



FCTUC FACULDADE DE CIÊNCIAS
E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE COIMBRA

DEPARTAMENTO DE
ENGENHARIA MECÂNICA

Propagação do fogo em encostas numa mistura de combustíveis vivos e mortos

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

Autor

Filipe Guilherme Gonçalves Ferreira Gomes

Orientador

Professor Doutor Domingos Xavier Filomeno Carlos Viegas

Co-Orientador

Doutor Miguel Abrantes de Figueiredo Bernardo de Almeida

Júri

Presidente	Professor Doutor Jorge Campos da Silva André Professor Auxiliar da Universidade de Coimbra Professor Doutor Domingos Xavier Filomeno Carlos Viegas Professor Catedrático da Universidade de Coimbra
Vogais	Professor Doutor António Manuel Gameiro Lopes Professor auxiliar da Universidade de Coimbra Doutor Miguel Abrantes de Figueiredo Bernardo de Almeida Investigador da ADAI, Universidade de Coimbra

Coimbra, Setembro, 2012

Agradecimentos

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

Em primeiro lugar queria expressar a minha gratidão aos meus pais, que nunca, em momento algum da minha vida, me deixaram de apoiar.

Ao Professor Doutor Xavier Viegas, pela oportunidade que me concedeu, pelos ensinamentos que me transmitiu, e pelo tempo disponibilizado para a realização desta dissertação.

Ao Doutor Miguel Almeida, pela orientação ao longo do trabalho, pelos conselhos e pela disponibilidade.

A toda a equipa do CEIF, pela ajuda e amizade que foram concedendo ao longo da realização desta dissertação.

À minha namorada, cujo apoio e companheirismo foram essenciais.

Resumo

Foram realizados cerca de 70 ensaios de combustão, num leito heterogéneo constituído por folhas verdes de *Pinus Pinaster*, e por *Palha*. Fez-se variar a composição de cada elemento existente no leito, para declives de 0, 20, 30 e 40 graus.

Da análise da influência destas duas variáveis na propagação de um fogo, foi proposto um modelo empírico com o objectivo de estimar, para leitos com declive, a velocidade de propagação de uma frente de chama em função do combustível seco. Com este modelo pretendeu-se generalizar os resultados obtidos para combustíveis semelhantes.

Palavras-chave: [comportamento do fogo], [leitos heterogéneos], [velocidade de propagação], [declive], [combustíveis vivos]

Abstract

About 70 combustion tests were conducted on a heterogeneous bed consisting of Pinus Pinaster green leaves, and straw. The composition of each element found in the bed was varied, for slopes of 0, 20, 30 and 40 degrees.

From the analysis of the influence of these two variables on the propagation of a fire, an empirical model was proposed to estimate, for beds with a slope, the speed of propagation of a flame front as a function of dry fuel. With this model we intended to generalize the results, to similar fuels.

Keywords [Fire behaviour], [heterogeneous fuels], [rate of spread], [slope], [live fuels].

ÍNDICE GERAL

ÍNDICE GERAL	IV
ÍNDICE DE FIGURAS	V
SIMBOLOGIA.....	VI
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. OBJECTIVOS	3
1.2. ESTRUTURA DA TESE	3
2. ESTADO DA ARTE.....	5
2.1. ENQUADRAMENTO DO ESTUDO DOS INCÊNDIOS FLORESTAIS	5
2.2. FACTORES QUE AFECTAM A PROPAGAÇÃO DO FOGO	7
2.2.1. <i>Combustível</i>	8
2.2.2. <i>Meteorologia</i>	11
2.2.3. <i>Topografia</i>	12
2.3. PREVISÃO DO COMPORTAMENTO DO FOGO	13
3. METODOLOGIA EXPERIMENTAL	18
3.1. ENSAIOS DE COMBUSTIBILIDADE.....	18
3.2. CARACTERIZAÇÃO DE COMBUSTÍVEIS.....	19
3.3. EQUIPAMENTO	22
3.4. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	23
3.5. DESCRIÇÃO DA METODOLOGIA DO TRATAMENTO DE DADOS.....	24
3.5.1. <i>Velocidade de propagação</i>	24
3.5.2. <i>Área queimada</i>	25
3.5.3. <i>Massa residual</i>	26
4. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DE RESULTADOS	28
4.1. VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO DOS ENSAIOS DE REFERÊNCIA.....	28
4.2. VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO EM FUNÇÃO DA COMPOSIÇÃO DO LEITO	29
4.3. VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO EM FUNÇÃO DO DECLIVE	31
4.4. VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO EM FUNÇÃO DO TEOR DA HUMIDADE DA MISTURA	32
4.5. VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO EM FUNÇÃO DA COMPOSIÇÃO DO LEITO E DO DECLIVE	34
4.6. ANÁLISE DA MASSA RESIDUAL	35
4.7. ANÁLISE DE ÁREA QUEIMADA	37
4.8. MODELOS DE PROPAGAÇÃO	39
5. CONCLUSÃO	47
6. BIBLIOGRAFIA.....	49
ANEXO – A	53

ÍNDICE DE FIGURAS.

FIGURA 1 – NÚMERO DE OCORRÊNCIAS DE INCÊNDIOS FLORESTAIS, E ÁREA ARDIDA.	1
FIGURA 2 – TRIÂNGULO DO FOGO.	5
FIGURA 3 ESTRATOS VERTICAIS DOS COMBUSTÍVEIS FLORESTAIS (VIEGAS, 2011)	9
FIGURA 4 – (A) MESA DESFILADEIRO 4 (DE4); (B) MESA R0.....	22
FIGURA 5 – EXEMPLO DE REGRESSÃO LINEAR PARA O CÁLCULO DA VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO.....	25
FIGURA 6 – EXEMPLO DA DELIMITAÇÃO DO LEITO E DAS REGIÕES QUEIMADAS.	26
FIGURA 7 – VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO EM FUNÇÃO DA PERCENTAGEM DE PALHA; VALORES DOS ENSAIOS DE REFERÊNCIA.	28
FIGURA 8 – VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO EM FUNÇÃO DA PERCENTAGEM DE PALHA; (A) DECLIVE DE 0º; (B) DECLIVE DE 20º.	29
FIGURA 9 - VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO EM FUNÇÃO DA PERCENTAGEM DE PALHA; (A) DECLIVE DE 30º; (B) DECLIVE DE 40º.	29
FIGURA 10 – VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO EM FUNÇÃO DO DECLIVE.	31
FIGURA 11 – VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO EM FUNÇÃO DO TEOR DE HUMIDADE DA MISTURA; (A) PARA DECLIVE DE 0º; (B) PARA DECLIVE DE 20º.	32
FIGURA 12 - VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO EM FUNÇÃO DO TEOR DE HUMIDADE DA MISTURA; (A) PARA DECLIVE DE 30º; (B) PARA DECLIVE DE 40º.	32
FIGURA 13 – VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO EM FUNÇÃO DO TEOR DE HUMIDADE COM AJUSTE EXPONENCIAL. (A) DADOS REFERENTES A 0º, (B) DADOS REFERENTES A 20º.	33
FIGURA 14 - VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO EM FUNÇÃO DO TEOR DE HUMIDADE COM AJUSTE EXPONENCIAL. (A) DADOS REFERENTES A 30º, (B) DADOS REFERENTES A 40º.	33
FIGURA 15 – VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO EM FUNÇÃO DO DECLIVE E DA PERCENTAGEM PALHA.	34
FIGURA 16 – PERCENTAGEM MÉDIA DE MASSA RESIDUAL EM FUNÇÃO DA PERCENTAGEM DE PALHA.	36
FIGURA 17 – PERCENTAGEM MÉDIA DE MASSA RESIDUAL EM FUNÇÃO DO TEOR DE HUMIDADE.....	37
FIGURA 18 – PERCENTAGEM DE ÁREA ARDIDA EM FUNÇÃO DA PERCENTAGEM DE PALHA.	38
FIGURA 19 – PERCENTAGEM DE ÁREA QUEIMADA EM FUNÇÃO DO DECLIVE.....	38
FIGURA 20 – PARAMETRO ADIMENSIONAL R' EM FUNÇÃO DA PERCENTAGEM DE PALHA.....	41
FIGURA 21 – VALOR ESTIMADO DE x_1 EM FUNÇÃO DO DECLIVE.....	41
FIGURA 22 – PARÂMETRO ADIMENSIONAL Ψ EM FUNÇÃO DO PARÂMETRO ADIMENSIONAL Φ	43
FIGURA 23 - PARÂMETRO ADIMENSIONAL Ψ EM FUNÇÃO DO PARÂMETRO ADIMENSIONAL Φ . DADOS RELATIVOS A DECLIVE 0º.	44
FIGURA 24 – VALORES DA VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO ESTIMADOS EM FUNÇÃO DOS VALORES OBSERVADOS EXPERIMENTALMENTE.....	44
FIGURA 25 – PARÂMETRO ADIMENSIONAL Ψ EM FUNÇÃO DO PARÂMETRO ADIMENSIONAL Φ . DADOS RELATIVOS A DECLIVE DIFERENTE DE ZERO.	45

SIMBOLOGIA

A - área útil (m^2)

F_i - combustível

I_R - intensidade de reacção ($J m^{-2} s^{-1}$)

m - massa de combustível (kg)

M_{Ti} - carga final ($kg.m^{-2}$)

m_f - teor de humidade (base seca)

P - propriedade de combustibilidade

Q_{ig} - entalpia de pré-ignição ($J [kg]^{-1}$)

R_{01} - velocidade de propagação de referência de um leito composto por um combustível F_1

R_{02} - velocidade de propagação de referência de um leito composto por um combustível F_2

R_{0x} - velocidade de propagação da mistura

R_2 - velocidade de propagação de um combustível F_2

R - velocidade de propagação numa situação de ausência de declive e de vento em estado quasi-estacionário ($m s^{-1}$)

x - fracção mássica de combustível seco

x_l - valor de x crítico estimado a partir das rectas de regressão linear

x_c - valor de percentagem de palha, para o qual existe extinção

x_i - fracção mássica de um combustível F_i

α - Declive [$^\circ$]

ε - Número de aquecimento efectivo (adimensional)

ξ - coeficiente de fluxo de propagação (adimensional)

ρ_b - massa volúmica do leito de combustível ($kg m^{-3}$)

φ - Parâmetro adimensional de caracterização da fracção mássica

ϕ_s - factor de declive

ϕ_w - coeficiente do vento

Ψ - Parâmetro adimensional de caracterização da velocidade de propagação

1. INTRODUÇÃO

O tema desta dissertação de mestrado está directamente ligado ao estudo dos Incêndios Florestais.

Segundo os dados revelados pelo Instituto de Conservação da Natureza e das Florestas, nos anos de 2003 e 2005 registaram-se os maiores valores, a nível florestal, de área consumida pelo fogo. Estes dados demonstram também que, apesar de, desde então, a área ardida não ter atingido valores semelhantes, o nível de ocorrências tem-se mantido consideravelmente elevado.

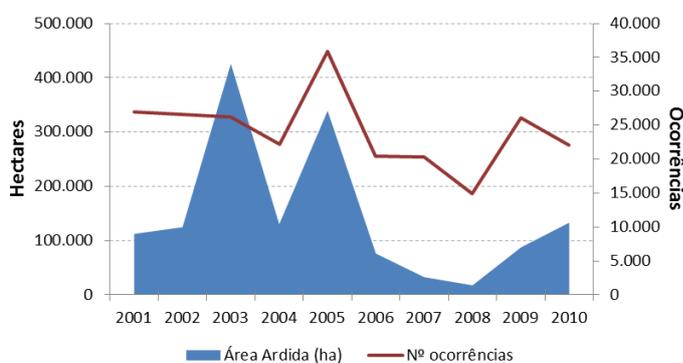


Figura 1 – Número de ocorrências de incêndios florestais, e área ardida.

Este é um problema que traz consequências devastadoras, entre as quais se encontram, por exemplo, os prejuízos materiais e o próprio risco que coloca à vida das populações.

No sentido de minimizar as ocorrências, podemos abordar o estudo dos incêndios florestais por dois caminhos interligados entre si, que, como refere Viegas (2011), muitas vezes erradamente se julgam acções separadas: Prevenção e Combate.

A prevenção remete-nos a um período prévio à deflagração de um incêndio, e em que o planeamento dos espaços florestais e a sensibilização das populações se enquadram.

O conjunto de acções que se realizam desde a eclosão do incêndio, até à sua completa extinção, estão compreendidas na acção de combate (Viegas, 2011).

Quer a abordagem de combate quer a preventiva, obrigam à compreensão profunda do fenómeno fogo, em particular, ao estudo do seu comportamento e modo de propagação.

Consequentemente, as pesquisas efectuadas no campo dos incêndios florestais, evoluíram no sentido da elaboração de modelos teóricos, semi-empíricos ou mesmo empíricos, que simulassem o comportamento de um fogo, e que pudessem prever algumas propriedades do modo de propagação.

Um dos modelos mais importantes nesta área, e por consequência, mais implementado em aplicações de software relacionadas com a gestão de fogos (André, 2001), é o modelo Rothermel (1972).

Este modelo simula o comportamento de um fogo superficial, e permite estimar a velocidade de propagação de uma frente de chama, num leito horizontal, ou com declive, com vento ou na ausência de vento.

Os ensaios que deram origem ao modelo Rothermel, foram efectuados em leitos constituídos por um só combustível. No entanto, Rothermel (1972) propôs a sua extrapolação para leitos heterogéneos.

Os leitos heterogéneos são de extrema importância, uma vez que representam, na maior parte das situações, os leitos existentes na natureza.

Os resultados obtidos por Catchpole (1993), com misturas de dois ou mais combustíveis, contrariaram as estimativas do modelo Rothermel (1972), revelando, assim, uma área pouco estudada e de elevado interesse.

Posteriormente, com esta contradição levantada por Catchpole (1993), Viegas et al (2010), propuseram um modelo linear, para estimar as propriedades de leitos heterogéneos, em condições de ausência de vento e num plano horizontal, baseada na fracção mássica de combustível.

O comportamento do fogo está essencialmente dependente de 3 grandes áreas, que englobam uma diversidade de factores, Meteorologia, Combustível e Topografia.

Das diversas variáveis que compõem cada área, destacamos aquela, à qual corresponde o nosso estudo, o declive.

O declive influencia directamente a velocidade de propagação de uma frente de chama, tornando-se assim um factor chave na compreensão do comportamento do fogo.

1.1. Objectivos

O objectivo fundamental deste estudo é o de analisar a combustibilidade de leitos florestais constituídos por um componente vivo e outro morto. Embora os combustíveis vivos isoladamente não ardam, a presença em determinadas quantidades de um combustível seco no mesmo leito, permite suportar a combustão e propagação das chamas.

Desta forma, com este trabalho pretende-se analisar, a velocidade de propagação de uma frente de chama, em função da percentagem de combustível seco num leito constituído por dois combustíveis, um vivo e um morto. A introdução da variável declive, nesta análise, permite-nos simular uma situação muitas vezes presente nos leitos naturais,

Através deste estudo, pretende-se estabelecer um modelo empírico simples, baseado num número reduzido de parâmetros, e alargar e generalizar a análise a outros combustíveis semelhantes.

Complementarmente, pretendeu-se analisar a massa residual, e a área queimada, deixada após o consumo dos combustíveis pelo fogo.

1.2. Estrutura da tese

Esta secção apresenta a estrutura e resume os conteúdos de cada capítulo presente na dissertação

Capítulo 1. Introdução, apresenta uma primeira abordagem aos incêndios florestais, os objectivos deste trabalho e a sua estrutura.

Capítulo 2. Estado da arte, São introduzidos, os conceitos físicos e químicos relacionados com o fogo, os factores que afectam a sua propagação, e é feita uma revisão bibliográfica relacionada com os modelos existentes para a previsão da velocidade de propagação.

Capítulo 3. Metodologia experimental, são apresentados os ensaios realizados para este trabalho, é feita uma descrição do procedimento, e são desenvolvidos os métodos de tratamento de dados utilizados.

Capítulo 4. Apresentação e discussão de resultados, apresentam-se os resultados obtidos nos ensaios experimentais com a discussão dos mesmos.

Capítulo 5. Conclusão, são abordadas as conclusões retiradas da análise deste trabalho.

Em Anexo, são apresentadas algumas fotos de ensaios realizados com diferentes percentagens de palha, e fotos de equipamento utilizado.

2. ESTADO DA ARTE

No estudo dos incêndios florestais é necessário ter presentes alguns conceitos fundamentais de forma a melhor enquadrar a análise do nosso trabalho de investigação.

Nesse sentido, o presente capítulo tem como objectivo apresentar e definir o conjunto de conceitos base neste domínio de pesquisa.

2.1. Enquadramento do estudo dos incêndios florestais

Como definição geral, podemos dizer que o fogo é essencialmente uma manifestação de uma reacção química, entre um combustível e um comburente (oxigénio), desencadeada pelo calor (Williams, 1982). A essa reacção química dá-se o nome de Combustão.

Os 3 elementos da combustão, formam entre si o conhecido triângulo do fogo (Figura 2). Numa situação de incêndio florestal, qualquer acção de supressão da propagação, passa por remover ou modificar um dos elementos constituintes dessa ligação triangular (Countryman, 1976).



Figura 2 – Triângulo do fogo.

Pela complexidade da estrutura química dos combustíveis florestais, podemos explicar a heterogeneidade das reacções químicas deles resultantes (Countryman, 1976).

Durante o período prévio à ignição, o calor absorvido pelos combustíveis provoca, num primeiro momento, a libertação da humidade existente no seu interior, em forma de vapor e, posteriormente, a partir de uma determinada temperatura, a libertação de

gases inflamáveis (Countryman, 1976). A pré-ignição é pois a fase endotérmica da combustão.

A degradação térmica, ou pirólise, é definida por Pyne (1996), como sendo uma reacção de decomposição, na qual as ligações das moléculas mais complexas são quebradas, provocando uma redução molecular e posterior libertação na forma gasosa.

A partir da ignição, o processo de combustão passa de uma reacção endotérmica para uma reacção exotérmica. O calor libertado é transferido para a atmosfera, para os solos e para os combustíveis adjacentes. Estes combustíveis, ao atingirem a temperatura de ignição e na presença de oxigénio, vão dar origem a uma nova reacção de combustão. Ou seja, podemos definir a combustão como um processo de reacções químicas em cadeia, em que a ignição de um combustível em particular dá, normalmente, origem à ignição dos combustíveis adjacentes (Byram, 1957).

O estudo da combustão deverá compreender também uma vertente física, relacionada com a transmissão do calor proveniente da reacção.

Tal como é do conhecimento geral, o calor transmite-se por um de três processos básicos de transferência: condução, convecção ou radiação.

A condução é a transferência de calor por actividade molecular, de um ponto de uma substância para o outro, ou entre substâncias em contacto. (Countryman 1976). Quanto menor for a distância molecular, mais facilidade existe em transferir calor.

Dado que o ambiente florestal é maioritariamente composto por combustíveis pouco densos, a condução torna-se um método de transmissão de calor menos importante. (FEN@, 2011).

A Convecção é o principal modo de transferência de calor para arbustos e vegetação alta em incêndios florestais, provocando um pré-aquecimento e consequente desidratação dos combustíveis.

Podemos classificar a convecção como natural ou forçada, dependendo do que está na origem do escoamento.

A convecção natural ocorre quando as diferenças de temperaturas entre duas substâncias causam uma diferença de densidades. Um fluido menos denso ascende

obrigando o fluido mais frio, e por consequência mais denso, a realizar um movimento descendente.

No caso dos ambientes florestais, existe convecção forçada aquando da ocorrência de vento, forçando o movimento do fluido e a troca de calor.

Define-se radiação como o processo pelo qual o calor se transmite através de ondas electromagnéticas. As ondas viajam à velocidade da luz para longe da fonte de calor e transferem a sua energia no momento do impacto de matéria.

A intensidade da energia radiante recebida por uma substância depende de dois factores, para além da intensidade da radiação na fonte. Estes são, a distância entre a fonte e a superfície receptora, e o ângulo em que a radiação atinge a substância. (Schroeder, 1970).

A radiação desempenha um papel fundamental no pré-aquecimento de combustíveis em incêndios florestais, especialmente na ausência de vento, em que a transferência de calor por convecção seria reduzida (FEN@, 2011).

2.2. Factores que afectam a propagação do fogo

Na existência de um incêndio florestal, a velocidade de propagação e a intensidade de reacção são duas características que nos permitem avaliar o seu comportamento. A sua evolução, ao longo do espaço e do tempo, procede-se de uma forma complexa, em resultado de um conjunto de fenómenos de natureza física e química que dependem de múltiplos factores. (Viegas, 2011)

O presente estudo foca essencialmente a primeira característica enunciada, a velocidade de propagação de uma frente de chama.

De acordo com o conhecimento tradicional, é usual considerar os factores condicionantes do comportamento do fogo agrupados em 3 classes (Viegas, 2011):

- Combustível
- Meteorologia
- Topografia.

De seguida descreveremos as variáveis mais importantes que compõem, cada uma destas 3 classes.

2.2.1. Combustível

Os combustíveis, na presença de oxigénio e calor, são um elemento crítico na ocorrência de combustão (Byram, 1959). Podemos considerá-los como todos os componentes da vegetação, vivos ou mortos, existentes em qualquer local (Anderson, 1982).

Tal como refere Viegas (2011), é o combustível que, quando em combustão, liberta a energia que irá influenciar a velocidade de propagação e o nível de intensidade de um potencial incêndio.

Por esse motivo, a caracterização dos combustíveis é um assunto de elevada importância no estudo dos incêndios florestais.

O modo mais simples e óbvio de classificação é através do estado vegetativo. Os combustíveis podem-se considerar, tal como foi mencionado anteriormente, mortos ou vivos. Estes dois tipos de combustíveis diferem, no interesse da propagação do fogo, essencialmente no seu teor de humidade, apresentando gamas distintas.

O modo de propagação dos incêndios florestais está ligado á classificação dos combustíveis por estratos. Na Figura 3, ilustram-se os 3 estratos verticais em que se dividem os combustíveis.

Um fogo pode propagar-se no solo, através dos combustíveis que se encontram por baixo da manta morta ou no solo mineral.

Estes fogos têm a particularidade de poderem persistir durante largos períodos de tempo, podendo até originar reacendimentos à superfície (Viegas, 2011).

Os combustíveis superficiais são o objecto de estudo de grande parte dos trabalhos na área do comportamento do fogo. São de grande importância, uma vez que é nesta camada que, geralmente, se iniciam e propagam os fogos (Pyne, 1996; in Tanskanen, 2007). Caracterizam-se por se localizarem entre o solo e os 2 metros de altura.

Os combustíveis aéreos são, normalmente, definidos como sendo as copas das árvores e de arbustos mais altos.

Comparando com outros modos de propagação, os fogos de copas são relativamente mais raros, no entanto, o seu impacto é bem mais severo (Rothermel, 1983).

Como refere Bennett (2010), os fogos de copas podem considerar-se passivos ou activos. Se o fogo for consequência das chamas que consomem os combustíveis superficiais considera-se que está na fase passiva. No momento em que a propagação se dá de copa para copa, passam a fogos activos.

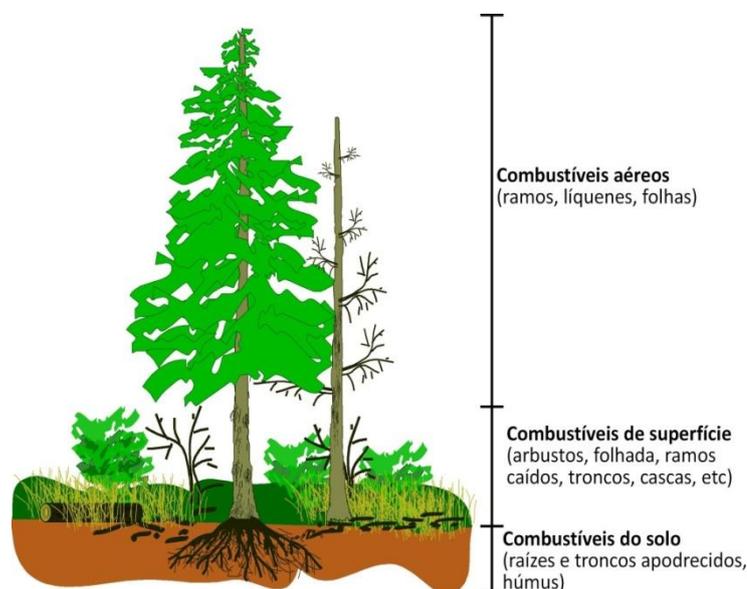


Figura 3 Estratos verticais dos combustíveis florestais (Viegas, 2011)

A carga do combustível é uma variável base na avaliação do perigo do fogo: representa toda a biomassa presente, viva ou morta, por unidade de área.

A quantidade de combustível existente pode variar devido a actividades humanas e a um factor ainda mais instável, a meteorologia.

A meteorologia afecta também o teor de humidade dos combustíveis, um dos factores cruciais que influencia e modifica os parâmetros do comportamento do fogo, como a velocidade de propagação e a intensidade (Tanskanen, 2007).

O teor de humidade expressa a quantidade de água existente num determinado combustível em percentagem do seu peso seco (Viegas, 2011).

Combustíveis mortos terão teores de humidade relativamente baixos. Pelo contrário, o teor de humidade de combustíveis vivos situar-se-á acima de valores de 40% em base seca (Schroeder, 1970), necessitando de mais calor para a desidratação e consequente ignição, tal como refere Viegas (1998).

Para teores de humidade muito elevados, o vapor de água libertado aproxima-se de valores da pressão atmosférica. A essa pressão, oxigénio e gases inflamáveis são excluídos da zona adjacente ao combustível, não permitindo a continuação da combustão (Byram, 1959).

Desta forma, e dando como exemplo o estudo de Soares (2011) num leito horizontal na ausência de vento, podemos afirmar que a velocidade de propagação de uma frente de chama diminui com o aumento da humidade do combustível e, acima de um certo limiar, a ignição e propagação tornam-se virtualmente impossíveis.

A forma como o teor de humidade responde às variações meteorológicas, depende, em parte, de características como o tamanho, a disposição e a estrutura física dos combustíveis.

Viegas (2011) Classifica os combustíveis em quatro tipos de tamanho:

- Finos ou ligeiros, com diâmetros inferiores a 6 mm (agulhas, folhas, ervas, manta morta em decomposição);
- Regulares, com diâmetros entre 6 e 25 mm (ramos finos e caules de arbustos);
- Médios, com diâmetros entre 25 e 75 mm (ramos);
- Grossos ou pesados, com diâmetros superiores a 75 mm (ramos grossos e troncos).

Com o aumento da dimensão aumenta também a capacidade calorífica de um combustível, requerendo uma maior quantidade de calor para atingir o ponto de ignição e conseqüente combustão.

A disposição dos combustíveis é dada pela distribuição vertical e horizontal de uma matéria dentro de um leito convenientemente definido (Tanskanen, 2007). A compactação ou porosidade reflectem o espaço existente entre as partículas de combustível. O grau de compactação afecta tanto a disponibilidade de ar para a combustão, como a facilidade de transferência de calor para as partículas imediatamente à frente do fogo (Chandler et al, 1983 in Viegas, 2011).

A geometria de uma partícula combustível é melhor definida pelo parâmetro forma, cuja relação entre a superfície exterior e o respectivo volume da partícula, nos dá uma indicação das alterações de humidade e temperatura que possa sofrer (Viegas, 2011). A

quantidade de energia que uma partícula pode receber, aumenta com a superfície exposta (Rothermel, 1972).

2.2.2. Meteorologia

A meteorologia é o principal factor que afecta a quantidade de combustível existente, e faz variar o teor de humidade dos combustíveis, tal como foi referido.

As variáveis meteorológicas que mais influenciam o teor de humidade e o comportamento dos incêndios são: a humidade relativa, a temperatura, a precipitação, e o vento (Tanskanen, 2007).

A humidade relativa exprime a quantidade de água no ar em relação à quantidade máxima que o ar pode conter nas mesmas condições de temperatura e pressão (Tanskanen, 2007). A humidade relativa tem efeitos directos na inflamabilidade dos combustíveis (Schroeder, 1970). Os combustíveis mortos, sujeitos às condições atmosféricas, sofrem com as diferenças de humidade, absorvendo ou libertando a água existente na atmosfera.

O calor necessário para elevar a temperatura de um combustível até ao ponto de ignição, depende da temperatura inicial do ar circundante (Schroeder, 1970). No entanto, por si só a temperatura não constitui o factor de mais relevância no comportamento dos incêndios. A sua associação à variação de outros parâmetros é que torna o seu papel importante (Viegas, 2011).

A principal variável meteorológica que afecta a propagação do fogo é o vento, que se caracteriza em cada instante de tempo pelos valores da velocidade e da direcção (Viegas, 2011).

O vento afecta o fogo de diversas formas. Ao arrastar ar carregado de humidade acelera a secagem do combustível. Uma vez um incêndio iniciado, o vento pode auxiliar a combustão, aumentando o fornecimento de oxigénio.

Morvan (2002) demonstra que, para ventos fracos, o comportamento do fogo é controlado pelo processo de radiação. Em situações de ventos fortes, os fluxos de gases quentes são empurrados na direcção dos combustíveis, alterando o processo dominante de transferência de calor, para a convecção.

A situação de um fogo na direcção contrária ao vento pode também verificar-se, sendo no entanto, segundo Weise (1997), uma situação inócua, e daí menos relevante.

2.2.3. Topografia

A topografia é a mais estável das variáveis. Nela encontramos uma das influências primárias no comportamento dos incêndios florestais, a inclinação do terreno ou declive (Weise, 1993).

Para um determinado declive do leito do combustível, a propagação poderá seguir um sentido ascendente ou, inversamente, um sentido descendente.

Quando um fogo desce uma encosta as chamas inclinam-se para a zona já queimada pelo que pouco contribuem para o processo de transmissão de calor.

Para valores positivos de inclinação, a frente das chamas inclina-se para o combustível ainda não queimado e dessa forma incrementa-se o fluxo de calor por radiação e convecção e, conseqüentemente, a velocidade de propagação (Viegas, 2011).

Tanto o declive como o vento provocam uma inclinação nas chamas, incrementando o fluxo de calor para a zona dos combustíveis. Malangone (2011) e Viegas (2004) referem, no entanto, que de apesar actuarem de forma semelhante na frente de chama, os efeitos de cada um no comportamento do fogo são distintos.

O efeito de valores positivos de inclinação na velocidade de propagação tem vindo a ser demonstrado tratar-se, uma função curvilínea (Curry and Fons (1938), Byram et al. (1966), McArthur (1967), Rothermel (1972), Hwang and Xie (1984), Weber and de Mestre (1990), FCFDG (1992); in Weise, 1997).

Viegas (2004) demonstra que a evolução de uma frente de fogo linear, no caso de fogos com declive ou sujeitos a vento, mesmo em condições uniformes e permanentes, não é constante, devido aos efeitos conjuntos da radiação e convecção.

Buttler (2007), variando a porosidade de um leito e o declive, coloca a hipótese de que, para declives até 25°, a transmissão de calor se processa maioritariamente através da radiação, enquanto que, a partir de 25°, o efeito dominante passa a ser a convecção.

Esta hipótese é confirmada por Dupuy (2011), que explora os efeitos da radiação e convecção na velocidade de propagação de um leito com declive. Entre 0° e 20°

a radiação é o mecanismo de transmissão de calor que predomina. Quando o declive aumenta de 20° para 30° a velocidade de propagação aumenta num factor de 2.5 devido, essencialmente, a um aumento significativo da transferência por convecção, enquanto que, para a radiação, não se regista mais nenhum aumento.

A orientação da encosta, a altitude e determinadas características do terreno (tais como, zonas de desfiladeiros) também influenciam o comportamento do fogo. No entanto, de uma forma mais indirecta, criando variações nas condições meteorológicas locais, o que se traduz em variações espaciais da composição e teor de humidade dos combustíveis (Tanskanen, 2007). Como exemplo, Bennet (2010) refere a situação de uma encosta orientada a sul. Geralmente, uma vez que a exposição solar é maior, os combustíveis têm valores de teor de humidade mais baixos e registam temperaturas mais elevadas, tornando-se potencialmente mais inflamáveis.

2.3. Previsão do comportamento do fogo

A pesquisa feita no campo do comportamento dos fogos levou à concepção de modelos de propagação, que reflectem tanto o conhecimento adquirido ao longo dos tempos, como também os limites da compreensão e previsão do fenómeno complexo que é o fogo (Dupuy, 1999).

Entendemos, de forma muito esquemática e geral, um modelo de propagação, como um modelo físico-matemático capaz de prever quantitativamente, em termos espaço temporais médios, alguns aspectos físicos do comportamento natural de toda ou parte de uma frente chamejante de um fogo florestal (André, 2001).

Segundo a usual classificação (Catchpole and de Mestre 1986, Webber 1991), podemos distinguir 3 tipos de modelos de propagação (In Dupuy, 1999):

- Modelos Físicos, que incluem partes dos processos físicos envolvidos no fenómeno do fogo.
- Modelos Semi-empíricos, baseados em expressões simples do princípio de conservação de energia, e que requerem muitas experiências laboratoriais para determinar os valores dos seus termos.

- Modelos Empíricos, que não incluem nenhum dos processos físicos, e relacionam a velocidade de propagação a variáveis da propagação, através de relações estatísticas.

Tal como foi referido, um dos parâmetros básicos que descreve o comportamento do fogo é a velocidade de propagação.

A velocidade de propagação é a rapidez linear de deslocação da frente de propagação do fogo, medida em m s^{-1} (Fernandes, 2002). É um parâmetro particularmente importante, uma vez que influencia o tempo disponível para responder e actuar numa situação de incêndio florestal (Williams, 1982).

O primeiro modelo teórico a surgir, que permitia calcular a velocidade de propagação, foi desenvolvido nos Estados Unidos por Fons (in Pastor, 2003).

Segundo Fons, a propagação do fogo podia ser vista como uma série sucessiva de ignições, em que a velocidade é controlada pelo tempo de ignição e pela distância entre partículas combustíveis (in Rothermel, 1972).

As ideias precursoras de Fons, confirmadas por Tarifa e Torralbo (1967) e Mcalevy, facilitaram a análise do fenómeno fogo (in Rothermel 1972).

Nesse sentido, em 1971, surge o modelo físico de Frandsen. Este modelo propunha que a velocidade de propagação durante um estado quasi-estacionario era determinada pela relação entre o fluxo de calor recebido de uma fonte e o calor necessário para gerar a ignição de um determinado combustível (Rothermel, 1972).

Com base na relação física de Frandsen, e suportando-se em dados experimentais, Rothermel (1972) formula um dos modelos semi-empiricos mais reconhecidos e importantes na actualidade, o Modelo de Rothermel, representado na equação (1).

A importância deste modelo deve-se em parte à sua integração em diversas aplicações de sistemas de comportamento de fogos na América do Norte, tais como os programas de computador BEHAVE e FARSITE (André, 2001).

$$R = \frac{I_R \xi (1 + \phi_W + \phi_S)}{\rho_b \varepsilon Q_{ig}} \quad (1)$$

R – velocidade de propagação numa situação de ausência de declive e de vento em estado quasi – estacionário ($m s^{-1}$)

I_R – intensidade de reacção ($J m^{-2}s^{-1}$)

ξ – coeficiente de fluxo de propagação (adimensional)

ρ_b – massa volúmica do leito combustível ($kg m^{-3}$)

ε – número de aquecimento efectivo (adimensional)

Q_{ig} – entalpia de pré – ignição ($J kg^{-1}$)

ϕ_W – coeficiente do vento

ϕ_S – factor de declive

Frandsen criou o seu modelo para determinar a velocidade de propagação de um fogo de superfície, num leito horizontal constituído apenas por um combustível (leito homogéneo).

No seu modelo, Rothermel integrou os efeitos do vento e do declive como factores de correcção, baseando-se nas simulações desenvolvidas no decorrer do seu trabalho.

Abrangendo ainda mais a gama de aplicação, Rothermel (1972), estima as propriedades de combustibilidade de um leito heterogéneo, calculando a média das características de cada elemento constituinte, e considerando um leito homogéneo equivalente (Viegas, 2010).

Esta abordagem aos leitos heterogéneos foi, no entanto, contrariada por Catchpole (1993) que demonstrou que o comportamento do fogo perante uma mistura de dois combustíveis, na ausência de vento e de declive, não estava de acordo com as previsões do modelo Rothermel.

Dado que os leitos naturais são habitualmente constituídos por mais do que um combustível, apresentando heterogeneidades na sua extensão, e que o modelo Rothermel, utilizado habitualmente para previsão do comportamento do fogo, não modelava correctamente as condições mais próximas do real (Catchpole, 1993), tornou-se de elevada importância e interesse focar e aprofundar o estudo da propagação do fogo em leitos heterogéneos.

Nesse sentido, após uma caracterização da combustibilidade dos combustíveis florestais (Viegas, 1998), Viegas (2002) propôs que a velocidade de propagação de um leito heterogêneo, composto por dois tipos de partículas, fosse determinada em função da percentagem de cada elemento na mistura.

Para descrever a velocidade de propagação da mistura, foi proposto adicionalmente um parâmetro adimensional, equação (2) (Viegas, 2002).

$$\Psi = \frac{R_{0x} - R_{01}}{R_{02} - R_{01}} \quad (2)$$

R_{01} – velocidade de propagação de referência de um leito composto por um combustível F_1

R_{02} – velocidade de propagação de referência de um leito composto por um combustível F_2

R_{0x} – velocidade de propagação da mistura

As velocidades de propagação de referência R_{01} e R_{02} representam ensaios obtidos em superfícies horizontais, sem vento e constituídas apenas por um combustível.

Viegas (2002) concluiu que a variação da velocidade de propagação em função da mistura dependia do tipo de partículas combustíveis.

Posteriormente, analisando a combustibilidade de uma mistura de dois combustíveis, Almeida (2005) verificou a existência de uma tendência linear do parâmetro adimensional de velocidade de propagação (Ψ), em função do aumento da percentagem de um dos combustíveis na mistura.

Baseando-se nas pesquisas de Viegas (2002) e Almeida (2005), e num conjunto de novos ensaios, Viegas *et al.* (2010) propuseram que qualquer propriedade da combustibilidade de um leito constituído por dois ou mais combustíveis, é dada pela mistura linear das propriedades individuais de cada elemento. Definiram, assim, um novo e mais simples modelo empírico que permite estimar a velocidade de propagação em função da fracção mássica dos combustíveis. Este modelo linear é representado pela seguinte equação (Viegas *et al.*, 2010).

$$P = \sum_{i=1}^n x_i P_i \quad (3)$$

P – propriedade de combustibilidade

x_i – fracção mássica de um combustível F_i

Considerando apenas dois combustíveis, F_1 e F_2 , a equação passaria a,

$$P = x_1 P_1 + x_2 P_2 = x_1 P_1 + (1 - x_1) P_2 \quad (4)$$

A exclusão de x_2 permitiria a existência de apenas uma variável independente, simplificando assim o modelo. A validação deste modelo esteve assente em mais de 100 ensaios laboratoriais constituídos por uma mistura de dois ou mais combustíveis.

No seguimento do modelo proposto por Viegas *et al* (2010), Soares (2011) realizou um estudo de análise da velocidade de propagação em função da composição do leito e do teor de humidade do combustível.

Foram utilizados, palha, como representante dos combustíveis mortos, e folhas verdes de pinheiro e de eucalipto, como representantes dos combustíveis vivos.

Para as condições de superfície horizontal e velocidade de vento igual a zero, Soares (2011), concluiu que a velocidade de propagação, em função da composição de um leito, poderia ser estimada a partir de um polinómio de segundo grau (equação (5)), para misturas de combustíveis semelhantes.

$$\Psi = -0,54\varphi^2 + 1,60\varphi \quad (5)$$

3. METODOLOGIA EXPERIMENTAL

3.1. Ensaios de combustibilidade

O estudo da combustibilidade de leitos heterogéneos levou ao estabelecimento de uma metodologia experimental, baseada nos factores que afectam o comportamento do fogo, considerados neste estudo, e em trabalhos anteriores, como em Viegas (2010) e Soares (2011).

Perante essa metodologia, foram escolhidos dois combustíveis que nos dessem garantias da sua vasta representação no leito natural e realizados um total de 123 ensaios, divididos em dois tipos, assim definidos:

- Ensaio principal, no qual se fez variar a contribuição de um dos combustíveis na mistura, alterando a sua percentagem mássica, e se introduziu uma variação no declive a que o leito estava sujeito.
- Ensaio de referência, onde apenas se fez variar a percentagem mássica dos combustíveis, mantendo o declive igual a zero.

A ausência de vento e uma carga total constante de $0,8 \text{ kg m}^{-2}$ foram duas das características comuns a ambos os ensaios.

Definimos como parâmetros de controlo ao nosso estudo, o declive (α), a percentagem de combustível seco na mistura (x), a temperatura do ar (T), a humidade relativa (HR), o teor de humidade dos combustíveis (m_{fi}), a hora de início de cada ensaio e a altura do leito.

Complementarmente ao objectivo principal foram ainda definidos dois métodos de análise, à área queimada de um leito, e à percentagem mássica residual. Estes, referentes apenas aos ensaios principais.

3.2. Caracterização de combustíveis

Partindo do objectivo de estudar a combustibilidade de uma mistura de dois combustíveis, um verde e um seco, uma das características que determinou as escolhas dos combustíveis a analisar deteve-se com a frequência com que os mesmos podem ser encontrados na natureza. Naturalmente, um segundo factor a considerar foi a facilidade de obtenção, para uso nos ensaios laboratoriais.

Tendo tais condições em vista foi escolhido como representante dos combustíveis vivos, as folhas verdes do *Pinus Pinaster*, vulgo Pinheiro bravo. O segundo combustível utilizado foi a palha. Este por representar os combustíveis de superfície, estrato preferencial para o desenvolvimento da maioria dos incêndios (Viegas, 2011).

Segundo a classificação de Viegas (2011), ambas as espécies consideradas, encontram-se na categoria de tamanho, dos combustíveis finos ou ligeiros.

Relativamente à propriedade teor de humidade numa primeira instância foram utilizados dois métodos.

Foram recolhidas amostras dos materiais que se encontravam à temperatura ambiente e colocadas numa balança de humidades (*AND MX-50*) com *resolução 0.01% Max = 51g*, que fornecia o teor de humidade do combustível, mediante a secagem, relativamente rápida, e a leitura da diferença entre o peso inicial e o peso final da amostra. Uma vez que este valor era dado em termos de base húmida, era efectuada uma transformação, de forma a obter o valor, m_f em base seca.

Este método, inicialmente foi apenas utilizado para calcular a massa de combustível necessária para cada ensaio, que dependeria da carga total (M_0) definida, e do teor de humidade.

Após a conclusão do procedimento anterior, eram recolhidas novas amostras dos materiais que, por sua vez, eram pesadas numa balança (*Metler PM600*), até atingir um valor de 0.005kg (m_1). De seguida eram colocadas, e mantidas durante 24h, numa estufa à temperatura de 100 – 110° C. Após 24h retiravam-se as amostras e procedia-se a uma nova pesagem da massa (m_2) resultante da secagem.

Partindo dos valores da massa inicial (m_1) e da massa final (m_2), era possível calcular o teor de humidade do combustível, em base seca, m_f , através da fórmula que se apresenta de seguida.

$$m_f = \frac{m_1 - m_2}{m_2} \times 100 \quad (6)$$

- m_1 – massa inicial [kg]
- m_2 – massa final, após as 24h [kg]
- m_f – teor de humidade em base seca

Este último método, a chamada análise gravimétrica, sendo mais preciso, levou-nos a descobrir que o valor dado pela balança de humidades se encontrava ligeiramente subestimado. Apesar disso, cremos que o erro introduzido por esta diferença será reduzido, e assim não afectará os resultados finais.

Com o decorrer dos ensaios laboratoriais, verificou-se que a humidade do combustível seco se apresentava demasiado elevada, interferindo com a qualidade dos ensaios.

De forma a contrariar esse facto, e a manter a humidade do combustível seco abaixo dos 10%, em base seca, decidiu-se colocar a palha, antecipadamente aos ensaios, numa estufa à temperatura de 40° C.

Na impossibilidade de fazer a análise gravimétrica, devido à utilização da estufa, o cálculo da humidade baseou-se na utilização da balança de humidades, tendo, no entanto, sido adoptada uma nova metodologia.

Era retirada uma amostra considerável de palha da estufa, registada a hora a que se iniciava o processo, e determinado, através da balança de humidades, o teor de humidade a partir de uma parte da amostra.

Mantendo a amostra exposta a condições semelhantes às dos ensaios, eram calculados os teores de humidade periodicamente, contabilizando o tempo que tinha decorrido desde o início do processo.

Com estes dados construiu-se um gráfico, que evidenciou a evolução do teor de humidade em função do tempo, desde a saída da estufa. Essa evolução permitiu-nos estimar com alguma aproximação, o teor de humidade dos combustíveis, no início de cada ensaio.

Relativamente à carga total dos ensaios, em virtude da experiência de trabalhos anteriores, chegou-se à conclusão que o valor ideal, para os nossos ensaios de combustibilidade, seria de $M_0 = 0.800 \text{ kgm}^{-2}$. Isto porque, um valor inferior ao referido, não seria suficiente para obter uma combustão regular, e mais, obrigar-nos-ia a dispor de grandes quantidades de folhas verdes de pinheiro.

Para medir as massas totais dos combustíveis, referentes aos ensaios, foi utilizada a balança *AND HW 100KGL* com resolução de $0,01\text{kg}$.

A fracção mássica de cada componente na mistura era dada pela seguinte equação, (Viegas, 2010)

$$x_i = \frac{M_i}{\sum_{j=1}^n M_j} \quad (7)$$

- M_i – carga do componente da mistura (kg m^{-2})
- x_i – fracção mássica do componente, na mistura (adimensional)

Logo, a carga total M_0 do leito era dada por

$$M_0 = \sum_{i=1}^n M_i \quad (8)$$

Posto isto, e tal como indicámos anteriormente, a massa m de cada componente na mistura, seria calculada a partir de

$$m = M_{Ti} \times A \quad \text{e} \quad M_{Ti} = (1 + m_f) \times M_0 \quad (9) \text{ e } (10)$$

- M_{Ti} – carga final ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$)
- A – área útil (m^2)
- m – massa de combustível (kg)
- m_f – teor de humidade (base seca)

3.3. Equipamento

Os ensaios de combustibilidade, realizados no decorrer deste trabalho, foram todos efectuados no Laboratório de Estudos sobre Incêndios Florestais (LEIF) na Lousã, pertencente à Associação para o Desenvolvimento da Aerodinâmica Industrial (ADAI) do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Coimbra.

A mesa utilizada para a realização dos ensaios principais, foi a mesa *Desfiladeiro 4* (DE4), apresentada na Figura 4 - (a). A superfície da mesa DE4, de dimensão 48 m², é composta por duas faces, ligadas a uma base que permite a definição do ângulo Delta (δ) para cada face, de uma forma independente. A base está fixa a uma estrutura que pode ser inclinada, possibilitando a definição de diferentes ângulos Alfa (α) [$0 < \alpha < 40^\circ$], simulando o declive de uma encosta.

Cada secção tem, ao longo dos seus topos, pinos com um espaçamento de 25cm, utilizados para atar os fios, que nos permitem determinar o tempo de avanço da linha de fogo.

Foi utilizada uma segunda mesa, com dimensão 1×1 m², de superfície metálica, sem qualquer tipo de automatismo mecânico, com um espaçamento entre pinos de 10cm, para proceder aos ensaios de referência, Figura 4 - (b). A esta mesa referimo-nos como mesa R0.

Para além das já anteriormente referidas balanças (fotografias em anexo), foi ainda utilizado equipamento fotográfico com o intuito de documentar e posteriormente analisar o nosso trabalho.



(a)

(b)

Figura 4 – (a) mesa Desfiladeiro 4 (DE4); (b) mesa R0

3.4. Procedimento experimental

Em cada série de ensaios, fez-se variar a contribuição de um dos combustíveis, na mistura, alterando a sua percentagem mássica. Por sua vez, entre séries de ensaios principais, procedeu-se à variação do declive a que o leito do combustível estava sujeito.

Os procedimentos seguidos para a realização dos ensaios principais foram os seguintes:

1. Foram reunidos os combustíveis necessários à realização de uma série de ensaios.
2. Obteve-se o teor de humidade de cada combustível através da balança de humidades.
3. Foram retiradas novas amostras, para a análise gravimétrica das humidades.
4. Procedeu-se ao cálculo das massas de acordo com a percentagem de cada componente na mistura.
5. Tendo esses valores, eram efectuadas as pesagens e, de seguida, misturados os combustíveis de forma a produzir uma mistura homogénea e isotrópica
6. Dado que a mesa DE4 tinha dimensões superiores às pretendidas pelos nossos ensaios, foi definido através de linhas marcadoras uma área de $2 \times 1 \text{ m}^2$. Houve o cuidado de situar essa área numa zona mais central da mesa, para que, a frente de fogo não sofresse nenhuma influência de um possível movimento de ar.
7. Colocaram-se 3 redes metálicas na zona do leito.
8. Dispôs-se, nessa área demarcada, a mistura dos combustíveis de forma a apresentar uma distribuição equilibrada.
9. Formaram-se linhas transversais à direcção da propagação do fogo, através de fios de algodão atados aos pinos existentes na mesa.
10. Determinou-se a altura do leito, colocando uma folha sobre o combustível, e medindo, através de uma fita métrica, a distância entre a superfície da mesa e a folha.
11. Colocou-se a mesa com o declive pretendido.
12. Fotografou-se o leito antes de iniciar o ensaio.
13. Registou-se a temperatura do ar, a humidade relativa e a hora do início do ensaio.
14. Formou-se uma frente linear de fogo, no início do leito, ateando um de fio de lã ensopado em gasolina.

15. O avanço da frente de fogo foi monitorizado por um observador, que registava o intervalo de tempo entre cada fio de algodão queimado, ao longo do leito.
16. O leito era novamente fotografado, no final do ensaio, com o intuito de proceder à análise fotográfica.
17. Após algum tempo de arrefecimento, retiravam-se as redes, cuidadosamente, e era pesada a massa residual deixada pelos dois combustíveis após a combustão.

O procedimento relativo aos ensaios de referência era semelhante aos ensaios principais, no entanto, tal como definimos no início deste capítulo, não se procedeu a variação do declive, nem a colocação de redes metálicas.

3.5. Descrição da metodologia do tratamento de dados

Posteriormente à realização dos ensaios procedeu-se ao tratamento dos dados. Este subcapítulo refere-se à metodologia empregue no seu tratamento

3.5.1. Velocidade de propagação

Não obstante o facto de termos dois tipos de ensaio, principal e de referência, o método de análise da velocidade de propagação foi exactamente o mesmo.

A partir dos valores de tempo registados, com o avanço da frente de chama, construiu-se um gráfico de distância em função do tempo.

O ajuste desses valores a uma tendência fez-se a partir de uma regressão linear com equação,

$$y = mx + b \tag{11}$$

Em que x representa o tempo decorrido y a distância percorrida pela frente de chama, e m , sendo a derivada da distância em função o tempo, representa a velocidade de propagação de uma chama.

No gráfico da Figura 5, apresenta-se um exemplo da regressão linear obtida a partir de um ensaio com declive 40° e percentagem de palha igual a 70%. Neste caso a

velocidade de propagação da frente de chama, tal como se pode ver da equação da recta, seria aproximadamente $2,52 \text{ m s}^{-1}$.

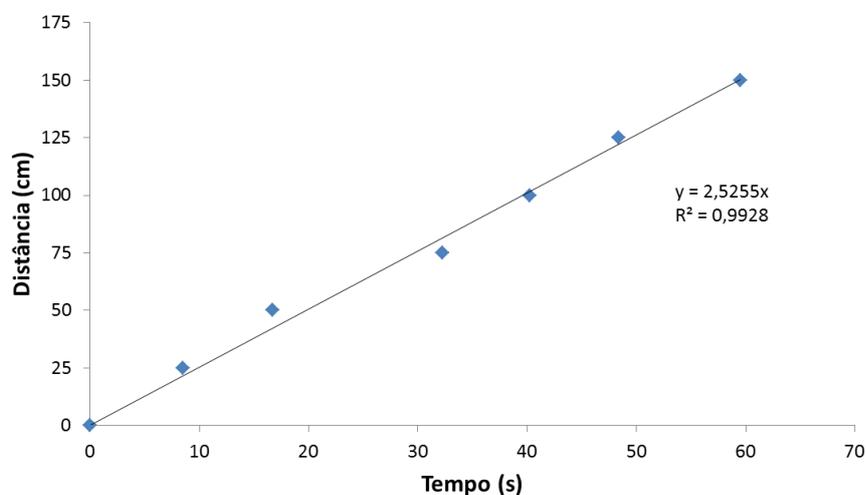


Figura 5 – Exemplo de regressão linear para o cálculo da velocidade de propagação.

Notando, como foi dito, que se trata de uma distância em função do tempo, seguindo o mesmo método que em Soares (2011), obrigou-se a linha de tendência linear, a interceptar a origem dos eixos, tornando a ordenada na origem, em todos os casos, igual a zero. Os erros obtidos com esta metodologia, apesar de nem sempre se obterem correlações tão sólidas como neste caso, consideraram-se não influenciar a posterior análise.

Tendo definido dois tipos de ensaios, determinámos a distinção entre velocidade de propagação de cada um, através da letra R , para os ensaios principais, e R_0 , para os ensaios de referência.

3.5.2. Área queimada

Com objectivo de determinar a área queimada correspondente a cada ensaio, recorreu-se às fotografias tiradas, maioritariamente de topo, dos leitos ardidos.

Inseriram-se as imagens, correspondes ao declive e percentagem mássica do ensaio, no software *AUTOCAD*, que nos permitiu sobrepor linhas de referência, como forma de delimitação da área total do leito e das regiões ardidas.

Através da função *AREA*, incluída no programa de *CAD*, foi determinada a área das regiões delimitadas, correspondentes às áreas queimadas, e a área total que o ensaio apresentava na imagem.

Conhecendo, as medidas reais do leito, estimou-se proporcionalmente a percentagem de área efectivamente queimada.

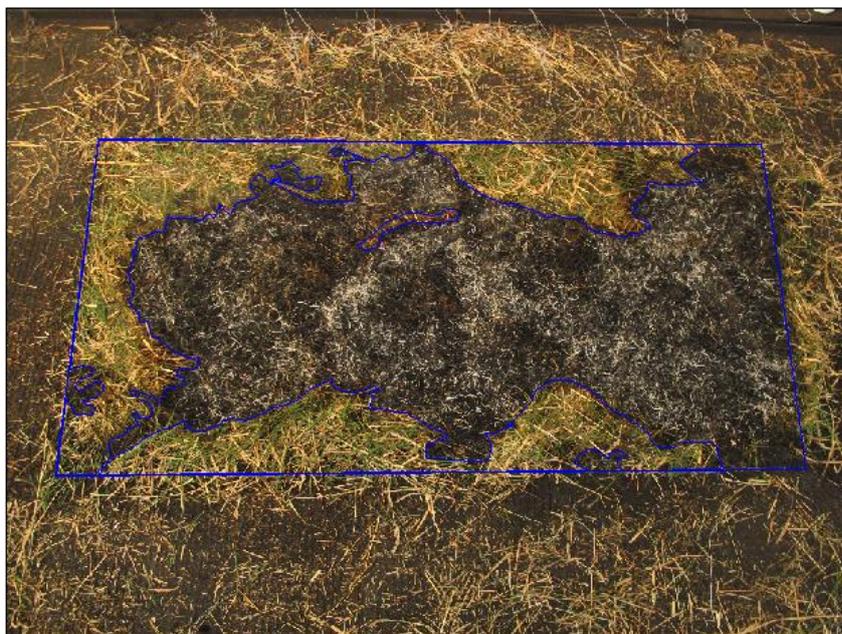


Figura 6 – Exemplo da delimitação do leito e das regiões queimadas.

3.5.3. Massa residual

Entre os objectivos do nosso estudo, encontrava-se a análise da variação de massa residual, registada após a combustão, segundo a variação da percentagem de combustível seco.

Em estudos anteriores (Soares 2011), a mesa de ensaios utilizada continha integrada, uma balança que permitia determinar a variação da massa dos combustíveis no decorrer dos ensaios.

No nosso trabalho, dadas as dimensões e as características da mesa DE4, não tínhamos disponível um sistema de medição integrado da massa. Desta forma, recorreu-se a outro método.

Foi definida a colocação de 3 redes metálicas de dimensões $20 \times 30 \text{ cm}$ e com malha de 2 mm , sob o leito formado pelos combustíveis. As redes foram dispostas tendencialmente na zona central e ao longo do leito.

Após o final dos ensaios, eram retiradas individualmente, e o seu conteúdo cuidadosamente colocado em tabuleiros. Com o auxílio da balança *Metler PM600*, eram registadas as massas contidas em cada tabuleiro.

Com a carga total de $0,8 \text{ kg m}^2$, inicialmente estabelecida, e o registo da massa total correspondente ao conjunto dos dois combustíveis, calculou-se a massa teoricamente existente, numa superfície de $20 \times 30 \text{ cm}$.

Comparando a massa inicial teórica com a massa registada após o final dos ensaios, obtínhamos a percentagem de massa residual.

Dada a existência de 3 valores distintos correspondentes às redes calculámos a média aritmética do conjunto.

4. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DE RESULTADOS

No decorrer dos ensaios laboratoriais foram registados dados cujo tratamento e análise serão devidamente apresentados neste capítulo.

4.1. Velocidade de propagação dos ensaios de referência

Com o intuito de referenciar as condições laboratoriais e as características dos combustíveis, a par com os ensaios principais, foram realizados os chamados ensaios de referência.

Como foi referido anteriormente, estes ensaios mantiveram-se sempre com um declive igual a zero, variando a percentagem de palha na mistura, apenas entre dois valores.

O gráfico da Figura 7 representa a velocidade de propagação obtida nos ensaios de referência, em função da percentagem de palha.

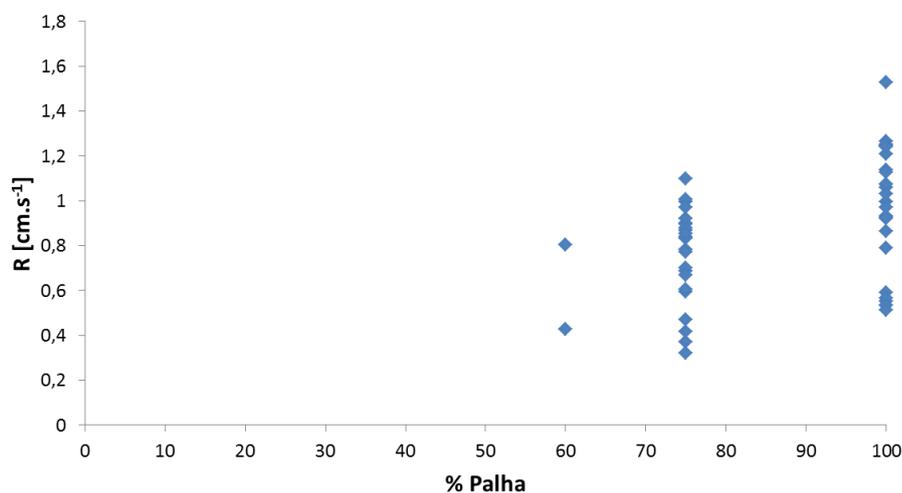


Figura 7 – Velocidade de propagação em função da percentagem de palha; valores dos ensaios de referência.

Os valores iniciais de 60% de palha revelaram estar muito próximos do valor definido anteriormente como x crítico, para declive zero. Essa proximidade obrigou-nos a alterar a percentagem de palha, prevista inicialmente para um dos ensaios de referência, de

60% para 75% na mistura. Desta forma os restantes ensaios realizados variaram apenas entre 75% e 100% de palha.

No presente trabalho, os valores destes ensaios serviram apenas para realçar e notar alguma das características dos combustíveis que estivessem desviadas da gama de valores pretendidos para o nosso estudo.

4.2. Velocidade de propagação em função da composição do leito

Cada ensaio principal depende da percentagem de palha na mistura e do declive a que o leito se encontra.

Os gráficos seguintes representam a velocidade de propagação da chama, determinada pelo método referido em 3.5.1, em função da percentagem de palha. Foram divididos tomando em consideração os declives estudados.

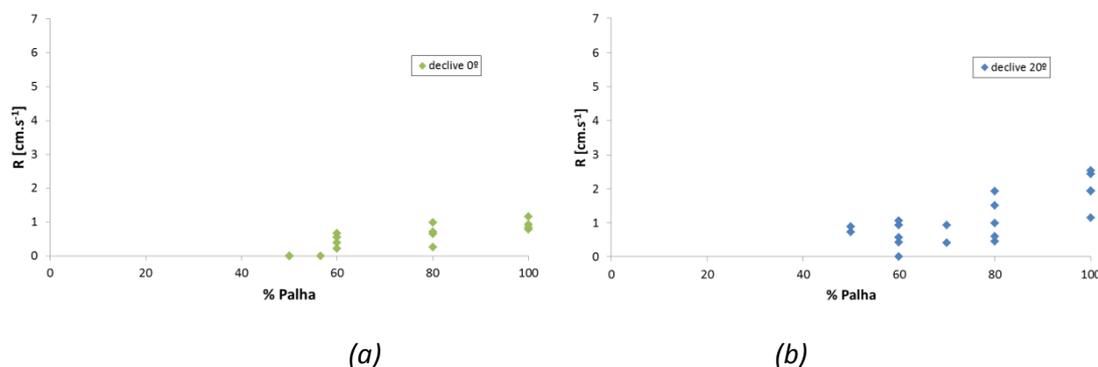


Figura 8 – Velocidade de propagação em função da percentagem de palha; (a) declive de 0°; (b) declive de 20°.

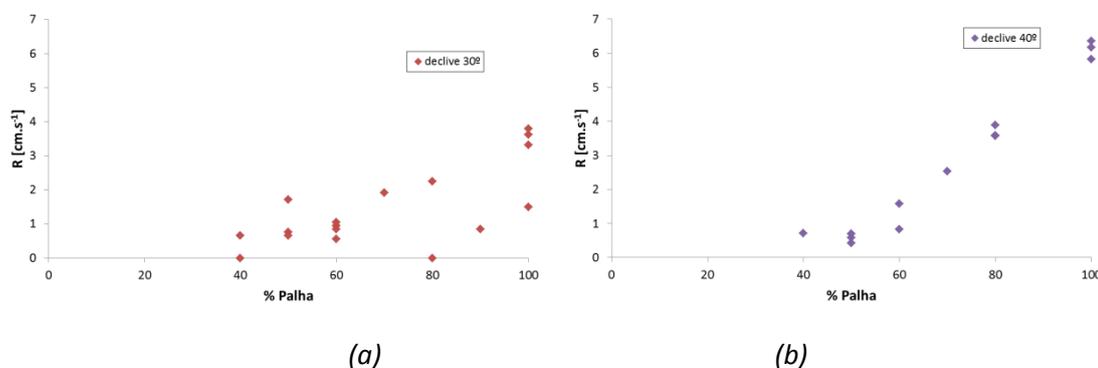


Figura 9 - Velocidade de propagação em função da percentagem de palha; (a) declive de 30°; (b) declive de 40°.

De acordo com o esperado, notamos um aumento da velocidade de propagação de chama com o aumento da percentagem de combustível seco (x). Verificamos ainda, que a gama de valores de velocidade de propagação de chama, torna-se notoriamente maior, com o aumento do declive.

Para os ensaios com declive 30° existe uma maior dispersão de resultados. Uma possível explicação, reside no facto de, numa série de ensaios, a humidade do combustível seco se encontrar com valores muito acima do habitual. No entanto, manteremos os dados correspondentes, para uma análise posterior.

Dado um dos elementos da mistura se tratar de um combustível vivo, não era possível obter propagação para valores abaixo de uma determinada percentagem de palha. Estes ensaios foram considerados com velocidade de propagação igual a zero. À percentagem para a qual o valor da velocidade era zero, denominamos por x crítico (x_c).

Com a introdução de declive no leito, houve uma diminuição do valor de x_c . A determinação deste valor, com exactidão, confrontou-nos com a necessidade de vários ensaios com valores de x , relativamente baixos e próximos uns dos outros.

Devido à restrição de realizar uma série de ensaios num só dia, e a esta dificuldade encontrada, em grande parte dos casos não nos foi possível determinar o valor para o qual a percentagem de palha representava a não propagação. Todavia, notamos que para declive nulo, o valor de x_c foi sempre determinado, correspondendo maioritariamente a 50%.

Relativamente a Figura 9 (a) referimos a existência de um ensaio com 80% de palha, que se considerou de velocidade zero. À luz da análise global dos dados, consideramos no entanto, que este resultado poderá não representar a realidade. Assumimos que se possam ter cometido algum tipo de erros na condução do ensaio, dado que, para percentagens inferiores de palha e com o mesmo declive, ainda obtínhamos propagação.

Verificou-se uma situação semelhante num ensaio de 60% de palha da Figura 8. Neste caso, comparativamente aos mesmos valores de x e declive, obtivemos sempre propagação total do leito.

Deste modo, decidimos não considerar estes dois ensaios futuramente.

4.3. Velocidade de propagação em função do declive

No gráfico seguinte, estão representados os valores de velocidade de propagação dos ensaios principais, já anteriormente apresentados, mas neste caso em função do declive a que estavam sujeitos. Foram separados por séries, de acordo com a sua percentagem de palha.

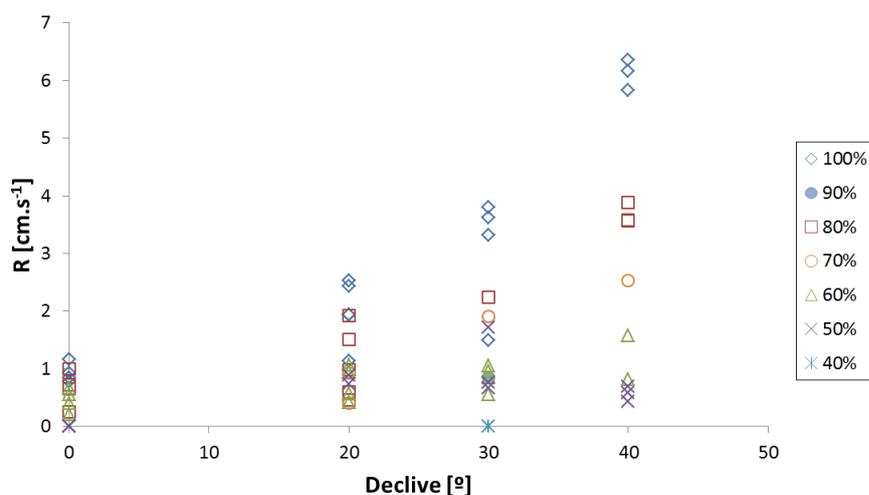


Figura 10 – velocidade de propagação em função do declive.

Da análise deste gráfico, apercebemo-nos do aumento da velocidade de propagação de chama com o aumento do declive e, novamente, com o aumento percentagem de palha.

Outra informação importante que se retira da análise deste gráfico, é a clara evolução das velocidades de propagação com o declive. Para declives mais acentuados tornam-se mais evidentes as zonas de velocidade de propagação para cada percentagem de combustível seco. Ou seja, com o aumento do declive, a mínima variação da percentagem de combustível seco promove uma alteração significativa nos valores da velocidade de propagação

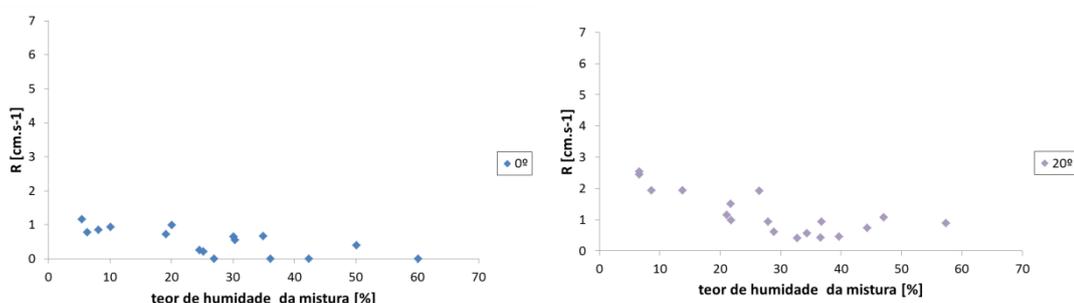
Poder-se-á assim dizer que, com o aumento do declive, a variação da percentagem de combustível seco, torna-se um factor preponderante.

4.4. Velocidade de propagação em função do teor da humidade da mistura

O teor de humidade do combustível verde, esteve sujeito, para além das próprias condições do pinheiro, às condições do interior do laboratório. Estas eram influenciadas pela própria meteorologia exterior.

Não havendo forma de manter um controlo sobre a humidade do combustível verde, foi necessário analisar a sua evolução e analisar a influência que a sua variação apresentava, na mistura dos dois combustíveis.

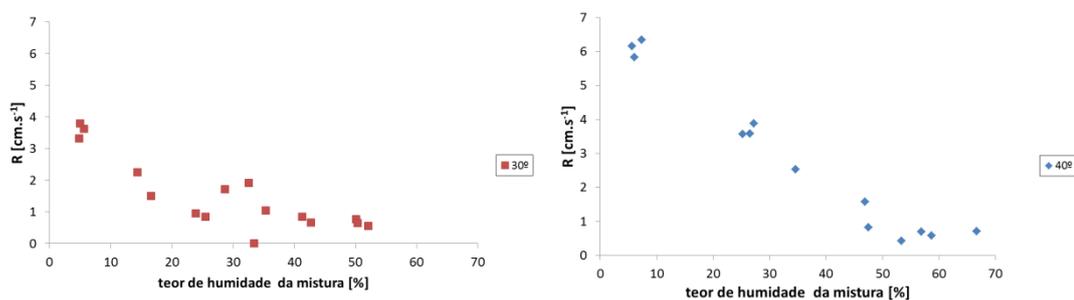
Desta forma, os dados relativos à velocidade de propagação em função do teor de humidade da mistura, foram divididos por declives, como se mostra nos gráficos seguintes.



(a)

(b)

Figura 11 – Velocidade de propagação em função do teor de humidade da mistura; (a) para declive de 0º; (b) para declive de 20º.



(a)

(b)

Figura 12 - Velocidade de propagação em função do teor de humidade da mistura; (a) para declive de 30º; (b) para declive de 40º.

Numa análise inicial, em todos os casos, verificamos a diminuição da velocidade de propagação da frente de chama com o aumento da humidade na mistura, tal como Soares (2011) tinha concluído. Este facto deve-se à necessidade de transferir uma maior quantidade de calor para a zona dos combustíveis ainda não ardida, e à diluição do oxigénio que a libertação do vapor de água provoca.

Numa análise complementar, se considerarmos tal como Wilson (1990), que a extinção do fogo, é uma função probabilística desligada do coeficiente de amortecimento da humidade, podemos analisar os dados, colocando de parte os ensaios com velocidade igual a zero.

Esta exclusão permite-nos seguir o mesmo método de Wilson, e ajustar uma função exponencial aos dados correspondentes a cada declive. Esta análise é apresentada de seguida na Figura 13 e Figura 14.

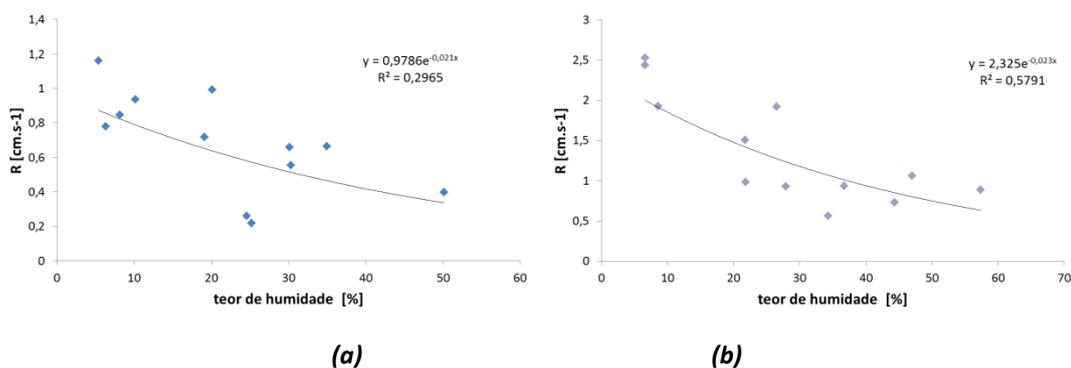


Figura 13 – Velocidade de propagação em função do teor de humidade com ajuste exponencial. (a) dados referentes a 0º, (b) dados referentes a 20º.

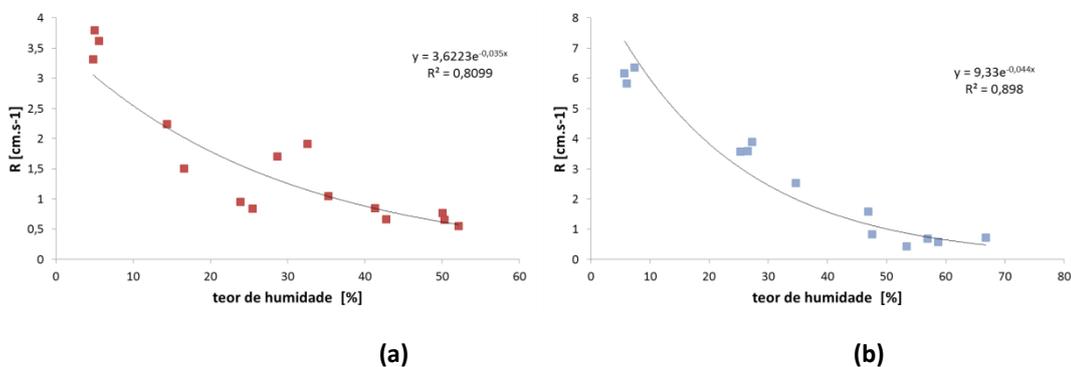


Figura 14 - Velocidade de propagação em função do teor de humidade com ajuste exponencial. (a) dados referentes a 30º, (b) dados referentes a 40º.

Da análise do ajuste da equação exponencial aos nossos dados, verificamos um aumento significativo na correlação obtida, com o aumento do declive. Propomos assim um aprofundamento futuro deste estudo

4.5. Velocidade de propagação em função da composição do leito e do declive

Um dos objectivos principais deste estudo, passou por estudar a velocidade de propagação de uma frente linear de chama, segundo duas variáveis, a percentagem de combustível seco (x) na mistura, e o declive (α) a que o leito heterogêneo, estava sujeito.

Após a análise individual de cada variável, recorremos ao software *Labfit* para gerar uma função tridimensional que nos permitisse analisar a influência do conjunto das duas variáveis independentes.

Este software, a partir de uma extensa base de dados de equações, determina a equação com melhor ajuste aos nossos dados.

Na Figura 15, apresentamos a superfície encontrada, representando assim, a variação da velocidade de propagação de uma frente linear, em função do declive, e em função da percentagem de combustível seco.

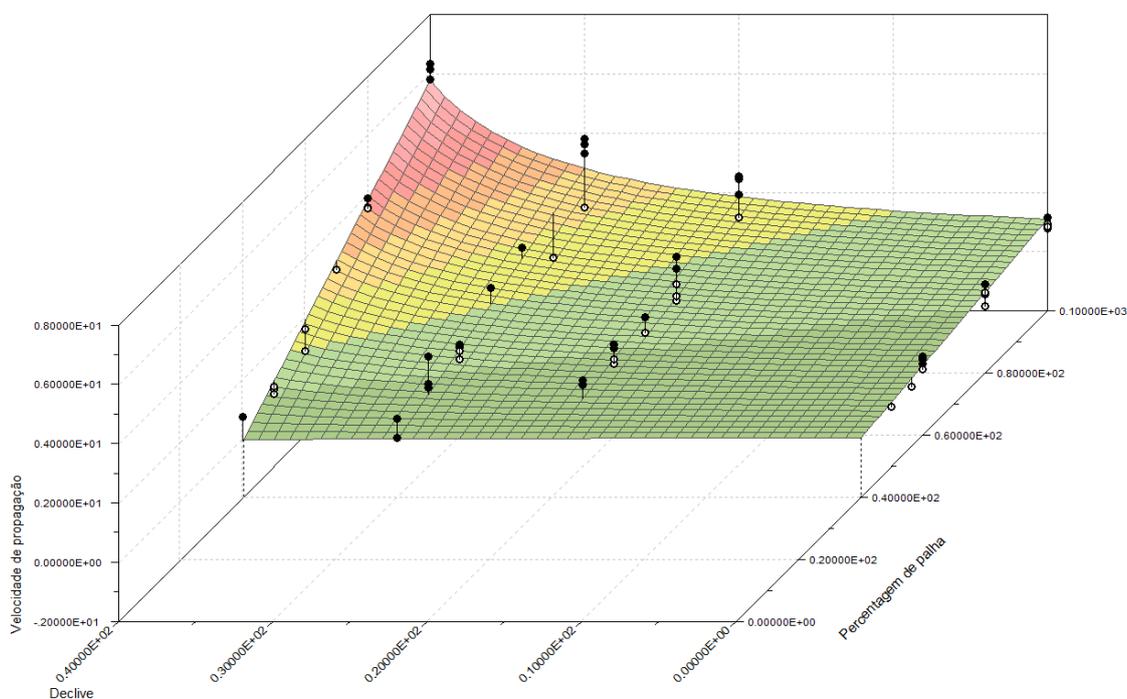


Figura 15 – Velocidade de propagação em função do declive e da percentagem de palha.

A equação correspondente é dada por:

$$Y = \frac{A + X_2}{B + C * X_1} \quad (12)$$

Cujos parâmetros têm o valor de,

$$A = -.4085E + 02; B = 0.5313E + 02; C = -.1073E + 01$$

O ajuste dos resultados dos ensaios laboratoriais à equação sugerida pelo programa *LabFit*, obteve uma correlação de $R^2=0,874$, o que nos parece um valor bastante sólido e demonstrativo das tendências que as duas variáveis apresentam.

Da observação da superfície encontrada, notamos que o melhor ajuste corresponde a uma variação linear, em função da percentagem de combustível seco, e uma variação curvilínea segundo o declive. Está pois, de acordo com a linearidade proposta pelo modelo de Viegas *et al* (2010).

Apesar da tendência que se verifica, sugerimos a continuação do estudo para parâmetros adimensionais, com vista a comparação de resultados.

4.6. Análise da massa residual

Os valores médios das percentagens de massa residual foram analisados segundo a variação da percentagem de combustível seco numa mistura.

Referimos que este método foi introduzido 3 séries de ensaios após o início do nosso trabalho, não contemplando pois, a totalidade dos ensaios realizados.

Conforme se observa no gráfico da Figura 16 foram divididos em quatro séries correspondentes aos declives estudados.

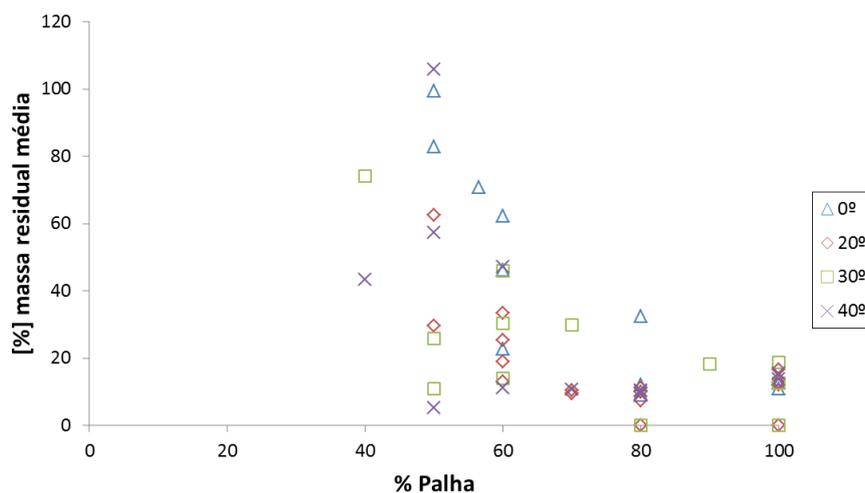


Figura 16 – Percentagem média de massa residual em função da percentagem de palha.

De acordo com a observação da Figura 16, notamos a existência de uma dispersão elevada dos valores. No entanto conseguimos detectar uma tendência de diminuição da percentagem média da massa residual, com o aumento de x , especialmente na série de declive nulo.

Da consulta dos valores registados, verificámos que para os ensaios com valores mais baixos de percentagem de palha, em algumas redes, a massa final excedia a massa inicial teórica. Tal facto deve-se em parte à dificuldade em dispor homogeneamente os combustíveis na zona delimitada ao leito.

Como exemplo dessa dificuldade, encontramos um valor, da série de 40°, acima dos 100% da percentagem média de massa residual.

Uma vez que a composição do leito influenciava os valores registados de massa residual, e que com a diminuição da percentagem de palha se aumentava a humidade, incluímos também um estudo em função do teor de humidade da mistura, como se observa na Figura 17.

Da análise da Figura 17 verificamos a tendência do aumento da massa residual em função do teor de humidade. Novamente, não se distinguem tendências entre declives. Notamos apenas que, quando se tratam de ensaios com valores inferiores a 10% de teor de humidade, qualquer que seja o declive, os valores de massa residual, são muito semelhantes.

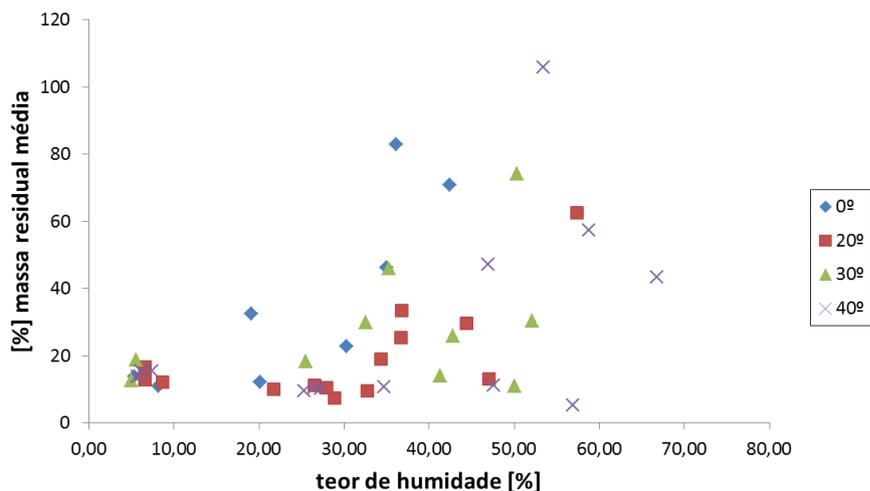


Figura 17 – Percentagem média de massa residual em função do teor de humidade

Um segundo potencial erro cometido, consistiu na recolha das redes para medição das massas residuais. Por questões relacionadas com o tempo disponível para cada série de ensaios, houve situações em que não se fizeram os registos no intervalo de tempo adequado, tornando-os, possivelmente menos precisos.

Por razões relacionadas com os erros detectados, consideramos que esta análise carece de posterior aprofundamento, de forma a poder ser retirada uma conclusão sólida.

4.7. Análise de área queimada

Conforme o processo mencionado em 3.5.2, foram analisadas as fotografias de modo a determinar a percentagem de área queimada e foi elaborado um estudo de acordo com a percentagem de palha existente no leito heterogéneo.

O gráfico da Figura 18 representa a percentagem de área queimada em função da percentagem de palha.

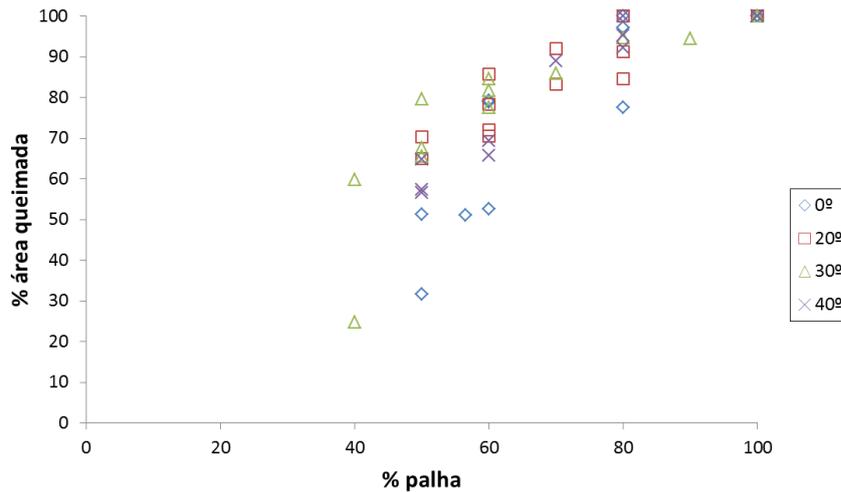


Figura 18 – Percentagem de área ardida em função da percentagem de palha.

Observando a Figura 18, no geral, notamos um aumento da área queimada com o aumento da percentagem de combustível seco na mistura.

A série de dados correspondentes a declive nulo, destaca-se por grande parte dos seus valores estarem fora da gama de valores das restantes séries. Indicando por isso, para além da diferença de velocidades de propagação referida anteriormente, uma diferença, na quantidade de combustível consumido com a introdução de declive.

No gráfico da Figura 19 apresentam-se as variações de percentagem de área queimada em função do declive, ordenadas, respectivamente, por percentagem de palha.

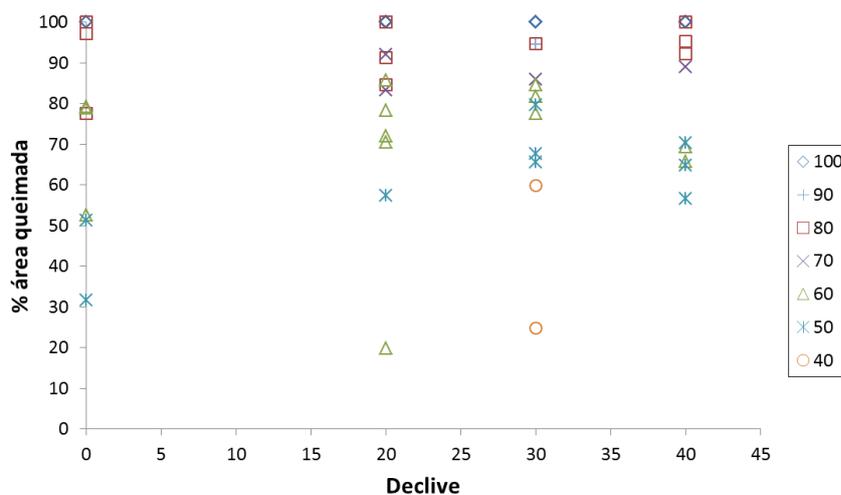


Figura 19 – Percentagem de área queimada em função do declive.

Uma dificuldade encontrada na análise das fotografias dos leitos queimados, deteve-se com a delimitação da área queimada. Em certos casos, as fotografias eram feitas logo após os ensaios, o que significava que captavam, para além do leito, algum do fumo que o final do ensaio libertava. Nestas situações tentou-se definir da melhor forma o limite da área queimada, no entanto, é possível que tenha dado origem a alguns erros.

A par dessa dificuldade, tratando-se de combustíveis finos, a sua dimensão também trouxe uma acrescida dificuldade na precisão.

4.8. Modelos de propagação

Até então, o nosso estudo tem incidido na análise da propagação do fogo numa mistura de dois combustíveis em concreto, em função do declive e da fracção de palha.

No entanto, a construção de modelos que nos permitam estimar as propriedades da propagação de uma frente de chama, para combustíveis semelhantes aos estudados, encaminham-nos para uma necessidade de generalização da nossa análise.

Nesse sentido, voltamos a referir o parâmetro adimensional (equação (2)), proposto por Viegas (2002), para a caracterização da velocidade de propagação. Este parâmetro tinha como base os ensaios realizados com uma mistura de dois combustíveis, num leito horizontal e na ausência de vento.

Com vista a caracterização por este parâmetro, era necessário que os combustíveis envolvidos na mistura fossem capazes de individualmente sustentar a combustão e propagação de um fogo.

No nosso estudo, a utilização de um combustível morto em conjunto com um vivo, fez-nos deparar com a existência de um valor mínimo de percentagem de palha para o qual não existe propagação. Esta situação, levou-nos a perceber que de um leito constituído, única e exclusivamente, por folhas verdes de pinheiro, não se obteria propagação. Este facto já tinha sido comprovado, para este combustível, e para folhas verdes de eucalipto, por Soares (2011).

Assim, a pretensão de generalizar a caracterização da velocidade de propagação para leitos compostos por combustíveis vivos e mortos, com ou sem, declive ou vento, levou à necessidade de adaptação do parâmetro ψ (equação (2)).

Assim Viegas *et al.* (submetido), definiram uma nova forma de representação de ψ , tal como se observa pela equação (13).

$$\Psi = \frac{R}{R_2} = R' \quad (13)$$

Nesta nova formulação, R representa a velocidade de propagação num qualquer ensaio de uma mistura de dois combustíveis e R_2 , por sua vez, para as mesmas condições experimentais consideradas em R , representa a velocidade de propagação de um só combustível F_2 . No nosso caso F_2 corresponde ao combustível morto, a palha.

Este parâmetro adimensional, definido na equação (13), toma a forma de R' quando representado em função da percentagem de combustível seco (x), tal como se verifica na Figura 20.

Em Soares (2011), foi também definido um parâmetro de caracterização da fracção de combustível seco.

$$\varphi = \frac{x - x_c}{1 - x_c} \quad (14)$$

A determinação deste parâmetro (φ) requer a existência de valores de x_c correspondentes a cada declive. Dado que no nosso trabalho, na maior parte dos nossos ensaios não foi possível determinar esse valor, optou-se por o estimar, considerando a linearidade proposta pelo modelo de Viegas *et al.* (2010). Com esse objectivo, ajustou-se uma regressão linear a cada uma das séries, tal como se vê na Figura 20.

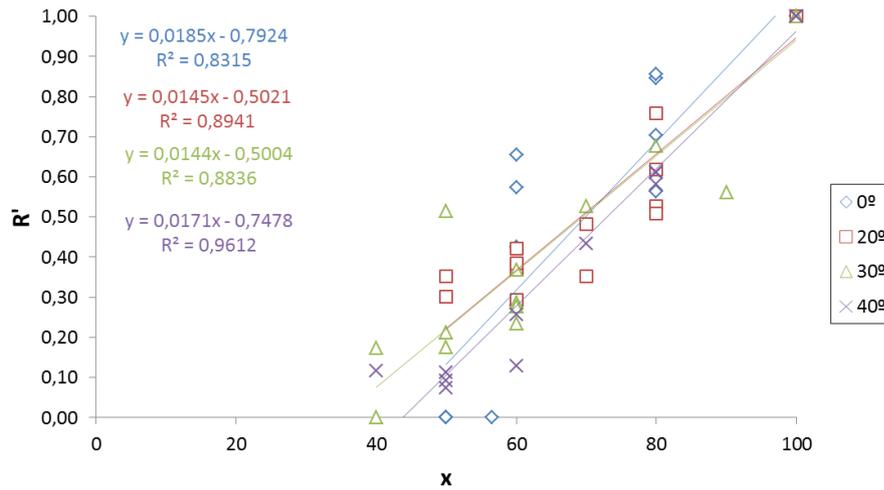


Figura 20 – Parametro adimensional R' em função da percentagem de palha.

A equação da recta, correspondente a cada declive, permitiu-nos calcular o valor de x_1 , para o qual a ordenada era igual a zero. Estes valores encontram-se na Tabela 1.

Tabela 1 – valores x_1 em função do declive

α [°]	X_1
0	42,83
20	34,62
30	34,75
40	43,73

A evolução do valor crítico de percentagem de palha, estimado pelas regressões lineares aplicadas, foi estudada no gráfico da Figura 21, na qual se representa x_1 em função do declive.

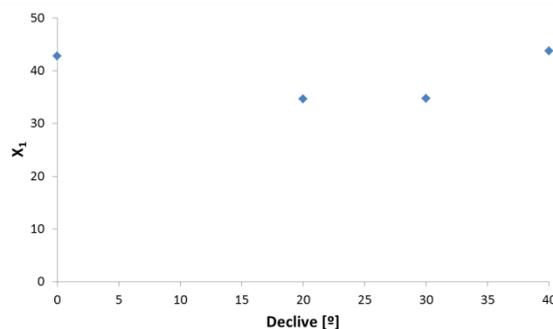


Figura 21 – Valor estimado de x_1 em função do declive.

Seria de esperar que o valor crítico x_c fosse diminuindo à medida que aumentávamos o declive, no entanto, como podemos observar da Figura 21, os valores estimados a partir da regressão linear de 20° e 30° são inferiores a 0°, mas são praticamente iguais. Para 40°, x_1 volta a aumentar atingindo até um valor superior ao encontrado para a recta de declive nulo. Esta tendência também foi confirmada presencialmente no decorrer dos ensaios. Comparativamente às séries de 20° e 30°, os ensaios com declive 40°, e percentagens mais baixas de palha, apresentaram uma maior dificuldade em sustentar uma propagação, logo após o início da combustão.

Uma explicação possível para esta tendência, estará no processo de transmissão de calor predominante em leitos com declive diferente de zero, a convecção, (Buttler, 2007; Dupuy, 2011), em conjunto com o elevado teor de humidade das misturas de combustíveis, posteriormente libertado na forma de vapor de água. Seriam no entanto necessários mais ensaios para aprofundar esta questão.

Os valores experimentais obtidos para declive nulo, demonstraram que em nenhum caso era ultrapassado o valor de 50% de fracção de palha para x_c . Desta forma para análise posterior do parâmetro ϕ , rejeitámos o valor x_1 encontrado por regressão linear e assumimos x_c , para declive nulo, como sendo o valor experimental de 50%.

Para declive de 40°, visto termos entre os nossos dados, um valor de x , com propagação, inferior ao estimado a partir da recta, optámos por considerar x_c , como um arredondamento por defeito de x_1 .

Os restantes valores de x_c considerados para a caracterização da composição do leito através do parâmetro ϕ , encontram-se na Tabela 2.

Tabela 2 – valores de X_c considerados, para cada declive.

α [°]	X_c
0	50
20	35
30	35
40	40

No gráfico da Figura 22, apresentam-se os valores do parâmetro ψ em função do parâmetro ϕ .

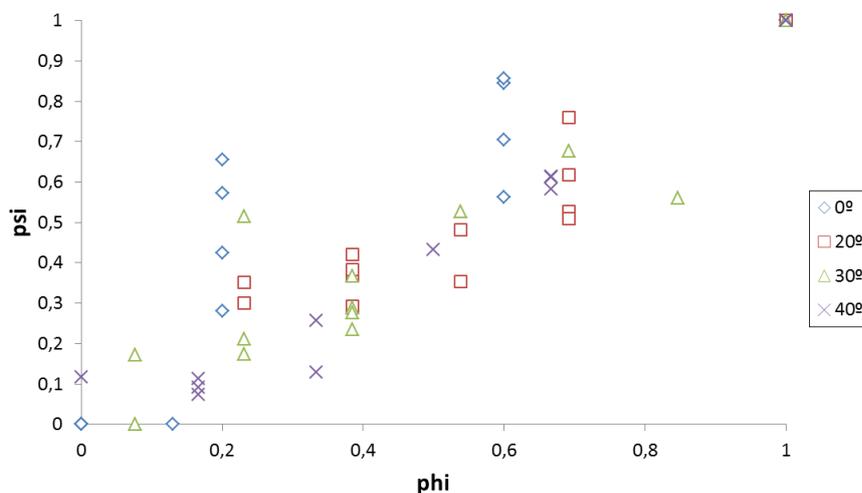


Figura 22 – Parâmetro adimensional Ψ em função do parâmetro adimensional ϕ .

Mantendo os dados devidamente identificados e separados por declive, verificámos logo à partida no gráfico da Figura 22, que os valores da série 0°, se destacam das restantes, por não se adaptarem à tendência geral.

Esta primeira análise levou-nos a considerar, tanto o modelo polinomial de segundo grau proposto por Soares (2011) para declive nulo, como a já referida predominância da convecção para leitões superiores a 20 graus de declive (Dupuy, 2011). Assim, e com vista a uma posterior comparação com o modelo empírico proposto por Soares (2011), decidimos analisar os dados ao declive nulo separadamente das restantes séries, tal como se observa no gráfico da Figura 23.

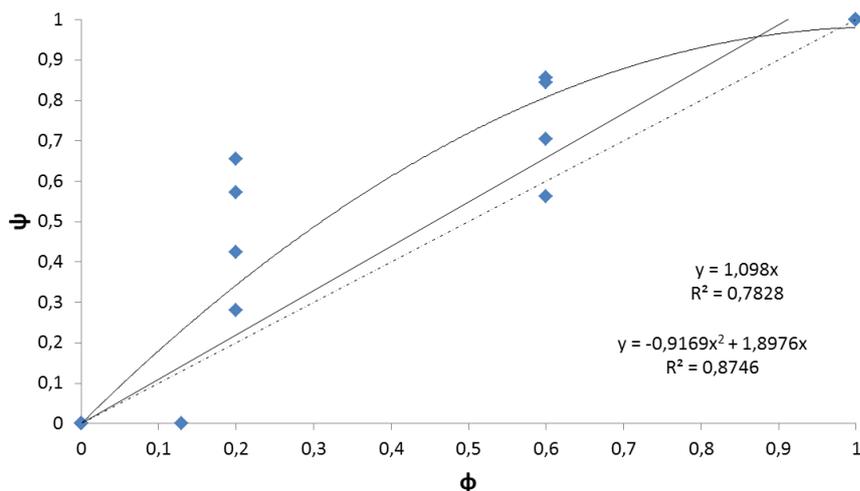


Figura 23 - Parâmetro adimensional Ψ em função do parâmetro adimensional ϕ . Dados relativos a declive 0°.

Baseando-nos na linearidade, do modelo proposto por Viegas *et al.* (2010) fizemos um primeiro ajuste através de uma regressão linear. No entanto, uma vez que a correlação obtida não obteve valores muito elevados, como se verifica na equação presente no gráfico da Figura 23, partiu-se para um ajuste polinomial de segundo grau.

Este ajuste de segundo grau, tendo um coeficiente de correlação bastante superior ao linear, levou-nos à comparação dos nossos dados com o modelo proposto por Soares.

Desta forma, estimámos a velocidade de propagação através da equação (5), de acordo com a composição do leito, e comparamos com os nossos valores experimentais obtidos para declive nulo. No gráfico da Figura 24 apresentamos essa análise.

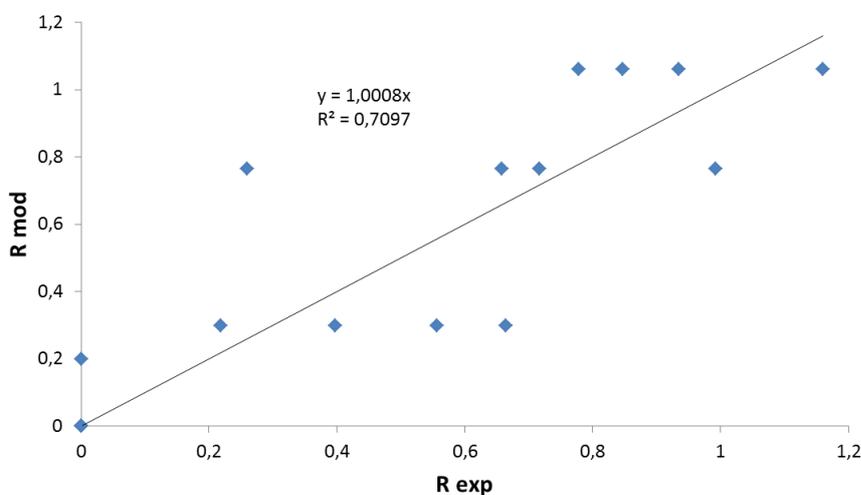


Figura 24 – Valores da velocidade de propagação estimados em função dos valores observados experimentalmente.

No eixo das ordenadas observamos os valores teóricos estimados pelo modelo, e no eixo das abcissas os valores da velocidade de propagação experimentais.

Da observação do gráfico da Figura 24, notamos que apesar da recta de ajuste ter um declive muito próximo do valor unitário, o que significa alguma correspondência entre os valores estimados e os observados, o coeficiente de correlação está abaixo das expectativas.

Tendo em conta o número extenso de ensaios realizados por Soares (2011), e a nossa amostra significativamente mais pequena referente a declive nulo, pensamos que não estamos aptos a pôr em causa o seu modelo. Podemos no entanto referir que assim como o seu modelo proposto, a melhor tendência ajustada aos nossos dados, é visivelmente uma função quadrática.

As séries correspondentes a ensaios com declive são apresentadas indiferenciadamente no gráfico da Figura 25.

Da mesma forma que anteriormente, ajustámos os dados para um polinómio de primeiro grau, e um polinómio de segundo grau

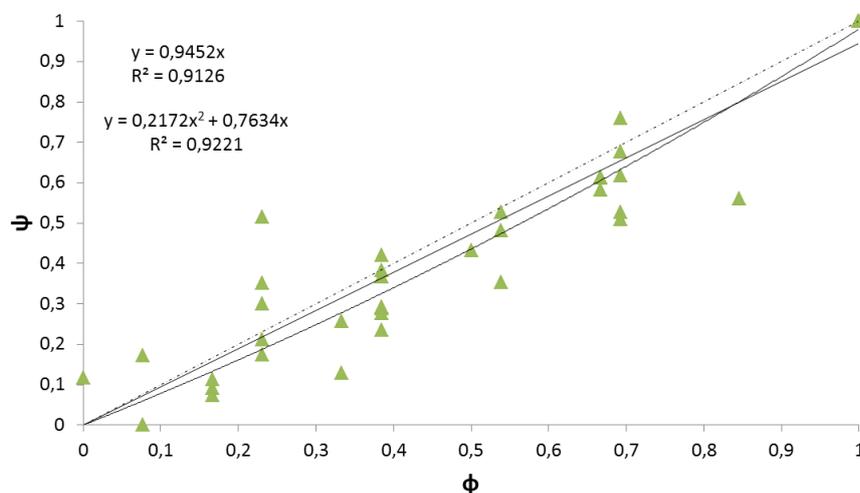


Figura 25 – Parâmetro adimensional Ψ em função do parâmetro adimensional ϕ . Dados relativos a declive diferente de zero.

Neste caso, obtivemos ajustes muito semelhantes para ambos os polinómios, e acima de 90% de correlação, o que nos pareceu dar fortes indicações de uma tendência.

Dada a proposta de linearidade em função da composição do leito, de Viegas *et al.* (2010), e à diferença mínima de coeficientes de correlação entre os dois polinómios

ajustados, propomos, para leitos com declive, um modelo polinomial de primeiro grau para o parâmetro adimensional da velocidade de propagação. Definimos assim, com a equação seguinte, o modelo empírico.

$$\Psi = 0,95\varphi \quad (15)$$

Estamos confiantes que esta tendência é demonstrativa da combustibilidade de um leito constituído por dois combustíveis, e que o facto de conter apenas uma variável independente, simplifica em muito as estimativas.

5. CONCLUSÃO

O conhecimento detalhado do comportamento do fogo traz consigo mais-valias quanto à forma como se encara a prevenção e, no decorrer de um incêndio florestal, ao próprio combate.

Em qualquer leito natural, os combustíveis existentes apresentam heterogeneidades, tanto entre eles como individualmente. Esta situação é uma dificuldade acrescida para a simulação das suas propriedades, através dos modelos de propagação.

No entanto, como forma de abordar o estudo dos leitos heterogéneos, Viegas *et al* (2011) propuseram um modelo linear que estimasse uma propriedade qualquer do leito, em função da fracção mássica dos combustíveis.

Inicialmente esta proposta baseava-se apenas em leitos horizontais. Dado, mais uma vez, que no leito natural existem inúmeras heterogeneidades topográficas, procedeu-se à sua aproximação, introduzindo a variável declive.

Este estudo, baseado na combustão de um leito constituído por um elemento vivo, consequentemente com maior teor de humidade, e um componente morto, permitiu concluir que a velocidade de propagação em função da fracção mássica do combustível, para leitos com declive, assume uma tendência linear.

Complementarmente, foram também analisados dados referentes à área queimada e à massa residual. Desta análise concluiu-se que a área queimada do ensaio aumenta em função da quantidade de combustível seco, na mistura.

Relativamente à massa residual, podemos dizer que a quantidade de combustível não ardido aumenta com a humidade, no entanto, os erros associados a esta metodologia, não nos permitiram retirar mais conclusões.

Com o intuito de generalizar os dados experimentais a outros combustíveis semelhantes, a velocidade de propagação e a fracção mássica do combustível seco foram caracterizados com o auxílio de dois parâmetros adimensionais.

A caracterização da fracção mássica levou-nos à necessidade de estimar a quantidade mínima de combustível seco que permitisse a existência de propagação. Nesse sentido, ao contrário do esperado, verificou-se que com o aumento do declive, o valor crítico teria tendência a diminuir até um determinado valor, após o qual voltaria a aumentar.

Com a separação dos dados de declive nulo, dos restantes, pudemos comparar o modelo proposto anteriormente por Soares (2011), com os resultados observados.

A correlação encontrada entre os dados experimentais e os valores estimados pelo modelo não ultrapassou o valor de 0,7. No entanto, considerando que Soares (2011) se baseou em cerca de 120 ensaios, e que a nossa amostra correspondente a declive nulo, se revelou bastante inferior, assumimos que será insuficiente para pôr em causa ou pelo contrário validar, o seu modelo.

Para leitões com declive, encontrou-se uma tendência linear no parâmetro adimensional de velocidade de propagação, em função da composição do combustível seco. Nesse sentido foi proposto um modelo empírico simples, apenas com uma variável independente, que permitisse estimar a velocidade de propagação para uma mistura de dois combustíveis, semelhantes aos estudados.

A validação deste modelo suporta-se com a realização de futuras repetições de ensaios para os mesmos combustíveis, e com um alargamento, tal como se referiu, a combustíveis semelhantes. Sugere-se ainda, que seja comparado, com os resultados obtidos em experiências de campo.

6. BIBLIOGRAFIA

Almeida M. A. (2005). “Caracterização da Combustibilidade de Leitões Florestais. Departamento de Ambiente e Ordenamento Aveiro, Universidade de Aveiro. Mestrado

Anderson, H. E. (1982)“Aids to Determining Fuel Models For Estimating Fire Behavior” United States Department of Agriculture Forest Service Intermountain Forest and Range Experiment Station Ogden, UT 84401 General Technical Report INT-122 April 1982

André, Jorge C. S., Viegas, Domingos X., (2001) “Modelos de Propagação de Fogos Florestais: Estado-da-Arte para Utilizadores: Parte I: Introdução e Modelos Locais”, *Silva Lusitana* 9(2): 237 - 265, 2001 © EFN, Lisboa. Portugal. pp. 237-265

Bennett ,Max; Fitzgerald ,Stephen, Parker, Bob; Main, Marty; Perleberg, Andy, Schnepf, Mahoney and Chris; Ron (2010) “Reducing Fire Risk on Your Forest Property”. A Pacific Northwest Extension Publication Oregon State University • University of Idaho • Washington State University PNW 618 • October 2010.

Butler, B.W., Anderson, W.R., and Catchpole, E.A. (2007), “Influence of Slope on Fire Spread Rate”, *USDA Forest Service Proceedings RMRS-P-46CD* pp. 75-82.

Catchpole, E. A., Catchpole, W. R. & Rothermel, R. C., (1993). *Fire Behaviour Experiments in Mixed Fuel Complexes. Int. J. Wildlandfire, Vol. 3, Tome 1, pp. 45-57.*

Countryman, Clive M., (1976) “Heat Conduction And Wildland Fire” in *Heat-Its Role In Wildland Fire-Part 3, Forest Service US Department of Agriculture, Berkeley, California.*

Dupuy, J.L. (1999).” An analysis of semi-empirical and physical models for fire spread in wildland fuels”. In *Wildfire Management, Proc. of the Advanced Study*

Course, Eftichidis, G., P. Balabanis, E. A. Ghazi (Eds.), Algosystems S.A., Athens. pp. 419-438.

Dupuy, J.-L. e Maréchal, J., (2011) “Slope effect on laboratory fire spread: contribution of radiation and convection to fuel bed preheating”, *International Journal of Wildland Fire* 20(2) 289-307.

FEN@ (2011). de <http://fire.forestencyclopedia.net/>. United States Department of Agriculture Forest Service Southern Research Station and Southern Regional Extension Forestry. Acedida em Julho 2012.

Fernandes, P., Botelho, H., Loureiro, C.,(2002) “Manual de formação para a técnica de fogo controlado”. Departamento Florestal Universidade de Trás os Montes e Alto Douro, Vila Real, Maio 2002.

Malangone, L., Russo, P., Vaccaro, S., (2011). “Effects Of Wind And Terrain Slope On Flames Propagation In A Vegetative Fuel Bed”, XXXIV Meeting of the Italian Section of the Combustion Institute

Pastor, E. Za´rate, L. Planas, E. Arnaldos, J. (2003) “Mathematical models and calculation systems for the study of wildland fire behavior”, *Progress in Energy and Combustion Science* 29 (2003) 139–153

Pyne, S. J.; “Introduction to Wildland Fire: Fire Management in the United States”, History Department, University of Iowa and Fire Management Specialist, Seasonal National Park Service; Wiley Interscience publication, USA, 1984 ISBN – 0-471-19658-X

Rothermel, R. (1991). Predicting behavior and size of crown fires in the northern Rocky Mountains. USDA Forest Service, Intermountain Research Station, Research Paper INT-438, 46 pp.”

Rothermel, R. C., (1972). “A Mathematical Model for Predicting Fire Spread in Wildland fuels”. USDA, Forest Service Research Paper

Schroeder, Mark J. and Buck, Charles C. (1970) "Fire Weather - A Guide For Application Of Meteorological Information To Forest Fire Control Operations". U.S. Department of Agriculture, Forest Service NFES 1174 PMS 425-I

Soares, J.M. (2011). "Combustibilidade de Leitos Heterogêneos – Estudo da Influência de Combustíveis Secos Numa Mistura de Dois Combustíveis. Universidade de Coimbra. Mestrado

Tanskanen, Heidi (2007), "Fuel conditions and fire behavior characteristics of managed *Picea abies* and *Pinus sylvestris* forests in Finland", Academic dissertation

Viegas D. X., (2004) On the existence of a steady state regime for slope and wind driven fires

Viegas, D. X. (coord), Rossa, C. e Ribeiro, L. M. (2011), "Incêndios Florestais", Verlag Dashofer.

Viegas, D. X., Afonso C. & Cruz, M. G., (2002), "Combustibility of heterogeneous fuels", Forest Fire Research & Wildland Fire Safety, Viegas (ed), 2002.

Viegas, D. X., Almeida, M. Miranda, A. I. and Ribeiro, L. M., (2010), "A Linear model for spread rate and mass loss rate for mixed-size fuel beds" *International Journal of Wildland fire* 2010, 19, 531-540.

Viegas, D. X., Ribeiro, P. R. & Cruz, M. G., (1998). "Characterisation of the Combustibility of Forest Fuels". III International Conference on Forest Fire Research, 16-20 November 1998, B.17. pp 467-482.

Viegas, D.X., Soares, J., Almeida, M., (submetido). "Combustibility of a Mixture of live and dead fuel componentes". *International Journal of Wildland Fire*.

Weise, D. R. and Biging, Gregory S. (1997) “A Qualitative Comparison of Fire Spread Models Incorporating Wind and Slope Effects”, *Forest Science*, Vol. 43, No. 2, May 1997. pp.170-180.

Williams, F. A., (1982), “Urban And Wildland Fire Phenomenology”, *Prog. Energy Combust. Sci.* 1982, Vol. 8, pp. 317-354.

ANEXO – A



Ensaio de 100% de palha



Ensaio de 80% de palha



Ensaio de 60% de palha



Balança Metler PM600



balança de humidades AND MX-50



Balança AND HW 100KGL