

# **Combustibilidade de Leitos Heterogéneos - Estudo da influência de Combustíveis secos numa Mistura de dois combustíveis.**

**Jorge Manuel Neves Soares**

Dissertação para a obtenção do Grau de Mestre em  
**Engenharia do Ambiente**

## **Júri**

Presidente: Professor Doutor António Rui de Almeida Figueiredo  
Orientadores: Professor Doutor Domingos Xavier Filomeno Carlos Viegas  
Engenheiro Miguel Abrantes de Figueiredo Bernardo de Almeida  
Vogal: Professor Doutor António Manuel Gameiro Lopes

**Setembro, 2011**

## AGRADECIMENTOS

De uma forma geral, gostaria de manifestar os meus agradecimentos a todas as pessoas que contribuíram de algum modo para a realização desta dissertação:

Em primeiro lugar, gostaria de expressar sinceros agradecimentos e uma enorme gratidão aos meus pais por terem sempre acreditado em mim, mesmo nos momentos mais difíceis da minha vida e pelo incentivo que sempre me inculcaram durante todo o meu percurso académico.

Ao meu irmão, por todo apoio prestado durante todo o meu percurso universitário e pela amizade e carinho sincero que existe entre nós.

Ao Professor Doutor Xavier Viegas pela orientação, acompanhamento e tempo disponibilizado para a realização desta dissertação.

Ao Miguel Almeida pela sua generosidade e prontidão em disponibilizar-me toda a informação necessária para efectuar este trabalho e pela ajuda que disponibilizou ao longo de todo o trabalho.

Ao Nuno Luís, Jorge Raposo e toda a equipa do CEIF/ADAI, pela amizade, disponibilidade e colaboração prestada durante a realização desta dissertação.

A todos os soldados da paz que pela sua dedicação, muitas vezes abdicando das suas vidas pessoais, arriscam a sua vida no combate a este flagelo que assola as nossas florestas.

A todos os meus amigos e colegas de curso que me incentivaram e contribuíram de alguma forma para a realização desta dissertação. A todos eles o meu obrigado!

***“Portugal sem fogos depende de todos”***

## RESUMO

Tanto a nível internacional como nacional tem havido um crescente interesse da comunidade científica pelo problema dos incêndios florestais. No entanto, a simulação do comportamento da propagação do fogo é ainda um desafio, devido à complexidade dos modelos físicos implicados.

A propagação de incêndios pode dividir-se em três tipos: fogo de solo, fogo de superfície e fogo de copa. O presente trabalho, dedica-se exclusivamente ao fogo de superfície, ou seja, aquele em que o combustível é a matéria viva ou morta que se encontra nas imediações do solo. Um desafio que se colocou à previsão do comportamento de leitos heterogéneos constituídos por combustíveis vivos e mortos tem sido o de compreender e quantificar o papel da componente morta nas características de propagação do fogo na mistura.

Nesta tese abordou-se o estudo da combustibilidade de leitos compostos por um combustível vivo e outro morto. Foram realizados mais de 100 ensaios em condições de ausência de vento e de declive com misturas de dois pares de combustíveis, um seco e um verde: (i) palha e folha verde de *Eucalyptus Globulus*; (ii) palha e caruma verde de *Pinus Pinaster*. Os ensaios foram realizados a uma carga constante de  $0,800 \text{ kg.m}^{-2}$  onde se variou a percentagem de cada combustível na mistura final.

Os objectivos fundamentais deste trabalho consistem no estabelecimento de uma relação entre a composição do leito e a velocidade de propagação e na análise da influência do teor de humidade da mistura no avanço da frente de chama. Foi desenvolvido um modelo empírico que se propõe para generalizar os resultados obtidos para outras misturas semelhantes. Considera-se que o presente modelo é de aplicação relativamente simples e constitui um avanço em relação ao estado dos conhecimentos nesta matéria.

## ABSTRACT

Both international and national level there has been a growing interest in the scientific community by the problem of forest fires. However, the fire spread simulation remains a challenge due to the complexity of the physical models involved.

The spread of fires can be divided into three types: ground fires, surface fires and crown fires. This work is dedicated exclusively to the fire surface, i.e., one in which the fuel is the alive or dead matter which is near the ground. One challenge that was arose to the prediction of the behavior of heterogeneous fuel beds consisting of live and dead fuels, has been to understand and quantify the role of dead component characteristics in the propagation of the mixture.

This thesis addressed the study of the combustibility of fuel beds composed of a living and a dead fuel. Were more than 100 tests in the absence of wind and slope with mixtures of two pairs of fuel, a dry and green: (i) straw and green leaf of *Eucalyptus Globulus* (ii) straw and green pine needles of *Pinus pinaster*. The tests were performed at a constant load of  $0.800 \text{ kg m}^{-2}$  and varied the percentage of each fuel in the final mix.

The fundamental objectives of this work are the establishment of a relationship between fuel bed composition and rate of spread and analysis of the influence of moisture content of the mixture in advance of the flame front. We developed an empirical model that aims to generalize the results obtained for other similar mixtures. It is considered that this model is relatively simple and the application is an improvement over the state of knowledge in this area.

---

## ÍNDICE

AGRADECIMENTOS .....	i
RESUMO .....	ii
ABSTRACT .....	iii
ÍNDICE.....	iv
ÍNDICE FÍGURAS .....	vi
ÍNDICE GRÁFICOS.....	vii
1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1. Objectivo do estudo .....	3
1.2. Estrutura da dissertação .....	4
2. COMPORTAMENTO DO FOGO .....	5
2.1. Combustão .....	5
2.2. Factores que afectam a propagação do fogo.....	8
2.2.1. Topografia.....	8
2.2.2. Tipo de combustível .....	9
2.2.3. Meteorologia.....	11
2.3. Modelo matemático de propagação do fogo.....	13
2.4. Modelo de Rothermel .....	14

---

2.5.	Modelo linear de Propagação de fogo em leitos de combustível heterogéneo .....	17
3.	METODOLOGIA EXPERIMENTAL .....	20
3.1.	Caracterização dos combustíveis .....	20
3.2.	Montagem Experimental.....	23
3.3.	Descrição do método de ensaio.....	25
3.4.	Descrição do programa de ensaios.....	27
4.	VALORES E RESULTADOS EXPERIMENTAIS .....	29
4.1.	Velocidade de Propagação em função da percentagem de combustível seco. ....	29
4.2.	Velocidade de propagação em função da composição do leito. ....	34
4.3.	Velocidade de propagação em função da humidade do combustível. ....	40
4.4.	Modelo polinomial de propagação de fogo. ....	45
5.	CONCLUSÕES .....	48
6.	BIBLIOGRAFIA .....	50
	ANEXOS .....	52

---

## ÍNDICE FÍGURAS

- Fig. 1 – Área ardida em Portugal continental no período de 1980-2006 (Ministério da Agricultura, 2011). 1
- Fig. 2 – Triângulo do fogo florestal (FEN@, 2011) 8
- Fig. 3 – Efeito do aumento do declive no ângulo da chama, (Alexander et al., 2009). 9
- Fig. 4 – Amostras dos três tipos de combustíveis: palha (a), pinheiro (b) e eucalipto (c) utilizados durante os ensaios. 21
- Fig. 5 – Fotografia da balança de humidades utilizada na realização dos ensaios, (a); Balança utilizada para a pesagem das amostras para o cálculo da humidade do combustível, (b). 22
- Fig. 6 - Estufas utilizadas durante os ensaios, (a). Balança utilizada para a pesagem dos combustíveis, HW-15K d=15kg x 0,02 Kg (b). 22
- Fig. 7 – Mesa de ensaio MC III 24
- Fig. 8 – Pormenor da montagem do leito onde se pode observar os fios de algodão utilizados para o cálculo da velocidade de propagação, num leito de 100% de pinheiro (a); Metodologia utilizada para medir as alturas do leito (b). 26

---

## ÍNDICE GRÁFICOS

- Gráfico 1 – Exemplo de regressão linear para o cálculo da velocidade de propagação  
(*PE85\_100/0\_S3\_R3*). 26
- Gráfico 2 – Gráfico da velocidade de propagação para o ensaio *PE75\_60/40\_S2\_R3* (*a*);  
Gráfico da velocidade de propagação para o mesmo ensaio (*PE75*) mas sem se  
forçar a ordenada na origem (*b*). 30
- Gráfico 3 - Gráfico da velocidade de propagação para o ensaio *PP94\_60/40\_S2\_R1* (*a*);  
Gráfico da velocidade de propagação para o mesmo ensaio (*PP94*), mas sem se  
forçar a ordenada na origem (*b*) 30
- Gráfico 4 – Gráficos da velocidade de propagação para misturas de palha-eucalipto por  
temperatura a que foi armazenado o combustível. Temperatura ambiente, série 1  
(*a*); 30°C, série 2 (*b*); 40°C, série 3 (*c*). 32
- Gráfico 5 - Gráficos da velocidade de propagação para misturas de palha-pinheiro por  
temperatura a que foi armazenado o combustível. Temperatura ambiente, série 1  
(*a*); 30°C, série 2 (*b*); 40°C, série 3 (*c*). 33
- Gráfico 6 – Gráfico da percentagem de palha em função da velocidade de propagação para a  
primeira repetição de ensaios de palha-eucalipto (*a*); segunda repetição (*b*);  
terceira repetição (*c*). 34
- Gráfico 7- Gráfico da percentagem de palha em função da velocidade de propagação para a  
primeira repetição dos ensaios de palha-pinheiro (*a*); segunda repetição (*b*). 35

- 
- Gráfico 8 – Media das velocidades de propagação dos ensaios de palha-eucalipto em função da percentagem de palha, onde foi ajustada um função linear 36
- Gráfico 9 - Media das velocidades de propagação dos ensaios de palha-eucalipto em função da percentagem de palha, onde foi ajustada um função polinomial de 2º grau. 36
- Gráfico 10 - Media das velocidades de propagação dos ensaios de palha-pinheiro em função da percentagem de palha, onde foi ajustada uma função linear. 37
- Gráfico 11 - Media das velocidades de propagação dos ensaios de palha-pinheiro em função da percentagem de palha, onde foi ajustada uma função polinomial de 2º grau. 38
- Gráfico 12 - Media das velocidades de propagação dos ensaios de palha-pinheiro em função da percentagem de palha, onde foi ajustada um função linear, sem o ponto  $T=30^{\circ}\text{C}$  e 40% palha 38
- Gráfico 13 - Media das velocidades de propagação dos ensaios de palha-pinheiro em função da percentagem de palha, onde foi ajustada um função polinomial de 2º grau, sem o ponto  $T=30^{\circ}\text{C}$  e 40% palha 39
- Gráfico 14 – Gráfico da velocidade de propagação em função da humidade média do combustível para todos os ensaios de realizados, para uma determinada temperatura de armazenamento do combustível. (a) palha-eucalipto; (b) palha-pinheiro. 40

---

Gráfico 15 - Gráfico da velocidade de propagação em função da humidade média do combustível para todos os ensaios de realizados: (a) palha-eucalipto; (b) palha-pinheiro.	41
Gráfico 16 – Velocidade de propagação em função da percentagem de combustível seco e media da humidade para as misturas de palha-eucalipto.	42
Gráfico 17 - Velocidade de propagação em função da percentagem de combustível seco e media da humidade para as misturas de palha-pinheiro.	43
Gráfico 18 - Percentagem de combustível seco a partir da qual houve ignição para ambas as misturas (a); Media da percentagem de palha para a qual houve ignição para as duas misturas (b).	44
Gráfico 19 – Gráfico do parâmetro adimensional de velocidade de propagação para as misturas de palha-eucalipto.	46
Gráfico 20 - Gráfico do parâmetro adimensional de velocidade de propagação para as misturas de palha-pinheiro.	47

## 1. INTRODUÇÃO

Os incêndios florestais são das catástrofes naturais mais graves em Portugal, não só pela elevada frequência com que ocorrem e na dimensão que alcançam, como pelos efeitos destruidores que causam. Para além dos prejuízos económicos e ambientais, os incêndios podem constituir uma fonte de perigo para populações. Diante de tais factos o interesse dos agentes políticos, e da comunidade científica, em torno desta matéria tem vindo a aumentar, não só apenas a nível nacional como também a nível internacional.

Os incêndios florestais em Portugal, contrariamente ao que acontece no sul da Europa (Silva, 2009), têm vindo tendencialmente a aumentar ao longo das últimas décadas. A nível nacional os anos de 2003 e 2005 foram os piores anos de sempre, com uma área ardida superior a 750,000ha, no conjunto dos dois anos (Fig. 1).

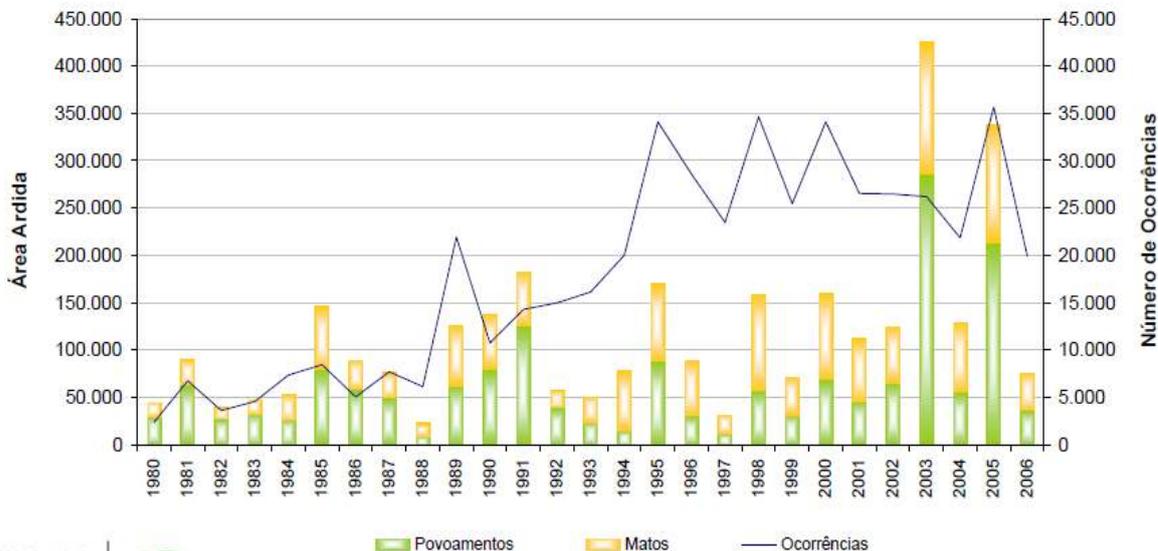


Fig. 1 – Área ardida em Portugal continental no período de 1980-2006 (Ministério da Agricultura, 2011).

Perante estes números, o estudo do comportamento do fogo tornou-se uma necessidade para a sociedade, tanto para os organismos de política, gestão, prevenção e combate aos incêndios, como para os sectores que aproveitam o fogo como factor essencial ao seu desenvolvimento.

Prever o comportamento e efeitos dos fogos florestais é uma tarefa essencial no estudo do fogo. Para tal, foram desenvolvidos modelos matemáticos de previsão do comportamento do fogo e sistemas de previsão dos seus efeitos em função das características do leito tais como carga, densidade, tamanho das partículas de combustível, poder calorífico e humidade do combustível.

De um ponto de vista pragmático, o desenvolvimento de ferramentas com os modelos de propagação justifica-se pelas múltiplas aplicações práticas que se podem dar a tais modelos, quer no âmbito da prevenção quer no do combate aos incêndios florestais. Assim, no âmbito das actividades de prevenção, empregando cenários de dados de entrada simulados ou mais ou menos realistas, com carácter histórico ou de prognóstico, estes modelos podem ser utilizados, por exemplo, dar formação a bombeiros; para regular a florestação e o ordenamento do território, de modo a reduzir o risco de ocorrência de fogos florestais; para planear as queimas controladas, para reduzir a quantidade de combustíveis finos na floresta, de forma económica e ecologicamente sustentável, (André e Viegas, 2001).

Os primeiros estudos sobre modelos de comportamento do fogo surgiram na década de 40 do século XX, por Fons (1946), tendo até ao presente sido apresentados vários outros modelos. Os primeiros modelos propostos foram desenvolvidos para leitos de combustível homogéneos. Mais recentemente foram conduzidos estudos para desenvolver modelos para misturas de combustíveis (Catchpole e Catchpole, 1991; Catchpole *et al.*, 1993; Viegas *et al.*, 2002; Viegas *et al.*, 2010), situação que mais se assemelha à realidade da propagação do fogo em meio natural.

O modelo mais amplamente usado na previsão do comportamento do fogo é o Modelo de Rothermel (1972), proposto pelo investigador Richard Rothermel dos Serviços Florestais Norte Americanos. Embora este modelo tenha sido desenvolvido para leitos homogéneos, mais recentemente foram conduzidos alguns estudos na perspectiva da sua aplicação a leitos heterogéneos. Relativamente ao tipo de leito supracitado poucos trabalhos são conhecidos, sendo que esta é a situação que mais se assemelha a propagação de fogo em meio florestal, é da mais elevada importância o estudo deste tipo de propagação.

Viegas *et al.* (2010), apresentaram um modelo linear de propagação do fogo para estimar as propriedades de leitos heterogéneos, em condições de ausência de vento e num plano horizontal, baseado na fracção mássica de cada componente na mistura de combustível. Neste estudo foram realizados vários ensaios em laboratório onde foram testadas misturas de dois, três e quatro tipos de combustíveis diferentes. Os resultados da perda de massa e da velocidade de propagação quando comparados com as previsões do modelo, apresentam um ajuste favorável.

Do ponto de vista desta temática, uma das propriedades físicas mais importantes dos combustíveis é o seu teor em água. O teor de humidade dos combustíveis florestais vivos e mortos, por si só, não pode ser usado para avaliar adequadamente o risco de incêndio ou o comportamento do fogo. No entanto, quando usado em conjunto com o conhecimento das suas tendências e a sua relação com outros aspectos do comportamento do fogo, a precisão, com que pode ser feita a determinação do risco de incêndio, comportamento do fogo, e os efeitos do fogo poderá ser aperfeiçoada, (Pollet, 2003). Perante este facto é da maior importância estudar a influência da humidade na velocidade de propagação de um incêndio florestal.

### **1.1. Objectivo do estudo**

O objectivo fundamental deste estudo é o de analisar e quantificar a combustibilidade de leitos florestais constituídos por um componente vivo - como por exemplo as folhas verdes de um arbusto ou de uma árvore - e outro morto - como por exemplo as partes mortas da mesma planta, folhada ou herbáceas secas. Sabendo que a componente viva isolada não suporta a combustão foi sendo acrescentada uma determinada quantidade de combustível seco até se obter uma propagação sustentada nas condições de ensaio; determinou-se em cada caso a velocidade de propagação do leito em função da fracção de combustível seco da mistura, tendo em vista a proposta de um modelo analítico simples para estimativa da velocidade de propagação de uma mistura semelhante, a partir de um número reduzido de parâmetros. Estudou-se ainda a variação da velocidade de propagação em função do teor de humidade da mistura, obtido por meio de uma média ponderada das humidades de cada um dos componentes.

## **1.2. Estrutura da dissertação**

A presente tese apresenta o trabalho desenvolvido, dividindo-o em cinco capítulos principais. O primeiro capítulo apresenta uma introdução sobre o conteúdo a ser estudado, desenvolvendo igualmente os objectivos fundamentais do trabalho do trabalho, assim como a sua estrutura.

No segundo capítulo, é efectuada uma revisão bibliográfica sobre a dinâmica e os factores que afectam a propagação dos fogos florestais e os modelos de propagação do fogo para leitos heterogéneos na ausência de vento e declive.

Os diversos ensaios laboratoriais realizados são desenvolvidos, no terceiro capítulo. No mesmo item apresenta-se a metodologia utilizada durante a sua execução e é feita uma breve apresentação à montagem experimental, caracterizando-se os combustíveis analisados.

No capítulo quatro apresentam-se os resultados obtidos para a velocidade de propagação do fogo e a influência do teor de humidade no desenvolvimento da frente de chama.

As principais conclusões resultantes deste estudo são desenvolvidas no quinto capítulo.

## 2. COMPORTAMENTO DO FOGO

O comportamento do fogo é o termo usado para descrever a magnitude, direcção e intensidade de propagação do fogo, (Morais, 2001).

Os fogos florestais propagam-se nos vários estratos da vegetação como fogo de solo, fogo de superfície e fogo de copa. Sendo de longe o mais estudado, o fogo de superfície é aquele que consome combustível vivo e morto que se encontra localizado no terreno ou nas suas imediações. Uma completa descrição e caracterização da vegetação como um combustível sólido poroso, é um enorme desafio para quem trabalha na modelação de fogo, devido ao facto de um largo número de parâmetros ser requerido para a sua caracterização bem como a variação destes no tempo e no espaço, (Viegas *et al.*, 2010)

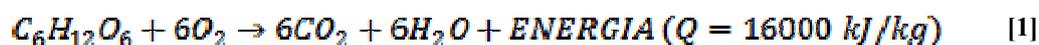
Um modelo de comportamento do fogo é sempre uma série idealizada de condições para o fogo e/ou para o ambiente onde este se propaga. O propósito é simplificar ou tornar mais flexível a medição e inclusão dos efeitos de todos os factores que afectam o comportamento do fogo. É uma ferramenta essencial na compreensão do fogo devido o grande número de variáveis que surgem nas situações reais.

De seguida, apresentam-se os conceitos físico-químicos que estão na base da propagação do fogo, os factores que afectam o fogo e a evolução dos modelos de propagação até aos dias de hoje.

### 2.1. Combustão

A Combustão é definida como sendo uma reacção química exotérmica em cadeia, resultante da inflamação entre uma substância (combustível) e o oxigénio (comburente), com libertação de calor, dióxido de carbono, água, entre outros compostos químicos. Nos fogos florestais a combustão tem como comburente o oxigénio e como combustível a vegetação natural.

Considerando-se, a título de exemplo, a reacção [1] de oxigénio com a celulose que é o principal constituinte da madeira, em que se liberta cerca de  $16000 \text{ kJ}$  de energia por cada quilo de celulose consumida, (Gaspar, 2009).



Para tal é necessário que uma fonte de calor eleve a temperatura do combustível ao ponto de este se inflamar. Pode então concluir-se que para que haja combustão é necessária a combinação, nas proporções correctas, de três factores: ignição, oxigénio e combustível

Para um fogo se propagar, é necessário que o calor seja transferido para o combustível que se encontra nas imediações da frente de chama. O calor produzido durante a combustão é transferido para outras partículas de combustíveis, para o solo e para a atmosfera por: convecção, radiação e/ou condução. Tendo em conta a forma como os fogos florestais se propagam, os principais métodos de transferência de calor de um combustível para outro são a radiação e convecção, enquanto as transferências por condução de calor geralmente ocorrem no seio grandes partículas de combustível, (Morvan, 2010).

Quando uma reacção em cadeia ocorre, a energia libertada por uma reacção serve de energia de activação para a reacção seguinte, pelo que apenas numa fase inicial será necessário fornecer uma fonte de calor independente do sistema de combustão. A transferência de calor, da frente da chama para as partículas vizinhas, apresenta uma grande variabilidade, sendo fortemente condicionada pelo vento, a porosidade do leito ou a heterogeneidade do combustível, de onde resulta uma inconstância da chama, (Morvan et al., 1998).

Segundo Pyne (1984), uma reacção de combustão pode ser dividida em duas fases a pré-ignição e a combustão. A pré-ignição é a fase de um processo de combustão (fase endotérmica) onde existe a absorção de calor por parte do combustível, resultando na vaporização da água e outras substâncias. A quantidade de calor necessária para que haja libertação da água do combustível varia consoante o teor de humidade do combustível. Durante a pré-ignição, a temperatura do combustível aumenta para pelo menos  $100^\circ\text{C}$  pelos mecanismos já referidos. “Calor de pré-ignição” define-se como sendo a quantidade de calor necessária para elevar à temperatura de ignição o combustível. Durante esta fase, são

---

produzidos gases voláteis, como lípidos e outros hidrocarbonetos altamente combustíveis. Este processo é conhecido por pirólise. A pirólise é a degradação térmica de um produto químico, onde as ligações que mantêm unidas as moléculas fragmentam em conjunto, reduzindo o tamanho da molécula, libertando moléculas menores a partir do material, tais como, gases, (Pyne *et al.*, 1996).

A transição da pré-ignição para a combustão é a transição da reacção da fase de absorção de calor (endotérmica) para uma de libertação do calor (exotérmica). A combustão é iniciada pela ignição dos gases voláteis produzidos durante a fase de pré-ignição e localizados acima do combustível aquecido. Quando estes gases libertados atingem uma concentração mínima para haver uma reacção de oxidação-redução, bastará uma energia mínima para iniciar a combustão, sendo denominada de “energia de activação”. Esta energia pode ser muito reduzida quando comparada com a energia libertada durante a combustão, bastando uma pequena faísca ou simplesmente o contacto com um corpo quente, o bastante para que haja ignição. Se a temperatura for bastante elevada e a libertação de gases ocorrer nestas condições, verifica-se a reacção destes gases voláteis como o ar envolvente, (Gaspar, 2009).

Numa reacção de combustão nem sempre se verifica a existência de chama. Em determinadas condições, como por exemplo com uma baixa concentração de oxigénio ou a temperaturas baixas, a pirólise não leva à formação de gases inflamáveis pelo que ocorre combustão sem chama. Estas reacções são por norma bastante lentas, quando comparadas com as combustões com formação de chama, em que há uma rápida degradação química de origem térmica com uma elevada formação de gases inflamáveis, (Almeida, 2005).

Na fase de combustão, a degradação térmica das moléculas, ocorre de uma forma mais rápida e completa que na pré-ignição, com uma grande libertação de energia térmica. Este calor provoca uma maior volatilização de compostos orgânicos no combustível sólido, que sustentam a chama. A ignição tende a ocorrer como uma reacção em cadeia, com a ignição dos combustíveis num determinado local a iniciar a ignição dos combustíveis adjacentes. A linha de fogo pode ser considerada uma cadeia de eventos de ignição, (FEN@, 2011).

## 2.2. Factores que afectam a propagação do fogo

A propagação do fogo é fenómeno físico complexo. A recolha de dados precisos, que descrevam as diversas variáveis envolvidas, são requisitos fundamentais para fazer uma correcta previsão do comportamento do fogo. Posto isto, torna-se clara, a necessidade de conhecer os factores que afectam a propagação do fogo. Os factores físicos que apresentam uma influência significativa na propagação podem agrupar-se, fundamentalmente, em três categorias (Fig. 2): Topografia; Tipo de combustível e Meteorologia



Fig. 2 – Triângulo do fogo florestal (FEN@, 2011)

### 2.2.1. Topografia

Relativamente à topografia, a configuração do plano onde o fogo se desenvolve, designadamente: o declive do leito, a exposição solar e a altitude representam, na generalidade, os principais factores que afectam o fogo para esta categoria.

Dos anteriores, destaque-se o declive do leito, que, segundo Rothermel (1986), afecta o comportamento do fogo de forma idêntica ao factor vento, alterando o ângulo da chama (Fig. 3). Com o aumento do declive ou o aumento da velocidade do vento, as chamas aproximam-se do combustível que se encontra a montante da frente de chama. Esta aproximação leva ao pré-aquecimento do combustível, evaporando o seu teor em água aumentando a facilidade de combustão.

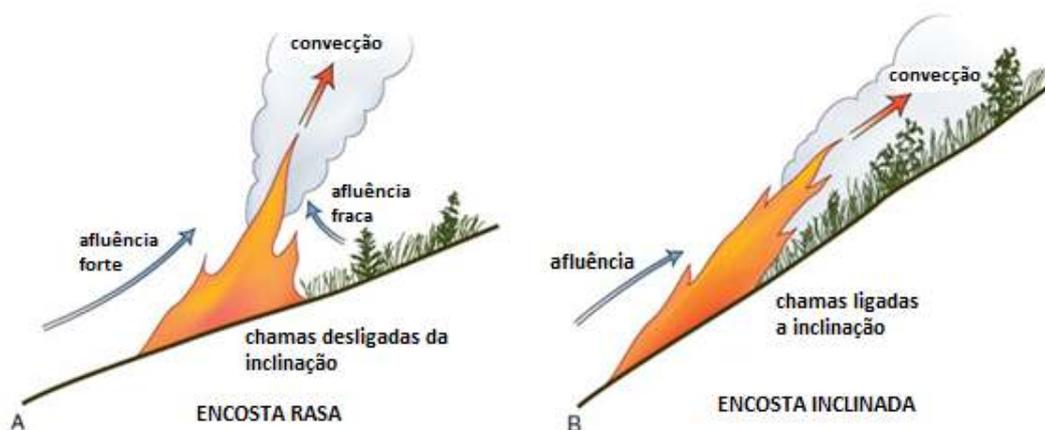


Fig. 3 – Efeito do aumento do declive no ângulo da chama, (Alexander et al., 2009).

### 2.2.2. Tipo de combustível

Os fogos florestais desenvolvem-se na vegetação natural que é composta por partículas de diferentes tamanhos e diferentes propriedades físicas e químicas. O tamanho e forma de vegetação, o seu teor em humidade, o poder calorífico, o arranjo espacial das partículas de combustível, e a porosidade são os principais factores, que no que diz respeito ao tipo de combustível, afectam a propagação de um fogo, (Viegas, 1998).

O teor de humidade do combustível é uma das características mais importante dos combustíveis florestais, que afecta o comportamento do fogo, (Pyne *et al.*, 1996). A capacidade de calcular ou estimar, com precisão, o teor de humidade dos combustíveis florestais reveste-se da maior importância na previsão da velocidade de propagação de um incêndio. Esta determina a disponibilidade do combustível para a combustão, e em última análise a quantidade que é consumida, (Miller, 2001). Elevando a capacidade calorífica de um combustível, a humidade do combustível influencia a ignição. Quanto maior for o teor de humidade, maior será a quantidade de calor absorvida para retirar a água dos combustíveis, o que reduz a sua taxa de combustão. Como vapor, a humidade induz a inibição da pirólise influenciando assim a ignição e propagação (Lopes, 2005). Para teores de humidade elevados, o calor necessário para evaporar a humidade dos combustíveis é maior que a quantidade de calor disponível, levando a inviabilização da combustão. Para um dado leito de propagação a

---

velocidade de propagação ( $R_0$ ), de uma frente de chama propagando-se num plano horizontal e na ausência de vento, diminui com o aumento da humidade do combustível e acima de um certo limiar – humidade de extinção – a ignição e propagação do fogo tornam-se virtualmente impossíveis. A humidade de extinção é função do tipo de combustível, (Viegas, 1998).

Para ambos os tipos de combustíveis, vivos e mortos, o seu teor em humidade pode retardar, extinguir, ou contribuir para a propagação do fogo. Os factores que regulam a humidade do combustível diferem entre combustíveis vivos e mortos. A humidade em combustíveis mortos varia com base no tamanho das partículas, mudanças climáticas a curto e a longo prazo, topografia, classe e composição do combustível. Os factores fundamentais que afectam a humidade de um combustível vivo são: factores internos que regulam as mudanças diurnas e sazonais, clima, factores relacionados com o meio ambiente onde se encontra o combustível, diferenças filogenéticas entre grupos de espécies (folha caduca *vs* perene), e as diferenças entre os tecidos da planta (folhas *vs* pedúnculos), (FEN@, 2011).

A humidade dos combustíveis depende das condições meteorológicas a longo e a curto prazo. As partículas mais finas de combustível morto podem variar significativamente o seu teor em humidade no espaço de horas enquanto partículas maiores ou combustíveis vivos requerem maiores intervalos de tempo, (Viegas, 1998).

O teor de humidade do combustível é uma das variáveis fundamentais em todos os modelos de previsão do comportamento do fogo, afectando a combustão, a ignição, a quantidade de combustível disponível, a intensidade do incêndio, e a geração de fumo. Estimar a humidade do combustível é, portanto, um passo importante no planeamento do combate ao fogo ou na avaliação do risco de perigo de incêndio. Existem várias maneiras de medir a humidade do combustível, incluindo a análise volumétrica, gravimétrica, indicadores de humidade, fórmulas e gráficos, (FEN@, 2011).

A dimensão das partículas de combustível representa outro factor com uma importância significativa na propagação do fogo. Devido à influência que a relação superfície-volume dos combustíveis exerce em todo o processo da combustão, ou seja valores altos deste parâmetro favorecem a ignição e combustão. É fundamental proceder à separação dos combustíveis por classes de dimensão ou diâmetro, (Fernandes e Pereira, 1993). Partículas de grandes

dimensões têm capacidades caloríficas elevadas, exigindo uma maior quantidade de calor para a ignição e combustão da partícula. Partículas menores têm capacidades caloríficas menores, por isso exigem menor quantidade de energia térmica para a ignição e combustão. Para os combustíveis mortos, o tamanho das partículas de combustível também está relacionado com a velocidade com que o seu teor de humidade se altera.

Os combustíveis finos apresentam um diâmetro inferior a *0,6cm* e possuem uma elevada relação superfície volume; como o seu pré-aquecimento e conseqüente ignição ocorre mais rapidamente que nas outras classes, estes determinam normalmente a velocidade de propagação da frente de chamas. Os combustíveis que apresentam um diâmetro compreendido entre *0,6 e 2,5cm*, são denominados de combustíveis médios. Aqueles que apresentam diâmetros na entre *2,5 e 7,0cm* denominam-se medianamente grossos e por fim aqueles cujo diâmetro é superior a *7cm* consideram-se combustíveis grossos e representam a classe com a mais baixa relação superfície volume, (Gaspar, 2009).

As propriedades químicas dos combustíveis afectam o seu poder calorífico e os tipos de emissões libertadas durante a combustão. O poder calorífico de um combustível é a energia térmica potencial de uma partícula de combustível ou o calor de reacção resultante de uma combustão completa. Um combustível com um maior poder calorífico vai queimar a uma temperatura superior e mais rapidamente do que um combustível com baixo poder calorífico, (Miller, 2001)

### **2.2.3. Meteorologia**

As condições meteorológicas são o factor mais variável no processo de propagação do fogo considerando-se normalmente como mais importantes, os parâmetros: temperatura do ar, humidade do ar, precipitação, radiação solar e o perfil vertical da velocidade e direcção do vento, (Viegas, 1998).

A temperatura é um elemento básico que influencia o clima e todos os outros elementos do tempo. A temperatura varia consideravelmente no tempo e no espaço, por variadas razões, a maioria dos quais relacionadas com o aquecimento ou arrefecimento da superfície da Terra.

---

Diferenças de temperatura criam diferenças na densidade do ar e na pressão atmosférica criando movimentos verticais e horizontais de ar. Através do movimento do ar, as diferenças de temperatura influenciam o transporte de calor, humidade e poluentes atmosféricos, como fumo. A influência da temperatura sobre a humidade atmosférica é fundamental, não só no transporte de humidade, mas também nas mudanças de estado, particularmente na evaporação e condensação, (FEN@, 2011).

A precipitação é outro factor climático que influencia o fogo, alterando o seu teor em humidade e diminuindo a temperatura dos combustíveis. Com chuva intensa não existe propagação.

A humidade absoluta representa a humidade real presente no ar, enquanto a humidade relativa indica o grau de saturação a uma dada temperatura. A humidade absoluta varia no espaço e no tempo devido a diferentes motivos, no entanto, a humidade relativa do ar não se altera necessariamente da mesma maneira, porque a humidade relativa é dependente da temperatura do ar. O efeito da temperatura frequentemente substitui o efeito de humidade absoluta e, portanto, humidade relativa do ar geralmente varia inversamente com a temperatura. A humidade atmosférica é um elemento importante no comportamento do fogo. Tem efeitos directos sobre a inflamabilidade dos combustíveis, intervindo na evolução do teor de humidade nos combustíveis mortos, (FEN@, 2011).

Relativamente ao vento e conforme já foi referido, este tem um efeito similar ao do declive na propagação do fogo, a diferença é que pode fazer sentir-se com maior intensidade. O vento aumenta o transporte de calor para os combustíveis situados à frente da linha de fogo, dobrando a chama e diminuindo o ângulo entre a frente e o solo, aumentando a intensidade e velocidade de propagação, (Alexander *et al.*, 2009).

O vento afecta o fogo de diversas formas. Ao arrastar ar carregado de humidade altera o teor da mesma nos combustíveis florestais. Ventos fracos podem, de certa forma, ajudar a ignição de um fogo. Uma vez um incêndio iniciado, o vento auxilia a combustão, aumentando o fornecimento de oxigénio à combustão. A direcção de propagação do fogo é determinada principalmente pela direcção do vento, (FEN@, 2011).

Dada a variação espacial e temporal do vento, na prática é impossível observar a propagação de fogo em condições estáveis e uniformes de vento durante um qualquer intervalo de tempo. A capacidade de estimar a distribuição do vento em torno da superfície da vegetação e a sua evolução temporal é da máxima importância para lidar com o problema da propagação do fogo, (Viegas, 1998).

Importa referir que no âmbito deste estudo não foi tido em conta nem efeito do vento nem do declive. Justifica-se, assim o pequeno desenvolvimento que se dá ao papel destes dois factores na propagação do fogo.

### **2.3. Modelo matemático de propagação do fogo**

Hoje em dia existe uma vasta gama de modelos de propagação de fogo. Desde aqueles puramente empíricos, ou sejam que provêm de abordagem experimental, até aqueles puramente físicos onde a propagação é descrita por leis da física com carácter fundamental, onde se garante a condição de conservação de energia para a reacção de combustão, (André e Viegas, 2001).

Um dos primeiros documentos que descreve, com bases físicas, os mecanismos que contribuem para a propagação do fogo foi proposto por Fons (1946). Mais tarde, os trabalhos desenvolvidos por Frandsen (1971) e Rothermel (1972) contribuíram para o desenvolvimento de um dos modelos de propagação de fogo mais bem aceites. Este modelo foi baseado num simples balanço energético entre a energia recebida por combustível não queimado, localizado à frente da frente de fogo e da energia necessária para sustentar a propagação do fogo, (Rothermel, 1972).

O modelo de Fransen (1971) para a determinação da velocidade de propagação do fogo está representado na equação [2]. Este modelo foi criado para uma gama de aplicação tão vasta quanto possível, num leito de combustível homogéneo com profundidade constante, com um movimento horizontal de  $x=-\infty$  a  $x=0$ , com  $x$  a representar a coordenada horizontal, para fogos de superfície, onde a velocidade de propagação do fogo ( $m.s^{-1}$ ) corresponde ao

quociente entre o fluxo de entalpia recebida da fonte ( $J.m^{-2}.s^{-1}$ ) e a entalpia de pré-ignição do volume de combustível ( $J.m^{-3}$ ) (Almeida, 2005).

$$R = \frac{I_{xig} + \int_{-\infty}^0 \left( \frac{\partial I_z}{\partial z} \right)_{z_c} dx}{\rho_{be} Q_{ig}} \quad [2]$$

em que:

$R$  – Velocidade de propagação em estado quasi-estacionário ( $m.s^{-1}$ )

$I_{xig}$  – Fluxo horizontal de calor absorvido por uma unidade de volume de combustível durante o tempo de ignição ( $J.m^{-2}.s^{-1}$ )

$\left( \frac{\partial I_z}{\partial z} \right)_{z_c}$  - Gradiente da intensidade vertical do fluxo de calor absorvido a uma profundidade constante de leito do combustível “ $z_c$ ” ( $J.m^{-3}.s^{-1}$ )

$\rho_{be}$  – Massa volúmica do combustível efectivo ( $kg.m^{-3}$ )

$Q_{ig}$  – Entalpia de pre-ignição ( $J.kg^{-1}$ )

$x$  e  $z$  – Coordenadas horizontal e vertical ( $m$ )

## 2.4. Modelo de Rothermel

O modelo de Rothermel (1972) é um modelo semi-empírico desenvolvido por Richard C. Rothermel. É usado em todo o mundo, sobretudo, pelo facto de os dados de entrada no modelo, serem facilmente observáveis e possíveis de determinar. A sua génese provém de experiencias conduzidas em laboratório com condições controladas. Tendo como ponto de partida o modelo de Frandsen, Rothermel propôs o modelo seguinte [3] para condições de leito horizontal e na ausência de vento.

$$R_0 = \frac{I_R \xi}{\rho_b \varepsilon Q_{ig}} \quad [3]$$

em que:

$R_0$  - Velocidade de propagação numa situação de ausência de declive e de vento, em estado quasi-estacionário ( $m.s^{-1}$ )

$I_r$  - Intensidade de reacção ( $J.m^{-2}.s^{-1}$ )

$\xi$  - Coeficiente de fluxo de propagação (adimensional)

$\rho_b$  - Massa volúmica do leito de combustível ( $kg.m^{-3}$ )

$\varepsilon$  - Número de aquecimento efectivo (adimensional)

$Q_{ig}$  - Entalpia de ignição ( $J.kg^{-1}$ )

O numerador do modelo de Rothermel refere-se ao fluxo de propagação, que representa o numerador do modelo de Frandsen simplificado à componente de fluxo de calor horizontal absorvido, uma vez que na ausência de vento e declive, Rothermel considerou que o fluxo vertical era muito reduzido. Os termos em denominador são semelhantes para os dois modelos, (Almeida, 2005).

No seguimento apresentam-se e definem-se os parâmetros de entrada no modelo de Rothermel:

$R_0$  - Velocidade de propagação ( $m.s^{-1}$ )

Representa a distância ( $m$ ) percorrida por uma frente de chama por unidade de tempo ( $s$ ). O valor que esta variável assume representa o resultado do modelo o seu conhecimento é de uma importância fundamental pois permite prever a velocidade a que o fogo avança e assim adequar os meios para o seu combate.

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

Representa o fluxo de calor libertado por unidade de área [4]. O calor é proveniente da queima dos gases libertados pela matéria orgânica presente no combustível. A taxa a que esta libertação ocorre corresponde a uma boa aproximação à intensidade de reacção do fogo. Assim, poderá estabelecer-se uma correspondência directamente proporcional entre o calor libertado ( $I_R$ ), o poder calorífico do combustível ( $h$ ) e a perda de massa do combustível ( $\partial w$ ) que se verifica ao longo da combustão

$$I_R = \frac{\partial w}{\partial t} h \quad [4]$$

A intensidade de reacção é influenciada por vários parâmetros, tais como, grau de humidade do combustível, relação superfície – volume das partículas, compactação do leito e composição química.

ξ- Coeficiente de fluxo de propagação (adimensional)

Esta variável representa o quociente entre o fluxo de propagação  $(I_p)_0$  e a intensidade de reacção  $I_R$ .

$$\xi = \frac{(I_p)_0}{I_R} \quad [5]$$

Relativamente ao denominador a forma de cálculo da intensidade de reacção já foi descrita anteriormente. No numerador o fluxo de propagação pode ser obtido pela seguinte fórmula

$$(I_p)_0 = R_D \cdot \rho_b \varepsilon Q_{ig} \quad [6]$$

Na equação [6],  $\rho_b$  ( $kg \cdot m^{-3}$ ), massa volúmica aparente do leito, é a massa seca total de partículas por unidade de volume do leito, relacionando-se com o coeficiente de compactação ( $\beta$ ) do leito e com a massa volúmica das partículas secas ( $\rho_s$ ), através de:

$$\rho_b = \beta \rho_s \quad [7]$$

$\varepsilon$  - Número de aquecimento efectivo.

É um número adimensional característico das partículas e da sua história real de aquecimento (à medida que a frente se vai aproximando), que tem, justamente, em conta o efeito da não-uniformidade do seu aquecimento. Concretamente,  $0 < \varepsilon \leq 1$ , sendo  $\varepsilon \approx 0$  quando as partículas entram em ignição apenas à superfície, estando todo o seu interior ainda frio, e  $\varepsilon = 1$  quando a ignição se dá simultaneamente em todo o volume da partícula por todo ele se encontrar à temperatura de ignição, (André e Viegas, 2001).

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

Conforme foi referido anteriormente para que o combustível entre em combustão é necessário que se atinja uma temperatura de ignição ( $T_{ig}$ ), para que ocorra a pirólise.

Posto isto, facilmente se percebe que o calor necessário para a ignição ( $Q_{ig}$ ) [8] é função da temperatura de ignição ( $T_{ig}$ ), da humidade do combustível ( $M_f$ ) e da carga de combustível.

$$Q_{ig} = f(M_f, T_{ig}) \quad [8]$$

Esta formulação foi desenvolvida para combustíveis homogéneos, e matematicamente extrapolada para misturas de combustíveis. Para modelar o fogo em combustíveis constituídos por partículas de diferentes tamanhos e diferentes estados vegetativos o modelo de Rothermel avalia as características médias dos diferentes componentes do combustível e estima as propriedades de combustibilidade de um combustível homogéneo equivalente. Apesar da sua vasta aplicação, os resultados produzidos pelo referido modelo para misturas de dois ou mais combustíveis, não foram verificados em laboratório, (Catchpole *et al.*, 1993).

A partir do modelo apresentado foi criado um programa de computador, sistema *BEHAVE* (Burgan e Rothermel, 1984) que permite a construção de um modelo de propagação de fogo em função das características específicas do leito de propagação e do combustível.

Conforme referem André e Viegas (2001) relativamente as propostas de extensão do modelo, que aliás se encontram incorporadas no programa *BEHAVE*, podem subdividir-se em três grupos: as que visam tornar o modelo aplicável às condições naturais mais comuns; as que se destinam a tornar mais fácil ao utilizador, a determinação dos parâmetros de entrada do modelo para leitos e ambientes naturais; e as que procuram estender o grupo de parâmetros de saída do modelo. Nas propostas do primeiro grupo incluem-se o tratamento de leitos heterogéneos (Rothermel, 1972), (Burgan e Rothermel, 1984), (Catchpole e Catchpole, 1991), (Catchpole *et al.*, 1993).

### **2.5. Modelo linear de Propagação de fogo em leitos de combustível heterogéneo**

Vários autores referem que o tratamento de leitos heterogéneos é um assunto da maior importância, embora no âmbito desta matéria poucos estudos tenham sido feitos até à data.

Recentemente Viegas *et al* (2010), propuseram um modelo linear para o cálculo da velocidade propagação de fogo em leitos heterogéneos. Este modelo baseia-se na fracção mássica de cada componente no combustível e permite estimar a velocidade de propagação.

Os autores definiram leito de combustível heterogéneo como sendo composto por dois ou mais tipos de combustíveis com propriedades diferentes, nomeadamente a combustibilidade. Considera-se que cada componente do combustível  $F_i$  é composto por um conjunto de partículas que em média apresentam as mesmas propriedades e que estas se mantêm inalteradas quando misturadas entre si. Estas propriedades podem ser caracterizadas pelos seguintes parâmetros:

$M_i$  – Carga do componente no combustível (base seca) ( $Kg.m^{-2}$ )

$m_i$  - Humidade do combustível (%)

$\sigma_i$  - Razão superfície/volume das partículas de combustível ( $m^{-1}$ )

$\beta_i$  – Coeficiente de compactação do leito (adimensional)

$x_i$  – Fracção mássica do componente  $F_i$ .

A fracção mássica de cada componente na mistura é dado por:

$$x_i = \frac{M_i}{\sum_{j=1}^n M_j} \quad [9]$$

A massa total (em base seca) do leito é dada por:

$$M_0 = \sum_{i=1}^n M_i \quad [10]$$

E conseqüentemente:

$$\sum_{i=1}^n x_i = 1 \quad [11]$$

A combustibilidade de um leito pode ser caracterizada por diferentes parâmetros associados com a propagação de uma frente de chama linear de comprimento “infinito” num plano

horizontal e na ausência de vento. Consideram-se as seguintes propriedades que podem ser determinadas quer para misturas de combustíveis quer para combustíveis puros:

$R_i$  – Velocidade de propagação de uma frente de fogo no plano horizontal e na ausência de vento ( $m.s^{-1}$ )

$L_i$  – Comprimento da chama ( $m$ )

$m'_i$  - Taxa de perda de massa por unidade de comprimento da frente de fogo e por unidade de tempo.

O modelo proposto [12] considera que uma propriedade geral de combustibilidade da mistura de combustíveis é uma combinação linear das propriedades individuais de cada combustível da mistura, de acordo com:

$$P = \sum_{i=1}^n x_i P_i \quad [12]$$

em que :

$P_i$  - Valor da propriedade  $P$  para o componente do combustível  $F_i$

$x_i$  - Fracção mássica na mistura de combustíveis.

Para uma mistura de dois combustíveis a equação anterior toma a seguinte forma:

$$P = x_1 P_1 + x_2 P_2 = x_1 P_1 + (1 - x_1) P_2 \quad [13]$$

Para validar este modelo os autores realizaram mais de 100 testes laboratoriais, tendo obtido resultados bastante satisfatórios na maioria dos ensaios.

O referido modelo foi também usado para o cálculo de velocidades de propagação de misturas de combustíveis com três ou mais componentes, apresentando, também, resultados bastante satisfatórios.

### 3. METODOLOGIA EXPERIMENTAL

Os ensaios de combustibilidade visaram simular a propagação do fogo para condições de ausência de vento e declive. O objectivo foi analisar o comportamento do fogo num leito heterogéneo de dois combustíveis, para diversas situações em que se variou a percentagem mássica de cada combustível e o seu teor em humidade. No âmbito desta dissertação foram realizados cerca de 120 ensaios. Assume-se que os leitos de combustíveis se encontram bem misturados, ou seja, qualquer propriedade macroscópica mantêm-se constante em todo o leito mesmo que seja possível distinguir as diferentes partículas a olho nu.

Considerou-se como parâmetros de controlo para a caracterização do comportamento a perda de massa, a evolução da temperatura e a velocidade de propagação da chama, o teor de humidade no combustível e a altura do leito para o cálculo da porosidade do leito. Como tal, a medição das variáveis experimentais foi realizada tendo em vista a obtenção destes parâmetros. Os valores obtidos foram registados e posteriormente procedeu-se ao cálculo da velocidade de propagação para as várias condições de humidade no combustível e percentagem mássica de cada combustível na mistura. No presente estudo não foram considerados os dados referentes a perda de massa de leito durante a combustão

#### 3.1. Caracterização dos combustíveis

As principais espécies presentes na floresta portuguesa em especial no centro de Portugal são: *Pinus pinaster* e *Eucalyptus globulus*, (Silva, 2009). Uma vez que o intuito dos ensaios é representar com a maior aproximação possível a situação que ocorre no ambiente florestal os combustíveis usados nos ensaios foram: palha, caruma de pinheiro (*Pinus pinaster*) e folha de eucalipto (*Eucalyptus globulus*) (Fig. 4). De forma a simplificar a compreensão dos métodos decidiu-se atribuir a seguinte nomenclatura aos combustíveis: Palha, Pinheiro e Eucalipto.

Os combustíveis foram recolhidos à mão dois dias antes dos ensaios, preferencialmente de árvores adultas. Foram escolhidos dias sem precipitação para se efectuar a recolha e

seleccionadas apenas as folhas que se apresentassem em melhores condições. O local de recolha foi uma mata de pinheiro e eucalipto a sul do concelho de Coimbra

Após a recolha os combustíveis foram mantidos em ambiente controlado, dentro de uma estufa, pelos menos durante 24 horas (Fig. 6 (a)). A estufa foi colocada a diferentes temperaturas, conforme descrito mais à frente no plano de ensaios, para que fosse possível atingir diferentes gamas nos valores de humidade do combustível. Relativamente à palha, foi obtida num fornecedor local.



**Fig. 4 – Amostras dos três tipos de combustíveis: palha (a), pinheiro (b) e eucalipto (c) utilizados durante os ensaios.**

O teor de humidade, em base seca foi calculado através de uma balança de humidades (*AND MX-50 resolução 0.01% Max = 51 g*; Fig. 5 (a)), que fornecia o valor aproximado da humidade do combustível mediante uma secagem relativamente rápida - durante dez a quinze minutos - de uma amostra de combustível. Este resultado foi confirmado pelo método gravimétrico, ou seja, uma amostra de combustível com cerca de *0,005 kg* era recolhida e pesada (*AND FX – 3000i, d = 3200 g x 0.01g*; Fig. 5 (b)) quando da preparação do leito e colocada numa estufa a *100-105°C*, durante 24 horas ao fim das quais a amostra voltava a ser pesada. Com os valores das massas obtidas calculou-se o teor de humidade do combustível considerado. Uma vez que a carga que aqui se refere é em base seca a humidade foi calculada pela seguinte fórmula:

$$H_s = \frac{m_i - m_f}{m_f} \times 100 \quad [14]$$

em que,

$m_i$  - Massa inicial

$m_f$  - Massa final, após 24h em estufa a 100-105°C



(a)

(b)

**Fig. 5 – Fotografia da balança de humidades utilizada na realização dos ensaios, (a); Balança utilizada para a pesagem das amostras para o cálculo da humidade do combustível, (b).**



(a)

(b)

**Fig. 6 - Estufas utilizadas durante os ensaios, (a). Balança utilizada para a pesagem dos combustíveis, HW-15K d=15kg x 0,02 Kg (b).**

Embora as cargas calculadas, para a realização dos ensaios, não fossem determinadas usando o valor da humidade efectiva (calculada pelo método gravimétrico), despreza-se o erro que isso possa introduzir nos resultados da velocidade de propagação. Importa referir que o valor da humidade obtido pela balança de humidades apenas é utilizado para o cálculo das cargas para a preparação do ensaio. Os valores de humidade apresentados nos resultados foram obtidos pelo método gravimétrico.

A massa de combustível necessária para cada ensaio depende obviamente da carga de combustível pretendida, em base seca, que foi definida para os ensaios em questão de,  $W_0 = 0,800 \text{ kg/m}^2$ . Posto isto, a massa de cada componente na mistura era calculada pela seguinte fórmula, (Ribeiro, 1998):

$$M_f = W \times A \quad \text{e} \quad W = (1 + H_s) \times W_0 \quad [15]$$

em que,

$M_f$  - Massa de combustível ( $kg$ ),

$W$  - Carga final ( $kg.m^{-2}$ ),

$A$  - Área útil do ensaio ( $m^2$ ).

A área útil dos ensaios realizados foi mantida constante e igual a  $1,008 \text{ m}^2$  ( $1,26 \times 0,80 \text{ m}$ ). Com a balança da Fig. 6 (b) foi feita a pesagem de cada componente do combustível, na mistura final a utilizar em cada ensaio.

### 3.2. Montagem Experimental

Os ensaios de laboratório tiveram lugar no Laboratório de Aerodinâmica Industrial, um edifício da Associação para o Desenvolvimento da Aerodinâmica Industrial (ADAI) situado em Coimbra.

Foi usada para os ensaios a mesa de combustibilidade *MCIII* (Fig. 7) que permite caracterizar as propriedades de combustão de leitos de fogo em condições de ausência de vento e declive.

Esta mesa concebida pelo Prof. Xavier Viegas tendo por base conhecimentos adquiridos em experiências anteriores.



**Fig. 7 – Mesa de ensaio MC III**

A MCIII tem uma plataforma de  $1,3 \times 2 \text{ m}^2$  ladeada por paredes verticais de  $0,6 \text{ m}$  de altura. A base é revestida por tijoleira cerâmica de  $25 \times 25 \text{ cm}^2$  e com uma espessura de  $1,7 \text{ cm}$ . Uma secção da base da mesa ( $77 \times 24,5 \text{ cm}^2$ ) está apoiada numa balança com uma precisão de  $0,02 \text{ g}$ , que quando ligada a um programa de aquisição de dados, permite monitorizar a perda de massa durante os ensaios. Como já se referiu estes dados não foram analisados no presente trabalho.

As paredes de um dos lados são feitas em vidro de alta temperatura com uma espessura de  $6 \text{ mm}$  e do outro lado em chapa metálica de  $1 \text{ mm}$  de espessura. Ao longo da mesa e com um espaçamento de  $10 \text{ cm}$ , entre si, existem pinos por onde são esticados fios, que permitem calcular a velocidade de propagação da chama. As paredes verticais nos topos da mesa são

montados em calhas para poderem subir (tipo guilhotina) e permitir a entrada de ar por uma abertura horizontal. Esta abertura pode ser ajustada permitindo assim preencher os requisitos experimentais. Apenas o topo a do lado mais afastado em que se iniciava a ignição do leito foi mantido aberto a  $15\text{ cm}$  em todos os testes conduzidos, conforme sugere Ribeiro (1998).

Conforme descrito em Viegas *et al* (2010), a ignição é feita num extremo da mesa (A) onde a abertura deve ser mantida fechada, e propaga-se em direcção ao topo que se encontra aberto (B). Assim podemos obter um comportamento mais reproduzível da frente de fogo, minimizando os efeitos das correntes de ar dentro do laboratório. Mais detalhes sobre esta mesa podem ser encontrados em Ribeiro (1998).

### 3.3. Descrição do método de ensaio

Na realização dos ensaios no âmbito deste trabalho e como já foi referido, a carga total, em base seca,  $W_0$  foi mantida constante a  $0,800\text{ kg m}^{-2}$ . Variou-se a percentagem mássica de cada combustível na mistura, em intervalos constantes.

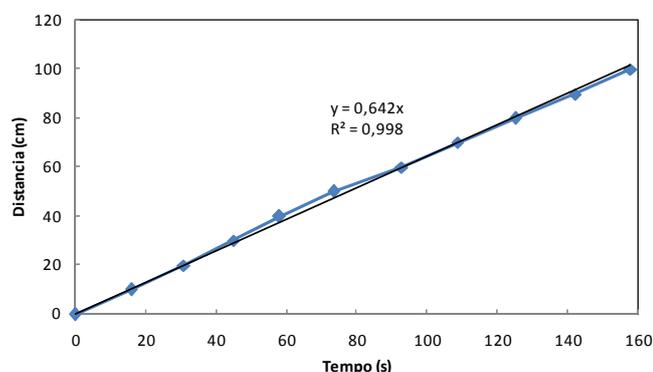
A preparação do ensaio era feita da seguinte forma: o valor da humidade de cada combustível era obtido com recurso à já referida balança de humidades, e calculada a massa de cada componente na mistura final. Era pesado cada componente do combustível (Fig. 6) e recolhida uma amostra para o cálculo da humidade pelo método gravimétrico. O combustível era então cuidadosamente misturado à mão em cima da mesa, de forma a obter uma composição mais homogénea possível. Após a mistura, este era espalhado uniformemente pela mesa. Os fios de algodão eram colocados de  $10$  em  $10\text{ cm}$  (Fig. 8) e medida a altura do leito em vários pontos (Fig. 8). Finalizada a preparação do leito, uma frente de fogo linear era ateadada, usando um fio de lã ensopado em gasolina que era colocado ao longo de um dos topos do leito e com um fósforo no meio do fio era feita a ignição, notando-se uma inflamação imediata do fio de lã que garantia a linearidade inicial da frente de chama.

No anexo, encontram-se fotografias dos leitos para as várias percentagens de cada combustível na mistura final, de ambas as misturas em estudo.



**Fig. 8 – Pormenor da montagem do leito onde se pode observar os fios de algodão utilizados para o calculo da velocidade de propagação, num leito de 100% de pinheiro (a); Metodologia utilizada para medir as alturas do leito (b).**

Um observador registava o avanço da frente do fogo, contabilizando o intervalo tempo entre a quebra dos sucessivos fios colocados ao longo da mesa de combustibilidade. A velocidade de propagação é então calculada pelo declive da regressão linear (Gráfico 1) dos tempos e distâncias medidos. O valor da velocidade de propagação é coeficiente de  $x$  na equação da recta obtida pela regressão linear.



**Gráfico 1 – Exemplo de regressão linear para o cálculo da velocidade de propagação (PE85\_100/0\_S3\_R3).**

Outro procedimento importante é o pré-aquecimento da mesa. Esta operação serve para elevar a temperatura da base, para que no princípio de cada ensaio a temperatura seja sensivelmente igual. Assim é possível garantir as condições de reprodutibilidade. Este procedimento é feito queimando uma pequena quantidade de combustível na mesa, deixando-a arrefecer até chegar

a temperatura de referência, que para os ensaios realizados foi de  $35^{\circ}\text{C}$ , garantindo que a superfície de combustão da mesa se encontra à mesma temperatura no início de cada ensaio.

### 3.4. Descrição do programa de ensaios

Para a preparação do plano de trabalho, foram conduzidos, previamente, alguns ensaios onde foram testadas diferentes misturas de combustíveis (caruma de pinheiro, folha de eucalipto, carqueja e palha), diferentes cargas e diferentes humidades no combustível.

O programa consistiu na realização de várias séries de ensaios com mistura de palha e um segundo combustível (ou combustível verde), define-se combustível verde aquele que foi recolhido dias antes dos ensaios (eucalipto e pinheiro). As séries consistiram numa primeira fase, em misturas de palha com eucalipto e posteriormente em misturas de palha com pinheiro. Os combustíveis foram recolhidos e armazenados na estufa durante 24 horas, a diferentes temperaturas, de acordo com as tabelas *A.1* e *A.2* em anexo. Foram realizadas três séries, para simular diferentes gamas de humidade no combustível:

Série 1: O combustível foi colhido e permanecia *24h* ao ar livre (no interior do laboratório) em lugar ventilado, à temperatura de aproximadamente  $20^{\circ}\text{C}$ .

Série 2: O combustível foi colocado na estufa durante *24h* a  $30^{\circ}\text{C}$

Série 3: O combustível foi colocado na estufa durante *24h* a  $40^{\circ}\text{C}$ .

As séries iniciaram-se e finalizaram com um ensaio com combustível simples (palha), no sentido de avaliar comparar propriedades e comportamentos do fogo para leitos de combustível homogêneos e heterogêneos.

Os ensaios tiveram início, conforme se referiu, com um ensaio de *100%* prosseguindo-se variando a carga de cada combustível na mistura, em intervalos o mais constante possível.

Nas tabelas *A.1* e *A.2* do anexo encontra-se em detalhe todas as informações relativas aos ensaios realizados e plano de trabalhos seguido. A referência atribuída aos ensaios permite distinguir os diferentes ensaios e a ordem de realização dos mesmos. As iniciais fazem referência aos diferentes tipos de combustíveis presentes na mistura (PE – palha-eucalipto; PP – palha-pinheiro) seguida pelos algarismos que representam o número de ordem do ensaio. No seguimento surge a percentagem de cada combustível na mistura, onde o primeiro número representa percentagem de palha e o segundo a percentagem de combustível verde. A sigla *Sx* que representa a serie do ensaio e por último *Rx* representa a repetição a que pertence o ensaio.

Para a mistura de palha-eucalipto foram realizadas três repetições do plano de ensaios, para as misturas de palha-pinheiro efectuaram-se duas repetições. Como se pode verificar analisando o plano de ensaios foi introduzida alguma aleatoriedade da variação dos parâmetros, a fim de evitar contaminação com outros efeitos, tais como a hora de realização do ensaio

## 4. VALORES E RESULTADOS EXPERIMENTAIS

No presente capítulo serão apresentados os resultados obtidos no decorrer dos ensaios de laboratório bem como a análise dos mesmos.

Como se disse atrás, os principais objectivos do presente trabalho são o estudo da alteração do comportamento do fogo mediante a variação da carga numa mistura de dois combustíveis num leito heterogéneo, e a análise da influência da humidade no processo de propagação. Durante os ensaios controlou-se a velocidade de propagação da frente de fogo num plano horizontal na ausência de vento em função da percentagem de combustível seco e do valor da humidade média da mistura de combustíveis.

### 4.1. Velocidade de Propagação em função da percentagem de combustível seco.

Para cada ensaio traçou-se, um gráfico que relaciona a distância percorrida e o tempo decorrido ajustando-se uma recta por regressão linear aos diversos valores obtidos [16]. O ajuste do tipo linear apresenta a seguinte forma:

$$y = m x + b \quad [16]$$

Onde  $b$  representa a ordenada na origem que em todos os casos foi forçada a começar no ponto  $(0,0)$  uma vez que o modelo de propagação linear define que quando o tempo é igual a zero a distancia percorrida é igual a zero. O declive da recta ( $m$ ) representa a velocidade de propagação  $R_0$  ( $cm.s^{-1}$ ). Em todos os ensaios o coeficiente de correlação ( $r^2$ ) foi próximo da unidade a variar entre 0,7554 (PE46) e 0,9998 (PE72), refira-se que cerca de 95% dos ensaios este valor foi superior a 0,9. Teoricamente o coeficiente de correlação deveria ser igual a “1” mas por motivos inerentes ao procedimento experimental nem sempre os ajustes tomam este valor. Embora o desvio que por vezes existe pode-se considerar os ensaios fiáveis, bem como, o seu estado quasi-estacionário.

De seguida apresenta-se os referidos gráficos para os dois tipos de misturas (Gráfico 2) com um ajuste onde a ordenada na origem foi forçada a começar no ponto (0,0). Nos gráficos seguintes (Gráfico 3) apresenta-se o mesmo resultado mas sem se forçar a ordenada na origem no ponto (0,0).

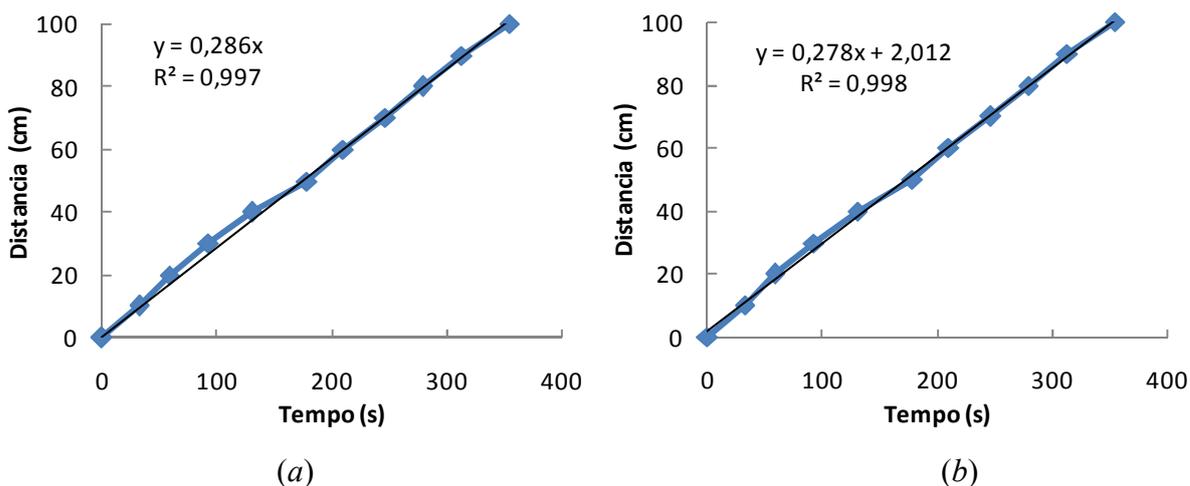


Gráfico 2 – Gráfico da velocidade de propagação para o ensaio PE75\_60/40\_S2\_R3 (a); Gráfico da velocidade de propagação para o mesmo ensaio (PE75) mas sem se forçar a ordenada na origem (b).

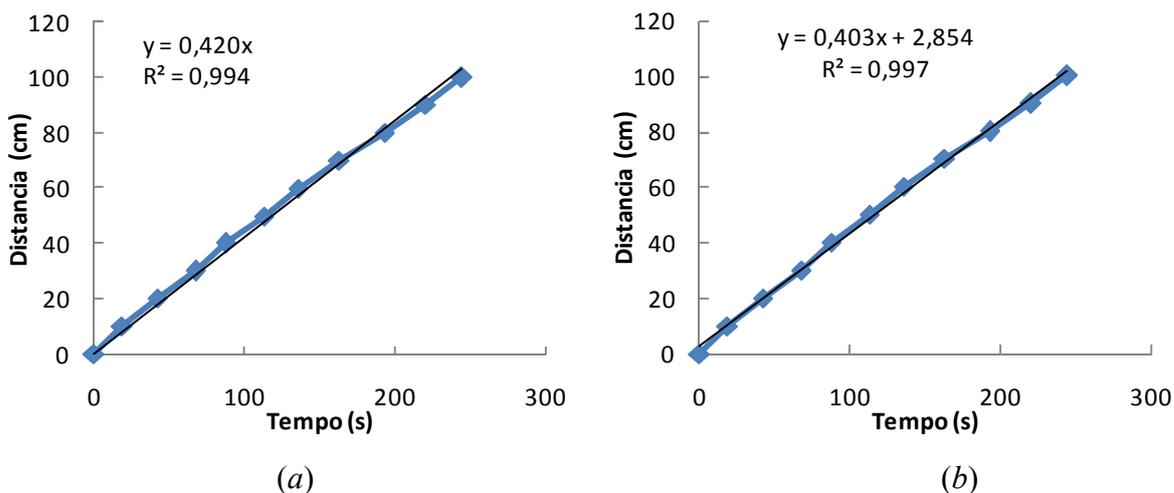


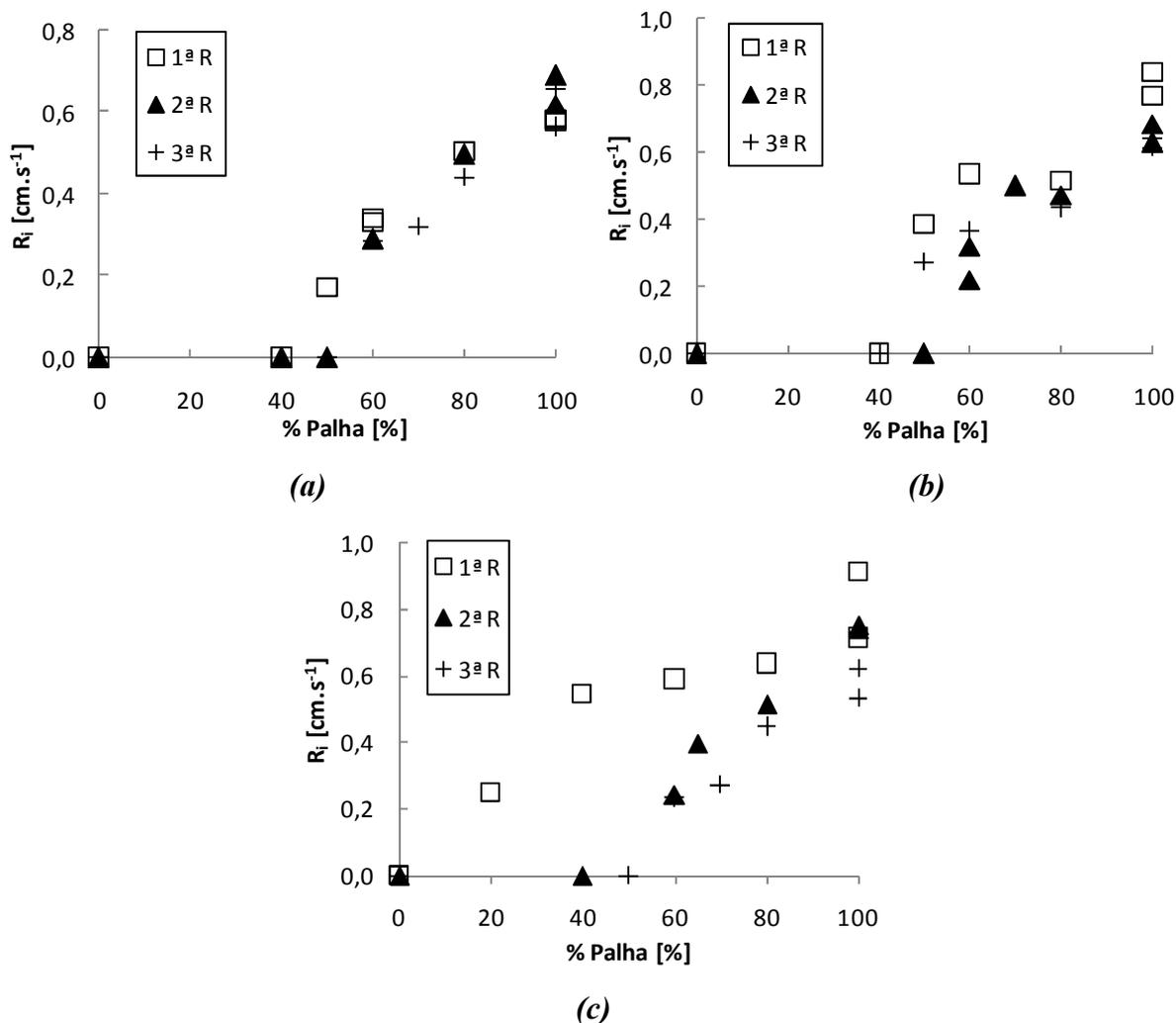
Gráfico 3 - Gráfico da velocidade de propagação para o ensaio PP94\_60/40\_S2\_R1 (a); Gráfico da velocidade de propagação para o mesmo ensaio (PP94), mas sem se forçar a ordenada na origem (b)

---

Analisando todos os gráficos conclui-se que de facto o fogo se propaga de forma linear, a distância aumenta linearmente com o tempo, para as referidas condições, conforme proposto por Viegas *et al* (2010). Como se pode observar não existe grande influência da alteração da ordenada na origem nos valores do ajuste ( $r^2$ ), quer no valor da velocidade de propagação. Não havendo um valor para comparação da velocidade de propagação, adquirido por outro meio experimental, não é possível ter a certeza qual o melhor valor para a mesma. Optou-se por tomar como referencia o valor obtido forçando o ajuste a começar no ponto  $(0,0)$

Conforme já foi referido efectuaram-se várias repetições ao plano de ensaios de forma a garantir consistência dos resultados. Com estas repetições pretendeu-se averiguar se para as mesmas condições, embora seja impossível conseguir exactamente as mesmas condições para dois ensaios diferentes, os valores de velocidade de propagação seriam os mesmos ou aproximados.

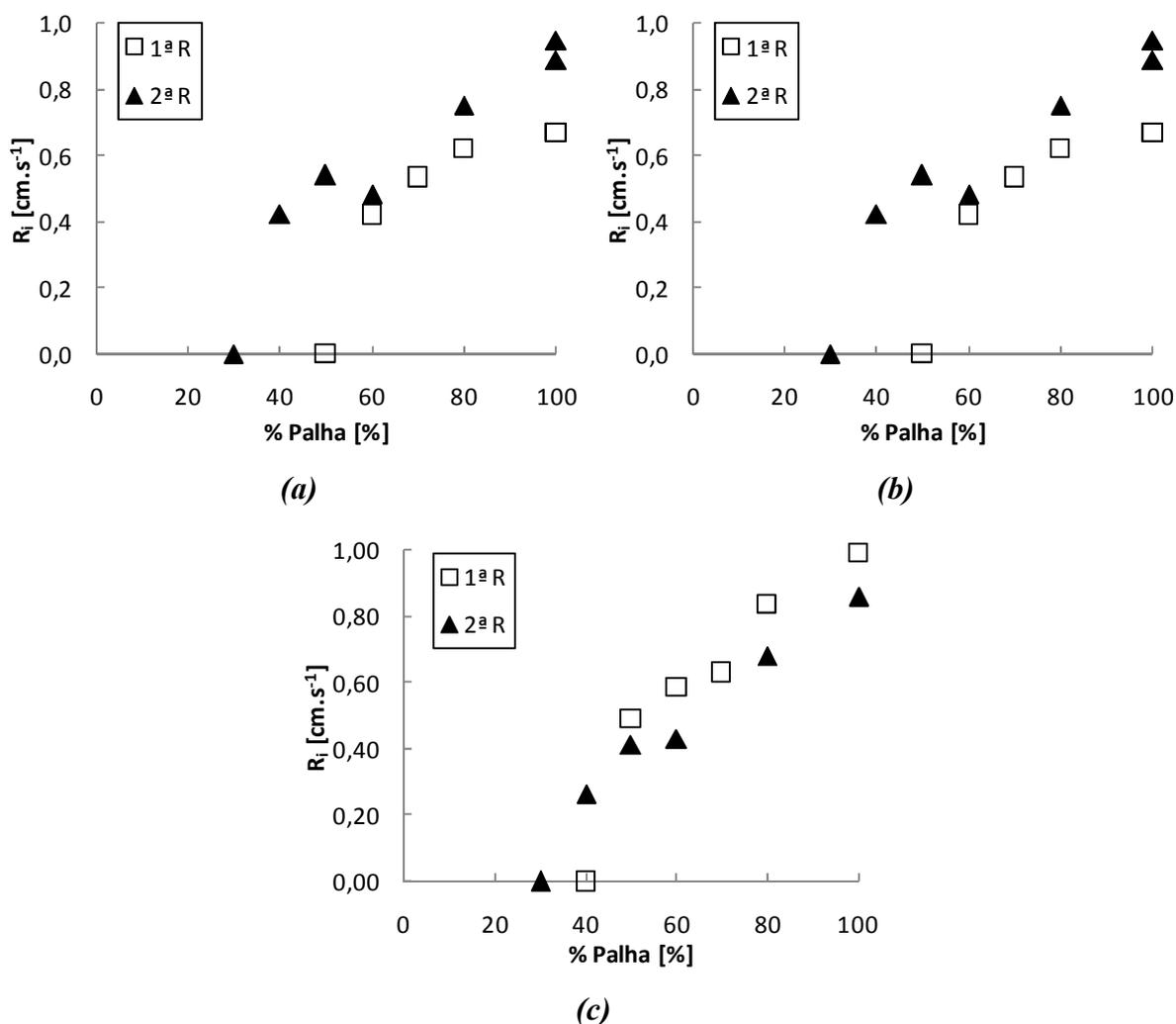
No Gráfico 4 e Gráfico 5 os resultados dos ensaios são agrupados por temperatura a que foi armazenado o combustível. Pretende-se, assim, verificar a reprodutibilidade dos ensaios para cada tipo de mistura para uma dada temperatura de armazenamento do combustível.



**Gráfico 4 – Gráficos da velocidade de propagação para misturas de palha-eucalipto por temperatura a que foi armazenado o combustível. Temperatura ambiente, série 1 (a); 30°C, série 2 (b); 40°C, série 3 (c).**

Como se pode verificar analisando os gráficos as melhores reprodutibilidades são conseguidas para as misturas armazenadas à menor temperatura. Esta tendência será devida ao facto de as condições climáticas dentro do laboratório influenciarem o combustível alterando as suas propriedades físicas. Outro factor que influencia a reprodutibilidade dos ensaios é o facto de ser completamente impossível reproduzir as mesmas condições dos leitos (humidade dos combustíveis, compactação, composição química dos combustíveis, etc.), assim como as condições climáticas dentro do laboratório.

O Gráfico 5 apresenta os resultados agrupados da mesma forma, mas neste caso para as misturas de palha-pinheiro.



**Gráfico 5 - Gráficos da velocidade de propagação para misturas de palha-pinheiro por temperatura a que foi armazenado o combustível. Temperatura ambiente, série 1 (a); 30°C, série 2 (b); 40°C, série 3 (c).**

Tal como no caso anterior as melhores reprodutibilidades são conseguidas para misturas armazenadas a menor temperatura. Os combustíveis quando armazenados a temperaturas superiores à temperatura ambiente apresentam valores para a velocidade de propagação pouco estáveis. Este efeito será causado pelas condições no interior do laboratório entre outras já referidas. Apesar de para as misturas armazenadas a 40°C os resultados se desviarem do que seria de esperar não se desconsiderou nenhum valor desta série nos resultados apresentados.

#### 4.2. Velocidade de propagação em função da composição do leito.

Os gráficos 6 e 7 apresentam o valor da velocidade de propagação em função de uma dada percentagem de palha para os dois tipos de misturas ensaiadas. Os resultados são agrupados pelas sequências em que foram realizados, para as misturas de palha-eucalipto e posteriormente para as misturas de palha-pinheiro. Conforme foi descrito os combustíveis foram armazenados a várias temperaturas de forma a variar o seu teor de humidade.

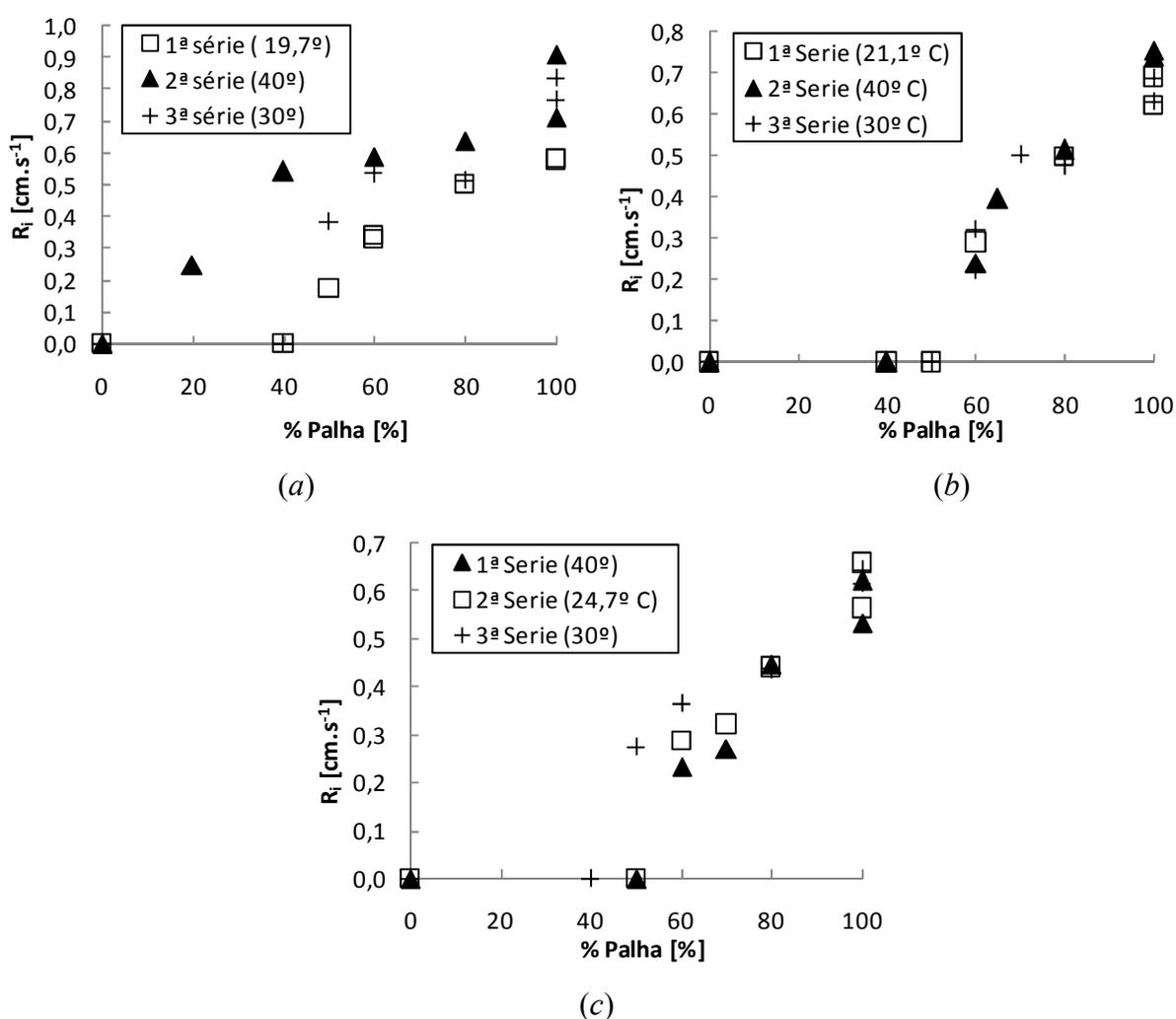


Gráfico 6 – Gráfico da percentagem de palha em função da velocidade de propagação para a primeira repetição de ensaios de palha-eucalipto (a); segunda repetição (b); terceira repetição (c).

De seguida apresenta-se os resultados obtidos para as misturas de palha-pinheiro. De forma semelhante às situações anteriores apresenta-se os gráficos da velocidade de propagação em função da percentagem de palha.

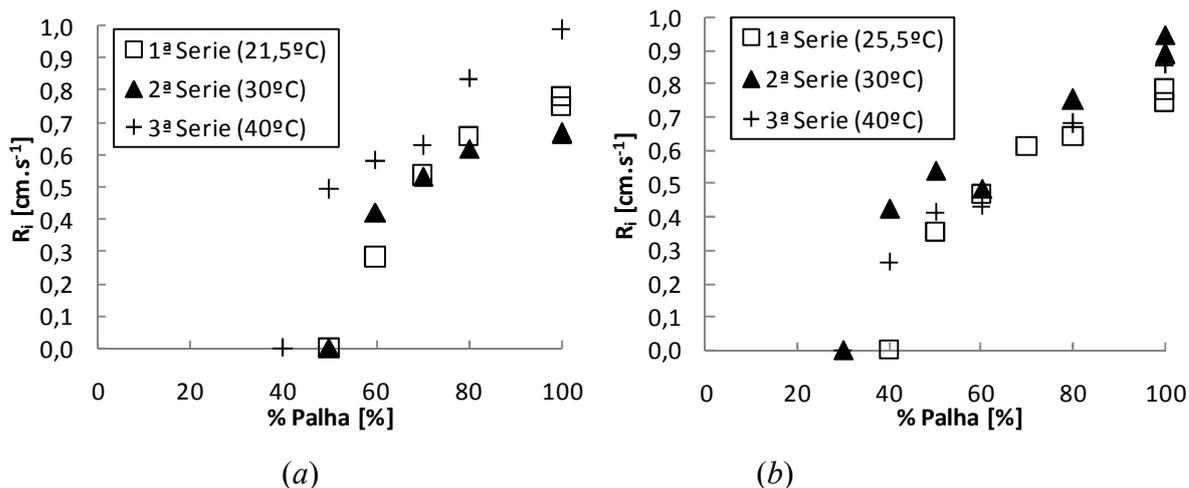
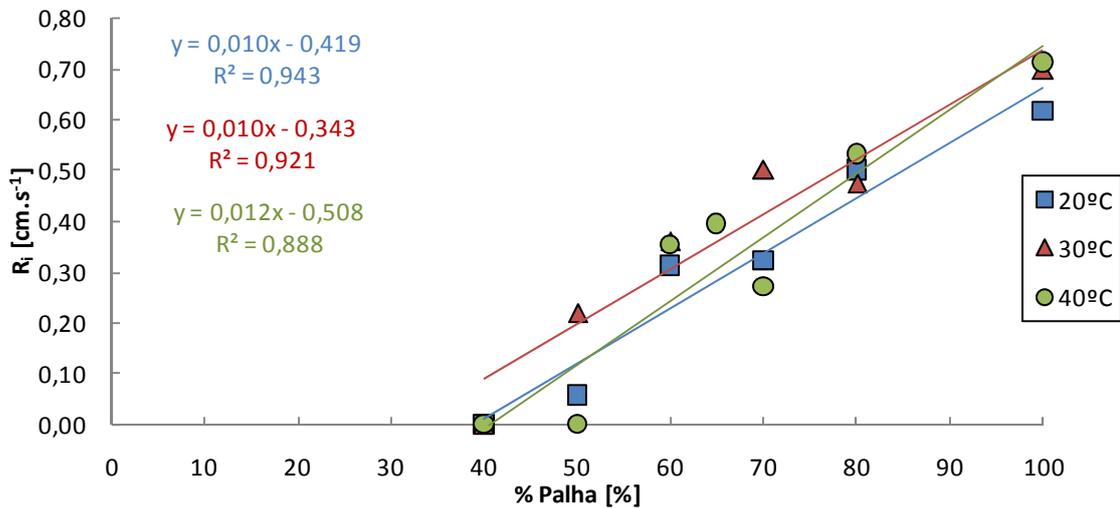


Gráfico 7- Gráfico da percentagem de palha em função da velocidade de propagação para a primeira repetição dos ensaios de palha-pinheiro (a); segunda repetição (b).

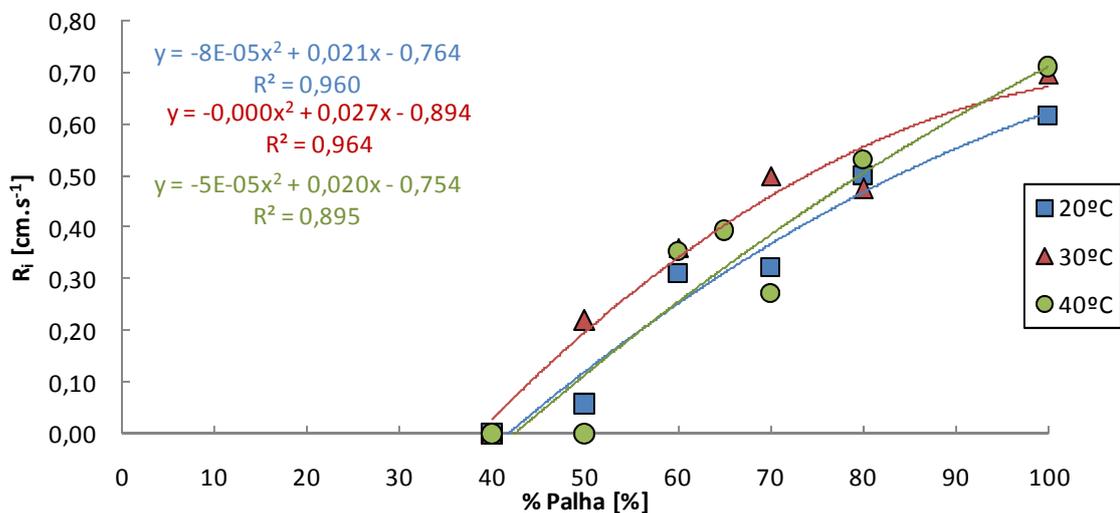
Da análise dos gráficos apresentados, e como seria de esperar, os combustíveis que foram armazenados a uma temperatura superior apresentam maiores valores para a velocidade de propagação. Pode-se observar que em alguns casos a velocidade de propagação para misturas armazenadas a  $40^\circ\text{C}$  é menor (Gráfico 6 (c)) do que as velocidades para as misturas armazenadas a uma menor temperatura. Este efeito, embora inesperado, poderá ser consequência das condições climáticas dentro do laboratório. Quando se retira o combustível de dentro da incubadora, ele permanece algum tempo exposto as condições do laboratório enquanto é feita a montagem do ensaio. Durante este intervalo de tempo, ele sofre influência das condições atmosféricas no laboratório, alterando algumas das suas propriedades físicas.

Nos gráficos 8 e 9, que de seguida se apresentam, foi calculada a média da velocidade de propagação, para uma dada percentagem de combustível seco (palha), das várias repetições realizadas. Ou seja, calculou-se a média ponderada das velocidades obtidas para cada percentagem de palha. Representa-se, assim, uma velocidade média de propagação de uma frente de fogo para uma dada percentagem de combustível seco, com vista a desenvolver um

modelo analítico de comportamento do fogo, para ambas as misturas. Foram ajustadas dois tipos de curvas, linear e polinomial.



**Gráfico 8 –** Media das velocidades de propagação dos ensaios de palha-eucalipto em função da porcentagem de palha, onde foi ajustada um função linear

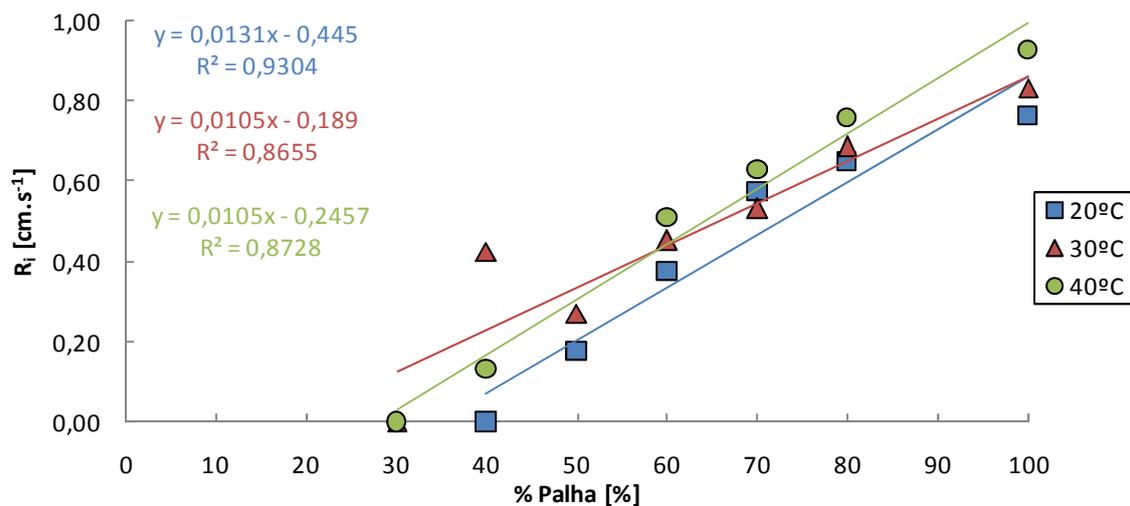


**Gráfico 9 -** Media das velocidades de propagação dos ensaios de palha-eucalipto em função da porcentagem de palha, onde foi ajustada um função polinomial de 2º grau.

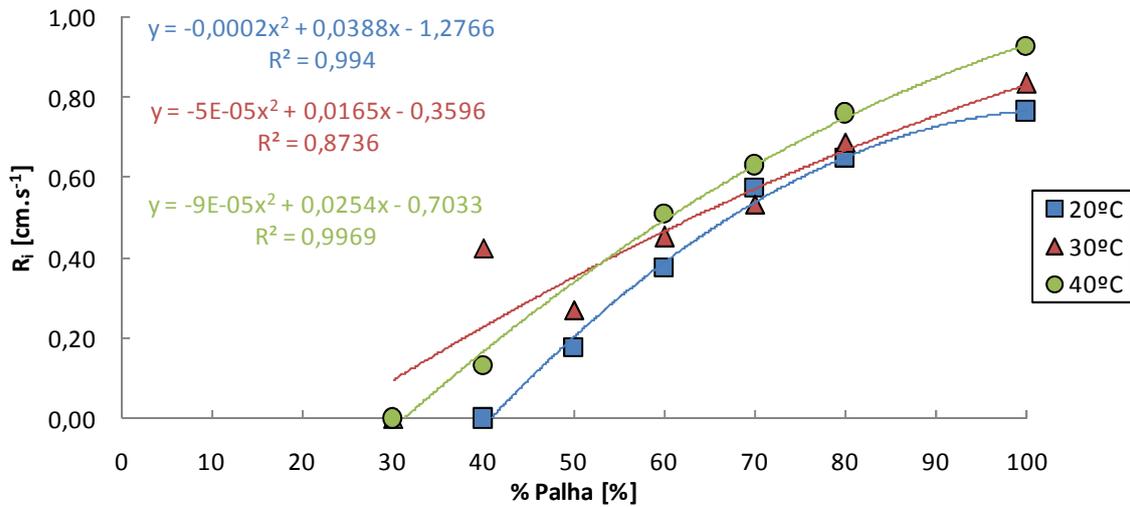
Analisando os gráficos conclui-se que só existe propagação a partir de uma determinada porcentagem de palha que se define como  $x_1$ , porcentagem de palha a partir da qual existe ignição, e que varia consoante a temperatura a que foi armazenado o combustível. Conforme

aumenta a percentagem de palha na mistura também aumenta a velocidade de propagação. Nestes gráficos podemos também verificar que para a temperatura de armazenamento de  $40^{\circ}\text{C}$  os resultados são inesperados, apresentando vários pontos abaixo das linhas de  $30^{\circ}\text{C}$  e  $20^{\circ}\text{C}$ , este resultado é efeito das causas já referidas. Relativamente aos diferentes ajustes efectuados observa-se que o polinomial apresenta um coeficiente de correlação ( $r^2$ ) um pouco melhor que o ajuste linear, embora a diferença não se considere significativa.

No gráfico 10 e 11 apresentam-se os resultados agrupados da mesma forma, mas neste caso para as misturas do tipo palha-pinheiro. A semelhança dos gráficos anteriores apresenta-se dois tipos de ajuste aos pontos calculados: um linear e outro polinomial.

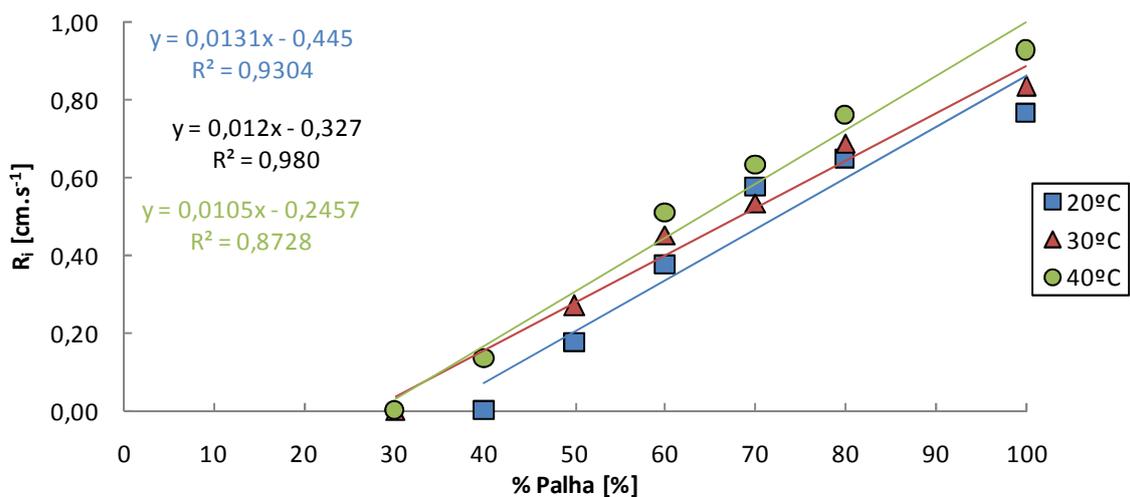


**Gráfico 10 - Media das velocidades de propagação dos ensaios de palha-pinheiro em função da percentagem de palha, onde foi ajustada uma função linear.**

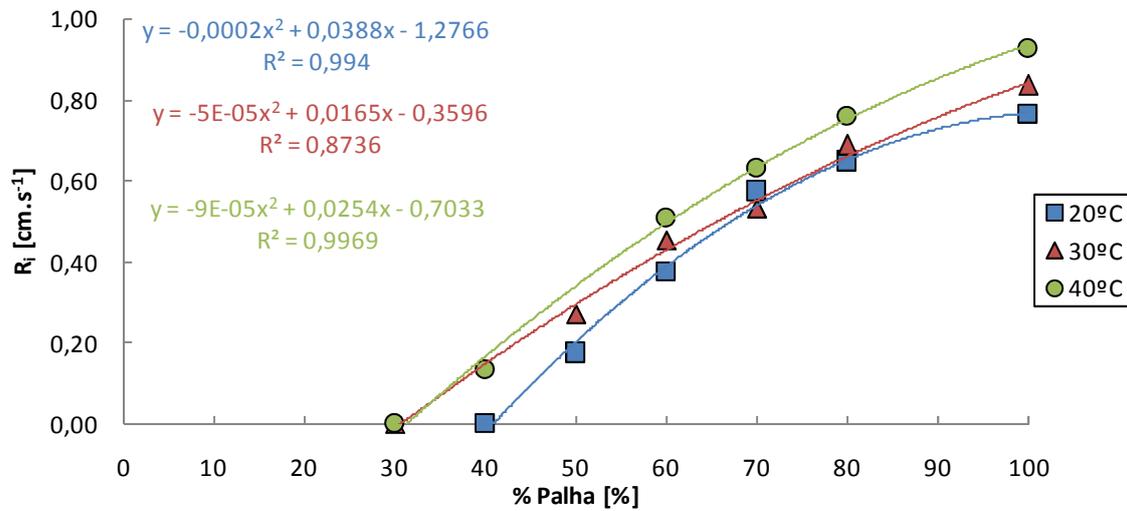


**Gráfico 11 -** Media das velocidades de propagação dos ensaios de palha-pinheiro em função da percentagem de palha, onde foi ajustada uma função polinomial de 2º grau.

Observando os gráficos verifica-se que para a temperatura de 30°C e uma percentagem de 40% de palha a valor para a velocidade de propagação se desvia bastante do que seria de esperar. Assim sendo, optou-se por retirar esse ponto e refazer ambos os gráficos, que se apresenta de seguida.



**Gráfico 12 -** Media das velocidades de propagação dos ensaios de palha-pinheiro em função da percentagem de palha, onde foi ajustada um função linear, sem o ponto T=30°C e 40% palha



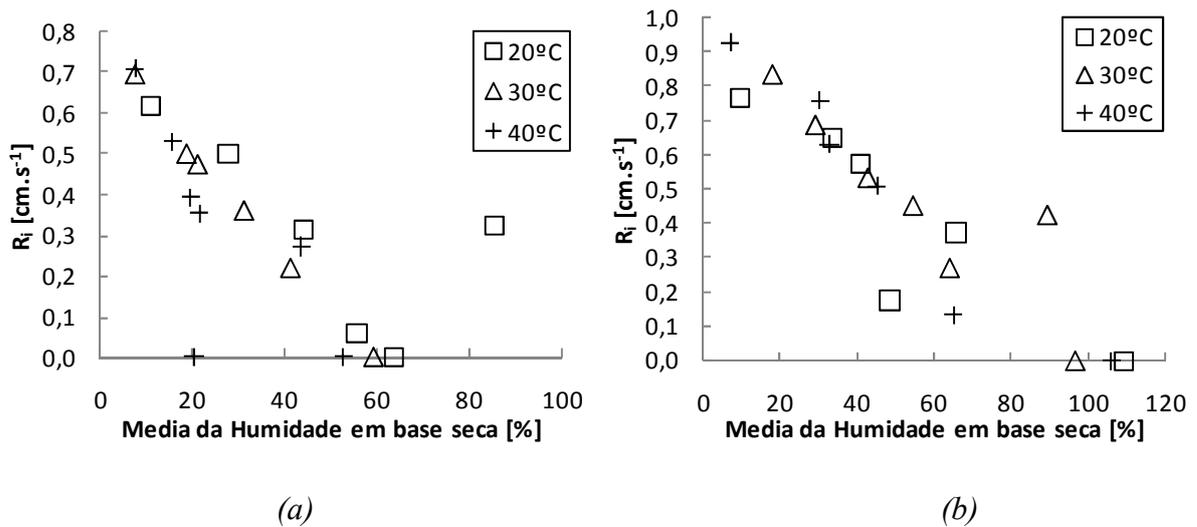
**Gráfico 13 - Media das velocidades de propagação dos ensaios de palha-pinheiro em função da percentagem de palha, onde foi ajustada um função polinomial de 2º grau, sem o ponto  $T=30^{\circ}\text{C}$  e 40% palha**

Nestes gráficos, os resultados obtidos, apresentam-se bastante mais satisfatórios que os apresentados para as misturas de palha-eucalipto. Neste caso nenhuma das curvas se cruza entre si e para uma maior temperatura de armazenamento há uma maior velocidade de propagação. Verifica-se que, em ambas as misturas, há uma melhor aproximação ao ajuste polinomial do que ao ajuste linear. A razão para se optar por apresentar os dois tipos de ajuste, prende-se com facto, de em primeiro se ter feito um ajuste linear pela facilidade de modelação e porque o modelo proposto por (Viegas *et al.*, 2010), expor uma representação linear. Entretanto verificou-se que um ajuste polinomial de 2º grau apresentava um coeficiente correlação um pouco melhor.

Observa-se, ainda, que existe uma tendência para as curvas assumirem um paralelismo entre si. Perante tal conclui-se que a velocidade de propagação aumenta com a diminuição da humidade do combustível e para cada  $x_1$  existe uma curva típica para a velocidade, sendo que para cada tipo de mistura estas curvas são paralelas entre si.

### 4.3. Velocidade de propagação em função da humidade do combustível.

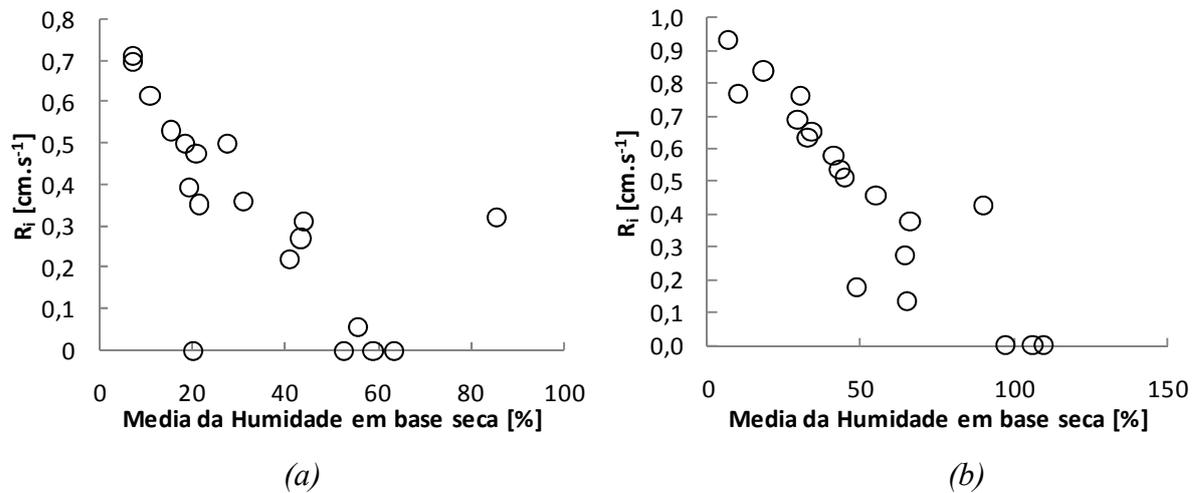
No Gráfico 14 apresenta-se a velocidade de propagação em função da humidade média do combustível, dividida por temperatura a que foi armazenada o combustível.



**Gráfico 14 – Gráfico da velocidade de propagação em função da humidade média do combustível para todos os ensaios de realizados, para uma determinada temperatura de armazenamento do combustível: palha-eucalipto (a); palha-pinheiro (b).**

De facto e como já se tinha observado no subcapítulo anterior a velocidade de propagação diminui com o aumento da humidade do combustível.

No Gráfico 15 apresentam-se os mesmos resultados mas agrupados por tipo de mistura.



**Gráfico 15 - Gráfico da velocidade de propagação em função da humidade média do combustível para todos os ensaios realizados: palha-eucalipto (a); palha-pinheiro (b).**

Embora alguns pontos pareçam afastar-se do esperado, da análise dos gráficos, pode afirmar-se que a velocidade de propagação diminui com o aumento da humidade do combustível até um certo patamar vulgarmente apelidado de humidade de extinção a partir da qual não existe propagação. Conforme foi exposto no capítulo 2 a humidade aumenta o poder calorífico do combustível. Quanto maior for o teor de humidade dos combustíveis, maior será a quantidade de calor absorvida para retirar a água dos combustíveis, o que reduz a sua taxa de combustão. Este efeito da humidade na velocidade de propagação seria previsível, mas não é tão linear como parece. De facto até uma certa percentagem de combustível verde na mistura existe propagação contrariamente ao que empiricamente seria de esperar.

Uma vez que eram conhecidas duas variáveis independentes, a percentagem de palha na mistura final e o teor de humidade média do combustível foi desenvolvido um modelo que relaciona a velocidade de propagação da frente de chama com aquelas duas variáveis.

Estes gráficos foram gerados pelo software LABFIT (Silva e Silva, 1998). Esta aplicação permite desenhar gráficos a três dimensões, onde se escolheu a função que apresentava melhor ajuste aos pontos.

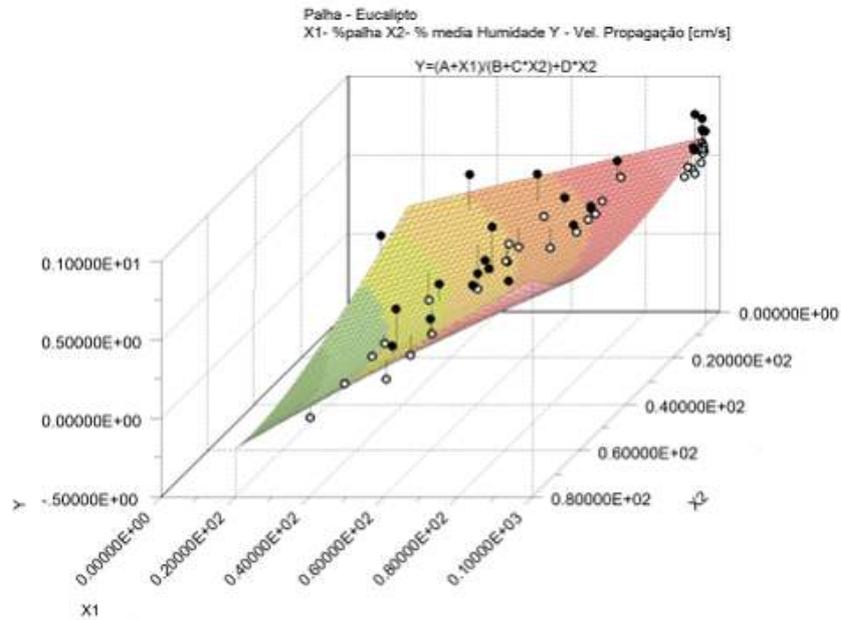


Gráfico 16 – Velocidade de propagação em função da percentagem de combustível seco e média da humidade para as misturas de palha-eucalipto.

A função que melhor se ajustou para as misturas palha-eucalipto assume a forma:

$$y = \frac{(A + x_1)}{(B + C \times x_2)} + D \times x_2$$

em que:

$y$  – velocidade de propagação [ $cm.s^{-1}$ ]

$x_1$  – percentagem de palha na mistura

$x_2$  – percentagem média de humidade no combustível

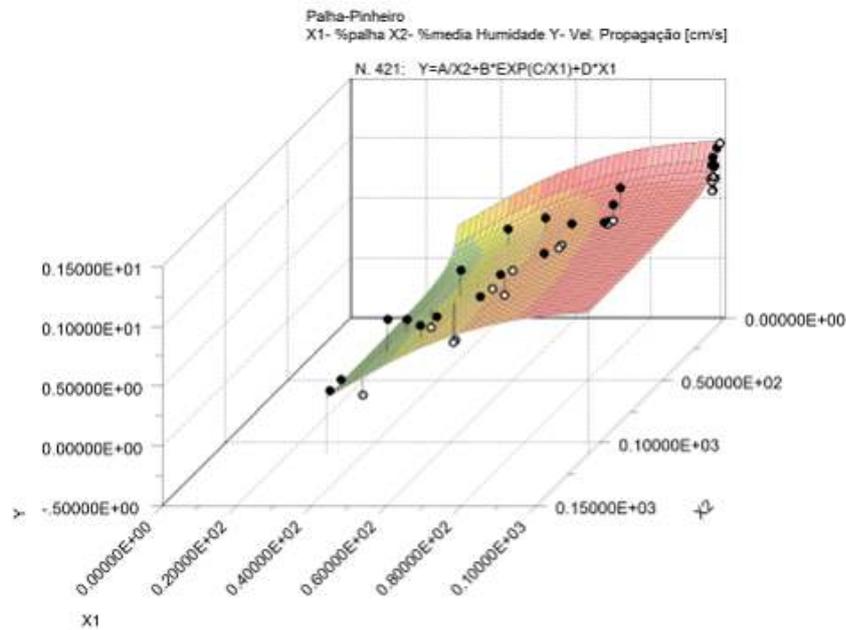
$A$  –  $0,415E^2$

$B$  –  $0,191E^3$

$C$  –  $-0,146E^1$

$D$  –  $-0,128E^{-1}$

com um ajuste ( $r^2$ ) de  $0,800$ . Para as misturas de palha-pinheiro procedeu-se de igual modo.



**Gráfico 17 - Velocidade de propagação em função da percentagem de combustível seco e média da humidade para as misturas de palha-pinheiro.**

Neste caso a função que melhor se ajustou aos pontos toma a forma:

$$y = \frac{A}{x_2} + B \times e^{\frac{C}{x_1}} + D \times x_1$$

em que,

$y$  – velocidade de propagação [ $cm.s^{-1}$ ]

$x_1$  – percentagem de palha na mistura

$x_2$  – percentagem média de humidade no combustível

$A$  –  $0,415E^2$

$B$  –  $0,191E^3$

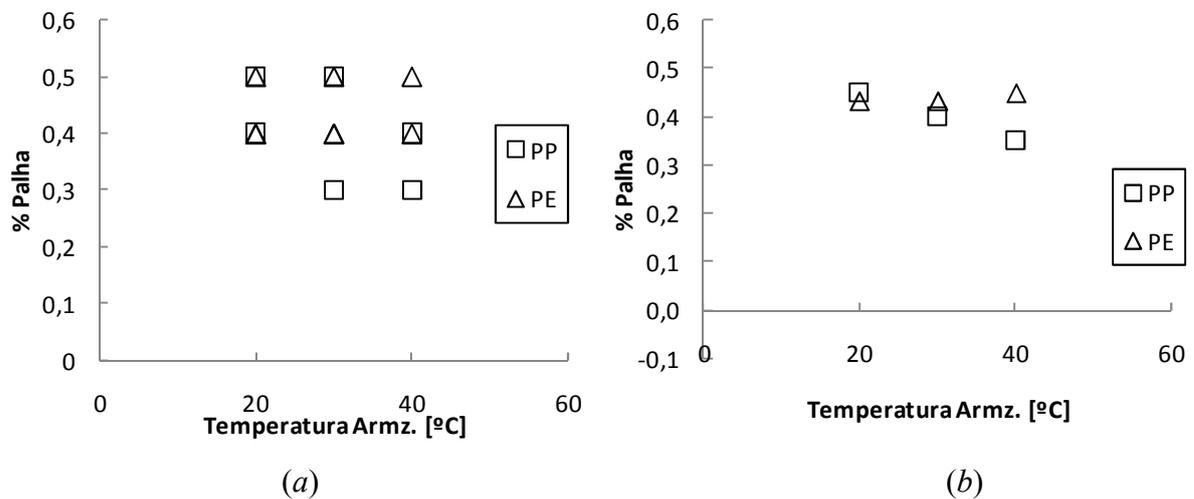
$C$  –  $-0,146E^1$

$D$  –  $-0,128E^{-1}$

com um ajuste ( $r^2$ ) de  $0,818$ . Conforme se pode notar nos gráficos de ambas as misturas formam superfícies idênticas e paralelas. Este era o resultado esperado, uma vez que

teoricamente, para cada tipo de mistura deverá observar-se superfícies iguais paralelas entre si.

Conforme já se referiu só existe propagação a partir de uma determinada percentagem de palha na mistura e definiu-se esta como  $x_1$ . Para ambas as misturas e para cada temperatura de armazenamento foi desenhado um gráfico que representa a percentagem de palha a partir da qual houve ignição (Gráfico 18 (a)), no Gráfico 18 (b) representou-se a média de todas as repetições.



**Gráfico 18 - Percentagem de combustível seco a partir da qual houve ignição para ambas as misturas (a); média da percentagem de palha para a qual houve ignição para as duas misturas (b).**

Nas tabelas seguintes apresentam-se os valores representados no Gráfico 18 (b), ou seja, a percentagem média de palha na mistura a partir da qual existe ignição.

**Tabela 1 - Percentagem média de palha na mistura a partir da qual existe ignição, para os dois tipos de misturas.**

Palha-Pinheiro	
$T_{\text{armz.}} (^\circ\text{C})$	$X_1$
20	0,45
30	0,40
40	0,35

Palha-Eucalipto	
$T_{\text{armz.}} (^\circ\text{C})$	$X_1$
20	0,43
30	0,43
40	0,45

Teoricamente os pontos deveriam ser coincidentes. Na prática isso não se verifica porque, conforme já se referiu, é impossível reproduzir exactamente as mesmas condições para os leitos.

#### 4.4. Modelo polinomial de propagação de fogo.

Os combustíveis florestais são geralmente uma mistura heterogénea de partículas de diferentes espécies, tamanhos e formas. Para fins de modelação é conveniente reduzir essa realidade complexa a um modelo de combustível equivalente conceptualmente composto por partículas homogéneas com as mesmas propriedades de combustibilidade que o combustível original, (Viegas *et al.*, 2002).

Com vista a comparação de resultados, conforme refere Viegas *et al* (2002), podem-se definir dois parâmetros adimensionais, um para a caracterização da fracção de combustível seco ( $\varphi$ ) e outro para a da velocidade de propagação da mistura de dois combustíveis ( $\psi$ ).

Definimos  $\varphi$  por:

$$\varphi = \frac{x - x_c}{1 - x_c} \quad [17]$$

Em que  $x_c$  é o valor mínimo de  $x$  para o qual existe propagação ( $R > 0$ ) para uma dada mistura. Definimos  $\psi$  por meio de, onde  $R_{01} > R_{02}$ .

$$\psi = \frac{R_{0\varphi} - R_{01}}{R_{02} - R_{01}} \quad [18]$$

em que:

$\psi$  - Parâmetro adimensional para a velocidade.

$R_{0\varphi}$ - Velocidade de propagação para um leito com a mistura dos dois combustíveis.

$R_{01}$ - Velocidade de propagação para um leito com 100% de combustível verde

$R_{02}$ - Velocidade de propagação para um leito com 100% de palha

$x$  – Percentagem de palha na mistura

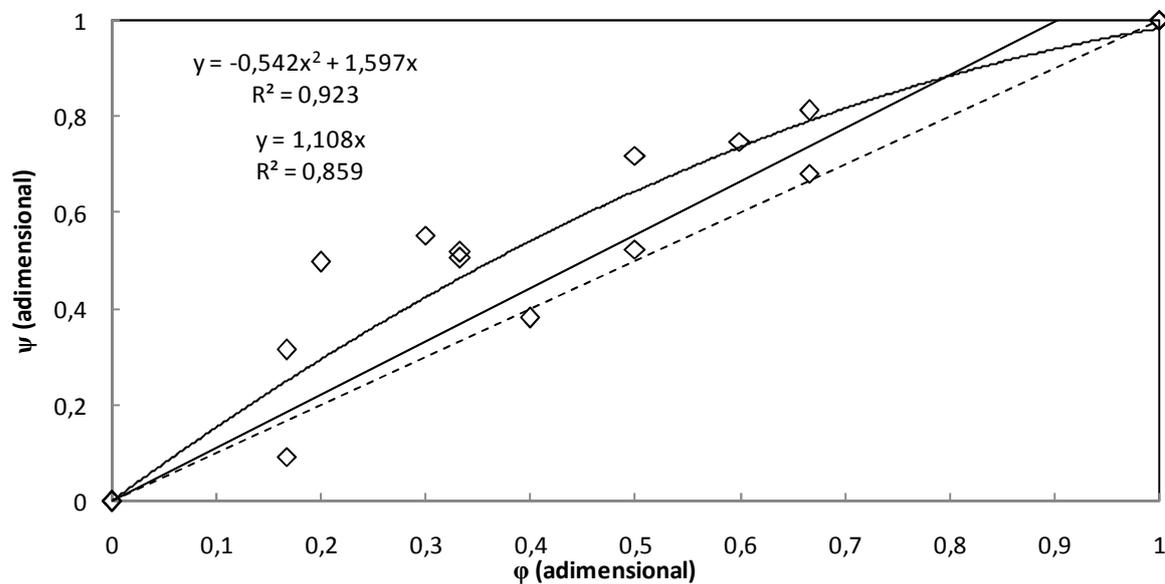
e por definição:

$$\varphi = 0 \quad \Psi = 0$$

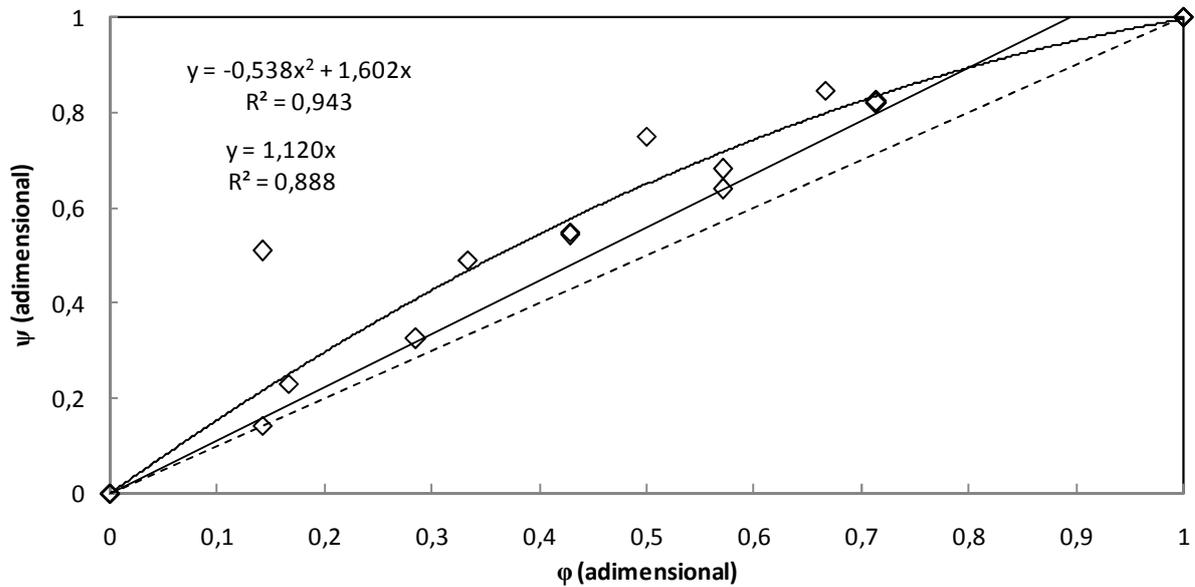
$$\varphi = 1 \quad \Psi = 1$$

No estudo referido anteriormente, Viegas *et al.* (2002) apresentou resultados referentes a este parâmetro, em que se verificavam alguns desvios à idealidade teórica. Alguns valores de  $\Psi$  não se inseriam no intervalo de “0” a “1”. No presente trabalho nenhum ponto saiu fora do referido intervalo.

Foram calculados os parâmetros adimensionais usando os valores das médias da velocidade de propagação. Aos pontos obtidos ajustaram-se curvas do tipo polinómio de segundo grau ( $y = ax^2 + bx + c$ ) e do primeiro grau ( $y = ax + b$ ). Obtiveram-se os seguintes gráficos



**Gráfico 19 – Gráfico do parâmetro adimensional de velocidade de propagação para as misturas de palha-eucalipto.**



**Gráfico 20 - Gráfico do parâmetro adimensional de velocidade de propagação para as misturas de palha-pinheiro.**

Analisando ambos os ajustes verifica-se uma tendência bastante melhor para o polinômio de segundo grau do que para o de primeiro grau. No ajuste polinomial os coeficientes de  $x$  apresentam valores muito próximos. Tomando a média dos dois valores destes coeficientes de, propõe-se um modelo polinomial de segundo para o parâmetro adimensional da velocidade de propagação, que apresenta a seguinte forma:

$$\Psi = -0,54\phi^2 + 1,60\phi \quad [19]$$

em que:

$\Psi$  – Parâmetro adimensional para a velocidade

$\phi$  – Percentagem de palha adimensional

Perante os resultados generaliza-se este modelo empírico para o cálculo da velocidade de propagação de uma mistura de dois combustíveis com diferentes propriedades físicas. Refere-se que esta conclusão é feita a partir de uma pequena amostra de ensaios, mas poderá ser o ponto de partida para uma análise mais alargada e exaustiva no âmbito desta temática.

## 5. CONCLUSÕES

A propagação do fogo depende fortemente da humidade do combustível. Foi objectivo desta dissertação estudar a influência desta humidade na velocidade de propagação de uma mistura de um combustível seco e um combustível vivo mediante a variação da fracção de cada um dos componentes na mistura final. Realizaram-se vários ensaios, simulando diferentes cenários de humidade do combustível, para dois tipos de misturas e registou-se os parâmetros necessários ao cálculo da velocidade. Para garantir a reprodutibilidade dos ensaios efectuaram-se várias repetições do plano de trabalho estabelecido, verificando-se a consistência dos resultados obtidos.

Para cálculo da velocidade de propagação existiam duas possibilidades, ou era calculada pelo modelo proposto por Rothermel (1972) ou pelo modelo linear proposto por Viegas *et al.* (2010). Utilizou-se o método linear, uma vez que se pretendia verificar a validade deste modelo, e por sua vez, julgou-se que este apresentaria melhores resultados para uma mistura de combustíveis. De facto, verificou-se que o fogo se propaga linearmente no tempo. Em todos os ensaios realizados o ajuste do modelo aos pontos observados experimentalmente foi muito próximo da unidade.

Para simular diferentes gamas de humidades, variou-se a carga de cada um dos componentes na mistura de combustíveis, em intervalos constantes. A variação da humidade foi conseguida armazenando os combustíveis a diferentes temperaturas durante um período mínimo de 24 horas. Como seria de esperar as misturas com um maior teor de humidade apresentam menores valores para a velocidade de propagação. Este estudo põe em evidência, paradoxalmente ao que é o conhecimento empírico, que um fogo se pode propagar em combustíveis verdes, desde que esteja presente uma fracção seca que permita suportar a combustão. Apesar de tudo, para as misturas armazenadas a 40°C, houve alguns resultados inesperados que provavelmente são efeitos das diferenças nas condições atmosféricas no interior da estufa para as do laboratório. Ao variar a carga de cada combustível na mistura foi possível cobrir toda a gama de resultados para a propagação do fogo nos combustíveis utilizados.

---

Após o tratamento de todos os dados, traçou-se gráficos da velocidade de propagação em função da percentagem de combustível seco (palha), para cada temperatura de armazenamento, com todos os resultados obtidos experimentalmente. Ao analisar os gráficos e as várias curvas ajustadas verificou-se que existia uma tendência para os pontos se moldarem a uma curva polinomial do 2º grau e que as curvas assumiam um certo paralelismo entre si o que evidenciou que se poderia propor um modelo para a propagação do fogo.

De forma a comparar os resultados obtidos, efectuou-se um estudo adimensional considerando os valores da velocidade de propagação e da percentagem de palha. Os valores obtidos permitiram ajustar um polinómio do 2º grau e verificou-se que para as duas misturas o modelo apresentou coeficientes coincidentes e um ajuste muito próximo da unidade. Perante os resultados obtidos neste estudo adimensional foi possível propor um modelo empírico que relaciona a percentagem de combustível seco na mistura com a velocidade de propagação de uma frente de fogo. Uma vez que os ajustes polinomiais apresentavam-se bastante idênticos, utilizando a média dos coeficientes de  $x$  nas equações dos ajustes de cada uma das misturas, apresenta-se um modelo polinomial para a velocidade de propagação de uma mistura de dois combustíveis.

De uma forma geral podemos afirmar que este estudo foi de encontro aos objectivos inicialmente estabelecidos, e crê-se que será um avanço significativo do conhecimento nesta área.

Embora na extensão desta dissertação se tenha realizado cerca de 120 ensaios, considera-se, que não serão suficientes para garantir a fiabilidade do modelo proposto. Propõe-se que no seguimento da presente trabalho sejam efectuadas mais repetições dos ensaios já realizados Sugere-se que na continuação do estudo fosse realizado o mesmo procedimento para misturas de palha ou feno com outros tipos de combustíveis característicos da flora mediterrânica, tais como, Carqueija (*Genista tridentata*), Urze (*Ericaceae sp.*) ou Tojo-Comum (*Ulex europaeus*).

## 6. BIBLIOGRAFIA

Alexander, M. E., Ackerman, M. Y. e Baxter, G. J. (2009). An Analysis of Dodge's Escape Fire on the 1949 Mann Gulch Fire in Terms of a Survival Zone for Wildland Firefighters. 10th Wildland Fire Safety Summit Pheonix, Arizona International Association of Wildland Fire.

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

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." Silva Lusitania **9(2)**: 237 - 265.

Burgan, R. E. e Rothmel, R. C. (1984). BEHAVE - Fire Behavior Prediction and Fuel Modelling System. U. S. D. o. Agriculture. Ogden, Utah.

Catchpole, E. A. e Catchpole, W. R. (1991). "Modelling moisture damping for fire spread in mixture of live and dead fuels." International Journal of Wildland Fire **1(2)**: 101-106.

Catchpole, E. A., Catchpole, W. R. e Rothmel, R. C. (1993). "Fire Behavior Experiments in Mixed Fuel Complexes." International Journal of Wildland Fire: 45-57.

FEN@ (2011). de <http://fire.forestencyclopedia.net>. United Sates Department of Agticulture - Forest Service Southern Research Station and Southern Regional Extension Forestry. Página consultada em Maio 2011.

Fernandes, P. A. e Pereira, J. P. (1993). Caracterização de Combustíveis na Serra da Arrábida. Vila Real, Portugal, Universidade de Trás-os Montes e Alto Douro.: 237-260.

Gaspar, S. C. (2009). Estudo da ignição de leitos de combustíveis por partículas em combustão - análise do efeito do tipo de combustível e respectivo teor de humidade. FCTUC - Departamento de Engenharia Mecânica. Coimbra, Universidade de Coimbra. **Mestrado**: 43.

Lopes, S. M. G. (2005). Estudo do Teor de Humidade de Combustíveis Florestais Finos na Lousã no Período entre 1996 e 2004 FCTUC - Departamento de Engenharia Mecânica. Coimbra, Universidade de Coimbra. **Mestrado**.

Miller, M. (2001). Fire Effets Guide. N. W. C. Group, National Interagency Fire Center.

Ministério da Agricultura, M., Ambiente e Ordenamento do Território (2011). "Incêndios Florestais - Portugal Totais Nacionais 1980-2006." 2011, de <http://www.afn.min-agricultura.pt/portal/dudf/Resource/pdf/estatisticas/dgrf-totaisnacional-1980-2006.pdf>.

Morais, M. (2001, 2001). 2011, de [http://web.physics.ucsb.edu/~complex/research/hfire/fbehave/fbehave\\_home.html](http://web.physics.ucsb.edu/~complex/research/hfire/fbehave/fbehave_home.html).

- 
- Morvan, D. (2010). "Physical Phenomena and Length Scales Governing the Behaviour of Wildfires: A Case for Physical Modelling." Springer Science **47**(Fire Technology): 437–460.
- Morvan, D., Porterie, B., Larini, M. e Loraud, J. C. (1998). Numerical simulation of the behaviour of a turbulent diffusion radiating flame in a cross wind during a surface fire. III International Conference on Forest Fire Research. **II**: 389-404.
- Pollet, J. (2003). Fuel Moisture Sampling Guide. B. o. L. Management. Utah, State Office.
- Pyne, S. J., Andrews, P. L. e Laven, R. D. (1996). "Introduction to Wildland Fire 2nd Edition." John Wiley & Sons **808**.
- Ribeiro, P. R. P. (1998). Relatório Final de Actividades Desenvolvidas na Área de Investigação em Incêndios Florestais. Coimbra, Associação para o Desenvolvimento da Aerodinâmica Industrial (ADAI).
- Rothermel, R. C. (1972). A mathematical model for predicting fire spread in wildland fuels. Ogden, Utah, USDA Forest Service, Intermountain Forest and Range Experiment Station.
- Silva, A. F. R. d. (2009). Modelação do dano causado pelos incêndios florestais em Portugal. Instituto Técnico de Agronomia. Lisboa, Universidade Técnica de Lisboa. **Mestre**.
- Silva, W. P. d. e Silva, C. P. d. (1998). LabFit Ajuste de Curvas. Paraíba, Brasil.
- Viegas, D. X. (1998). Forest Fire Propagation. Londres, The Royal Society: 2097-2928.
- Viegas, D. X., Afonso, C. e Cruz, M. G. (2002). "Combustibility of Heterogeneous Fuels." Forest Fire Research & Wildland Fire Safety.
- Viegas, D. X., Almeida, M., Miranda, A. I. e Ribeiro, L. M. (2010). "Linear model for spread rate and mass loss rate for mixed-size fuel beds." International Journal of Wildland Fire **19**: 531-540.

# ANEXOS

**Tabela A.1 – Parâmetros e resultados da velocidade de propagação para as misturas de palha-eucalipto dos ensaios realizados no âmbito da dissertação.**

Ref.	T <sub>armz.</sub> (°C)	Repetição	Data	Hora	T <sub>ar</sub> [°C]	HR [%]	M <sub>f1</sub> [%]	M <sub>f2</sub> [%]	H <sub>s1</sub> [%]	H <sub>s2</sub> [%]	M <sub>f1</sub> [kg]	M <sub>f2</sub> [kg]	Alturas de Leito [cm]					R [cm/s]
													5,5	7,0	7,5	7,7	7,0	
PE20_100/0_S1_R1	20	1	01-04-2011	10:00	17,6	65	100	0	14,943	0,000		0,000	5,5	7,0	7,5	7,7	7,0	0,579
PE21_0/100_S1_R1	20	1	01-04-2011	10:40	18,2	64	0	100	0,000	85,977	0,000	1,500	4,0	4,1	3,8	3,7	3,9	0,000
PE22_80/20_S1_R1	20	1	01-04-2011	11:51	18,7	62	80	20	14,351	95,771	0,738	0,316	5,8	6,4	5,8	6,1	6,7	0,503
PE23_60/40_S1_R1	20	1	01-04-2011	13:30	19,8	57	60	40	11,807	132,342	0,541	0,749	5,0	5,8	4,8	4,7	5,7	0,339
PE24_40/60_S1_R1	20	1	01-04-2011	14:35	20,6	53	40	60	10,742	125,530	0,357	1,091	4,7	4,0	4,5	4,0	3,8	0,000
PE25_60/40_S1_R1	20	1	01-04-2011	15:30	20,5	51	60	40	10,668	83,756	0,535	0,593	5,5	5,5	4,5	5,0	5,5	0,330
PE26_50/50_S1_R1	20	1	01-04-2011	16:30	21,0	45	50	50	11,719	109,249	0,450	0,790	4,0	4,9	4,0	3,9	4,1	0,172
PE27_100/0_S1_R1	20	1	01-04-2011	17:00	21,1	45	100	0	11,707	0,000	0,901	0,000	6,5	6,5	7,3	7,0	6,7	0,582
PE28_100/0_S3_R1	40	1	08-04-2011	10:30	21,2	50	100	0	11,297	0,000	0,897	0,000	6,0	6,5	7,0	5,4	7	0,712
PE29_0/100_S3_R1	40	1	08-04-2011	11:30	21,2	49	0	100	0,000	23,130	0,000		3,1	3,5	3,5	4,0	3,3	0,000
PE30_80/20_S3_R1	40	1	08-04-2011	12:30	21,9	47	80	20	9,550	21,496	0,757	0,197	6,0	6,3	6,8	5,8	6,7	0,636
PE31_60/40_S3_R1	40	1	08-04-2011	14:56	22,2	36	60	40	10,803	19,760	0,536	0,386	5,2	5,4	5,6	5,0	5,4	0,588
PE32_40/60_S3_R1	40	1	08-04-2011	15:45	22,5	35	40	60	9,087	13,161	0,352	0,548	4,0	4,1	4,3	4,0	4,5	0,542
PE33_20/80_S3_R1	40	1	08-04-2011	16:30	22,7	35	20	80	10,902	19,617	0,179	0,772	3,4	2,8	3,8	3,0	3	0,248
PE34_0/100_S3_R1	40	1	08-04-2011	16:58	22,7	36	0	100	0,000	28,610	0,000	0,772	3,1	3,1	4,0	3,5	4,1	0,000
PE35_100/0_S3_R1	40	1	08-04-2011	17:25	22,1	36	100	0	10,448	0,000	0,821	0,000	5,1	6,1	5,8	5,8	5,4	0,909
PE36_100/0_S2_R1	30	1	12-04-2011	10:15	20,9	44	100	0	7,527	0,000	0,867	0,000	6,5	6,5	6,1	6,6	6,7	0,838
PE37_0/100_S2_R1	30	1	12-04-2011	10:50	21,3	43	0	100	0,000	79,856	0,000	1,450	3,1	3,7	3,2	3,1	3	0,000
PE38_80/20_S2_R1	30	1	12-04-2011	11:20	21,7	42	80	20	8,401	83,352	0,699	0,296	5,8	5,5	4,9	5,9	5,5	0,514
PE39_60/40_S2_R1	30	1	12-04-2011	12:00	21,4	43	60	40	8,342	71,615	0,524	0,554	5,5	5,4	4,3	5,1	4,7	0,536
PE40_40/60_S2_R1	30	1	12-04-2011	13:00	21,3	44	40	60	9,051	102,224	0,352	0,978	4,5	4,0	3,8	4,3	4,5	0,000
PE41_50/50_S2_R1	30	1	12-04-2011	14:30	21,5	44	50	50	7,608	110,040	0,434	0,847	5,5	5,5	5,6	6,6	4,7	0,385

PE42_100/0_S2_R1	30	1	12-04-2011	15:00	21,4	44	100	0	7,458	0,000	0,867	0,000	6,8	6,8	7,4	6,6	6,4	0,769
PE43_100/0_S1_R2	20	2	15-04-2011	10:40	20,4	37	100	0	10,877	0,000	0,894	0,000	6,6	6,4	6,8	6,1	6,3	0,690
PE44_0/100_S1_R2	20	2	15-04-2011	11:30	20,7	38	0	100	0,000	78,795	0,000	1,442	3,5	3,6	3,5	3,1	3,4	0,000
PE45_80/20_S1_R2	20	2	15-04-2011	12:10	20,8	38	80	20	11,932	68,322	0,722	0,271	5,4	5,0	4,9	5,0	4,9	0,496
PE46_60/40_S1_R2	20	2	15-04-2011	12:45	21,1	36	60	40	7,956	75,685	0,522	0,567	4,0	4,5	5,3	4,4	4,5	0,290
PE47_40/60_S1_R2	20	2	15-04-2011	13:30	21,3	36	40	60	11,682	71,703	0,360	0,831	4,0	4,5	4,3	4,1	4,5	0,000
PE48_50/50_S1_R2	20	2	15-04-2011	15:00	21,6	36	50	50	9,194	77,936	0,440	0,717	4,4	4,1	4,1	4,0	4,7	0,000
PE49_100/0_S1_R2	20	2	15-04-2011	15:45	21,6	37	100	0	13,520	0,000	0,915	0,000	6,5	6,7	6,4	5,8	6	0,619
PE50_100/0_S2_R2	30	2	03-05-2011	11:00	20,2	50	100	0	6,175	0,000	0,841	0,000	6,7	6,4	6,7	6,5	6,4	0,740
PE51_0/100_S2_R2	30	2	03-05-2011	12:10	20,4	50	0	100	0,000	47,505	0,000	1,202	3,1	3,1	3,5	3,4	3,5	0,000
PE52_80/20_S2_R2	30	2	03-05-2011	13:00	20,4	48	80	20	3,420	39,044	0,673	0,276	5,5	5,5	5,6	5,4	5,4	0,513
PE53_60/40_S2_R2	30	2	03-05-2011	15:30	20,9	46	60	40	6,613	46,047	0,533	0,552	4,5	4,8	4,3	4,0	4,5	0,241
PE54_40/60_S2_R2	30	2	03-05-2011	16:30	20,8	46	40	60	6,188	44,088	0,352	0,789	4,1	3,8	4,0	4,1	3,8	0,000
PE55_65/35_S2_R2	30	2	03-05-2011	17:30	20,6	45	65	35	5,976	44,910	0,571	0,460	4,5	4,5	4,6	4,5	4,4	0,394
PE56_100/0_S2_R2	30	2	03-05-2011	18:20	20,6	46	100	0	7,171	0,000	0,857	0,000	6,5	6,6	6,4	6,5	6,5	0,753
PE57_100/0_S3_R2	40	2	05-05-2011	10:30	19,9	52	100	100	7,725	0,000	0,883	0,000	6,2	6,3	6,5	6,5	6,3	0,630
PE58_0/100_S3_R2	40	2	05-05-2011	11:30	20,2	50	0	100	0,000	93,846	0,000	1,199	3,2	3,6	3,6	3,5	3,4	0,000
PE59_80/20_S3_R2	40	2	05-05-2011	12:00	20,2	49	80	20	7,296	62,662	0,706	0,240	5,5	5,5	5,5	6,6	5,6	0,475
PE60_60/40_S3_R2	40	2	05-05-2011	13:00	20,3	49	60	40	9,409	54,206	0,530	0,479	4,4	4,5	4,5	4,7	4,5	0,221
PE61_60/40_S3_R2	40	2	05-05-2011	14:35	20,9	45	60	40	6,794	56,075	0,523	0,447	4,0	4,5	4,5	3,9	4,1	0,321
PE62_50/50_S3_R2	40	2	05-05-2011	15:45	21,1	50	50	50	6,554	41,408	0,436	0,558	3,8	4,0	4,0	4,4	4,0	0,000
PE63_70/30_S3_R2	40	2	05-05-2011	16:30	21,2	52	70	30	4,832	50,729	0,611	0,335	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,501
PE64_100/0_S3_R2	40	2	05-05-2011	17:15	21,3	51	100	0	7,527	0,000	0,878	0,000	6,4	6,4	6,3	6,1	6,1	0,686
PE65_100/0_S1_R3	20	3	18-05-2011	11:00	22,4	66	100	0	6,610	0,000	0,883	0,000	5,5	5,4	5,6	5,5	5,5	0,621
PE66_0/100_S1_R3	20	3	18-05-2011	11:40	22,2	69	0	100	0,000	80,287	0,000	1,203	3,1	3,3	3,6	3,4	3,3	0,000
PE67_80/20_S1_R3	20	3	18-05-2011	12:30	22,1	69	80	20	8,894	86,617	0,702	0,241	4,8	5,0	5,4	5,0	5,0	0,447
PE68_60/40_S1_R3	20	3	18-05-2011	14:30	23,1	66	60	40	8,639	56,522	0,529	0,514	3,8	3,9	4,0	4,5	4,0	0,233
PE69_50/50_S1_R3	20	3	18-05-2011	15:30	23,2	63	50	50	11,258	94,318	0,456	0,643	4,0	3,8	3,8	4,0	3,7	0,000

PE70_70/30_S1_R3	20	3	18-05-2011	16:10	23,3	63	70	30	10,889	57,547	0,639	0,386	4,1	4,5	4,6	4,6	4,8	0,272
PE71_100/0_S1_R3	20	3	18-05-2011	17:15	23,4	64	100	0	10,458	0,000	0,902	0,000	6,0	6,3	5,8	5,9	6,0	0,533
PE72_100/0_S2_R3	30	3	24-05-2011	10:00	24,0	61	100	0	7,939	0,000	0,889	0,000	5,8	6,4	6,2	6,0	5,9	0,564
PE73_0/100_S2_R3	30	3	24-05-2011	11:10	24,2	60	0	100	0,000	97,004	0,000	1,535	4,0	3,8	3,6	3,5	3,9	0,000
PE74_80/20_S2_R3	30	3	24-05-2011	11:30	24,3	59	80	20	8,913	111,429	0,711	0,307	4,6	4,7	5,0	5,1	4,9	0,441
PE75_60/40_S2_R3	30	3	24-05-2011	12:10	24,3	59	60	40	10,359	89,591	0,533	0,614	4,0	4,0	4,1	4,4	4,0	0,287
PE76_50/50_S2_R3	30	3	24-05-2011	14:20	24,7	56	50	50	9,348	116,942	0,448	0,830	4,5	4,1	4,2	4,5	4,4	0,000
PE77_70/30_S2_R3	30	3	24-05-2011	15:10	25,3	49	70	30	10,090	117,917	0,627	0,497	4,8	4,9	4,9	5,0	4,7	0,322
PE78_100/0_S2_R3	30	3	24-05-2011	16:10	25,9	46	100	0	6,992	0,000	0,896	0,000	6,5	6,5	6,1	6,8	6,7	0,659
PE79_100/0_S3_R3	40	3	26-05-2011	11:00	24,4	58	100	0	7,173	0,000	0,897	0,000	6,4	6,7	6,5	6,4	6,4	0,615
PE80_0/100_S3_R3	40	3	26-05-2011	11:40	26,2	58	0	100	0,000	82,353	0,000	1,378	4,1	3,3	3,5	3,5	3,9	0,000
PE81_80/20_S3_R3	40	3	26-05-2011	12:30	26,1	56	80	20	7,234	77,352	0,718	0,760	5,5	5,9	5,8	5,9	5,6	0,436
PE82_60/40_S3_R3	40	3	26-05-2011	14:30	26,6	55	60	40	9,524	77,465	0,538	0,537	4,5	4,6	4,8	4,5	4,9	0,366
PE83_40/60_S3_R3	40	3	26-05-2011	15:20	25,8	56	40	60	8,478	83,158	0,355	0,806	3,7	3,9	4,0	3,8	4,0	0,000
PE84_50/50_S3_R3	40	3	26-05-2011	16:10	25,4	53	50	50	10,753	70,323	0,444	0,671	4,5	4,6	4,0	4,5	4,3	0,274
PE85_100/0_S3_R3	40	3	26-05-2011	17:00	25,7	57	100	0	7,312	0,000	0,888	0,000	6,5	7,0	6,8	6,5	6,8	0,643

**Tabela A.2 – Parâmetros e resultados da velocidade de propagação para as misturas de palha-pinheiro dos ensaios realizados no âmbito da dissertação.**

Ref.	T <sub>armz.</sub> (°C)	Repetição	Data	Hora	T [°C]	HR [%]	M <sub>f1</sub> [%]	M <sub>f2</sub> [%]	H <sub>s1</sub> [%]	H <sub>s2</sub> [%]	M <sub>f1</sub> [kg]	M <sub>f2</sub> [kg]	Alturas de Leito [cm]					R [cm/s]
													7,2	7,9	7,5	7,0	7,5	
PP86_100/0_S1_R1	20	1	08-06-2011	10:30	20,7	42	100	0	11,453	0,000	0,879	0,000	7,2	7,9	7,5	7,0	7,5	0,782
PP87_80/20_S1_R1	20	1	08-06-2011	11:21	21,4	40	80	20	10,434	125,440	0,703	0,299	6,0	6,0	5,5	5,2	5,5	0,656
PP88_60/40_S1_R1	20	1	08-06-2011	12:10	21,8	37	60	40	11,208	124,324	0,527	0,598	5,1	4,9	4,8	5,0	5,2	0,283
PP89_50/50_S1_R1	20	1	08-06-2011	13:05	22,4	37	50	50	11,973	119,481	0,439	0,748	4,5	4,6	5,1	4,5	4,5	0,000
PP90_70/30_S1_R1	20	1	08-06-2011	14:30	21,4	40	70	30	9,628	114,346	0,617	0,473	5,1	5,5	5,2	5,7	5,5	0,537
PP91_100/0_S1_R1	20	1	08-06-2011	15:10	21,5	38	100	0	8,102	0,000	0,877	0,000	6,0	6,6	6,7	6,4	6,1	0,752
PP92_100/0_S2_R1	30	1	09-06-2011	14:15	21,5	49	100	0	9,719	0,000	0,889	0,000	6,8	6,8	6,8	6,1	6,4	0,667
PP93_80/20_S2_R1	30	1	09-06-2011	15:30	21,4	45	80	20	8,972	111,814	0,711	0,291	4,8	5,6	5,5	4,0	5,7	0,622
PP94_60/40_S2_R1	30	1	09-06-2011	15:55	21,7	46	60	40	7,158	114,468	0,533	0,581	4,5	4,5	4,6	4,9	4,5	0,420
PP95_50/50_S2_R1	30	1	09-06-2011	16:40	21,8	46	50	50	9,032	125,551	0,444	0,726	4,9	5,1	4,8	4,4	5,0	0,000
PP96_70/30_S2_R1	30	1	09-06-2011	17:30	21,7	47	70	30	10,256	119,650	0,622	0,436	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,533
PP97_100/0_S2_R1	30	1	09-06-2011	18:30	20,8	48	100	0	10,412	0,000	0,884	0,000	6,5	6,4	6,5	6,8	6,6	0,668
PP98_100/0_S3_R1	40	1	14-06-2011	11:00	23,1	57	100	0	6,554	0,000	0,857	0,000	7,0	7,8	7,4	7,5	7,2	0,989
PP99_80/20_S3_R1	40	1	14-06-2011	11:50	23,8	50	80	20	5,306	98,837	0,685	0,324	5,5	5,5	6,0	5,5	6,2	0,837
PP100_70/30_S3_R1	40	1	14-06-2011	12:45	24,1	53	70	30	6,737	93,103	0,600	0,486	4,8	5,0	5,2	5,0	5,1	0,630
PP101_60/40_S3_R1	40	1	14-06-2011	15:15	23,9	53	60	40	5,672	51,506	0,513	0,538	5,0	4,7	4,5	4,5	4,7	0,585
PP102_50/50_S3_R1	40	1	14-06-2011	16:00	23,7	53	50	50	12,276	35,675	0,428	0,672	4,9	5,2	5,0	4,8	5,4	0,492
PP103_40/60_S3_R1	40	1	14-06-2011	16:50	24,2	52	40	60	4,336	89,474	0,342	0,807	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,000
PP104_100/0_S3_R1	40	1	14-06-2011	16:53	24,2	50	100	0	4,082	0,000	0,847	0,000	6,5	6,8	7,0	7,2	7,0	1,001
PP105_100/0_S1_R2	20	2	29-06-2011	10:30	24,3	50	100	0	10,468	0,000	0,894	0,000	6,9	6,3	6,5	6,9	7,0	0,743
PP106_80/20_S1_R2	20	2	29-06-2011	11:30	25,2	49	80	20	10,762	128,251	0,716	0,301	5,9	5,6	5,5	5,1	5,5	0,640
PP107_60/40_S1_R2	20	2	29-06-2011	12:15	25,6	44	60	40	10,307	173,016	0,537	0,603	5,1	5,3	5,5	5,4	5,6	0,466

PP108_50/50_S1_R2	20	2	29-06-2011	14:40	25,9	43	50	50	9,586	151,269	0,445	0,778	5,4	5,3	5,5	5,5	5,5	0,352
PP109_40/60_S1_R2	20	2	29-06-2011	15:30	25,8	44	40	60	8,836	176,344	0,356	0,934	5,1	5,1	5,5	5,0	5,0	0,000
PP110_70/30_S1_R2	20	2	29-06-2011	16:10	25,8	44	70	30	9,013	161,026	0,624	0,467	5,1	5,0	5,3	5,0	5,1	0,611
PP111_100/0_S1_R2	20	2	29-06-2011	16:20	25,7	42	100	0	9,804	0,000	0,886	0,000	7,2	6,5	7,2	6,4	6,8	0,783
PP112_100/0_S2_R2	30	2	30-06-2011	10:30	25,1	35	100	0	10,108	0,000	0,885	0,000	7,0	7,5	7,6	7,9	7,5	0,947
PP113_80/20_S2_R2	30	2	30-06-2011	11:35	26,6	34	80	20	10,089	106,639	0,708	0,332	6,0	6,0	6,4	6,5	6,7	0,753
PP114_60/40_S2_R2	30	2	30-06-2011	13:30	27,0	33	60	40	9,348	134,884	0,531	0,664	5,2	6,0	6,5	5,5	5,7	0,485
PP115_40/60_S2_R2	30	2	30-06-2011	14:40	27,0	31	40	60	10,989	142,157	0,354	0,833	5,0	4,8	4,6	4,9	4,5	0,425
PP116_30/70_S2_R2	30	2	30-06-2011	15:30	26,3	32	30	70	10,245	134,101	0,266	0,972	4,5	4,7	4,1	4,3	4,7	0,000
PP117_50/50_S2_R2	30	2	30-06-2011	16:00	26,6	30	50	50	7,921	114,893	0,443	0,694	5,1	5,4	5,5	5,7	6,0	0,541
PP118_100/0_S2_R2	30	2	30-06-2011	16:40	26,1	32	100	0	10,841	0,000	0,890	0,000	6,7	6,6	7,0	6,9	6,8	0,890
PP119_100/0_S3_R2	40	2	06-07-2011	9:30	23,7	56	100	0	8,261	0,000	0,865	0,000	7,0	7,5	7,3	7,5	7,7	0,859
PP120_80/20_S3_R2	40	2	06-07-2011	10:30	25,0	56	80	20	8,590	148,500	0,692	0,336	6,0	6,1	6,5	5,5	6,3	0,681
PP121_60/40_S3_R2	40	2	06-07-2011	11:15	25,2	55	60	40	8,137	152,525	0,519	0,672	5,5	5,3	5,0	5,3	5,5	0,433
PP122_40/60_S3_R2	40	2	06-07-2011	11:50	24,8	54	40	60	7,709	118,966	0,346	1,008	5,2	5,3	5,8	5,1	5,5	0,266
PP123_30/70_S3_R2	40	2	06-07-2011	12:15	24,7	49	30	70	7,082	148,241	0,260	1,122	5,1	4,7	4,5	5,2	4,8	0,000
PP124_50/50_S3_R2	40	2	06-07-2011	12:40	24,6	45	50	50	8,534	178,652	0,433	0,801	5,7	5,7	5,2	4,9	5,5	0,414
PP125_100/0_S3_R2	40	2	06-07-2011	13:15	24,4	52	100	0	8,913	0,000	0,875	0,000	7,5	7,3	7,0	7,3	7,1	0,859



(a)

(b)

**Foto A.1 – montagem de um ensaio com um leito de 100% palha (a); Leito com uma mistura de 80% palha e 20% de eucalipto (b)**



(a)

(b)

**Foto A.2 – Leito com uma mistura de 70% de palha com 30% de eucalipto (a); leito com uma mistura de 60% de palha com 40% de eucalipto (b).**



(a)

(b)

**Foto A.3 – Leito com uma mistura de 50% de palha com 50% de eucalipto (a); leito com uma mistura de 40% de palha com 60% de eucalipto (b).**



**Foto A.3 – Leito com uma mistura de 30% de palha com 70% de eucalipto (a); leito com uma mistura de 20% de palha com 80% de eucalipto (b).**