropriado para colocar o combustível, ver Figura 8 (b).

Efectuou-se a marcação dos limites do leito com auxílio de fios de algodão para a dimensão desejada e estabelecida anteriormente. Procedeu-se à distribuição regular do combustível na área delimitada pelos fios de algodão, de modo a obter um leito homogéneo. Foram registadas cinco medições aleatórias da altura de leito e anotadas na folha de registo.

Caso o ensaio a ser realizado seja um ensaio de interacção, são realizados ensaios de R_0 antes de se realizar o ensaio principal. São ensaios realizados para a mesma carga e condições ambientais do ensaio principal e a área destes ensaios é de $1,25 m^2$. São

colocados fios de 25 em 25 *cm* e são registados os tempos em que estes são cortados pela frente de fogo como se pode verificar na Figura 9.

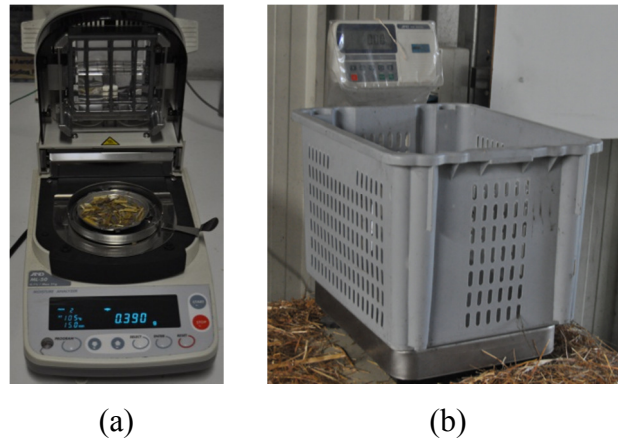


Figura 8. (a) Analisador de teor de humidade; (b) Balança de medição da carga do combustível.

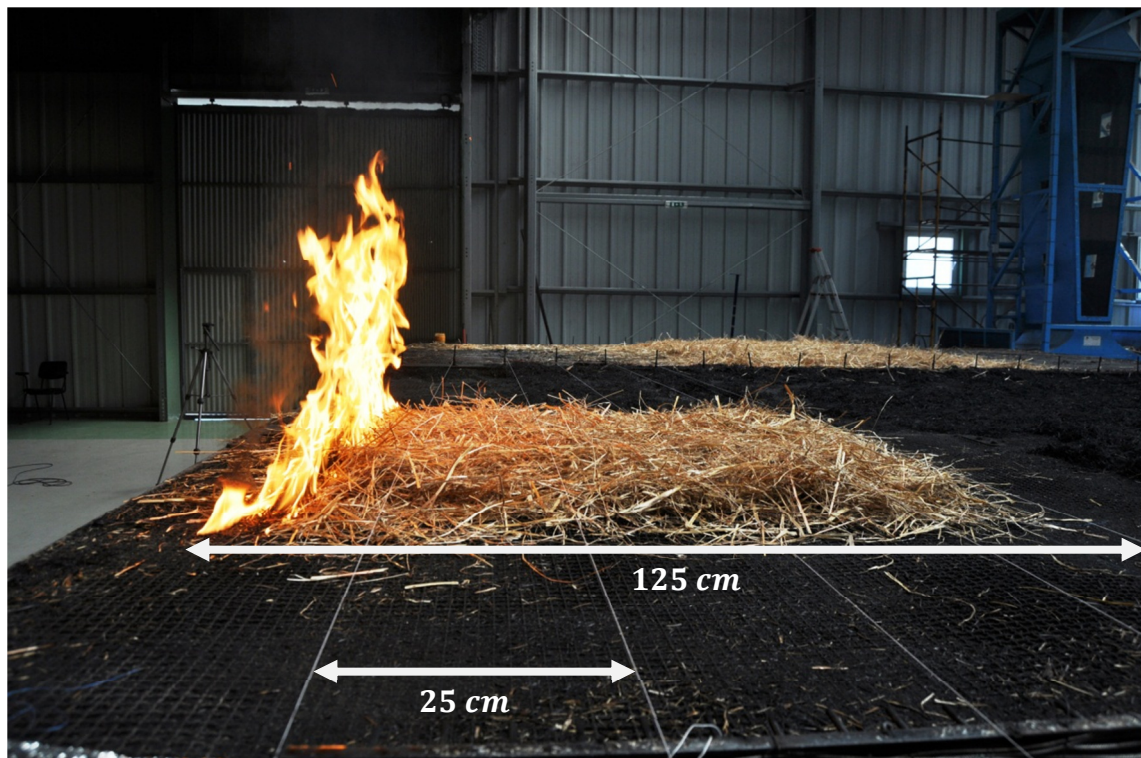


Figura 9. Foto de medição da velocidade básica de propagação ROS.

3.2. Realização do Ensaio

Na realização do ensaio voltou-se a recolher uma amostra de combustível, do leito na mesa DE4, sendo medido e registado o teor de humidade e por fim convertido para base seca. Tendo-se registado a temperatura e humidade relativa do ar durante a recolha da amostra, seguindo-se a preparação das ignições para o ensaio. Neste estudo desenvolvido utilizaram-se dois tipos de ignição, linear e pontual. Para a sua preparação foi utilizado um fio de lã com 2 m e uma bola de algodão, ambos embebidos em gasolina.

Concluído o ultimo passo, passou-se à activação das ignições utilizadas no ensaio, registado em imagens visíveis e infravermelhos. Terminado o ensaio deixou-se arrefecer a mesa de ensaios e foram aspirados os resíduos depois de certificada a inexistência de combustão dos mesmos. A necessidade de arrefecer a mesa de ensaios prende-se com o facto de não perturbar a variação do teor de humidade do combustível associado às condições ambientais por espalhar o combustível na área definida para o leito que ainda esteja quente do ensaio anterior.

No **Anexo A** está a tabela com os parâmetros para os ensaios realizados.

4. TRATAMENTO DE DADOS

4.1. Tratamento de Dados

Foram retiradas fotos laterais temporizadas ao nível do leito para efeitos de controlo e realizados vídeos de topo para a mesma função. Os filmes registados com a câmara de infravermelhos foram a principal fonte de dados para os ensaios. Dos filmes de infravermelho foram retirados fotogramas com intervalos de tempo de cinco segundos entre cada um de forma a poder acompanhar a evolução da propagação das frentes de fogo. Nalguns casos foram seleccionados outros instantes de tempo, a fim de analisar aspectos importantes da interacção, nomeadamente o encontro das duas frentes.

Para o tratamento dos dados começou-se pela utilização do programa *Therma CAMTM Researcher*, para selecção dos fotogramas correspondentes a cada ensaio com intervalos de cinco segundos com início na activação das ignições, Figura 10.

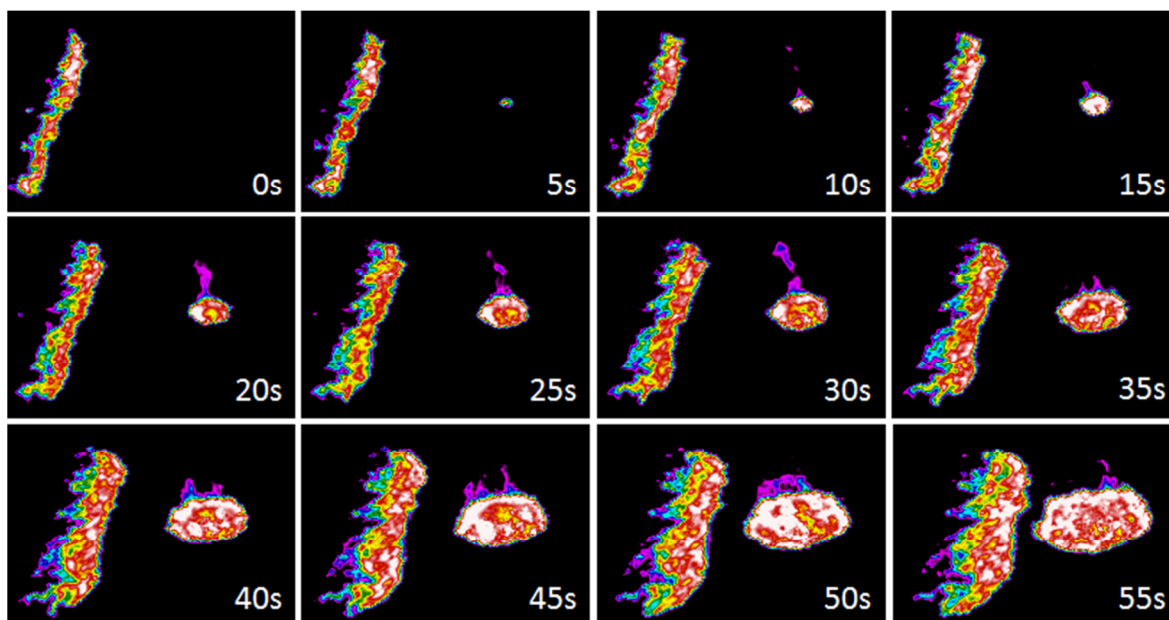


Figura 10. Fotogramas de 5 em 5 segundos do ensaio SPFL-DE4-25, deste o instante 0s até aos 55s.

A utilização do programa CAD *MicroStation 95* possibilitou traçar os contornos do avanço das frentes de fogo ao longo do ensaio, Figura 11. Também permitiu medir a distância percorrida pela frente ao longo do ensaio.

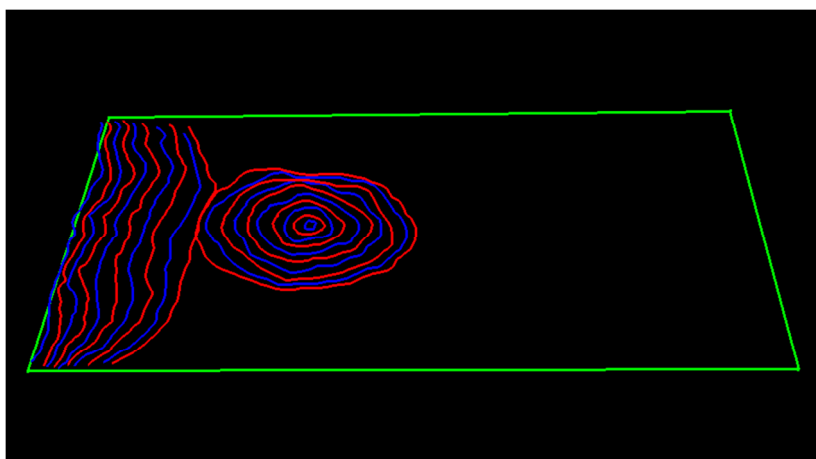


Figura 11. Traçado de contornos do ensaio SPFL-DE4-23, no programa MicroStation.

No programa referido anteriormente foi utilizada uma Macro desenvolvida por Gonçalves (2000), da ADAI, que permite fazer a correcção dos erros de paralelismo devido ao facto de a filmagens de infravermelho não serem perpendiculares ao plano da mesa, sendo a correcção apresentada num ficheiro de texto.

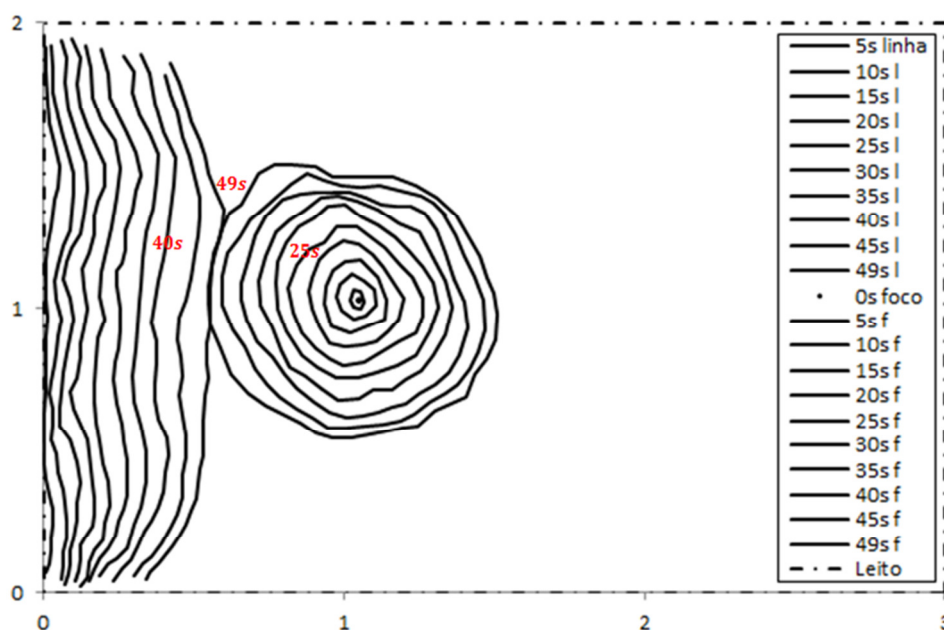


Figura 12. Traçados do perímetro de fogo para o ensaio SPFL-DE4-23, corrigido pela Macro.

Posteriormente são medidas as distâncias entre cada traçado de fogo no programa *MicroStation 95*. Com base na distância entre traçados e sabendo o tempo que essa distância demora a ser percorrida, determina-se a velocidade instantânea, equação [1].

$$R_i = \frac{dx}{dt} \approx \frac{\Delta x}{\Delta t} \tag{1}$$

Para facilitar a comparação dos ensaios e permitir futura extrapolação dos resultados a outros combustíveis, recorreu-se uma forma adimensional da velocidade de propagação, R' , representada na equação [2].

$$R' = \frac{R_i}{R_0} \tag{2}$$

Sendo R_0 a velocidade de propagação básica de uma linha de fogo, em condições de leito horizontal e sem vento.

Para o tratamento de dados foram utilizados três programas informáticos, *MicroStation 95*, *Microsoft Excel 2010* e *Therma CAMTM Researcher Pro 2.8 SR-3*.

Na Figura 13 está esquematizado de forma sucinta todo o processo de tratamento de dados.



Figura 13. Esquema do processo de tratamento de dados.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. Condições Gerais de Realização dos Ensaios

Para a realização dos ensaios tentou-se ter as condições atmosféricas semelhantes ao longo do programa experimental.

Os ensaios SPFL-DE4-04 e SPFL-DE4-12 foram invalidados devido a erros experimentais, o que motivou a repetição dos mesmos.

Os 24 ensaios com uma carga de $0,6 \text{ kg/m}^2$ em base seca apresentam uma altura média do leito de $7,7 \text{ cm}$. Por sua vez os três ensaios com carga de $0,8 \text{ kg/m}^2$ em base seca apresentam uma altura média do leito de $9,9 \text{ cm}$.

Pela razão de em alguns ensaios a palha se encontrar mais quebradiça, isto influenciou a variação da altura dos ensaios para uma carga de $0,6 \text{ kg/m}^2$ em base seca, esta influencia deve-se ao facto de o leito estar mais compacto.

Na Figura 14 está representada a altura média, calculada com base nas medições de altura de leito realizadas para os 29 ensaios.

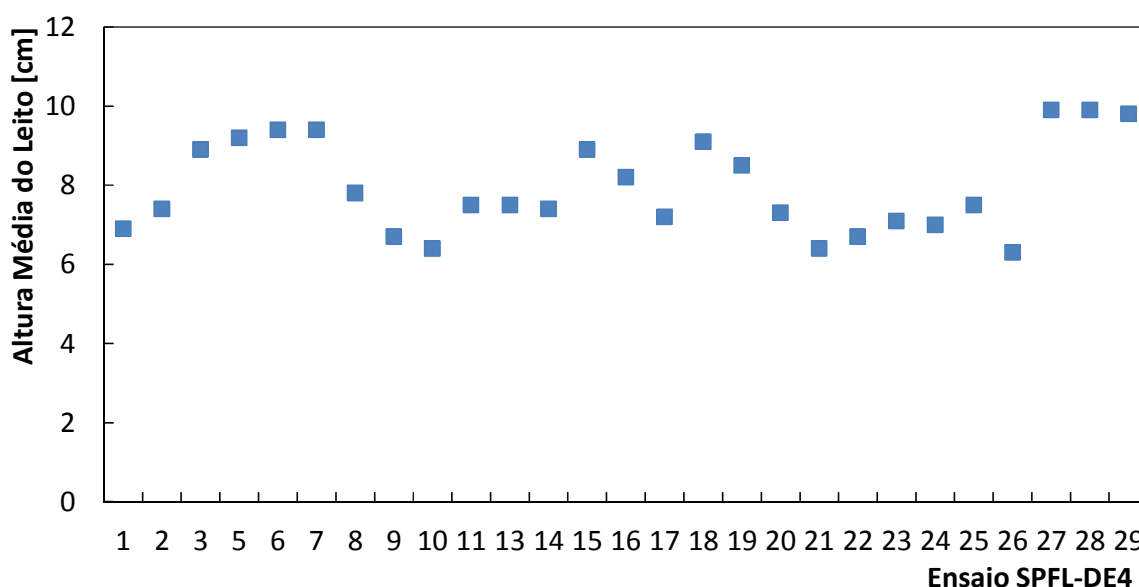


Figura 14 Altura Média do Leito para os ensaios realizados.

A Figura 15 mostra as temperaturas registadas imediatamente antes da ignição de cada ensaio. Os ensaios indicados foram realizados nos meses de Abril, Julho e Agosto.

Os ensaios realizados nos meses de Julho e Agosto apresentam maiores temperaturas como é natural em Portugal.

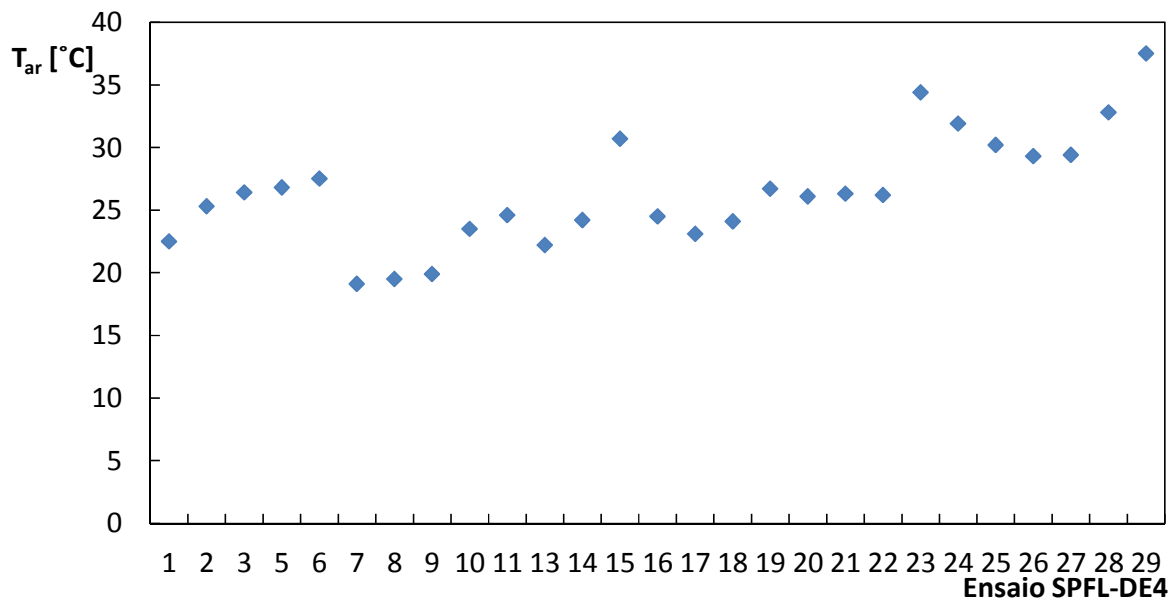


Figura 15. Temperatura do ar para a realização dos ensaios.

Na Figura 16 verifica-se que humidade relativa do ar influencia a humidade do combustível variando em relação directa de acordo com Byram (1959).

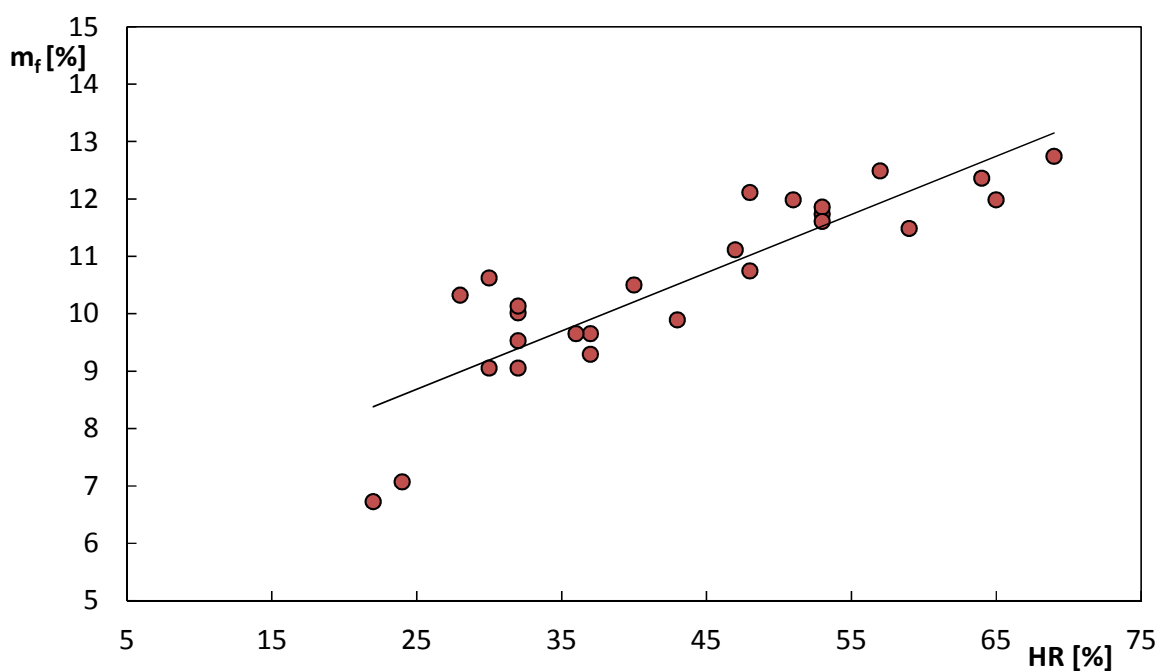


Figura 16. Teor de humidade do combustível (m_f) em função da humidade relativa (HR).

Verifica-se pelas Figura 17 e Figura 18 que com o aumento da temperatura a humidade relativa do ar bem como a humidade do combustível tendem a diminuir.

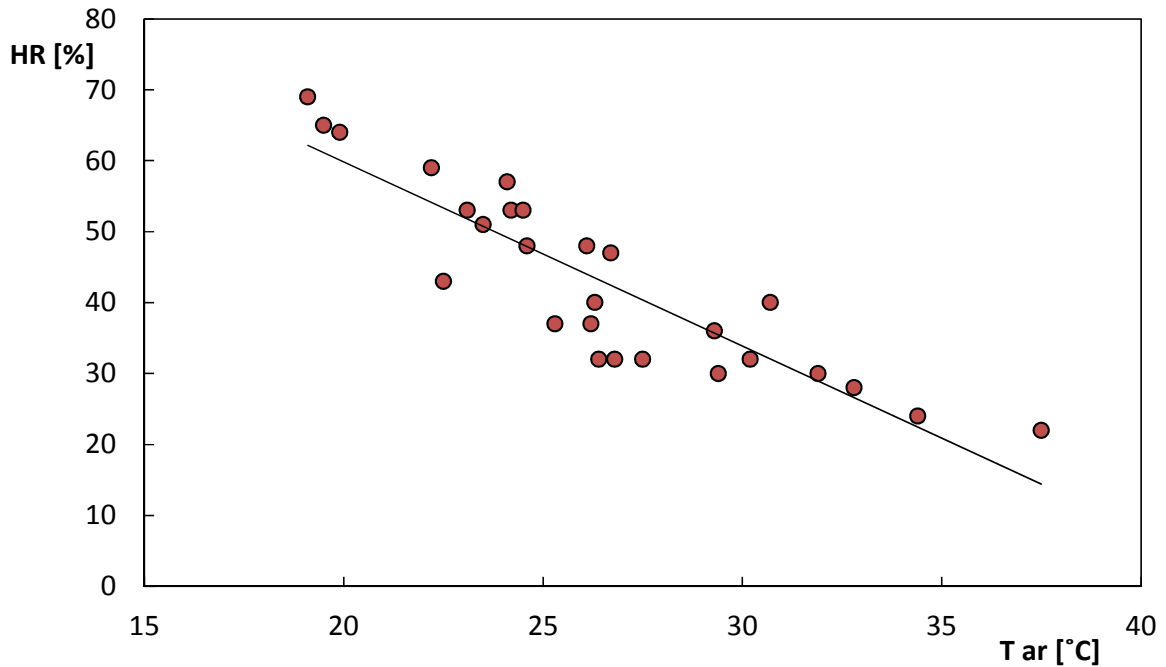


Figura 17. Humidade relativa do ar (HR) em função da temperatura do ar.

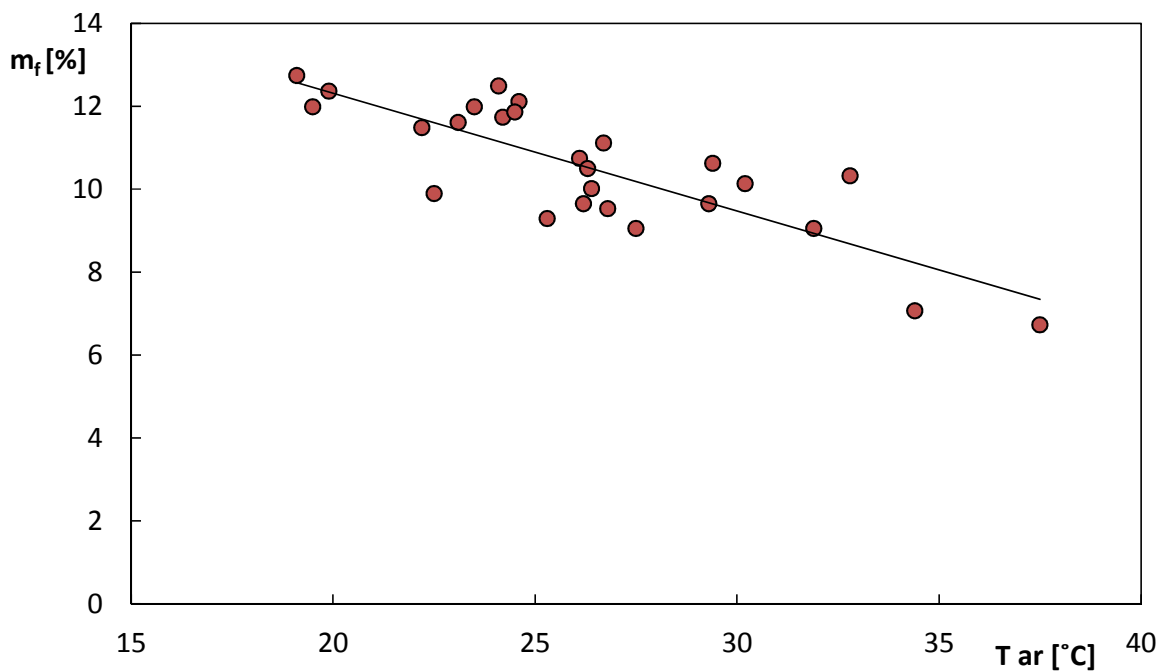


Figura 18. Teor de humidade (m_f) em função da temperatura do ar.

5.2. Variação da Distância das Ignições (a)

De forma a facilitar a compreensão dos resultados, estes serão divididos de acordo com a distância entre ignições e a carga utilizada.

5.2.1. Ensaios ($a = 1$)

Foram realizados três tipos de ensaios para uma distância entre ignições igual a um metro. De seguida são apresentados os ensaios de referência e os ensaios em que ocorre interacção.

5.2.1.1. Ensaios de Referência Linear

Na Figura 19 estão representadas as distâncias percorridas pelas frentes de fogo para os ensaios de referência realizados. Através do declive das rectas é possível determinar a velocidade média de propagação da frente, R_1 . Como era de esperar verificase que a velocidade de propagação de uma frente de fogo linear em terreno plano e sem vento apresenta uma velocidade de propagação constante.

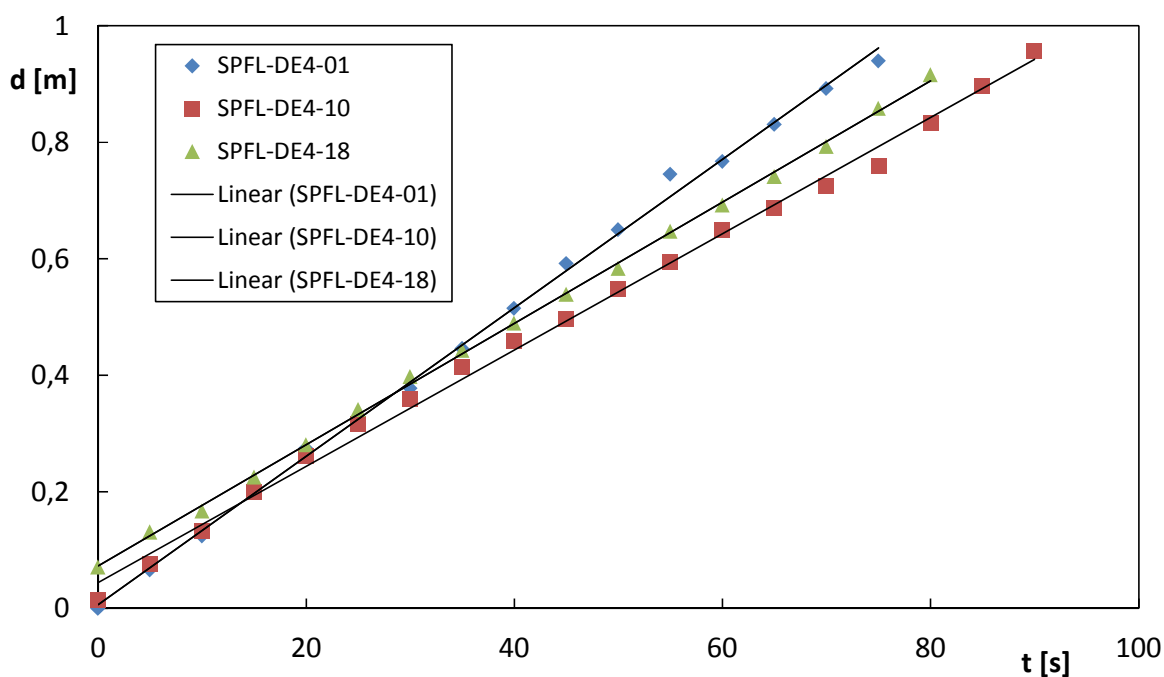


Figura 19. Distância percorrida pela frente de fogo ao longo do tempo.

As rectas presentes na Figura 19 são determinadas com base na equação [3].

$$y = mx + b \quad [3]$$

Na Tabela 3 são apresentados as velocidades de propagação R_1 média e os parâmetros que caracterizam cada recta, para os respectivos ensaios realizados nas condições indicadas.

Tabela 3. Parâmetros dos ensaios.

Ref. Ensaio	<i>m</i>	<i>b</i>	r^2	R_1 média [cm/s]
SPFL-DE4-01	0,0127	0,0062	0,9980	1,27
SPFL-DE4-10	0,0100	0,0443	0,9966	1,00
SPFL-DE4-18	0,0104	0,0730	0,9993	1,04

5.2.1.2. Ensaios de Referência Pontual

Para os ensaios com foco pontual apenas se considera a distância percorrida após os primeiros segundos uma vez que nesta fase se verifica um aumento progressivo da velocidade. Depois deste intervalo a velocidade tende a estabilizar como refere Beck et al. (2005). Nestes ensaios realizados verifica-se que a velocidade média de propagação é inferior para as velocidades registadas nas mesmas condições para ensaios de frente linear.

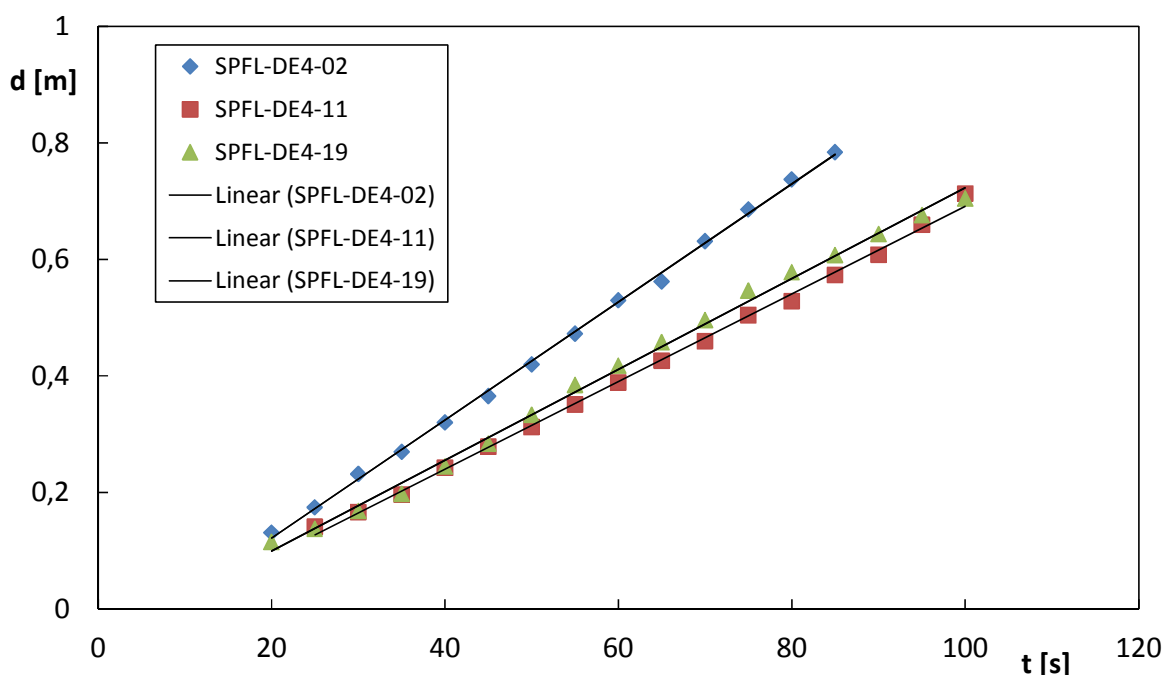


Figura 20. Distância percorrida pelo foco ao longo do tempo.

Na Tabela 4 são apresentadas as velocidades médias de propagação registadas para os ensaios com foco pontual. Verifica-se que estas velocidades são inferiores à velocidade de propagação de uma frente linear.

Tabela 4. Parâmetros dos ensaios.

Ref. Ensaio	m	b	r^2	R_2 média [cm/s]	R_0 [cm/s]	R'
SPFL-DE4-02	0,0101	- 0,0811	0,9988	1,01	1,27	0,80
SPFL-DE4-11	0,0075	- 0,0609	0,9978	0,75	1,00	0,75
SPFL-DE4-19	0,0078	- 0,0566	0,9967	0,78	1,04	0,75

5.2.1.3. Ensaios de Interação

Pela análise da Figura 21 verifica-se que existe um aumento da velocidade de propagação da frente linear à medida que ambas as frentes de fogo se aproximam. Também é visível um ligeiro aumento da velocidade de propagação do foco pontual.

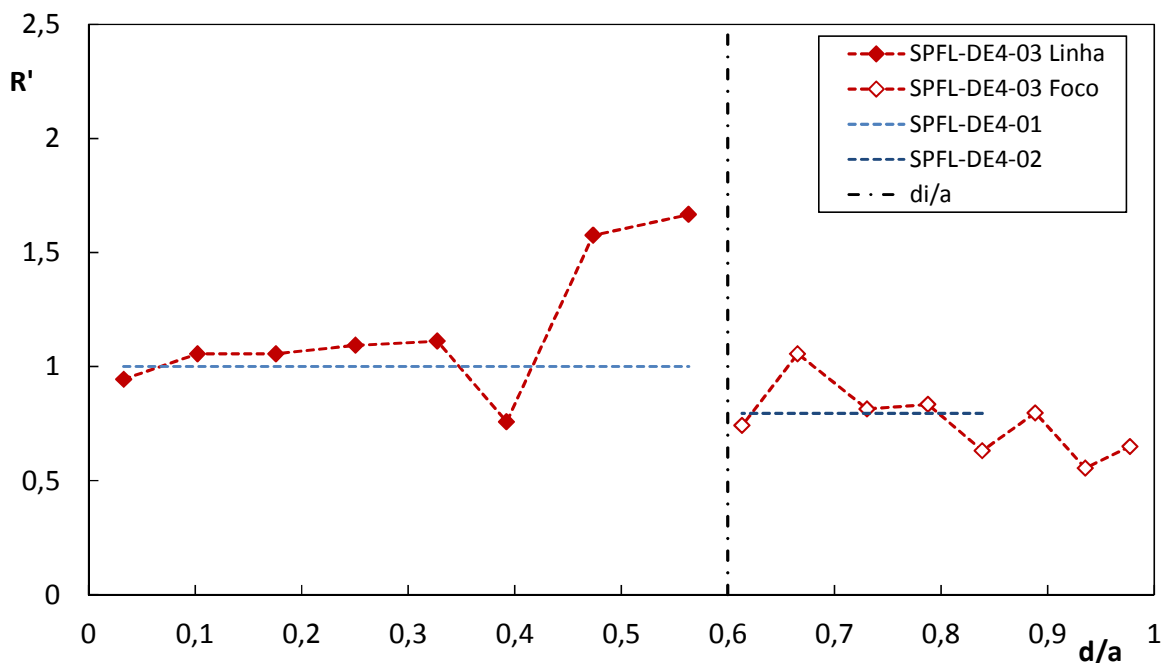


Figura 21. Comparação do ensaio de interação SPFL-DE4-03 com os respectivos ensaios de referência.

Pode-se retirar destes ensaios que a velocidade de propagação de uma frente é influenciada positivamente pela existência de um foco a um metro de distância. De seguida são apresentadas as velocidades da propagação adimensional para os ensaios de interação na Figura 22.

Para uma distância inicial de um metro verifica-se que a velocidade da frente linear duplica perto do ponto de intersecção das frentes.

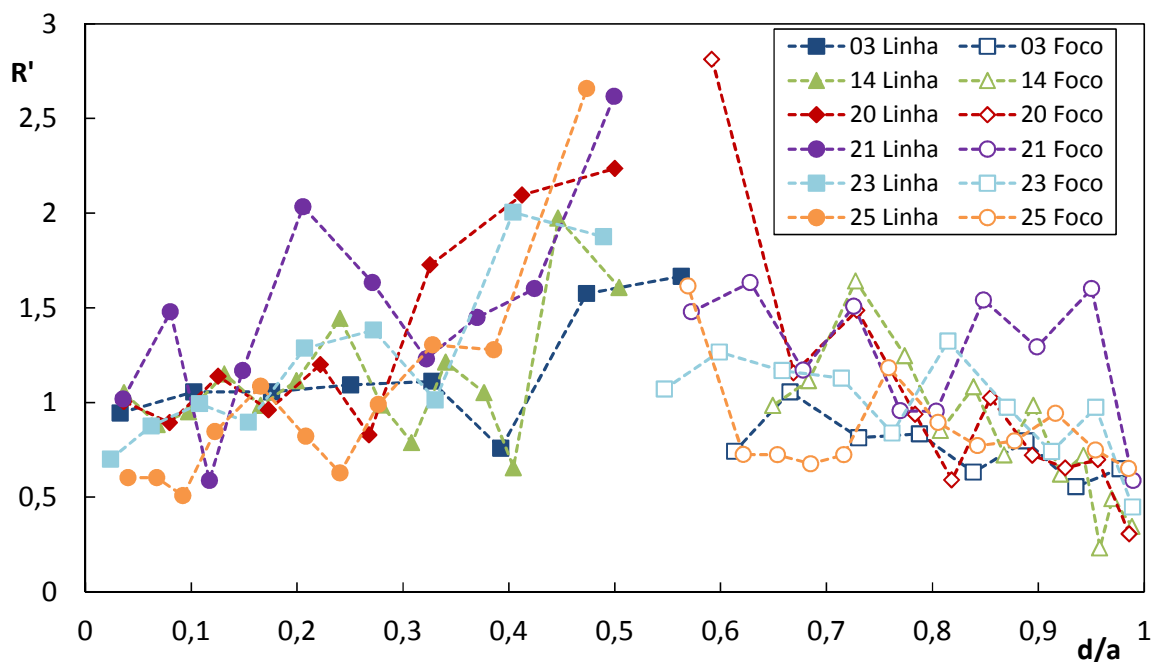


Figura 22. Gráfico da variação das velocidades de propagação ao longo da distância percorrida.

Pela Tabela 5 verifica-se que a frente linear e o foco tendem a intersectar-se para uma distância média $d/a = 0,55$.

Tabela 5. Distância onde as frentes de fogo se encontram.

$a = 1$		
Ensaio	di/a	$(di/a)_{med}$
SPFL-DE4-03	0,60	0,55
SPFL-DE4-14	0,54	
SPFL-DE4-20	0,54	
SPFL-DE4-21	0,55	
SPFL-DE4-23	0,53	
SPFL-DE4-25	0,53	

5.2.2. Ensaios ($\alpha = 2$)

De seguida são apresentados os resultados dos ensaios de referência e dos ensaios em que ocorre interação.

5.2.2.1. Ensaios de Referência Linear

Nestes ensaios constata-se mais uma vez que para uma frente linear a sua velocidade de propagação é constante. Deste modo determina-se a sua velocidade média de propagação com base no declive da recta do gráfico presente na Figura 23.

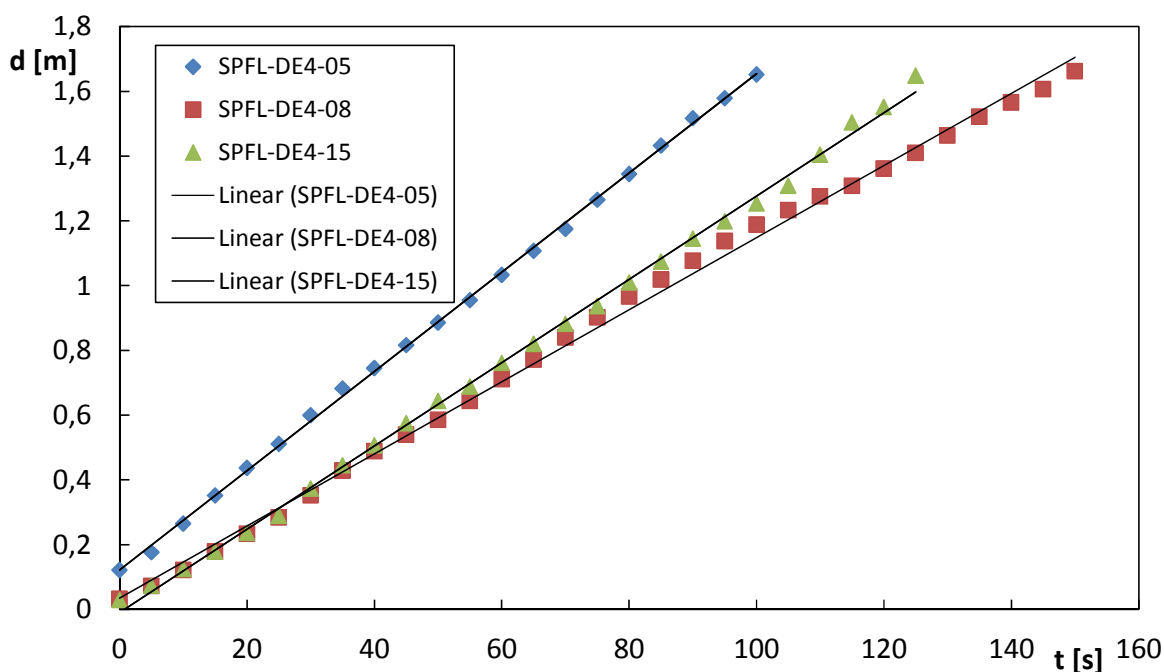


Figura 23. Distância percorrida pela frente de fogo ao longo do tempo.

Na Tabela 6 são apresentados as velocidades de propagação R_1 e os parâmetros da equação [3] para os respectivos ensaios realizados nas condições indicadas.

Tabela 6. Parâmetros dos Ensaios.

Ref. Ensaio	m	b	r^2	R_1 média [cm/s]
SPFL-DE4-05	0,0153	0,1215	0,9994	1,53
SPFL-DE4-08	0,0111	0,0350	0,9974	1,11
SPFL-DE4-15	0,0129	- 0,0095	0,9974	1,29

5.2.2.2. Ensaios de Referência Pontual

Para os ensaios com foco pontual são apresentados apenas os valores a partir dos vinte segundos, pois como foi referido anteriormente, neste intervalo de tempo existe um aumento da aceleração característico dos focos pontuais, (Figura 24).

São apresentados os valores para a mesma distância percorrida pela frente de fogo de modo a haver coerência nos resultados. Verificou-se que no ensaio SPFL-DE4-13 a velocidade de propagação foi muito inferior à dos outros dois ensaios pontuais realizados, uma vez que neste ensaio temos um leito combustível mais compacto, como se pode verificar no **Anexo A** pela altura média do leito.

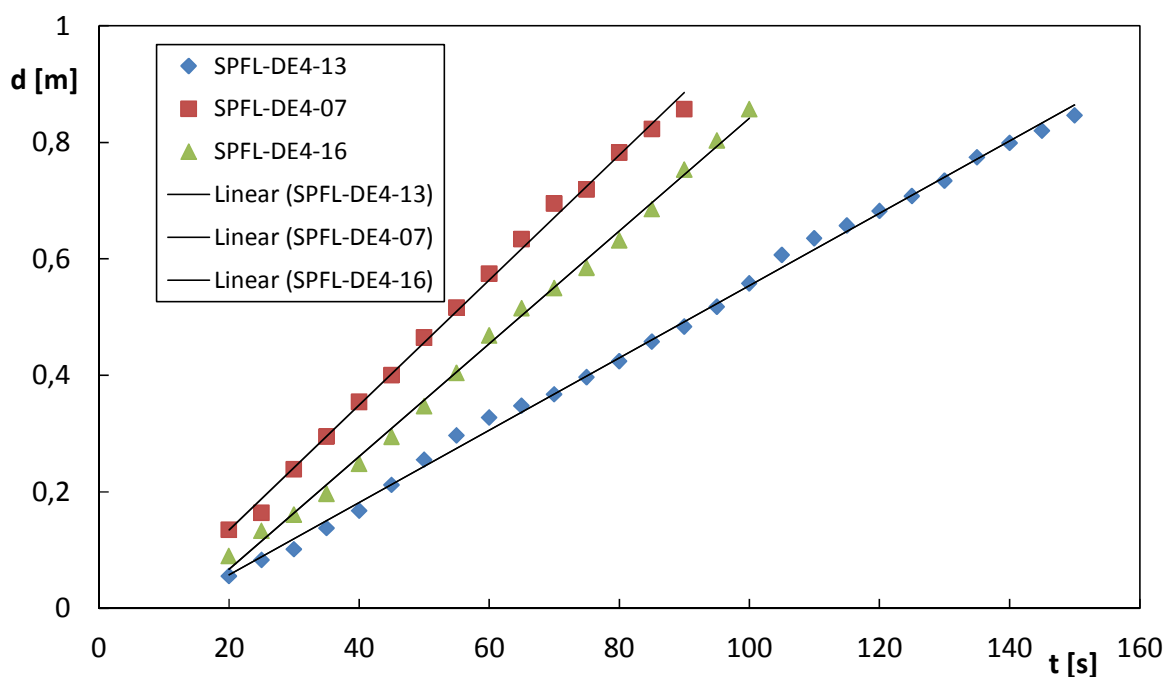


Figura 24. Distância percorrida pelo foco ao longo do tempo.

Na Tabela 7 são apresentadas as velocidades médias de propagação registadas para os ensaios com foco pontual. Verifica-se que estas velocidades são inferiores à velocidade de propagação de uma frente linear.

Tabela 7. Parâmetros dos Ensaios.

Ref. Ensaio	m	b	r^2	R_2 média [cm/s]	R_0 [cm/s]	R'
SPFL-DE4-07	0,0107	- 0,0800	0,9967	1,07	1,11	0,96
SPFL-DE4-13	0,0062	- 0,0663	0,9977	0,62	0,68	0,92
SPFL-DE4-16	0,9969	- 0,1266	0,9969	0,97	1,04	0,93

5.2.2.3. Ensaios de Interação

Apresenta-se de seguida os resultados de uma série que engloba os ensaios de referência e o ensaio de interação SPFL-DE4-09, Figura 25.

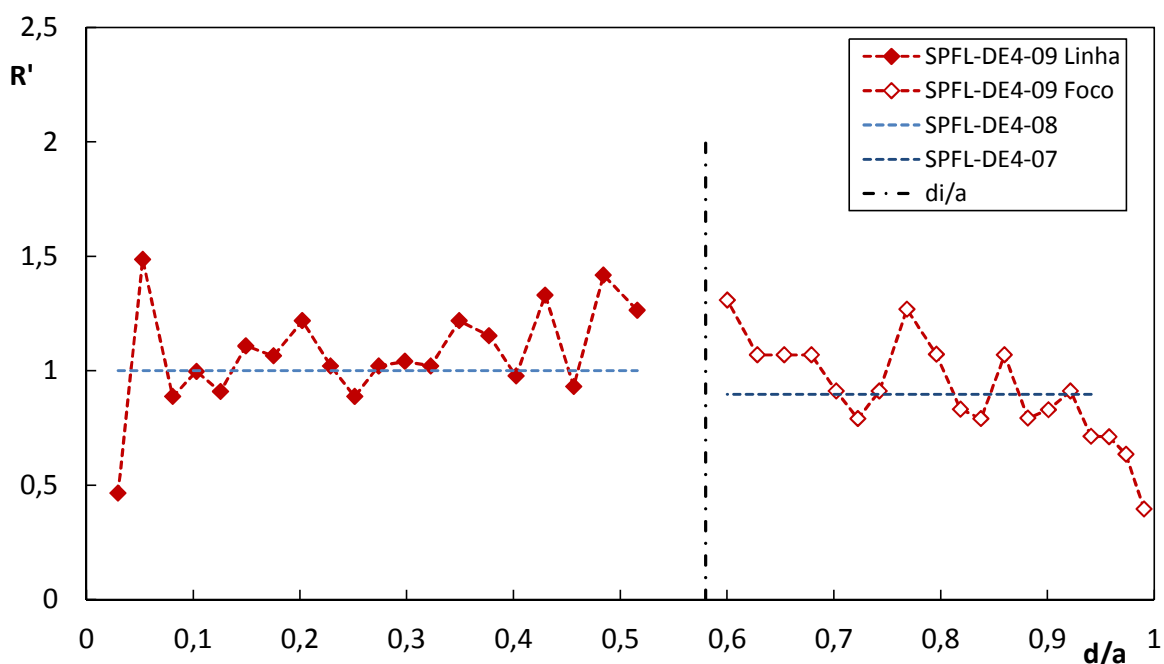


Figura 25. Comparação do ensaio SPFL-DE4-09 com os respectivos ensaios de referência.

A existência dos picos na variação da velocidade de propagação está relacionada com as características do leito, pois este pode estar mais compactado em alguns locais. A velocidade de propagação para o ensaio SPFL-DE4-07 foi adimensionalizada, sendo dividida pela velocidade de propagação do ensaio SPFL-DE4-08 que é um ensaio realizado nas condições básicas. Verifica-se que para o ensaio 09 a propagação da frente linear é constante havendo um pequeno aumento de velocidade perto

do ponto de intersecção. Relativamente à velocidade de propagação do foco segundo a direcção analisada verifica-se que esta vai aumentando inicialmente até que tende a estabilizar. Pela Figura 26 verifica-se que existe uma aceleração da frente de fogo linear em que a velocidade de propagação junto da zona de intersecção é o dobro da velocidade registada para um ensaio linear.

Para uma distância de dois metros verifica-se que a velocidade de propagação do foco na direcção da frente linear acaba por, no final, ter um comportamento similar ao de uma frente de fogo linear.

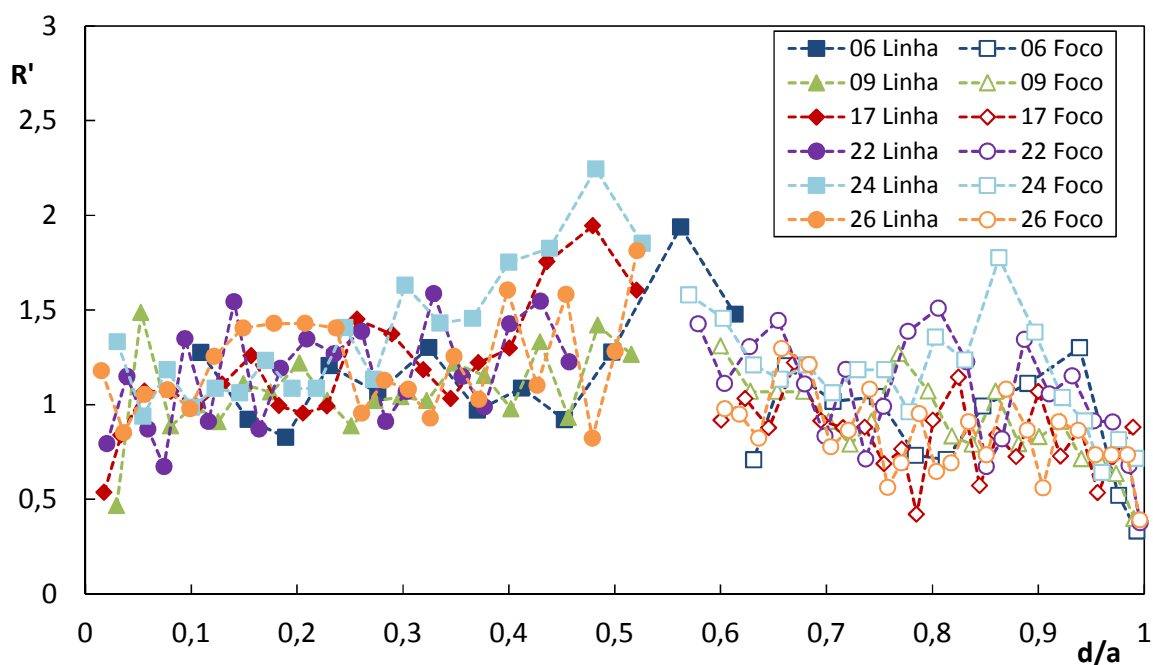


Figura 26. Gráfico da variação das velocidades de propagação ao longo da distância percorrida.

Verificou-se que a frente linear e o foco tendem a intersectarem-se para uma distância média $d/a = 0,56$. Ver Tabela 8.

Tabela 8. Distância onde as frentes se encontram.

$a = 2$		
Ensaio	di/a	$(di/a)_{med}$
SPFL-DE4-06	0,63	0,56
SPFL-DE4-09	0,58	
SPFL-DE4-17	0,54	
SPFL-DE4-22	0,51	
SPFL-DE4-24	0,54	
SPFL-DE4-26	0,56	

5.3. Modelo Empírico

Como se verifica um aumento da velocidade de propagação das frentes de fogo à medida que estas se aproximam, procedeu-se à determinação de um modelo empírico com base nos pontos obtidos. Deste modo determinou-se as curvas de propagação equivalentes para cada uma das situações analisadas anteriormente, ensaios com $\alpha = 1$ e $\alpha = 2$.

Para determinar os pontos médios, dividiu-se d/α em intervalos de 0,05 em 0,05 e foi calculada a média para os pontos contidos em cada intervalo. Desta forma obteve-se um conjunto de pontos médios característico para os ensaios com $\alpha = 1$ e $\alpha = 2$.

São apresentados os pontos médios para cada uma das situações nas Figura 27 e Figura 28. Para determinar os pontos médios, não se contabilizou os *outliers*, que em estatística correspondem a valores atípicos. Ou seja valores demasiado dispersos não foram contabilizados.

Analisando os pontos médios dos dois casos verifica-se que para os ensaios com uma distância entre ignições iguais a um metro a velocidade de propagação é maior junto da zona de intersecção que nos ensaios a dois metros. Esta situação resulta do facto de nos ensaios a um metro o foco estar pouco desenvolvido e existe uma maior atracção do mesmo. Nos ensaios a dois metros quando se dá a intersecção o foco já se desenvolveu mais e a frente de fogo é influenciada apenas pelo lado esquerdo do foco.

Em ambos os casos a distância de intersecção, di/α , é quase igual sendo a média das distâncias de intersecção dos 12 ensaios de interacção $di/\alpha = 0,55$. A velocidade de propagação da frente linear aumenta ligeiramente atingir $d/\alpha = 0,4$. A partir deste valor verifica-se que a velocidade de propagação foi influenciada positivamente pela presença do foco secundário, sendo visível o grande aumento da velocidade.

Relativamente ao foco pontual, também se verifica um aumento da velocidade. Mas para a situação $\alpha = 2$ verifica-se que a velocidade de propagação do foco pontual sofre pouca influência da frente de fogo no intervalo d/α de [0,7-0,9].

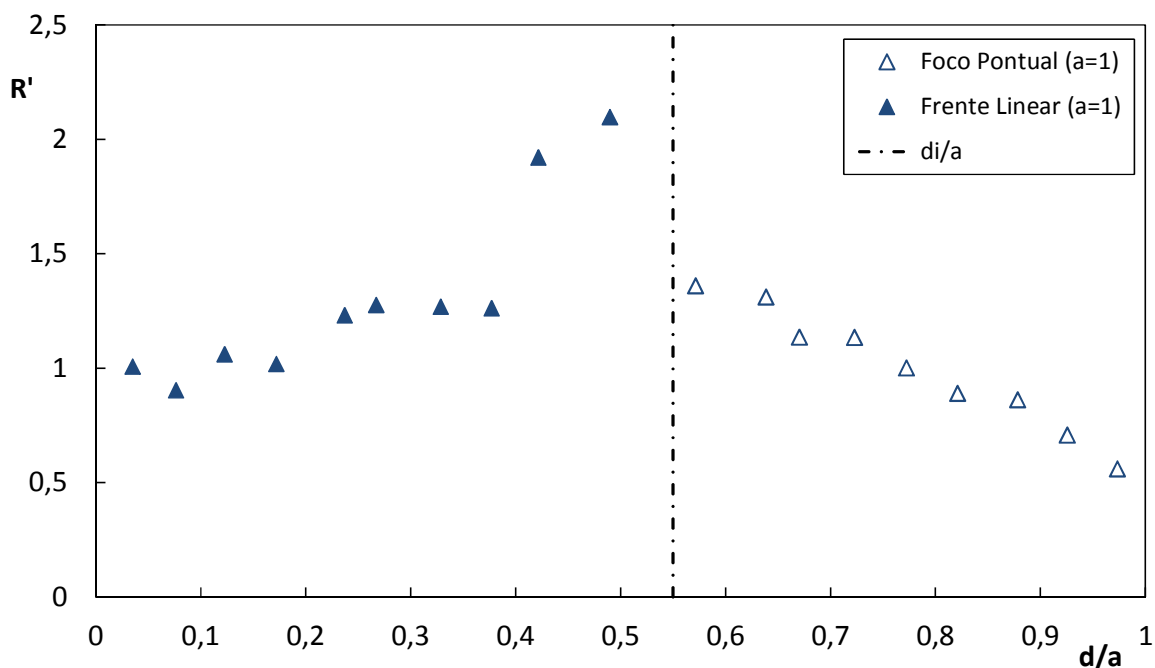


Figura 27. Pontos médios para os ensaios de interação com $a = 1$.

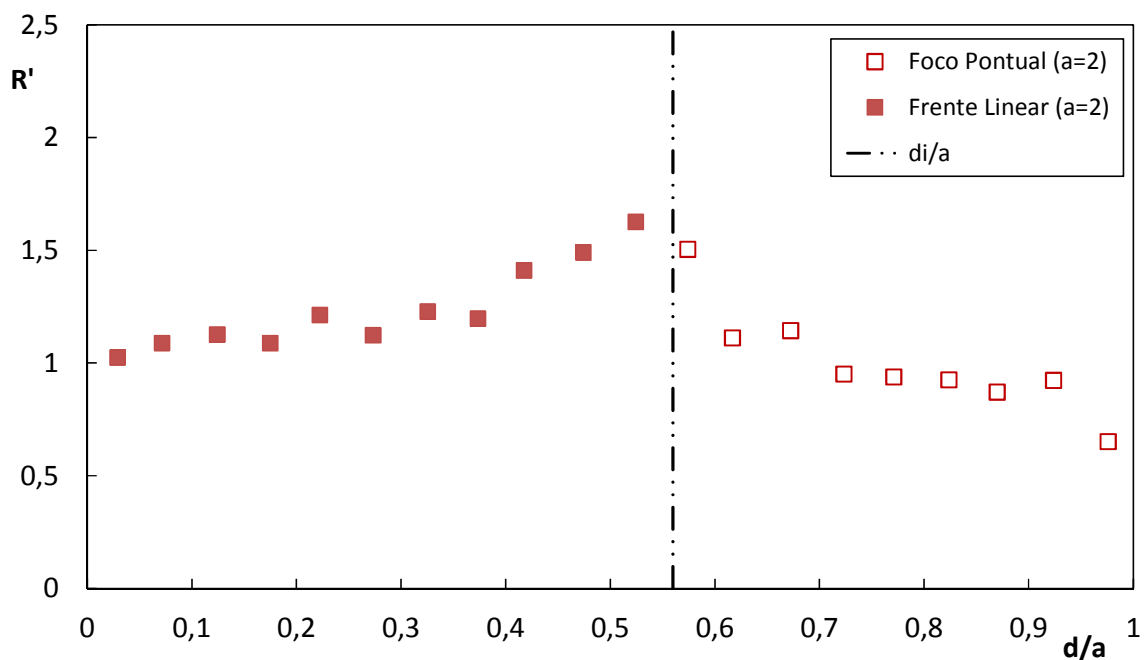


Figura 28. Pontos médios para os ensaios de interação com $a = 2$.

Da análise dos pontos médios para as duas situações verifica-se um comportamento semelhante. Desta forma foi determinado um modelo empírico com base nos pontos dos 12 ensaios de interação com uma carga de $0,6 \text{ kg/m}^2$. Na Figura 29 está

representada a média de todos os pontos e o respectivo desvio padrão relativamente à média.

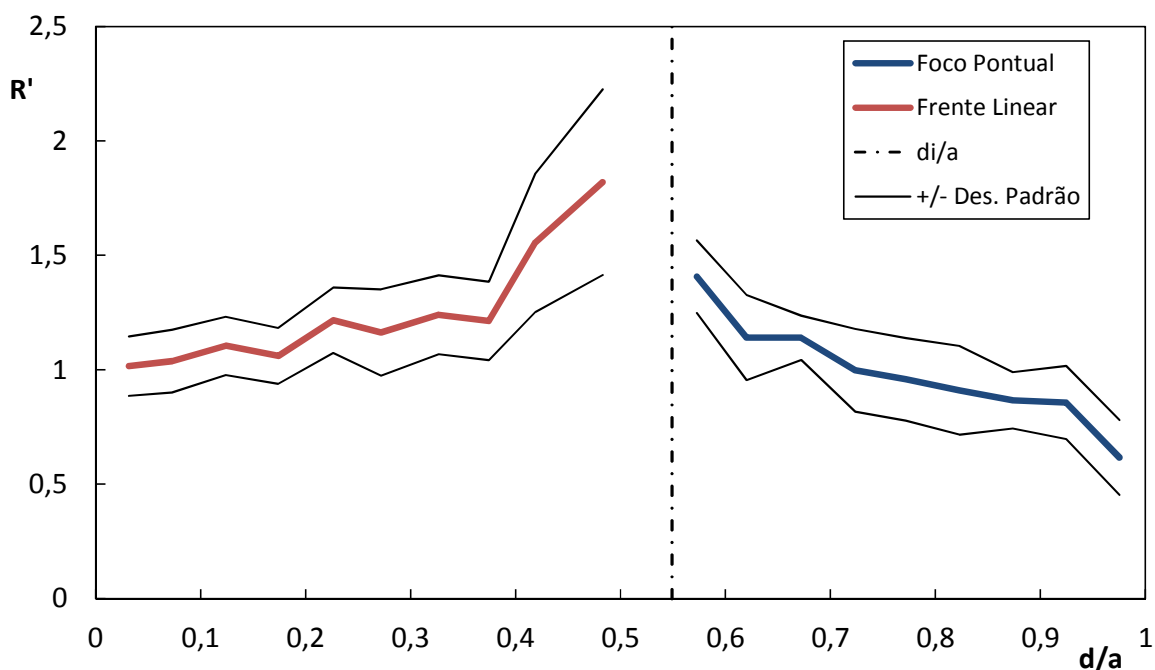


Figura 29. Modelo empírico de todos os ensaios realizados com uma carga de $0,6 \text{ kg/m}^2$.

A elaboração deste modelo tem como fim poder adaptar este estudo a uma situação real, outra escala. Para existir forma de comparação, foi determinada a altura média das chamas, para ser possível aplicar este modelo a uma escala real, relacionando a altura das chamas de um caso real com a altura medida em laboratório.

5.4. Altura das Chamas

Foram realizadas medições de alturas de ensaios para os ensaios SPFL-DE4-21, SPFL-DE4-22, SPFL-DE4-23, SPFL-DE4-24, SPFL-DE4-25, SPFL-DE4-26. Esta medição foi feita recorrendo às fotografias laterais que se realizaram, nas quais foi colocada uma régua perpendicular ao plano da mesa DE4. E na direcção em que se mediam as velocidades de propagação das duas frentes.

Nas fotografias foram medidas as alturas da frente de fogo e do foco pontual no qual se apresenta em seguida. Da análise das várias alturas medidas ao longo do decorrer dos ensaios, verifica-se que a frente linear apresenta pouca variação na sua altura de chama.

Por seu lado nos focos pontuais verifica-se uns picos mais elevados no intervalo dos 10 aos 40 segundos.

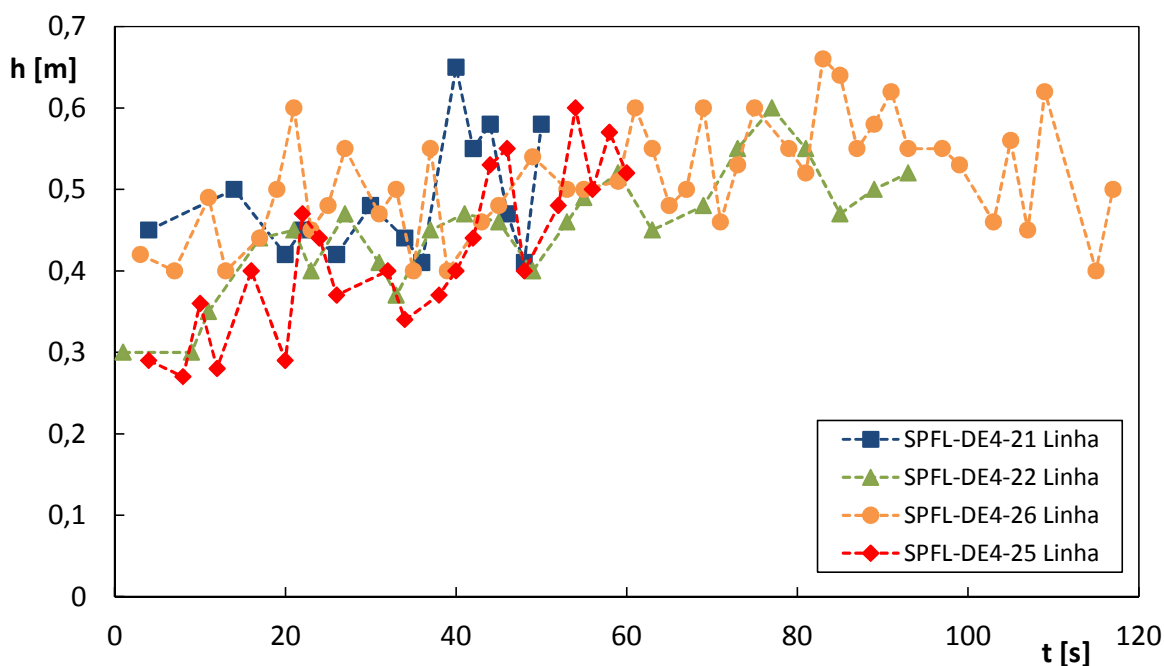


Figura 30. Altura das chamas em metros para as frentes lineares.

Pela análise da figura anterior verifica-se que a altura das chamas de uma frente linear mantém-se sempre próxima do mesmo valor, deste modo pode-se determinar uma altura média para cada ensaio.

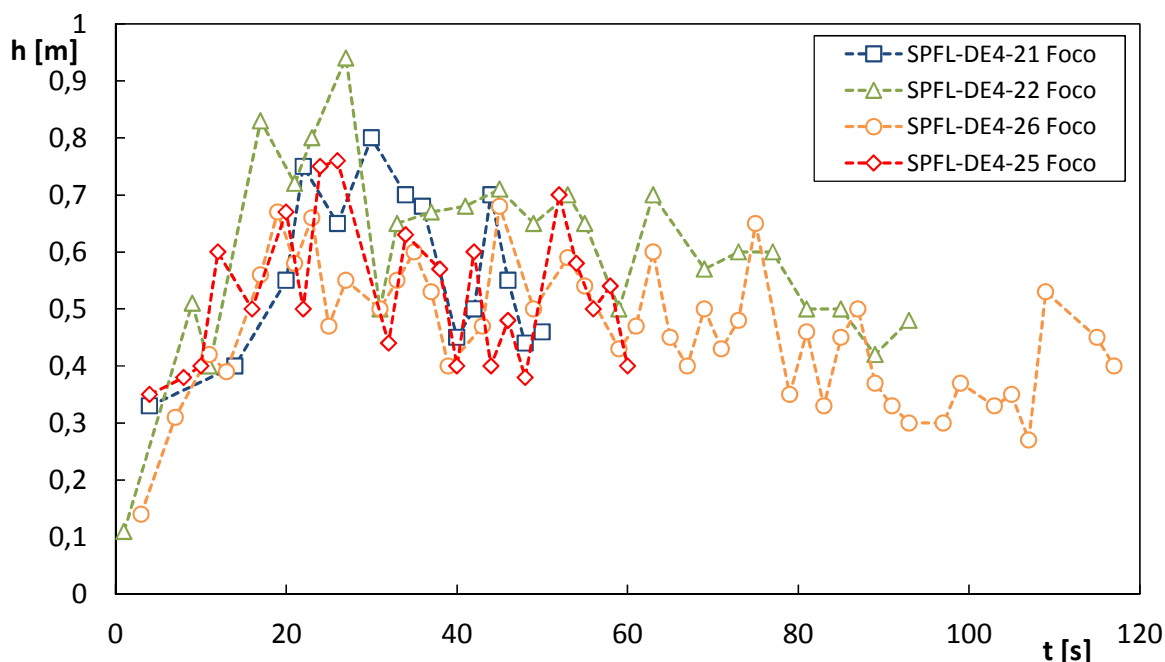


Figura 31. Altura das chamas em metros para os focos pontuais.

Na Figura 31 verifica-se que inicialmente o foco apresenta uma maior altura para as chamas, e à medida que se afasta essa mesma altura diminui uma vez que as chamas tendem a inclinar-se para o centro da perímetro circular de fogo do foco pontual.

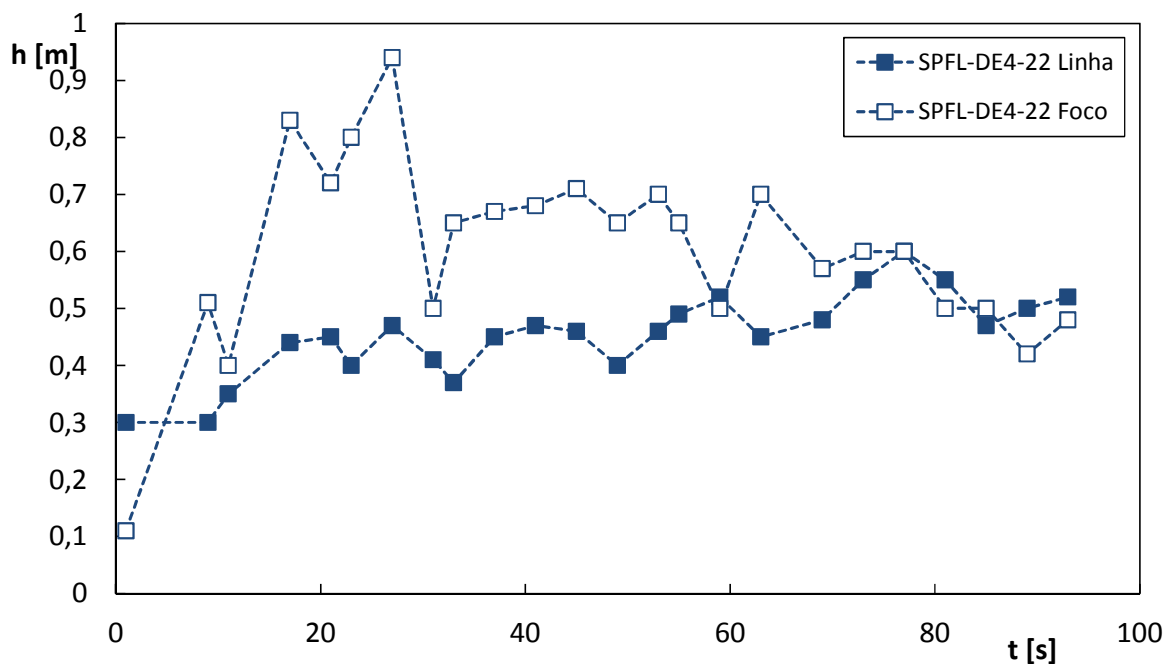


Figura 32. Altura de chama para o ensaio SPFL-DE4-22.

Devido à pouca variação da altura foi calculada a altura média das chamas para cada ensaio. Ver Tabela 9.

Tabela 9. Parâmetros dos ensaios e altura média das chamas.

	A. Leito [m]	T [°C]	HR [%]	m_f	h _{média} Chamas [m]	
					Linha	Foco
SPFL-DE4-21	6,4	26,3	40	10,497	0,49	0,57
SPFL-DE4-22	6,7	26,2	37	9,649	0,45	0,60
SPFL-DE4-23	7,1	34,4	24	7,066	0,68	0,84
SPFL-DE4-24	7,0	31,9	30	9,051	0,56	0,58
SPFL-DE4-25	7,5	30,2	32	10,132	0,42	0,52
SPFL-DE4-26	6,3	29,3	36	9,649	0,51	0,47

Verifica-se experimentalmente que a altura das chamas está relacionada com o teor de humidade do combustível. Na Figura 33 para além de se verificar a relação mencionada anteriormente, também se verifica que a altura das chamas média do foco é superior à altura das chamas da frente linear para o mesmo ensaio.

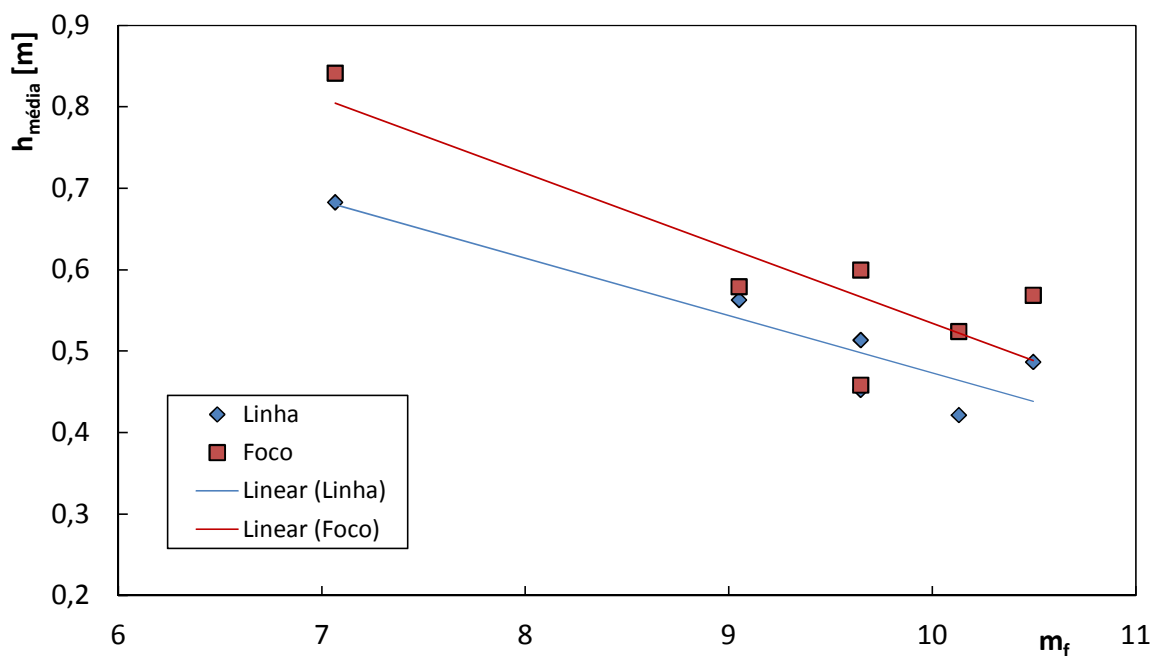


Figura 33. Altura média das chamas em função do teor de humidade.

5.5. Variação da Carga

De forma a iniciar um futuro estudo com outra carga foi realizada uma série em que se aumentou a carga de combustível para uma distância entre ignições de um metro.

Apresenta-se de seguida na Figura 34, o gráfico com as velocidades de propagação para os três ensaios realizados com uma carga de $0,8 \text{ kg/m}^2$ em base seca. Tal como nos ensaios realizados anteriormente verifica-se que a velocidade da frente linear é superior à velocidade de propagação do foco segundo o eixo X_0 .

Mais uma vez verifica-se uma maior aceleração da frente linear no ensaio de interacção.

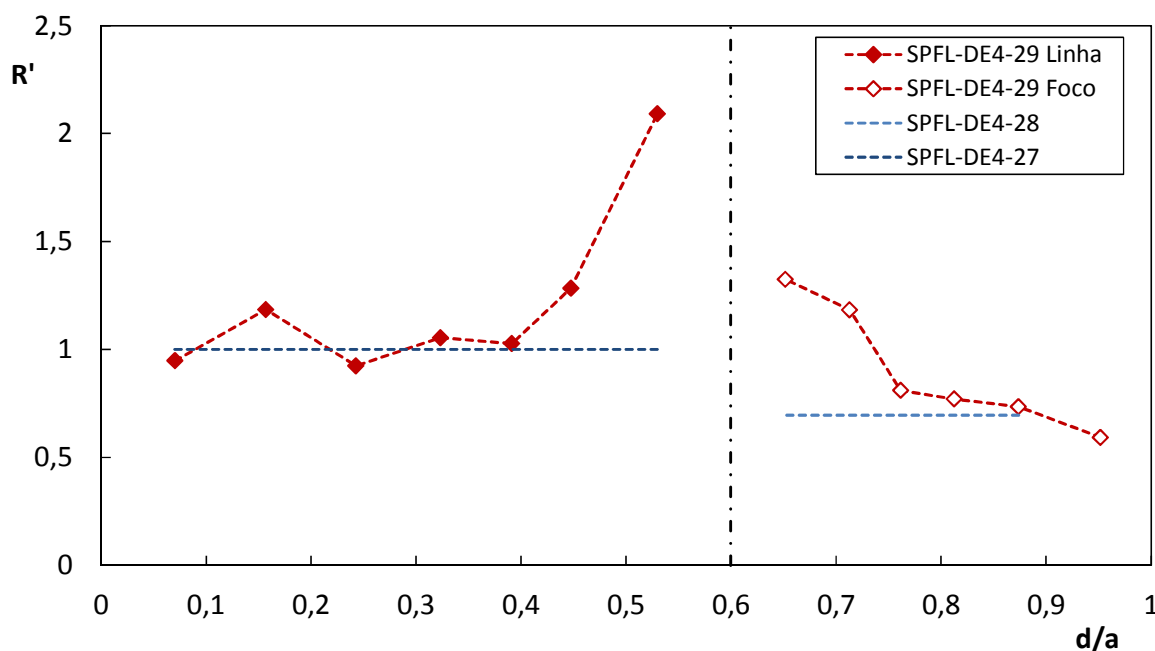


Figura 34. Comparação do ensaio SPFL-DE4-29 com os respectivos ensaios de referência.

De seguida é apresentada a comparação dos pontos médios com o ensaio SPFL-DE4-29.

Pode-se verificar que com o aumento da carga para a mesma distância inicial, o que varia é a distância de intersecção das frentes, di/a . A distância média neste caso para o ensaio SPFL-DE4-29 é $d/a = 0,60$. Ver Figura 34.

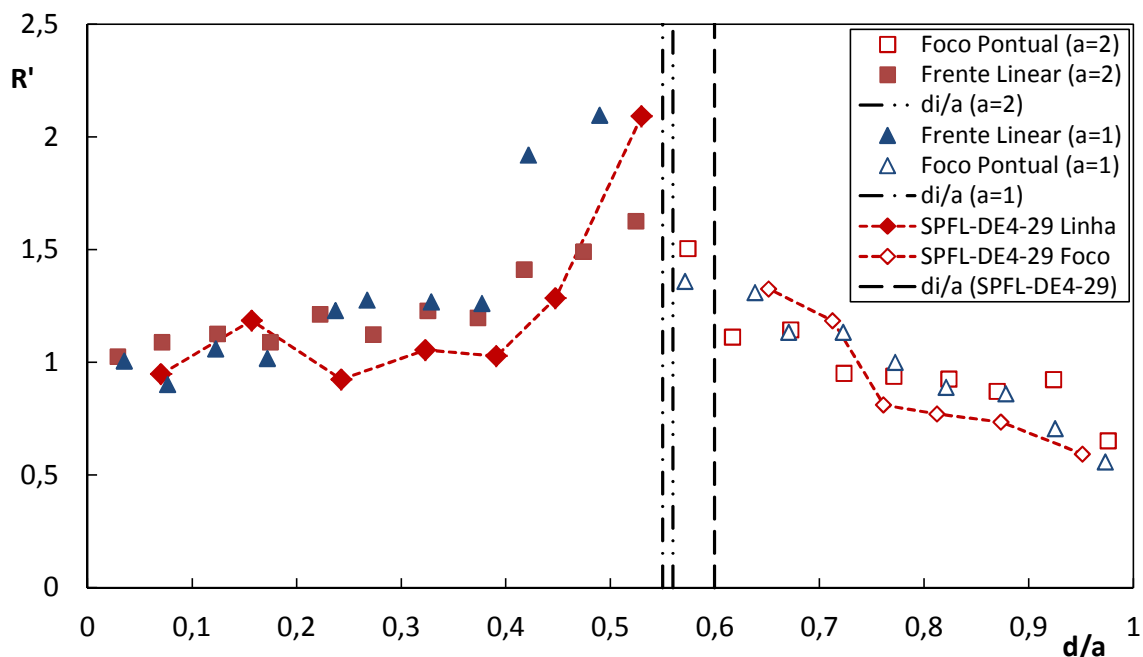


Figura 35. Comparação do ensaio SPFL-DE4-29 com os pontos médios dos ensaios para $a = 1$ e $a = 2$.

Verificou-se que a distância de intersecção aumenta, mas tem que se ter em conta que foi realizado apenas um único ensaio de interacção para uma carga de $0,8 \text{ kg/m}^2$, ver Figura 35.

Mas nos outros 12 ensaios de intersecção também foram registados dois casos em que a distância de intersecção veio para estes valores. Deste modo só a realização de mais ensaios pode determinar se a carga influencia a distância de intersecção ou não.

6. CONCLUSÃO

A realização deste trabalho permitiu conhecer e participar nos trabalhos de investigação realizados pela equipa do CEIF/ADAI no âmbito do estudo do comportamento do fogo. Foram utilizadas infra-estruturas excepcionais a nível mundial, concebidas unicamente para o estudo do comportamento do fogo.

Neste trabalho foi abordado o estudo de interacção de um foco secundário com uma frente de fogo, sendo um tema pouco aprofundado. Realizaram-se ensaios com dois tipos de cargas, 0,6 e 0,8 kg/m^2 , e variou-se a distância inicial entre as ignições. Da análise dos resultados destes ensaios verificou-se que existe um aumento da velocidade de propagação principalmente da frente de fogo. Deste modo foi alcançado o objectivo primordial que seria conhecer a influência da interacção na variação da velocidade de propagação. Verifica-se que a velocidade de propagação da frente linear sofre um efeito positivo pela presença do foco pontual. A aproximação das duas frentes (frente de fogo linear e a frente do lado esquerdo do foco) vai propiciar uma maior transferência de calor por radiação o que aumenta a velocidade de propagação. Em ambos os casos a distância de intersecção, di/a , é quase igual sendo a média das distâncias de intersecção dos 12 ensaios de interacção $di/a = 0,55$.

Este trabalho foi pioneiro nesta área e deixa em aberto um maior aprofundamento do tema. Como trabalho futuro sugere-se a realização de mais ensaios com uma carga de 0,8 kg/m^2 , que possam consolidar e reforçar a consistência dos dados obtidos. Na realização dos ensaios será indicado utilizar um leito com maior comprimento, e desta forma serem realizados ensaios num leito com 3 metros de comprimento por 3 metros de largura pois nos ensaios a dois metros de distância, o foco desenvolvia-se mais e no instante da intersecção acabava por ter um diâmetro muito grande para as dimensões do leito. Poderiam vir a ser utilizados outros tipos de combustíveis nos ensaios bem como a realização de ensaios com declive. Para completar este estudo seria interessante realizar ensaios com declive positivo e declive negativo de modo a verificar como varia di/a para cada uma das situações. Aconselha-se a realização deste tipo de ensaios a outra escala, que

não a laboratorial, como por exemplo ensaios de campo visto que esta situação se verifica muitas vezes no terreno e origina grandes dificuldades aos bombeiros.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- André, J.C.S. e Viegas, D.X. (2001), “Modelos de Propagação de Fogos Florestais: Estado-da-arte para Utilizadores Parte I: Introdução e Modelos Locais”. Lisboa, Silva Lusitana, 10 (2), 237-365, 2002.
- André, J.C.S. e Viegas, D.X. (2001), “Modelos de Propagação de Fogos Florestais: Estado-da-arte para Utilizadores Parte II: Modelos Globais e Sistemas Informáticos”. Lisboa, Silva Lusitana, 10 (2), 217-233, 2002.
- Byram, G.M. (1957), “Some Principles of Combustion and their Significance in Forest Fire Behavior”, Reprinted from: Fire control notes, 18 (2), 47-27.
- Byram, G.M. (1959), “Combustion of Forest Fuels”, In: Davis, K.P. (ed.), Forest fire control and use, New York: McGraw-Hill, 3, 61-89.
- Beck, J., Parminter, J., Alenxander, M., MacDermind, E., Van Nest, T. & Beaver, A. (2005), “Fire Ecology and Management”, In: Watts, S.B. & Tolland, L. (eds.), Forestry Handbook for British Columbia, Vancouver, University of British Columbia, 490-525.
- Gonçalves, J.C. (2000), “Experiencias de Propagação de Frentes de Fogo em Leitos Porosos Homogéneos e Inclinados”. Tese de Mestrado em Engenharia Mecânica. Departamento de Engenharia Mecânica, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade de Coimbra, Coimbra.
- McRae, D.J. (1999), “Point-souce fire groth in jack pine slash”. International Journal of Wildland Fire, 9 (1), 65-77.
- Morvan, D., Méradji, S. and Bessonov, O. (2010), “ Interaction Between Two Fire Fronts: Numerical Simulation and Physical Phenomena”. VI International Conference on Forest Fire Research D.X. Viegas (Ed.), 2010.
- Pastor, E., Zárate, L., Planas, E., and Arnaldos, J. (2003), “Mathematical Models and Calculation Systems for the Study of Wildland fire Behaviour”. Progress in Energy and Combustion Science, 29, 139-153.
- Portierie, B., Zekri, N., Clerc, J.P., Loraud, J.C. (2007), “Modeling Forest Fire Spread and Spotting Process with Small World Networks” Combustion and Flame, 149, 63-78
- Raposo, J.R. (2011), “Estudo da Interacção de Frentes de um Incêndio Florestal”. Tese de Mestrado em Engenharia Mecânica. Departamento de Engenharia Mecânica, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade de Coimbra, Coimbra.

- Rosa, C.V. (2011), “Análise da Evolução de Dois Focos Pontuais, em Função do Declive e da Distância entre Eles”. Tese de Mestrado em Engenharia do Ambiente. Departamento de Engenharia Mecânica, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade de Coimbra, Coimbra.
- Rossa, C.G. (2008), “Protocolo de Elaboração dos Ensaios Realizados no LEIF no Âmbito da Formação para a ENB – Lousã dada pelo CEIF”. Relatório técnico interno: Centro de Estudos sobre Incêndios Florestais, ADAI, Coimbra. 18 p.
- Tarifa, C.S., Notario, P.P. and Moreno, F.G. (1965), “On the Flight Paths and Lifetimes of Burning Particles of Wood”. Tenth Symposium (International) on Combustion, The Combustion Institute, 1021-1037.
- Tarifa, C.S., Notario, P.P. and Moreno, F.G., Villa, A.R., (1967), “Transport and Combustion of Firebrands”. Final Report of Grants FG-SP-114 and FG-SP 146, Aeronautical Institute of Madrid for USDA.
- VanWagner, C.E. (1977), “Conditions for the Start and Spread of Crown Fire”. Canadian Forestry Service Bymonthly Research Notes, 7 (1), 23-34.
- Ventura, J. e Vasconcelos, M.J. (2006), “O Fogo como Processo Físico-Químico e Ecológico”, Em: Pereira, J.S., Pereira, J.M.N, Rego, F.C., Silva, J.M.N. & Silva, T.P (eds.), Incêndios florestais em Portugal, Lisboa, Tipografia Lousanense, 4, 93-113.
- Viegas, D.X. (2006), “Modelação do Comportamento do Fogo”, Em: Pereira, J.S., Pereira, J.M.N, Rego, F.C., Silva, J.M.N. & Silva, T.P (eds.), Incêndios florestais em Portugal, Lisboa, Tipografia Lousanense, 14, 287-325.

ANEXO A

Tabela 10. Parâmetros para os ensaios realizados

Ref. Ensaios	Data	Hora [h:min]	Tar [°C]	HR [%]	m_f [%]	Altura _{média} Leito [cm]
SPFL-DE4-01	18-04-2011	10:52	22.5	43	9.890	6.9
SPFL-DE4-02	18-04-2011	11:34	25.3	37	9.290	7.4
SPFL-DE4-03	18-04-2011	12:05	26.4	32	10.011	8.9
SPFL-DE4-05	18-04-2011	14:29	26.8	32	9.529	9.2
SPFL-DE4-06	18-04-2011	15:15	27.5	32	9.051	9.4
SPFL-DE4-07	19-04-2011	10:45	19.1	69	12.740	9.4
SPFL-DE4-08	19-04-2011	11:16	19.5	65	11.982	7.8
SPFL-DE4-09	19-04-2011	11:55	19.9	64	12.360	6.7
SPFL-DE4-10	19-04-2011	14:08	23.5	51	11.982	6.4
SPFL-DE4-11	19-04-2011	14:58	24.6	48	12.110	7.5
SPFL-DE4-13	11-07-2011	10:49	22.2	59	11.183	7.5
SPFL-DE4-14	11-07-2011	11:42	24.2	53	11.732	7.4
SPFL-DE4-15	11-07-2011	14:14	30.7	40	*	8.9
SPFL-DE4-16	12-07-2011	10:44	24.5	53	11.857	8.2
SPFL-DE4-17	12-07-2011	11:23	23.1	53	11.607	7.2
SPFL-DE4-18	12-07-2011	14:13	24.1	57	12.486	9.1
SPFL-DE4-19	12-07-2011	15:17	26.7	47	11.111	8.5
SPFL-DE4-20	12-07-2011	16:00	26.1	48	10.742	7.3
SPFL-DE4-21	13-07-2011	10:55	26.3	40	10.497	6.4
SPFL-DE4-22	13-07-2011	11:44	26.2	37	9.649	6.7
SPFL-DE4-23	13-07-2011	14:32	34.4	24	7.066	7.1
SPFL-DE4-24	13-07-2011	15:17	31.9	30	9.051	7.0
SPFL-DE4-25	13-07-2011	16:10	30.2	32	10.132	7.5
SPFL-DE4-26	13-07-2011	17:04	29.3	36	9.649	6.3
SPFL-DE4-27	11-08-2011	10:41	29.4	30	10.620	9.9
SPFL-DE4-28	11-08-2011	12:09	32.8	28	10.320	9.9
SPFL-DE4-29	11-08-2011	15:18	37.5	22	6.724	9.8

De referir que o ensaio SPFL-DE4-15 não apresenta valor de humidade do combustível uma vez que ocorreu uma avaria eléctrica no LEIF o que impediu concluir a medição do teor de humidade do combustível.

Os ensaios foram planeados de modo a que estes fossem realizados nas mesmas condições atmosféricas, de modo a que o teor de humidade de combustível dos vários ensaios não apresenta-se grandes variações. Apenas dois ensaios apresentam valores baixos devido a terem sido realizados em condições extremas, menor humidade relativa do ar e temperaturas do ar a rondar os 40 °C.