



FCTUC FACULDADE DE CIÊNCIAS
E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE COIMBRA

DEPARTAMENTO DE
ENGENHARIA MECÂNICA

Estudo da probabilidade de ignição por focos secundários

Estudo de um conjunto de pares de partículas/leito combustível

Dissertação apresentada para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia do Ambiente na Especialidade de Tecnologia e Gestão do Ambiente

Autor

Teresa Margarida Simões Batista

Orientador

Professor Doutor Domingos Xavier Filomeno Carlos Viegas

Coorientador

Mestre Ricardo Filipe Oliveira

Júri

Presidente Professor Doutor António Rui de Almeida Figueiredo

Professor Associado com Agregação da Universidade de Coimbra

Vogais Professor Doutor Domingos Xavier Filomeno Carlos Viegas

Professor Catedrático da Universidade de Coimbra

Professor Doutor José Manuel Baranda Ribeiro

Professor Auxiliar da Universidade de Coimbra

Mestre Ricardo Filipe Oliveira

Investigador da ADAI, Universidade de Coimbra

Coimbra, Julho, 2012

Agradecimentos

O trabalho que aqui se apresenta não teria sido possível sem a colaboração e apoio de algumas pessoas, às quais não posso deixar de transmitir as minhas palavras de apreço e gratidão.

Em primeiro lugar ao Professor Domingos Xavier Viegas, por me ter aceite como sua aluna de mestrado, pelo tema, pela partilha do saber, pelas suas contribuições para o desenvolvimento deste trabalho e por me ter inserido na equipa do CEIF.

Ao Professor José Baranda Ribeiro por toda a disponibilidade, ajuda e esclarecimentos de dúvidas.

Ao Mestre Ricardo Filipe Oliveira, meu coorientador, pela disponibilidade, orientação, colaboração, apoio e ajuda nos ensaios laboratoriais e no tratamento de dados. Ao Mestre Rafael Raposo por todo o apoio demonstrado e ainda à restante equipa do CEIF pelo acolhimento.

A todos os amigos, que estiveram sempre próximos e de alguma maneira contribuíram para tornar estes anos melhores. Agradeço por todo o apoio, amizade, companheirismo e por todas as frases de incentivo.

À minha família, Mãe, Pai e Mano pelo incentivo, pelo apoio incondicional e paciência ao longo destes cinco anos. À Alexandra pela ajuda nesta etapa final.

A todos deixo aqui o meu agradecimento sincero.

Resumo

O presente trabalho desenvolve um estudo sobre o comportamento extremo do fogo, nomeadamente o que está associado aos incêndios florestais originados por focos secundários. A propagação destes incêndios caracteriza-se pela libertação de partículas em combustão (com ou sem chama), pela sua ascensão, pelo transporte devido ao vento e por fim o seu contacto com um leito combustível. Apesar de ter sido alvo de vários estudos, este fenómeno continua a apresentar uma elevada incerteza, devido à imprevisibilidade de queda das partículas e à sua evolução para incêndios de grandes dimensões.

O trabalho apresentado constitui um estudo do momento em que a partícula em combustão contacta com o leito combustível, tendo como objetivo o estudo da probabilidade de ignição de leitos combustíveis por partículas em combustão.

Os pares de partícula/leito combustível utilizados neste trabalho foram, a pinha de *Pinus halepensis* sobre folhada de *Eucalyptus globulus*, a casca de *Eucalyptus globulus* sobre folhada de *Pinus halepensis* e pinha de *Pinus halepensis* sobre palha de *Avena sativa*, existentes na floresta de Portuguesa. Foi ainda objetivo do presente trabalho o estudo das características físicas, químicas e térmicas de cada partícula e leito combustível utilizado, bem como o efeito do teor de humidade, tendo sido realizadas análises específicas, como análise química elementar, análise calorimétrica, TGA e DTA.

Constatou-se que as características físicas das partículas e dos leitos combustíveis têm influência quer nos resultados das análises térmicas, quer na degradação de massa, e que a posição de queda da partícula é determinante na probabilidade de ignição de um leito combustível. O atraso à ignição foi dependente do teor de humidade, tendo sido mais baixo para o par casca de *Eucalyptus globulus* sobre folhada de *Pinus halepensis*.

Palavras-chave: Comportamento extremo do fogo, focos secundários, análises térmicas, probabilidade de ignição, partículas em combustão, leito combustível.

Abstract

The following thesis develops a study about the extreme fire behavior, in particularly the forest fires caused by spot fires. The spread of these fires is characterized by the release of firebrands (with or without flame), by its rise, the transport due to wind and finally its contact with a fuel bed. Despite being the aim of several studies, it still has a high uncertainty due to the unpredictability of falling particles and its evolution to large fires.

The presented work essentially consist in a study of the moment at which firebrand contact with fuel bed, aiming to study the probability of ignition of fuel beds by firebrands.

The pairs of particle/ fuel bed used were pine *Pinus halepensis* litter on *Eucalyptus globulus*, the bark of *Eucalyptus globulus* on litter of *Pinus halepensis* and *Pinus halepensis* pine on litter of straw on *Avena sativa*, found on the portuguese forest.

It was also aimed to study the physical, chemical and thermal properties of each particle and fuel bed used, as well as the effect of moisture content, specific analyses were carried out, such as elemental chemical analysis, scanning calorimetry, TGA and DTA.

It was found that the physical characteristics of the particles and fuels beds influenced the results of thermal analysis, as for the mass degradation, and that the position of landing of the particle is decisive to the probability of ignition of a fuel bed. The ignition delay was dependent of the moisture content, being lower on the pair bark of *Eucalyptus globulus*/litter of *Pinus halepensis*.

Keywords Extreme fire behaviour, Spot fires, Probability of ignition, thermal analysis, firebrands, fuel beds.

Índice

Índice de Figuras	v
Índice de Tabelas	vii
Simbologia e Siglas	viii
Simbologia.....	viii
Siglas	x
1. Introdução.....	1
1.1. Motivação e Objetivos	1
1.2. Revisão Bibliográfica.....	2
1.3. Problemática dos incêndios florestais.....	3
1.4. Comportamento extremo do fogo	6
1.5. Os focos secundários	7
2. Programa experimental.....	9
2.1. Metodologia experimental	9
2.1.1. Caracterização física das partículas e dos leitos combustíveis e resposta às condições ambientais.....	10
2.1.2. Análise química elementar das partículas e dos leitos combustíveis	11
2.1.3. Análise das propriedades térmicas das partículas e dos leitos combustíveis	12
2.1.4. Ensaios laboratoriais para determinação da probabilidade de ignição	14
2.2. Tratamento de dados	16
3. Resultados e discussão	18
3.1. Análise química elementar – teor de Azoto, Carbono, Hidrogénio, Enxofre e Oxigénio	18
3.2. Caracterização térmica.....	19
3.2.1. Poder calorífico superior e inferior.....	19
3.2.2. Comportamento das partículas e dos leitos combustíveis durante um processo térmico.....	22
3.3. Análise dos ensaios de ignição	30
3.3.1. Probabilidade de ignição	32
3.3.2. Atraso à ignição vs. Teor de humidade	35
3.3.3. Taxa média de perda de massa	41
4. Conclusão	45
Referências bibliográficas	47
Apêndice A – curvas médias	50

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Incêndios florestais e área ardida entre 1990-2010 (Fonte: AFN, 2012).....	5
Figura 2 - a) pinha de <i>Pinus halepensis</i> , b) casca de <i>Eucalyptus globulus</i>	9
Figura 3 - a) leito de folhada de <i>Eucalyptus globulus</i> , b) leito de folhada de <i>Pinus halepensis</i> , c) leito de palha de <i>Avena sativa</i>	9
Figura 4 - Calorímetro de bomba de oxigénio.....	12
Figura 5 - <i>Rheometric Scientific STA 1500</i>	14
Figura 6 - Pinha de <i>Pinus halepensis</i> retida no dispositivo e leito combustível de folhada de <i>Eucalyptus globulus</i>	15
Figura 7 - a) Pinha de <i>Pinus halepensis</i> em combustão, b) Pinha de <i>Pinus halepensis</i> sobre leito de folhada de <i>Eucalyptus globulus</i> , c) Leito de folhada de <i>Eucalyptus globulus</i> em combustão.....	15
Figura 8 - TGA e DTA à pinha de <i>Pinus halepensis</i>	22
Figura 9 - DTG pinha de <i>Pinus halepensis</i>	22
Figura 10 - TGA e DTA à casca de <i>Eucalyptus globulus</i>	23
Figura 11 - DTG casca de <i>Eucalyptus globulus</i>	23
Figura 12 - TGA e DTA à folhada de <i>Pinus halepensis</i>	24
Figura 13 - DTG folhada de <i>Pinus halepensis</i>	25
Figura 14 - TGA e DTA às folhas de <i>Eucalyptus globulus</i>	26
Figura 15 - DTG folhas de <i>Eucalyptus globulus</i>	26
Figura 16 - TGA e DTA à palha de <i>Avena sativa</i>	27
Figura 17 - DTG palha de <i>Avena sativa</i>	27
Figura 18 - TGA e DTA às partículas	28
Figura 19 - TGA e DTA aos leitões combustíveis	29
Figura 20 - Probabilidade de ignição das partículas em combustão de casca de <i>Eucalyptus globulus</i> sobre folhada de <i>Pinus halepensis</i>	32
Figura 21 - Probabilidade de ignição das partículas em combustão de pinhas de <i>Pinus halepensis</i> sobre folhada de <i>Eucalyptus globulus</i>	33
Figura 22 - Probabilidade de ignição das partículas em combustão de pinhas de <i>Pinus halepensis</i> sobre palha de <i>Avena sativa</i>	33
Figura 23 - Probabilidade de ignição das partículas de pinhas de <i>Pinus halepensis</i> sobre folhada de <i>Eucalyptus globulus</i> e palha de <i>Avena sativa</i> em função dos teores de humidade	34
Figura 24 - Probabilidade de ignição das partículas de casca de <i>Eucalyptus globulus</i> sobre folhada de <i>Pinus halepensis</i> em função dos teores de humidade	35
Figura 25 - Atraso à ignição em função dos teores de humidade para os pares de partícula/leito combustível	36
Figura 26 - Atraso à ignição em função dos teores de humidade para os pares de partícula/leito combustível, com teores de humidade entre 10% e 20%	36
Figura 27 - Valores médios do atraso à ignição em função dos teores de humidade.....	37
Figura 28 – Efeito da partícula no atraso à ignição no intervalo de teor de humidade até 30%	38
Figura 29 - Atraso à ignição em função do teor de humidade e da posição de queda da pinha de <i>Pinus halepensis</i>	39

Figura 30 – Efeito do leito combustível no atraso à ignição no intervalo de teor de humidade até 30%	40
Figura 31 - Taxa média de perda de massa das partículas em combustão de pinhas de <i>Pinus halepensis</i> sobre folhada de <i>Eucalyptus globulus</i>	41
Figura 32 - Taxa média de perda de massa das partículas em combustão de casca de <i>Eucalyptus globulus</i> sobre folhada de <i>Pinus halepensis</i>	42
Figura 33 - Taxa média de perda de massa das partículas em combustão de pinhas de <i>Pinus halepensis</i> sobre palha de <i>Avena sativa</i>	43

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Análise química elementar da pinha de <i>Pinus halepensis</i> e casca de <i>Eucalyptus globulus</i>	18
Tabela 2 - Análise química elementar da folhada de <i>Pinus halepensis</i> , folha de <i>Eucalyptus globulus</i> e palha de <i>Avena sativa</i>	19
Tabela 3- Massa de amostra, resíduo final e PCS da pinha de <i>Pinus halepensis</i> e casca de <i>Eucalyptus globulus</i>	19
Tabela 4 - Massa de amostra, resíduo final e PCS da folhada de <i>Pinus halepensis</i> , folha de <i>Eucalyptus globulus</i> e palha de <i>Avena sativa</i>	20
Tabela 5 - PCI em base seca e PCI com humidade M para a pinha e folhada de <i>Pinus halepensis</i> , casca e folhas de <i>Eucalyptus globulus</i> e palha de <i>Avena sativa</i>	21
Tabela 6 - Propriedades das partículas e leitos testados.....	30
Tabela 7 - Propriedades dos ensaios de ignição	31
Tabela 8 - Número de ignições e não ignições dos ensaios de probabilidade de ignição ...	31

SIMBOLOGIA E SIGLAS

Simbologia

$w(H)_s$ – Teor de hidrogénio (% em massa) do combustível, em base seca

$w(O)_s$ – Teor de oxigénio (% em massa) do combustível, em base seca

$w(N)_s$ – Teor de azoto (% em massa) do combustível, em base seca

M – Teor de humidade (%)

σ – Desvio padrão

y1 – Soma da média de valores com o desvio padrão

y2 – Subtração da média de valores com o desvio padrão

CEg_FPh – Casca de *Eucalyptus globulus* sobre folhada de *Pinus halepensis*

PPh_FEg – Pinha de *Pinus halepensis* sobre folhada de *Eucalyptus globulus*

PPh_Palha – Pinha de *Pinus halepensis* sobre palha de *Avena sativa*

PPh_FPh – Pinha de *Pinus halepensis* sobre folhada de *Pinus halepensis*

PPh – FEg cima – Pinha de *Pinus halepensis*, com a chama voltada para cima, sobre folhada de *Eucalyptus globulus*

PPh_FEg baixo – Pinha de *Pinus halepensis*, com a chama voltada para baixo, sobre folhada de *Eucalyptus globulus*

PPh_Palha cima – Pinha de *Pinus halepensis*, com a chama voltada para cima, sobre palha de *Avena sativa*

PPh_Palha baixo – Pinha de *Pinus halepensis*, com a chama voltada para baixo, sobre palha de *Avena sativa*

PPh_FPh cima – Pinha de *Pinus halepensis*, com a chama voltada para cima, sobre folhada de *Pinus halepensis*

PPh_FPh baixo – Pinha de *Pinus halepensis*, com a chama voltada para baixo, sobre folhada de *Pinus halepensis*

mf (%) – Teor de humidade (%)

Hr – humidade relativa do ar

T_a – Temperatura ambiente

DTA Casca – DTA à casca de *Eucalyptus globulus*

DTA Folhada – DTA à folhada de *Pinus halepensis*

DTA Folhas – DTA às folhas de *Eucalyptus globulus*

DTA Palha – DTA à palha de *Avena sativa*

DTA Pinha – DTA à pinha de *Pinus halepensis*

DTG Casca – DTG à casca de *Eucalyptus globulus*

DTG Folhada – DTG à folhada de *Pinus halepensis*

DTG Folhas – DTG às folhas de *Eucalyptus globulus*

DTG Palha – DTG à palha de *Avena sativa*

DTG Pinha – DTG à pinha de *Pinus halepensis*

TGA Casca – TGA à casca de *Eucalyptus globulus*

TGA Folhada – TGA à folhada de *Pinus halepensis*

TGA Folhas – TGA às folhas de *Eucalyptus globulus*

TGA Palha – TGA à palha de *Avena sativa*

TGA Pinha – TGA à pinha de *Pinus halepensis*

Siglas

DEM – Departamento de Engenharia Mecânica

ADAI – Associação para o Desenvolvimento da Aerodinâmica Industrial

LEIF – Laboratório de Estudos sobre Incêndios Florestais

LAI – Laboratório da Aerodinâmica Industrial

LEDAP – Laboratório de Energética e Detónica

PI – Probabilidade de ignição

PCI – Poder Calorífico Inferior

PCS – Poder Calorífico Superior

DTA – Análise térmica diferencial

TGA – Análise termogravimétrica

DTG – Termogravimetria derivada

1. INTRODUÇÃO

1.1. Motivação e Objetivos

O interesse pelo tema de dissertação prende-se com a necessidade de compreender o comportamento do fogo, nomeadamente o que está associado aos incêndios florestais originados por focos secundários. A imprevisibilidade do local de queda das partículas e a sua evolução para incêndios de grandes dimensões constituem um dos grandes problemas na gestão do combate, provocando por vezes um elevado número de vítimas mortais. A exemplo do que foi anteriormente exposto, temos o caso recente de Monte Carmelo em Israel, onde dezenas de pessoas perderam a vida.

O incêndio de Monte Carmelo ocorreu em Dezembro de 2010, tendo uma propagação muito rápida, devido à progressão por focos secundários. Este incêndio originou um elevado número de mortos, ao incendiar-se um autocarro com guardas prisionais que seguiam para ajudar na evacuação de uma prisão situada próxima de uma zona florestal no Monte Carmelo, nos arredores de Haifa.

Acontecimentos como este são possíveis de ocorrer em Portugal, uma vez que os focos secundários são um fenómeno bastante comum, no entanto, ainda com escassa informação. É assim importante compreender a origem dos focos secundários, bem como a influência das várias espécies florestais, das suas características e das condições ambientais a que estão sujeitas. Pode assim definir-se o objetivo geral como a análise dos mecanismos de ignição de focos secundários em incêndios florestais, tendo como objetivo específico o estudo das características das partículas em combustão de pinhas de *Pinus halepensis* sobre folhada de *Eucalyptus globulus* e casca de *Eucalyptus globulus* sobre leitos homogéneos de folhada de *Pinus halepensis*. Será ainda dada continuação ao estudo das características das partículas em combustão de pinhas de *Pinus halepensis* sobre leitos homogéneos de palha de *Avena sativa*. Pretende-se assim contribuir para o conhecimento da probabilidade de ignição (PI) de diferentes leitos combustíveis existentes em Portugal, utilizando partículas com potencial para originar focos secundários.

1.2. Revisão Bibliográfica

Os incêndios florestais têm suscitado preocupação à comunidade científica, tendo surgido ao longo dos anos muitas investigações sobre a temática. Estas têm vindo a contribuir de modo significativo para a perceção do fenómeno, ajudando na prevenção de acidentes e contribuindo para uma melhoria na gestão do combate.

Na década de 40 (1940) foram realizados ensaios laboratoriais por Curry e Fons (1940) de modo a compreender o comportamento do fogo. Estes autores demonstraram com as suas investigações que a velocidade do vento, a dimensão e humidade das partículas e a topografia influenciam o comportamento do fogo.

Albini (1976) desenvolveu um trabalho sistemático sobre o comportamento do fogo, congregando modelos teóricos e empíricos e discutiu os modelos matemáticos, apresentando as suas capacidades e limitações. Os modelos apresentados são o *Fire-DangerRating*, *FireControl Planning* e *Prescribed Fire Planning*.

Um parâmetro de elevada importância no comportamento do fogo é o teor de humidade dos combustíveis florestais, devido à sua implicação em diversos aspetos de risco de incêndio, propagação e ecologia do fogo, como referido por Lopes *et al.* (2010). Estes autores apresentam a caracterização dos teores de humidade de combustíveis finos no centro de Portugal. As diversas características dos combustíveis florestais têm sido também alvo de estudo. Liodakis *et al.* (2002) consideram que o conhecimento das características térmicas dos combustíveis pode facilitar a compreensão do mecanismo de inflamabilidade, tendo estudado as características de ignição espontânea de combustíveis florestais Mediterrânicos, usando métodos de análise térmica.

Os modelos de fogos têm sido alvo de diversas classificações, podendo ser divididos em fogos subterrâneos, fogos de superfície, fogos de copas e fogos secundários, como referido por Pastor *et al.* (2003).

O fenómeno de fogos secundários é exposto como de difícil compreensão por Manzello *et al.* (2005). No mesmo trabalho refere-se que as faúlhas produzidas e libertadas em árvores durante os incêndios são arrastadas na atmosfera por ventos, podendo ser transportadas a longas distâncias e inflamar leitos combustíveis quando atingem o repouso. Manzello *et al.* investigam a ignição de leitos combustíveis devido ao impacto de faúlhas,

concluindo que existem parâmetros importantes como o fluxo de faúlhas, o seu tamanho e ainda o fluxo de ar na propensão de ignição de um leito combustível.

No trabalho de Manzello *et al.* (2007) é estudada a distribuição de massa e tamanho de faúlhas geradas pela queima de abetos de Douglas (*Pseudotsuga menziesii*). É referida a importância na mitigação do fogo e no impedimento de este se espalhar, através da compreensão da formação de faúlhas e dos mecanismos pelos quais estas podem inflamar leitos de combustível.

A capacidade das faúlhas provocarem ignição em leitos combustíveis foi estudada por Ganteaume *et al.* (2009), tendo concluído que a capacidade destas inflamarem leitos combustíveis é maior quando existe chama e na ausência de fluxo de ar.

O estado atual da investigação relacionada com a produção de faúlhas foi revisto em 2010, por Koo *et al.* Neste trabalho é referido o fenómeno de focos secundários como dividido em três mecanismos sequenciais, a geração de faúlhas, o transporte e a ignição do combustível quando é atingido o repouso. É ainda referido que as condições climáticas, principalmente o vento, são o fator mais crítico na identificação de ignição. De acordo com Tarifa *et al.* (1965) e Albini (1979), citados por Koo *et al.* (2010), para uma dada velocidade de vento, a distância máxima a que podem ocorrer focos secundários depende do tempo de vida das faúlhas a arder.

Têm sido desenvolvidos vários estudos ao longo do tempo, no entanto, há ainda fenómenos com elevada incerteza e novos modelos a desenvolver. É assim importante que trabalhos nesta área se continuem a praticar, de modo a possibilitar cada vez mais conhecimento.

1.3. Problemática dos incêndios florestais

O fogo é um fenómeno indissociável da vida do Homem, podendo ser tratado como uma ferramenta indispensável para a gestão de combustíveis, como é o caso das queimadas, ou queimas de restolho agrícola, numa utilização controlada (Raposo, 2011). Pelo contrário, o fogo pode ser prejudicial, levando a grandes incêndios, o que desencadeia danos avultados para o ambiente e para a vida do Homem. De acordo com Viegas (2009), os incêndios florestais são geralmente reconhecidos como uma ameaça ao meio ambiente e

na maioria das vezes os seus efeitos diretos são quantificados em termos de número de incêndios, de área ardida, casas destruídas ou perdas económicas.

A destruição ambiental provocada pelos incêndios florestais causa um duplo impacto, por um lado afeta as espécies enquanto elementos de determinado ecossistema, assim como as relações entre os seus diferentes elementos. Por outro, a fauna e a flora existentes antes do fogo são substituídas por espécies adaptadas aos incêndios florestais, espécies pirófitas (Oliveira, 2010).

Esta mudança nos ecossistemas afeta, direta e indiretamente, o Homem, visto este estar em constante interação com o meio que o rodeia. Interação essa que passa pelo contacto com as emissões de gases e partículas, que embora difíceis de quantificar, são responsáveis por grandes impactes ambientais, interagindo quer com Homem, quer com a atmosfera e levando a alterações climáticas (Rocha, 2005). Devido à destruição do coberto vegetal o solo fica exposto aos agentes erosivos, originando fenómenos de deslizamentos e cheias durante as chuvas pós incêndio. Consequentemente o transporte de cinzas, que contém um elevado número de poluentes, para rios e albufeiras, alteram a qualidade da água. Há ainda que ter em conta os fatores económicos, visto que as florestas são importantes fornecedoras de matérias-primas para os mais diversos setores (Rocha, 2005).

O Homem deve assim encarar os incêndios florestais como um problema com o qual tem de lidar, conhecendo o fenómeno e o seu comportamento. Em Portugal os anos críticos a partir dos quais os incêndios florestais começaram a atingir proporções preocupantes principiaram na década de 80, devido a mudanças de hábitos na sociedade, tais como o abandono de áreas agroflorestais, mudanças a nível socioeconómico, entre outras (Lourenço e Malta, 1993). Além destas razões, Portugal sofre influência de clima mediterrânico, o que faz com que possua invernos amenos e chuvosos e verões quentes e secos, favorecendo a ocorrência de incêndios.

Através da análise de dados relativos aos incêndios florestais ocorridos em Portugal continental entre 1990 e 2010, figura 1, verifica-se que ao longo dos anos Portugal tem sido bastante afetado em relação ao número de incêndios florestais e área ardida. A partir do ano 2000, observa-se que, apesar do número de ocorrências, há uma diminuição da área ardida, com exceção dos anos 2003, onde o estado do tempo, em certas regiões de Portugal continental, foi favorável ao desenvolvimento de incêndios (Lourenço, 2007), e 2005, onde se verificou também um grande aumento de área ardida. Pode ainda

observar-se que o maior número de incêndios florestais ocorre a Norte do Tejo, apresentando maior área ardida a região interior centro e ainda a Serra Algarvia.

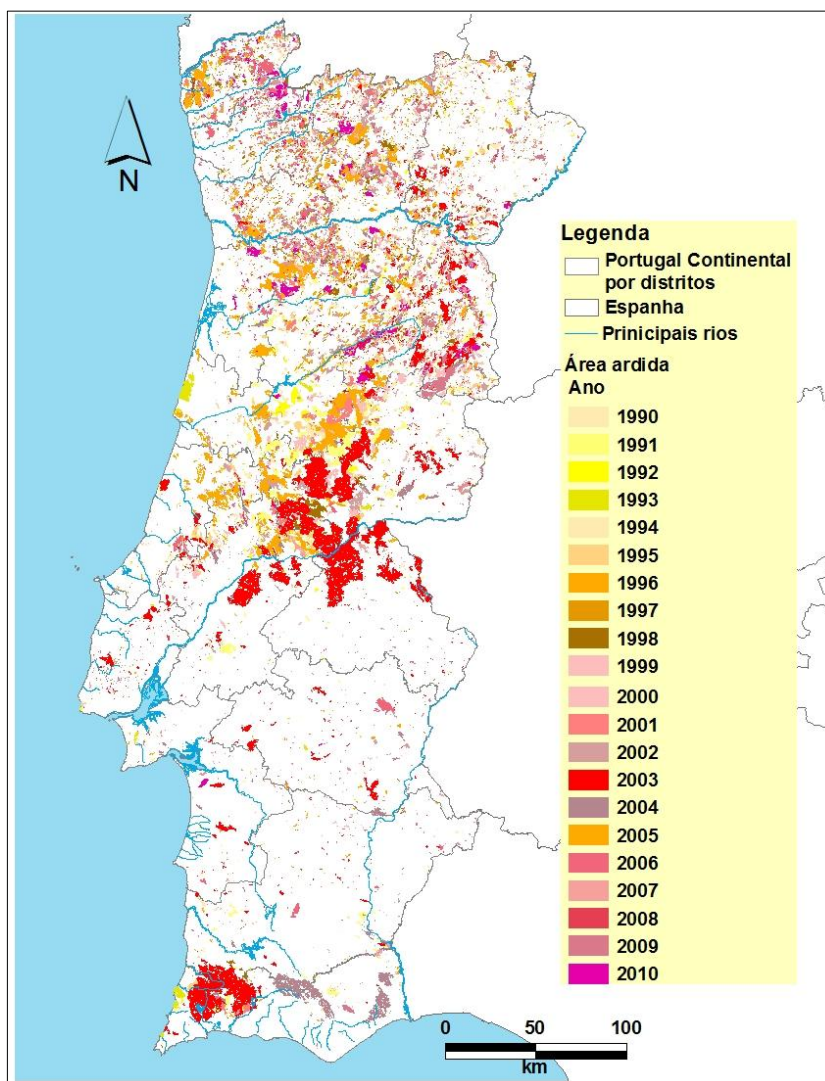


Figura 1 - Incêndios florestais e área ardida entre 1990-2010 (Fonte: AFN, 2012)

Fazendo uma comparação entre os países mediterrânicos (Portugal, Espanha, França, Itália e Grécia) verifica-se que Portugal atingiu proporções alarmantes em relação à quantidade de área ardida. A partir do ano de 1995, com exceção de 1997, 1999, 2000 e 2004, Portugal apresentou sempre a maior área ardida entre os cinco países mediterrânicos. Segundo dados da União Europeia, nos últimos anos metade da área destruída nestes cinco países pertencia a Portugal (Vieira, 2006).

Nos últimos anos os sucessivos governos investiram em novos meios de combate, criaram diversos planos, de entre os quais se salienta o Plano Nacional de Defesa da Floresta Contra Incêndios (PNDFCI) e entenderam a investigação e a formação como medidas fundamentais na mitigação dos incêndios florestais. Podem destacar-se os programas levados a cabo pela ENB (Escola Nacional de Bombeiros), os protocolos com centros de estudos sobre incêndios florestais, a criação de Unidades Locais de Formação (ULFs, publicação do Desp.21722/2008), entre outras, mostrando assim preocupação com esta problemática. A situação presente levanta alguma preocupação, visto que se caminha para uma situação contrária, onde os investimentos relacionados com os incêndios florestais, um pouco à semelhança do restante, têm sofrido reduções.

1.4. Comportamento extremo do fogo

O comportamento extremo do fogo é de difícil compreensão e definição, podendo ser entendido como o conjunto de características e propriedades do fogo que impedem o seu controlo e supressão em segurança, utilizando os recursos e conhecimentos técnicos disponíveis (Viegas, 2012). Os fogos podem ser divididos em subterrâneos, superfície e copas, no entanto, quando estão presentes determinadas características como elevadas velocidades de propagação, presença de tornados, colunas de convecção e projeção de partículas, esta divisão é reformulada surgindo o conceito de comportamento extremo, que abrange determinados tipos de fogo.

O fogo eruptivo classifica-se como comportamento extremo e caracteriza-se por um aumento drástico da velocidade de propagação, mantendo as condições de fronteira constantes (Viegas, 2006). Neste tipo de comportamento estão também abrangidos os fogos de copas, onde o fogo avança da copa de uma árvore para outra gerando uma elevada energia. As ações de supressão a este tipo de fogo são restritas, o combate direto e em segurança é normalmente impossível até que haja uma mudança no tipo de combustível, nas condições topográficas ou meteorológicas (Alexander e Cruz, 2011).

Os focos secundários devido à sua complexidade, estão também relacionados com este comportamento, sendo alvo de explicação no subcapítulo 1.5. Considera-se ainda como comportamento extremo, o fogo de salto onde a interação de duas frentes, que formam um ângulo entre si, causam o aumento da velocidade de propagação para

velocidades nunca antes registadas (Raposo, 2011), e as conflagrações, onde ocorrem grandes incêndios em larga escala, devido a condições meteorológicas extremas (Viegas, 2012).

1.5. Os focos secundários

Durante um fogo de superfície ou de um fogo de copas pode ocorrer o fenómeno denominado por focos secundários. Este caracteriza-se pela libertação de uma partícula em combustão, com ou sem chama, pela sua ascensão, pelo seu transporte devido ao vento e por fim o seu contacto com um leito combustível (Almeida, 2011). No momento do contacto pode ocorrer uma ignição, desencadeando assim um foco secundário e a sua evolução. Este fenómeno pode ser classificado de acordo com a distância a que ocorre, podendo ser de curta distância (até 50 m), de média distância (50 a 500 m) e de longa distância (mais de 500 m) (Viegas, 2012). Até à data a maior distância registada foi de 29 km em Vitória, Austrália, nos incêndios de 1965 (McArthur, 1967). Assim, os focos secundários originados por projecções de longa distância podem tornar-se independentes e evoluírem para incêndios com maior magnitude do que o que lhe deu origem.

A formação de um foco secundário depende de diversos fatores, como a intensidade do fogo principal, quanto mais intenso for um fogo, mais fácil é a libertação e elevação das partículas, das condições meteorológicas, como o vento, que ao facilitar a libertação e aumentar a distância de transporte da partícula faz com que seja considerado um fator bastante crítico, como referido por Koo *et al.* (2010), e o teor de humidade dos combustíveis, que pode contribuir para a alteração da probabilidade de ignição. O local onde a partícula é libertada é também decisivo na formação de um foco secundário, uma vez que o tamanho das árvores pode dificultar a ascensão da partícula, árvores mais altas impedem a elevação das partículas de árvores mais baixas. A topografia do terreno, devido à influência das diferenças de altitude entre as zonas de emissão e receção das partículas, pode também influenciar a formação de um foco secundário, como referido por Oliveira (2010).

O tipo de partícula é muito importante na geração de um foco secundário, as características como o tamanho, forma e idade vão influenciar o tempo de combustão e a facilidade de libertação. Albini (1979) considera que partículas como caruma, cascas de

árvores, escamas de pinhas, pinhas abertas, pedaços de musgo seco e ainda pequenos ramos têm um elevado potencial para originar um foco secundário. O leito combustível onde a partícula cai é também uma condição determinante na PI, já que esta depende de diversas características como a porosidade, a humidade, a inflamabilidade, entre outras.

O presente trabalho constitui um estudo da quarta fase do processo de focos secundários, assim é de elevada importância o conhecimento das características físicas, químicas e térmicas da partícula, bem como do leito combustível, de modo a estabelecer-se uma relação entre a PI, características, teor de humidade e condições ambientais.

2. PROGRAMA EXPERIMENTAL

2.1. Metodologia experimental

O trabalho experimental foi realizado com combustíveis florestais de *Pinus halepensis* (pinhas e folhada), recolhidos na Serra da Boa Viagem, local onde prolifera esta espécie, combustíveis florestais de *Eucalyptus globulus* (casca e folhas) e palha de *Avena sativa*, recolhidos na região de Coimbra (figura 2 e figura 3).

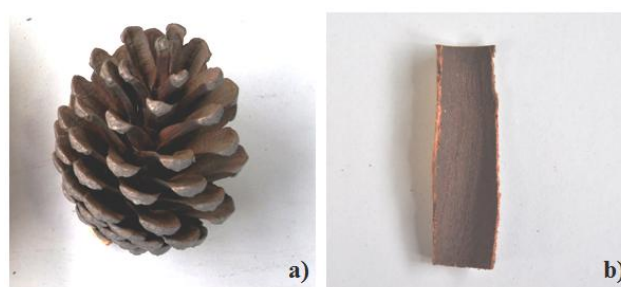


Figura 2 - a) pinha de *Pinus halepensis*, b) casca de *Eucalyptus globulus*



Figura 3 - a) leito de folhada de *Eucalyptus globulus*, b) leito de folhada de *Pinus halepensis*, c) leito de palha de *Avena sativa*

A metodologia experimental teve o seu desenvolvimento em três fases. Na primeira procedeu-se à caracterização física das partículas e dos leitos de combustível, seguindo-se os ensaios laboratoriais para determinação da PI. Esta fase foi concretizada no Laboratório da Aerodinâmica Industrial, LAI, local que reúne as condições técnicas e materiais para o desenvolvimento dos ensaios. Foram realizados 110 ensaios para cada par de partícula/leito combustível, sendo estes divididos em séries de 5. Em cada série foram

analisadas fisicamente todas as partículas utilizadas, bem como os leitos combustíveis, que mantinham as suas propriedades ao longo de uma série.

Numa segunda fase foram efetuadas análises químicas elementares, uma para cada tipo de partícula e leito combustível. A realização destas análises ficou ao cargo do Departamento de Engenharia Química da Universidade de Coimbra, visto tratar-se de análises que requerem instrumentos e técnicos específicos, existentes nestas instalações.

Por último, procedeu-se à realização de análises térmicas para cada tipo de partícula e leito combustível. Estas dividiram-se entre análises calorimétricas e TGA/DTA (Análise termogravimétrica/Análise térmica diferencial). As primeiras foram realizadas no Departamento de Engenharia Mecânica, DEM, local que reúne as condições materiais necessárias. As análises TGA/DTA foram realizadas no Laboratório de Energética e Detónica, LEDAP, em Condeixa. Efetuou-se um ensaio e duas repetições para cada tipo de partícula e leito combustível, em ambas as análises.

2.1.1. Caracterização física das partículas e dos leitos combustíveis e resposta às condições ambientais

Todas as partículas e leitos combustíveis utilizados no programa experimental foram submetidos a uma caracterização física, antes de cada série de 5 ensaios, tendo sido analisadas as suas características de acordo com as condições ambientais a que estavam sujeitos.

Antecipadamente a cada série de ensaios, efetuou-se a medição do teor de humidade do leito combustível a utilizar. Este foi determinado através de um analisador de humidade, onde uma amostra com 1-2 g de combustível foi colocada a secar a 105 °C durante quinze minutos. Convencionou-se previamente que o valor da área de leito combustível a utilizar seria igual a 0,066 m² e que o valor da carga seria 0,6 kg/m². Assim, o valor de humidade obtido, bem como o valor da área, foram inseridos numa folha de cálculo do Excel, que permitia obter a massa exata de combustível a utilizar, em base seca.

A caracterização física das partículas, pinhas de *Pinus halepensis* e casca de *Eucalyptus globulus*, teve procedimentos adaptados a cada espécie, dada a sua diferença física:

Pinhas de *Pinus halepensis*

Foram recolhidas pequenas amostras de cada pinha utilizada no estudo (“escamas”), sendo estas pesadas e levadas a estufa a 105 °C durante 24 horas. As amostras depois de retiradas da estufa foram de novo pesadas, tornando assim possível o cálculo da humidade da partícula. Cada pinha de *Pinus halepensis* foi pesada, com recurso a balanças de precisão e foi medido o seu comprimento e a sua largura com recurso a um paquímetro digital.

Casca de *Eucalyptus globulus*

Convencionou-se que as dimensões da casca a utilizar em cada ensaio seriam 7x2 cm. À semelhança da pinha também em cada casca utilizada foram recolhidas amostras (pedaço com dimensões de 1x2 cm), sendo estas pesadas e levadas a estufa a 150 °C durante 24 horas. Depois de retiradas da estufa as amostras foram de novo pesadas, o que tornou possível o cálculo da humidade da partícula. Com recurso a balanças de precisão, cada pedaço de casca de *Eucalyptus globulus* (7x2 cm) foi pesado, tendo sido ainda medida a sua espessura em seis pontos, com recurso a um paquímetro digital, obtendo assim a espessura média.

Os resultados obtidos foram registados em folha própria para posterior tratamento.

2.1.2. Análise química elementar das partículas e dos leitos combustíveis

Foram realizadas análises químicas elementares a cada tipo de partícula estudada, pinhas de *Pinus halepensis* e casca de *Eucalyptus globulus* e a cada tipo leito, folhada de *Pinus halepensis*, folhada de *Eucalyptus globulus* e palha de *Avena sativa*. A análise química elementar, em base seca, dá a informação relativa à percentagem de azoto (N), carbono (C), hidrogénio (H), enxofre (S) e oxigénio (O), de cada partícula e leito combustível.

2.1.3. Análise das propriedades térmicas das partículas e dos leitos combustíveis

A análise das propriedades térmicas das partículas e dos leitos combustíveis teve o seu desenvolvimento em duas etapas. Inicialmente realizou-se uma análise calorimétrica a cada partícula e a cada tipo de leito combustível em estudo. Esta técnica permite medir o poder calorífico de um sólido ou de um líquido, obtendo-se assim o poder calorífico do combustível, que se pode entender como o calor libertado por unidade de massa de uma amostra, quando queimada com oxigénio, num espaço com volume constante (Mendes, 2010). O poder calorífico pode caracterizar-se como superior ou inferior, sendo que a sua principal diferença está relacionada com o estado físico da água nos produtos da reação, ou seja, no poder calorífico superior (PCS), a água encontra-se no estado líquido, já no poder calorífico inferior (PCI) esta encontra-se no estado gasoso.

O aparelho utilizado foi o calorímetro de bomba de oxigénio da marca *Parr*, figura 4, neste o valor do poder calorífico é obtido pela queima da amostra em estudo, no interior de um recipiente metálico, designado por bomba, com oxigénio a alta pressão. A energia libertada por essa combustão é absorvida pelas paredes do calorímetro e pelo meio envolvente da bomba, que é constituído por água. O poder calorífico pode então ser calculado multiplicando o aumento da temperatura no calorímetro, por uma energia equivalente previamente determinada, a sonda que lê a temperatura da água tem uma precisão mínima de 0,01 °C.



Figura 4 - Calorímetro de bomba de oxigénio

O procedimento experimental foi realizado de acordo com o manual de instruções do calorímetro de bomba de oxigénio, tendo sido registados os valores da temperatura da água ao longo do tempo (de 1 em 1 minuto nos primeiros 5 minutos, aos

45, 60, 75, 90, 105, 120, 135, 150, 165 e 180 segundos após a ignição e de novo de 1 em 1 minuto até estabilizar). A quantidade de água utilizada foi $2000 \pm 0,5$ g, a quantidade de amostra foi próxima de 1 g (valor estabelecido para amostras em geral) e a quantidade de fio de ignição utilizado foi 10 cm. No final de cada ensaio foi ainda pesado o cadinho que continha a amostra, de modo a obter-se o valor da massa de resíduo. Os resultados experimentais, após tratamento de acordo com o manual de instruções, permitiram obter o valor do poder calorífico superior, valor que foi convertido para poder calorífico inferior através da equação [1] e posteriormente para poder calorífico inferior tendo em conta o valor do teor de humidade, M , através da equação [2].

$$PCI = PCS - 212,2 w(H)_s - 0,8[w(O)_s + w(N)_s] (J/g) \quad [1]$$

$$PC_{inf, Hum} = \{PCS - 212,2w(H)_s - 0,8[w(O)_s + w(N)_s]\} \cdot (1 - 0,01M) - 24,43M (J/g) \quad [2]$$

Importa salientar que é necessário conhecer a capacidade calorífica do calorímetro antes de cada teste, sendo esta dada pela soma das capacidades caloríficas dos seus componentes. Assim, são feitos ensaios com a queima de uma amostra com calor de combustão conhecido. A amostra utilizada é o ácido benzoico, uma vez que queima completamente na presença de oxigénio (Mendes, 2010).

Para uma investigação térmica mais detalhada seguiu-se, numa segunda etapa, a realização de análises DTA e TGA. Nestas, as propriedades físicas de uma substância ou dos seus produtos, são medidas em função da temperatura, ao mesmo tempo que a substância é submetida a uma alteração programada da temperatura, numa atmosfera controlada (Mendes, 2010). A análise DTA mede a diferença de temperatura entre a amostra e um material de referência, decorrente de reações ou transformações físicas, com uma taxa de aquecimento constante (Casimiro, 2006). Numa análise DTA a amostra e a referência são colocadas no mesmo forno. A análise TGA mede a variação de massa de uma determinada amostra em função da temperatura (Mendes, 2010).

Importa referir que para a mesma espécie de biomassa é usual obter-se diferentes análises termogravimétricas, devido às diferentes origens biogeográficas ou idade da amostra recolhida, e os resultados destas apresentam a região térmica de

decomposição da biomassa que depende dos seus componentes principais, como a celulose, a hemicelulose e a lenhina (Zhao, 2010), bem como da sua ordem de decomposição (hemicelulose, celulose e lenhina).

O instrumento utilizado para a realização destas análises foi o *Rheometric Scientific STA 1500*, como se observa na figura 5. Este permite obter simultaneamente os resultados de uma análise DTA e TGA.



Figura 5 - *Rheometric Scientific STA 1500*

O procedimento experimental foi realizado de acordo com manual *Rheometric Scientific STA 1500*, tendo sido o peso das amostras próximo de 10 mg. A taxa de aquecimento foi igual a 10 °C/minuto para todos os ensaios e o gás utilizado nos ensaios foi N₂ (nitrogénio). A temperatura máxima convencionada foi igual a 550 °C, porém o aparelho apresentava alguma dificuldade em atingir esse valor e em todos os ensaios realizados a temperatura máxima de aquecimento foi sempre inferior à convencionada.

2.1.4. Ensaios laboratoriais para determinação da probabilidade de ignição

Depois da classificação física das partículas e do respetivo leito, iniciou-se a série de cinco ensaios laboratoriais para determinação da PI, perfazendo um total de 110 ensaios. A partícula foi retida num dispositivo, a uma altura de 50 cm do respetivo leito. Este encontrava-se devidamente preparado com a massa de combustível, calculada anteriormente, e uniformemente distribuída pela área convencionada, o procedimento descrito pode ser visto na figura 6.



Figura 6 - Pinha de *Pinus halepensis* retida no dispositivo e leito combustível de folhada de *Eucalyptus globulus*

A partícula, já em combustão, foi largada no leito combustível, sendo o atraso até à ignição medido com um cronómetro. As perdas de massa resultantes da combustão, ou não, dos diferentes combustíveis, foram medidas com recurso a uma balança de precisão e ao *software Kern Balance Connection*, que registou os valores de massa de um em um segundo, a figura 7 descreve todo este processo.



Figura 7 - a) Pinha de *Pinus halepensis* em combustão, b) Pinha de *Pinus halepensis* sobre leito de folhada de *Eucalyptus globulus*, c) Leito de folhada de *Eucalyptus globulus* em combustão

No caso em que a partícula foi a pinha de *Pinus halepensis* (leito de folhada de *Eucalyptus globulus* e palha de *Avena sativa*) foi ainda registado a sua posição de queda, ou seja, se caiu com a chama voltada para cima ou para baixo.

2.2. Tratamento de dados

Os ensaios laboratoriais para determinação da PI e as análises térmicas realizadas às partículas e aos leitos combustíveis foram, após conclusão, submetidos ao tratamento de dados, de modo a alcançar-se resultados concretos. Este tratamento foi obtido através de folhas de cálculo do Excel.

Propriedades térmicas das partículas e dos leitos

Os primeiros dados a tratar relacionados com as propriedades térmicas foram os adquiridos nas análises calorimétricas. Nestas obteve-se as temperaturas da água do calorímetro em determinados intervalos de tempo, a quantidade de fio não utilizada e ainda a massa de resíduo. Assim, tendo em conta a massa da amostra e da água, foi possível, através da interpretação do procedimento experimental respeitante ao calorímetro de bomba de oxigénio, chegar ao valor do PCS e de seguida, através da fórmula [1] ao valor do PCI, que foi depois calculado em função do teor de humidade apresentado pelas partículas e pelos leitos combustíveis, através da equação [2]. Foram calculados os valores médios do ensaio laboratorial e das repetições, de modo a obter-se um resultado final.

Os valores adquiridos nas análises térmicas, como percentagem de perda de massa, temperatura e fluxo de calor, permitiram obter as curvas DTA/TGA, que foram construídas para cada partícula e leito combustível. Foi também traçado um gráfico que continha todas as curvas (DTA/TGA) para todas as partículas e um outro que continha todas as curvas para todos os leitos combustíveis, de modo a comparar as diferentes partículas em estudo e ainda os diferentes leitos combustíveis. Por fim, foram traçadas as curvas DTG de modo a perceber quais as temperaturas a que ocorrem as maiores degradações de massa.

Determinação da probabilidade de ignição

A etapa inicial do tratamento de dados para a determinação da PI foi a construção das curvas de perda de massa, utilizando os dados adquiridos nos ensaios laboratoriais (valor da massa por segundo). Com estes resultados foi possível obter a curva da taxa média de perda de massa para os ensaios onde houve ignição. Estes gráficos foram realizados tendo em conta três momentos diferentes de perda de massa, ou seja, o momento em que a partícula cai no leito (\dot{m}_1), o momento em que a degradação de massa apresenta um declive mais acentuado (\dot{m}_2) e o momento em que a degradação de massa estabiliza (\dot{m}_3).

Após encontrados os valores das taxas médias de perda de massa seguiu-se a construção de uma tabela que reuniu toda a informação sobre as condições de ensaio, como as características físicas das partículas e dos respetivos leitos, as condições ambientais e ainda o valor do atraso à ignição. Nos casos em que a partícula utilizada foi a pinha de *Pinus halepensis* a tabela abarcou informação sobre a posição de queda desta, tendo sido assumido o valor de 1 quando a pinha caiu com a chama voltada para cima, e 0 quando caiu com a chama voltada para baixo. Foi assim possível a determinação da curva das taxas médias de perda de massa em função dos teores de humidade dos combustíveis.

Com todos os resultados encontrados e organizados, procedeu-se à construção de gráficos que sintetizam a informação pretendida para as situações em que houve ignição, como o atraso à ignição em função dos teores de humidade para cada par de partícula/leito combustível e atraso à ignição em função da posição de queda da pinha e do teor de humidade. Nestes gráficos foram acrescentados os resultados de um estudo da equipa da ADAI, que envolvia partículas em combustão de pinhas de *Pinus halepensis* sobre folhada da mesma espécie.

Obteve-se também a curva que apresenta o número de ignições e não ignições, através da PI para cada par de partícula/leito combustível em função do teor de humidade, sendo a probabilidade igual a 1 no caso de ocorrência de ignição e igual a 0 quando não houve ignição. Determinou-se ainda a PI em função dos teores de humidade, tendo sido os resultados fracionados por intervalos de humidade, de modo a uma melhor visualização e compreensão dos resultados.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Análise química elementar – teor de Azoto, Carbono, Hidrogénio, Enxofre e Oxigénio

Após obtidos os resultados da análise química elementar foi possível realizar uma comparação entre as diferentes partículas utilizadas no estudo e os diferentes leitos combustíveis. O conhecimento do teor de azoto, de hidrogénio e de oxigénio é fundamental para obter o valor do PCI. Na tabela 1 são apresentados os resultados para as partículas de pinhas de *Pinus halepensis* e casca de *Eucalyptus globulus*, podendo concluir-se, através dos dados obtidos, que as principais diferenças entre as duas residem nos valores do teor de azoto, carbono e oxigénio, sendo o resultado do teor de hidrogénio semelhante.

Tabela 1 - Análise química elementar da pinha de *Pinus halepensis* e casca de *Eucalyptus globulus*

Amostra	Base de análise	% N (w/w)	% C (w/w)	% H (w/w)	% S (w/w)	% O (w/w)
Pinha <i>Pinus halepensis</i>	Base seca	0,502	53,406	6,414	≤ 100 ppm	31,106
Casca <i>Eucalyptus globulus</i>	Base seca	0,784	48,375	6,237	≤ 100 ppm	42,061

Legenda: (N) azoto, (C) carbono, (H) hidrogénio, (S) enxofre, (O) oxigénio

O teor de azoto, carbono, hidrogénio, enxofre e oxigénio dos leitos combustíveis utilizados no estudo são apresentados na tabela 2, observando-se que a folha de *Eucalyptus globulus* apresenta diferenças em relação aos outros leitos combustíveis, já a palha e a folhada de *Pinus halepensis* têm alguma semelhança, principalmente no teor de azoto e no teor de hidrogénio.

Tabela 2 - Análise química elementar da folhada de *Pinus halepensis*, folha de *Eucalyptus globulus* e palha de *Avena sativa*

Amostra	Base de análise	% N (w/w)	% C (w/w)	% H (w/w)	% S (w/w)	% O (w/w)
Folhada <i>Pinus halepensis</i>	Base seca	0,504	50,295	6,742	≤ 100 ppm	34,599
Folha <i>Eucalyptus globulus</i>	Base seca	1,602	54,280	7,531	≤ 100 ppm	36,570
Palha <i>Avena sativa</i>	Base seca	0,507	46,016	6,262	≤ 100 ppm	31,773

Legenda: (N) azoto, (C) carbono, (H) hidrogénio, (S) enxofre, (O) oxigénio

3.2. Caracterização térmica

3.2.1. Poder calorífico superior e inferior

Através do tratamento de dados, de acordo com o manual de instruções do calorímetro de bomba de oxigénio, foi possível obter-se o valor do poder calorífico superior para cada partícula e leito combustível. A tabela 3 mostra os resultados para a pinha de *Pinus halepensis* e casca de *Eucalyptus globulus*.

Tabela 3- Massa de amostra, resíduo final e PCS da pinha de *Pinus halepensis* e casca de *Eucalyptus globulus*

Ensaio	Massa de amostra (g)	Resíduo final (%)	PCS MJ/kg
Pinha 1	1,03	1,65	18,68
Pinha 2	1,06	0,75	19,04
Pinha 3	1,10	1,55	18,91
	Média	1,32	18,88
Casca 1	1,06	1,61	16,42
Casca 2	1,00	2,09	16,32
Casca 3	1,00	2,20	16,41
	Média	1,96	16,38

Assim, o PCS da pinha de *Pinus halepensis* é igual a 18,88 MJ/kg e o da casca de *Eucalyptus globulus* é igual a 16,38 MJ/kg.

A tabela 4 mostra os resultados respeitantes à folhada de *Pinus halepensis*, folhada de *Eucalyptus globulus* e palha de *Avena sativa*.

Tabela 4 - Massa de amostra, resíduo final e PCS da folhada de *Pinus halepensis*, folha de *Eucalyptus globulus* e palha de *Avena sativa*

Ensaio	Massa da amostra (g)	Resíduo final (%)	PCS MJ/kg
Folhada 1	0,99	2,13	17,60
Folhada 2	1,02	0,69	17,84
Folhada 3	1,04	2,03	17,94
	Média	1,61	17,79
Folha 1	1,00	2,19	21,51
Folha 2	1,00	2,19	21,83
Folha 3	1,00	2,20	21,70
	Média	2,19	21,68
Palha 1	0,82	3,79	16,16
Palha 2	0,86	1,64	16,46
Palha 3	0,93	1,40	16,26
	Média	2,27	16,29

Verifica-se que o PCS da folhada de *Pinus halepensis* é 17,79 MJ/kg, das folhas de *Eucalyptus globulus* é 21,68 MJ/kg e da palha de *Avena sativa* é 16,29 MJ/kg. A folha de *Eucalyptus globulus* e a palha apresentam uma maior quantidade de resíduo final, em comparação com a folhada de *Pinus halepensis*.

O valor do PCI foi, como referido na metodologia experimental, obtido através da equação [1], tendo sido inseridos, na mesma, os valores do teor de azoto, hidrogénio e oxigénio, adquiridos nas análises químicas elementares e os valores dos PCSs, note-se que a equação [1] tem como unidades J/g. Os valores encontrados foram posteriormente corrigidos tendo em conta o teor de humidade, obtendo-se assim o PCI em relação ao teor de humidade, *mf*, que cada partícula e cada leito combustível apresentavam. Os valores do PCI para todas as partículas e leitões combustíveis utilizados no estudo, encontram-se listados na tabela 5, bem como o teor de humidade que cada partícula e leito combustível apresentavam.

Tabela 5 - PCI em base seca e PCI com humidade M para a pinha e folhada de *Pinus halepensis*, casca e folhas de *Eucalyptus globulus* e palha de *Avena sativa*

Ensaio	PCI em base seca MJ/kg	mf (%) (M)	PCI (com humidade M) MJ/kg
Pinha 1	17,29	12,64	13,81
Pinha 2	17,66	12,64	14,13
Pinha 3	17,52	12,64	14,02
Média	17,49	12,64	13,99
Casca 1	15,07	11,21	12,23
Casca 2	14,96	11,21	12,14
Casca 3	15,05	11,21	12,22
Média	15,03	11,21	12,20
Folhada 1	16,14	15,19	12,14
Folhada 2	16,38	15,19	12,34
Folhada 3	16,48	15,19	12,42
Média	16,33	15,19	12,30
Folha 1	19,89	8,50	17,33
Folha 2	20,20	8,50	17,61
Folha 3	20,07	8,50	17,50
Média	20,05	8,50	17,48
Palha 1	14,8	8,14	12,76
Palha 2	15,1	8,14	13,04
Palha 3	14,91	8,14	12,86
Média	14,94	8,14	12,89

O poder calorífico inferior é assim igual a 17,49 MJ/kg para a pinha de *Pinus halepensis*, 15,03 MJ/kg para a casca de *Eucalyptus globulus*, 16,33 MJ/kg para a folhada de *Pinus halepensis*, 20,05 MJ/kg para a folha de *Eucalyptus globulus* e 14,94 MJ/kg para a palha de *Avena sativa*. O valor do PCI tendo em conta o teor de humidade que as amostras apresentavam é inferior ao PCI em base seca, tal como era esperado, este foi igual a 13,99 MJ/kg para a pinha de *Pinus halepensis*, 12,20 MJ/kg para a casca de *Eucalyptus globulus*, 12,30 MJ/kg para a folhada de *Pinus halepensis*, 17,48 MJ/kg para as folhas de *Eucalyptus globulus* e 12,89 MJ/kg para a palha de *Avena sativa*. Importa salientar a dificuldade na compactação da palha, devido às suas características físicas, como textura oca, assim foi necessário um esforço para atingir o valor da massa desejado, tendo sido este muito inferior a 1 g.

3.2.2. Comportamento das partículas e dos leitos combustíveis durante um processo térmico

Análises TGA e DTA das partículas

As figuras seguintes mostram os resultados das análises DTA e TGA para cada uma das partículas em estudo e ainda as curvas DTG, sendo que em todas as análises o primeiro estágio de decomposição diz respeito à desidratação da amostra, ou seja, ao processo de secagem. Os resultados foram semelhantes em todas, uma vez que a amostra foi sempre biomassa, e correspondem à pirólise.

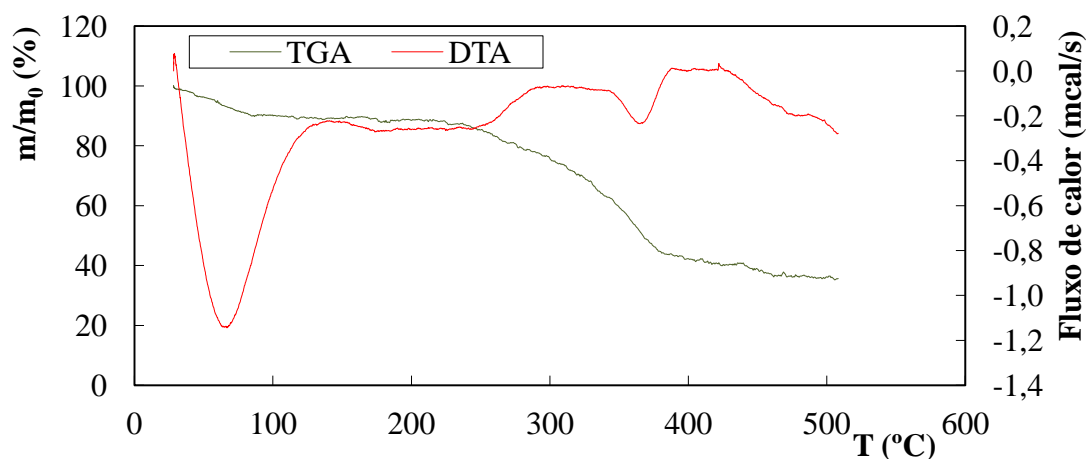


Figura 8 - TGA e DTA à pinha de *Pinus halepensis*

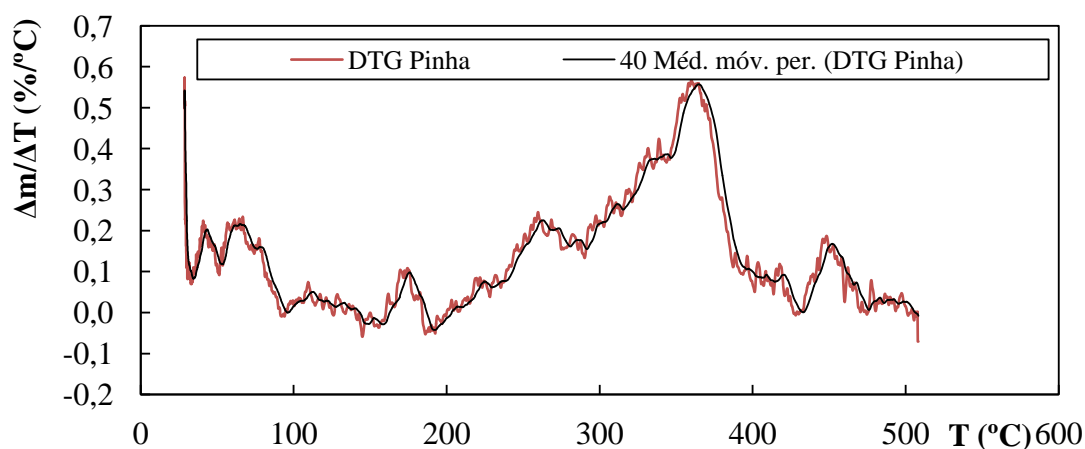


Figura 9 - DTG pinha de *Pinus halepensis*

Verifica-se que a análise TGA apresenta uma decomposição multi-estágio, sendo que o primeiro, até cerca de 140 °C, corresponde ao processo de perda de água, observando-se um elevado pico endotérmico (curva DTA). Em seguida, aproximadamente até aos 260 °C ocorre a degradação da hemicelulose, levando à libertação de pequenas quantidades de voláteis, como CO, CO₂ e ácido acético. Até cerca dos 380 °C dá-se uma acentuada perda de massa, permitindo identificar a degradação da celulose, momento em que acontece a maior emissão de voláteis, como por exemplo CO, CO₂, H₂ e CH₄, sendo observável na curva DTA um pico endotérmico entre os 360 °C e os 380 °C. A partir dos 380 °C ocorre a degradação da lenhina. A temperatura onde ocorre a maior degradação pode ser observada na curva DTG, sendo igual a 360 °C e corresponde à fase da degradação da celulose. A pinha de *Pinus halepensis* apresentou uma degradação com o aumento da temperatura igual a 68,8 %.

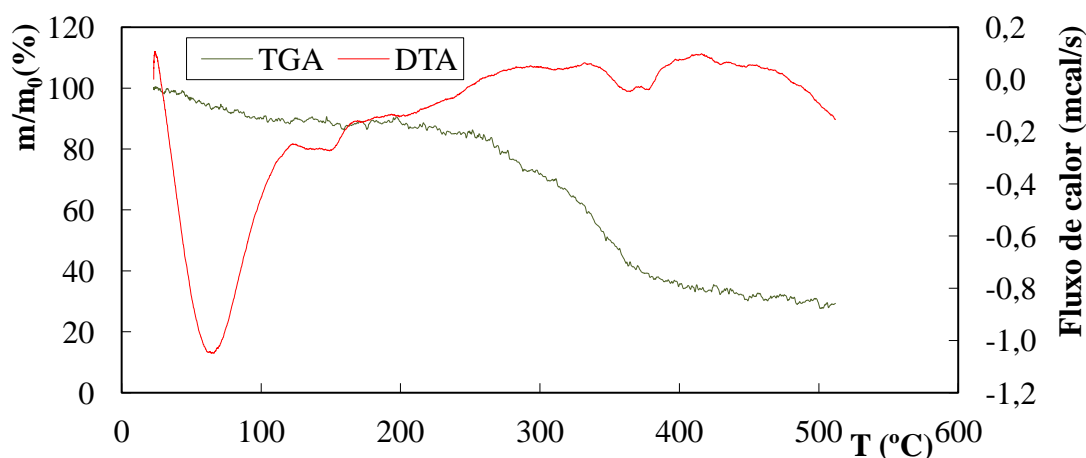


Figura 10 - TGA e DTA à casca de *Eucalyptus globulus*

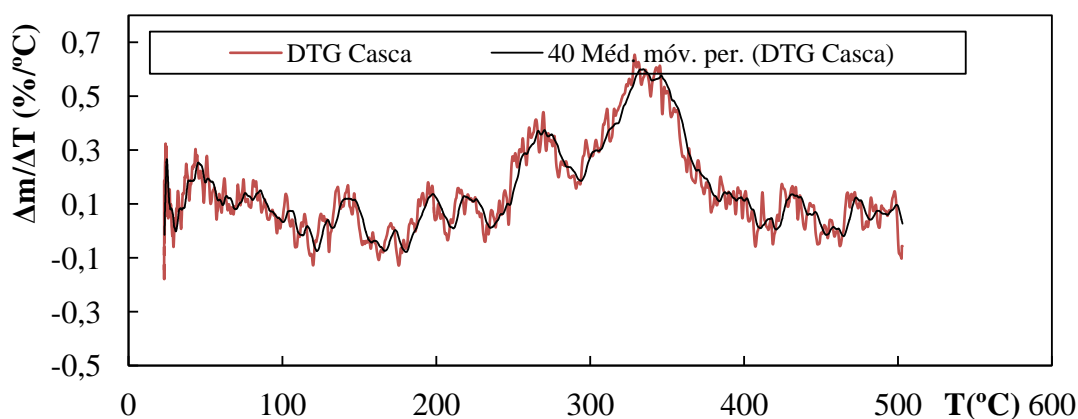


Figura 11 - DTG casca de *Eucalyptus globulus*

As figuras 10 e 11 são muito semelhantes às anteriores em termos de temperaturas de degradação e em termos dos picos da análise DTA, apresentando a análise DTG uma maior quantidade de picos. Até aos 140 °C é observável um pico endotérmico na curva DTA, correspondendo à desidratação da amostra, seguindo-se a fase de degradação da hemicelulose até cerca de 300 °C (temperatura mais elevada que na análise anterior). A temperatura de maior degradação da hemicelulose é igual a 270 °C (curva DTG). A degradação da celulose dá-se entre os 300 °C e os 380 °C, sendo observável um pico endotérmico ente os 360 °C e os 380 °C (curva DTA). A temperatura onde há a maior degradação é observada na curva DTG e é igual a 330 °C, correspondendo igualmente à fase de degradação da celulose. A casca de *Eucalyptus globulus* teve uma degradação igual a 76,3 %.

Análises TGA e DTA dos leitos combustíveis

As figuras seguintes representam os resultados das análises DTA e TGA para cada um dos leitos combustíveis em estudo e ainda as curvas DTG, correspondendo à pirólise.

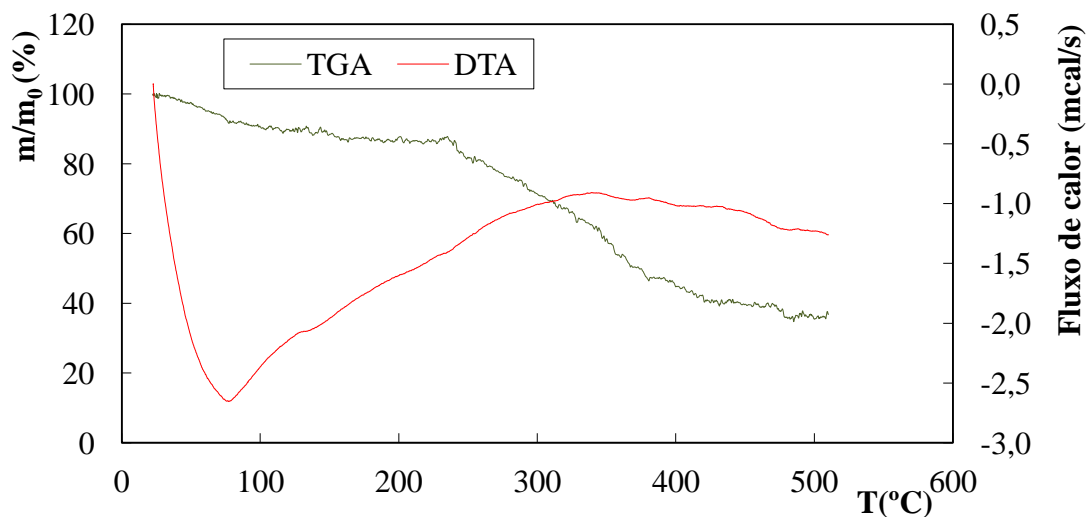


Figura 12 - TGA e DTA à folhada de *Pinus halepensis*

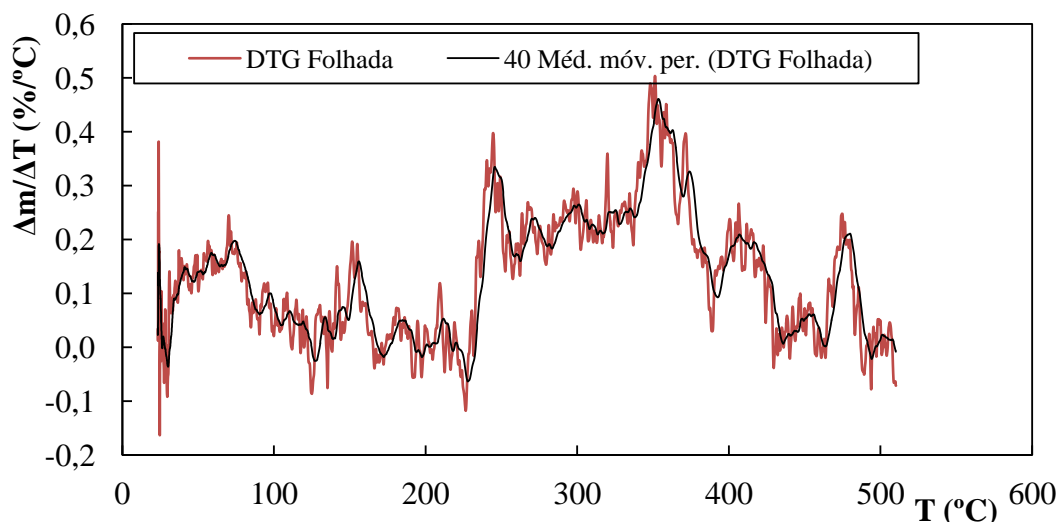


Figura 13 - DTG folhada de *Pinus halepensis*

Pode ser observado na figura 12 um grande pico endotérmico na análise DTA até aos 160 °C, correspondendo às reações de desidratação. Ao longo do aumento da temperatura o comportamento observado na análise DTA apresentou-se semelhante. Através das análises TGA constata-se que a etapa da decomposição da hemicelulose, aproximadamente entre os 160 °C e os 250 °C, não apresenta uma grande decomposição, ao contrário da fase de decomposição da celulose (até próximo de 380 °C), podendo relacionar-se mais uma vez com a libertação de voláteis como CO, CO₂, H₂ e CH₄. A curva DTG (figura 13) apresenta vários picos, sendo observável um pico aos 250 °C que corresponde à temperatura de máxima degradação da hemicelulose e um aos 360 °C, correspondendo à temperatura de máxima degradação da celulose, que coincide com a temperatura de degradação máxima. A folhada de *Pinus halepensis* apresentou uma degradação de massa igual a 66,7 %.

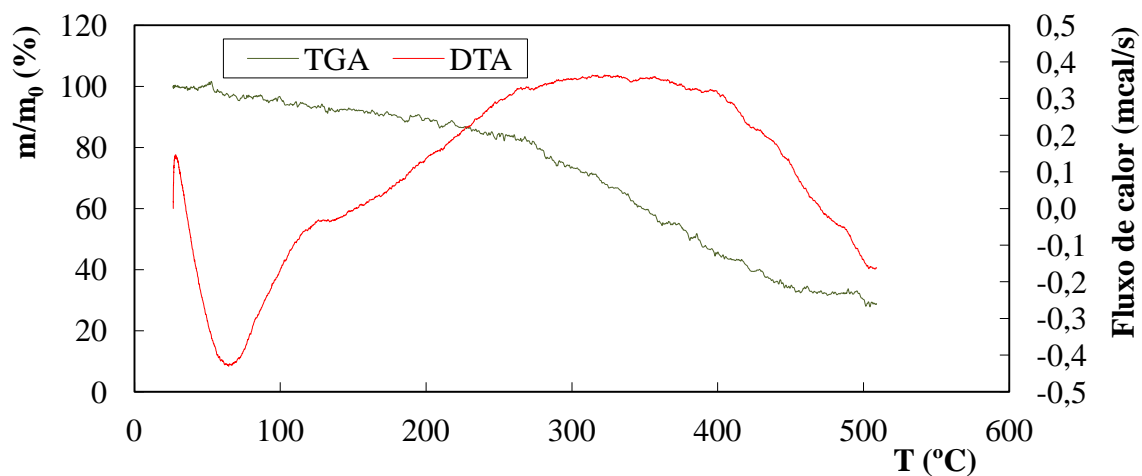


Figura 14 - TGA e DTA às folhas de *Eucalyptus globulus*

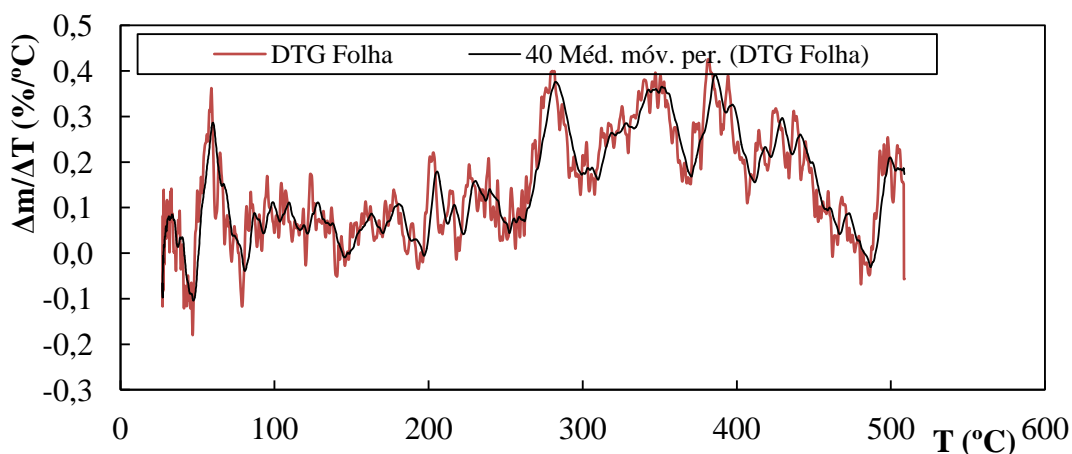


Figura 15 - DTG folhas de *Eucalyptus globulus*

Nas figuras 14 e 15 observa-se que a taxa de degradação dos componentes da folha de *Eucalyptus globulus* foi semelhante à folhada de *Pinus halepensis*, notando-se na curva TGA um declive semelhante ao longo do aumento da temperatura. Este resultado é corroborado pela curva DTA, que apresenta um pico endotérmico elevado até aos 140 °C, correspondendo à perda de água da amostra, tendo depois um comportamento semelhante ao longo do aumento da temperatura. Próximo dos 280 °C verifica-se um ligeiro aumento do declive (TGA) e um pico DTG, o que pode estar relacionado com o fim da degradação da hemicelulose e com a temperatura onde esta tem a maior degradação (280 °C). A degradação da celulose ocorre até cerca de 400 °C, momento em que o pico da curva DTA começa a baixar, sendo a temperatura de maior degradação da celulose igual a 380 °C (curva DTG). Neste gráfico DTG não é tão evidente qual a temperatura a que ocorreu a

máxima degradação, verificando-se no entanto que esta se encontra próximo dos 380 °C. As folhas de *Eucalyptus globulus* apresentaram uma degradação de massa igual a 76,1 %.

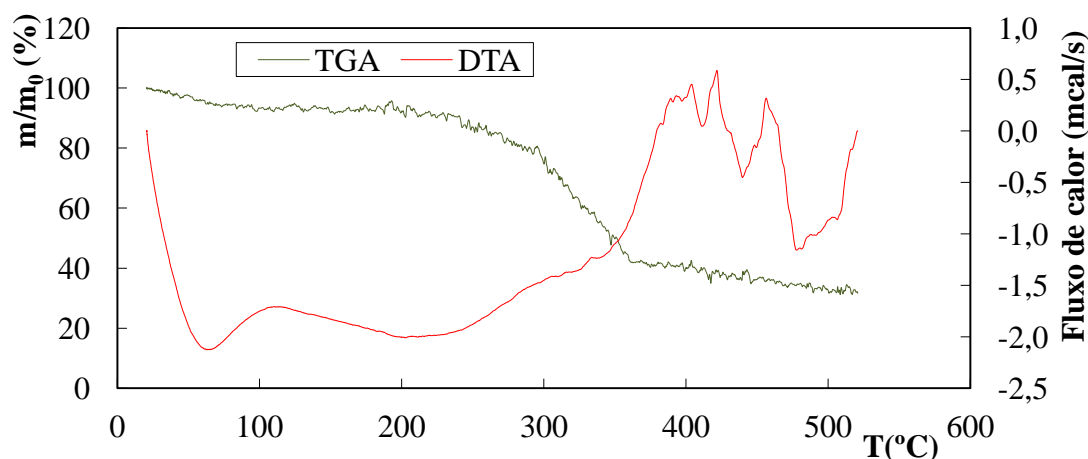


Figura 16 - TGA e DTA à palha de *Avena sativa*

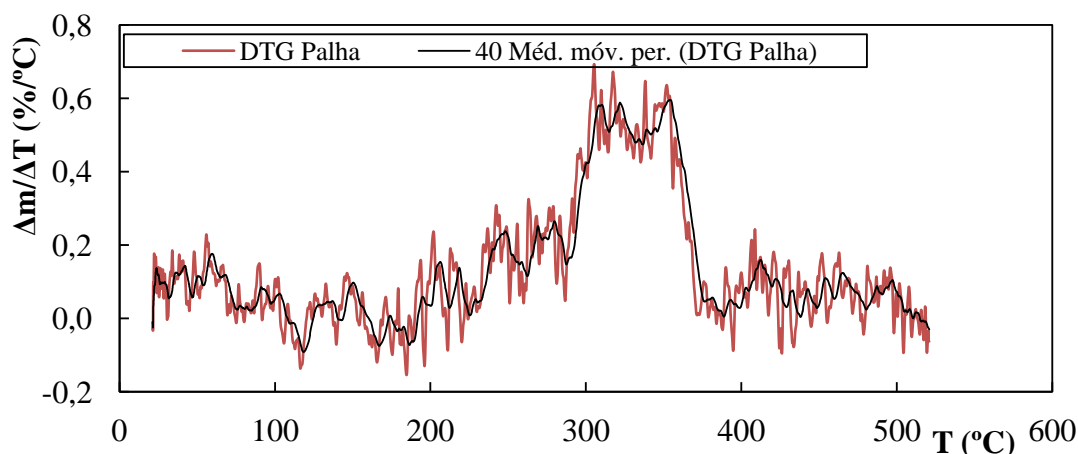


Figura 17 - DTG palha de *Avena sativa*

É observável nas figuras 16 e 17 que a palha de *Avena sativa* apresenta um comportamento um pouco diferente em termos de análise DTA, TGA e DTG, verificando-se vários picos a partir dos 350 °C. A fase de desidratação ocorre até uma temperatura mais elevada, próximo de 180 °C. A pirólise da hemicelulose ocorre também até uma temperatura maior, cerca de 300 °C e a da celulose até uma temperatura menor (360 °C), evidenciando uma possível libertação de voláteis em menor quantidade. Em relação à curva DTG é observável dois picos bastante salientes, um por volta dos 300 °C estando relacionado com a temperatura de maior degradação da hemicelulose e outro por volta dos

360 °C, que se relaciona com a degradação da celulose, sendo que a temperatura a que ocorreu a degradação máxima foi igual a 300 °C, correspondendo então à degradação da hemicelulose.

A diferença de comportamento desta análise pode estar relacionada com as características físicas da palha, já que esta apresenta uma textura oca, sendo difícil a sua moagem e compactação, assim, para este tipo de leito combustível, foi utilizada uma amostra menos compacta do que as restantes. A degradação da massa, na palha de *Avena sativa*, foi igual a 62 %, sendo este o valor mais baixo, possivelmente pelas mesmas razões apresentadas anteriormente.

Comparação das partículas e dos leitos combustíveis

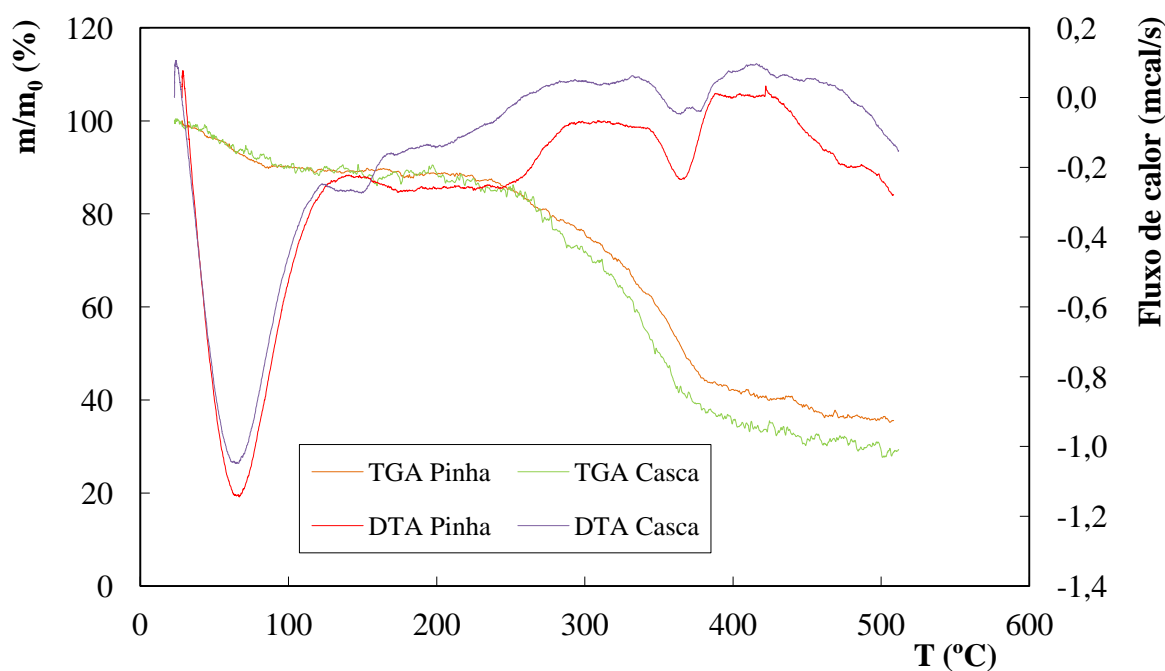


Figura 18 - TGA e DTA às partículas

A figura 18 possibilita uma comparação das análises TGA e DTA para as partículas em estudo. Constata-se que as partículas apresentam um comportamento semelhante, tal como foi dito anteriormente, excetuando o intervalo de temperaturas entre 300 °C e 400 °C em que a casca apresenta um maior decaimento de massa (análise TGA) e entre os 100 °C e 150 °C onde a casca apresenta um pico endotérmico e a pinha um pico exotérmico.

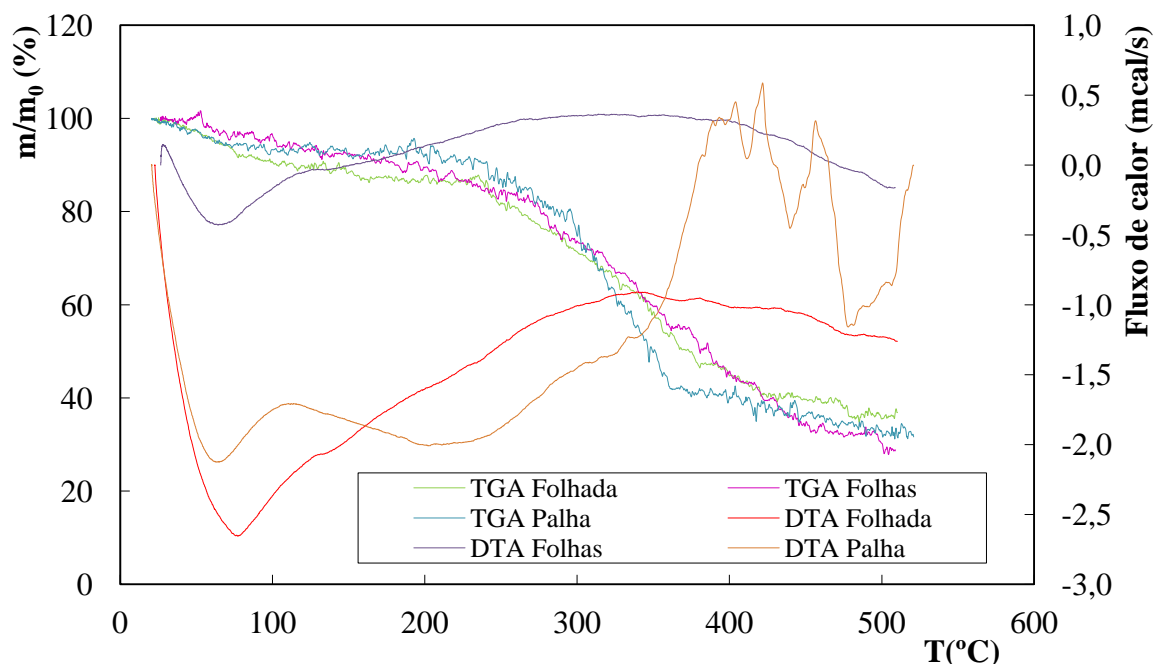


Figura 19 - TGA e DTA aos leitos combustíveis

A figura 19 permite fazer uma comparação entre os leitos combustíveis estudados. Neste gráfico tornam-se evidentes algumas diferenças, principalmente entre a análise DTA da palha de *Avena sativa*, que apresenta vários picos exotérmicos, como foi referido anteriormente, e as restantes, que apesar de apresentarem valores diferentes, têm uma forma gráfica muito semelhante. Em relação à análise TGA verifica-se que a palha, até cerca dos 300 °C, apresenta uma menor degradação de massa, passando depois a ter uma acentuada perda de massa. A folhada de *Pinus halepensis*, até essa temperatura, apresenta a maior degradação de massa. É assim possível constatar as diferenças de comportamento de cada leito combustível, com o aumento da temperatura ao longo do tempo.

Constatou-se que a fase que apresenta uma maior perda da massa é aquela onde se dá a degradação da celulose, excetuando a amostra de palha. Assim conhecendo as temperaturas de autoignição dos voláteis libertados, supõe-se que o momento de degradação da celulose acarreta maior possibilidade de ignição, uma vez que apresenta a libertação de CH_4 e H_2 que possuem uma temperatura de autoignição menor (aproximadamente 540 °C e 585 °C, respetivamente (Cracknell, 2002)), em comparação com o CO (630 °C, aproximadamente).

3.3. Análise dos ensaios de ignição

Nos ensaios de ignição as condições de ensaio foram registadas em folha própria, como referido na metodologia experimental, podendo consultar-se os parâmetros registados na tabela 6. Visto tratar-se de uma extensa informação os resultados apresentados correspondem à média dos valores obtidos, sendo indicado o valor máximo (max), o valor mínimo (min) e ainda o desvio padrão (σ) de cada um. Sempre que na tabela apareça o símbolo x significa que a análise não faz sentido para a situação em questão.

Tabela 6 - Propriedades das partículas e leitos testados.

Ref.	Propriedades	Partículas			Leitos	
		Pinha	Casca	Folhada	Folhas	Palha
P1	mf (%)	19,40 (max=55,6; min=4,6; σ =8,1)	18,44 (max=65; min=6,67; σ =8,4)	18,50 (max=74,2; min=3,6; σ =15,2)	12,79 (max=53,2; min=4,1; σ =9,9)	12,96 (max=38; min=2,9; σ =8,7)
P2	Massa (g)	39,80 (max=82; min=19; σ =10,4)	1,38 (max=3,49; min=0,7; σ =0,4)	46,90 (max=69; min=41; σ =6)	44,80 (max=61; min=41; σ =4)	44,90 (max=55; min=41; σ =3,5)
P3	Largura (cm)	6,60 (max=10,7; min=4,8; σ =0,76)	2	x	x	x
P4	Comprimento (cm)	8,60 (max=12,5; min=6,2; σ =1,1)	7	x	x	x
P5	Espessura (mm)	x	1,75 (max=3,45; min=0,97; σ =0,43)	x	x	x
P6	Carga (kg/m ²)	x	x	0,6	0,6	0,6

Através da análise da gama de variação dos teores de humidade verifica-se que as partículas e os leitos combustíveis diferem nas suas características. Uma vez sujeitos às mesmas condições laboratoriais, como temperatura e humidade relativa, apresentaram comportamentos distintos, que se refletiram na variação dos teores de humidade. Há, no

entanto, uma gama de teores de humidade que foi várias vezes encontrada para todos os leitões combustíveis, situando-se esta entre os 10 % e os 14 % de humidade.

As tabelas 7 e 8 apresentam informação relativa aos ensaios da probabilidade de ignição, sendo resumidos os parâmetros medidos e os resultados obtidos. A informação relativa à temperatura ambiente (T_a), humidade relativa do ar (Hr) e massa total é apresentada com valores médios.

Tabela 7 - Propriedades dos ensaios de ignição

Ref.	Partícula	Leito	T_a (°C)	Hr (%)	Massa total (g)
PI1	CEg	FPh	16,4 (max=23; min=12; $\sigma=2,3$)	54,0 (max=78; min=32; $\sigma=9,8$)	48,0 (max=71,8; min=41,8; $\sigma=6,1$)
PI2	PPh	FEg	16,8 (max=23,5; min=13; $\sigma=2,4$)	54,0 (max=77; min=32; $\sigma=10$)	80,9 (max=116,9; min=59,2; $\sigma=11,4$)
PI3	PPh	Palha	14,9 (max=19,5; min=9,5; $\sigma=3,1$)	55,0 (max=83; min=32; $\sigma=14,1$)	80,3 (max=109,9; min=58,9; $\sigma=9,9$)

Tabela 8 - Número de ignições e não ignições dos ensaios de probabilidade de ignição

Ref	Partícula	Leito	Nº ensaios	Com ignição	%	Sem ignição	%	Cima	%	Baixo	%
PI1	CEg	FPh	110	85	77	25	23	x	x	x	x
PI2	PPh	FEg	110	102	93	8	7	61	60	41	40
PI3	PPh	Palha	110	96	87	14	13	52	54	44	46

Ao longo dos 110 ensaios, quando o par de partícula/leito combustível foi casca de *Eucalyptus globulus* sobre folhada de *Pinus halepensis* houve 85 ignições. No caso de estudo da pinha de *Pinus halepensis* sobre a folhada de *Eucalyptus globulus* houve 102 ignições e no caso em que o leito foi palha de *Avena sativa* houve 96 ignições. As colunas cujo nome é Cima e Baixo correspondem ao número de pinhas que caíram com a chama voltada para cima ou voltada para baixo, respetivamente.

A massa total apresentada na tabela 7 corresponde à soma da massa do leito combustível com a massa da partícula já em chamas, que apresenta uma massa superior à massa inicial, ou seja, antes de entrar em combustão.

3.3.1. Probabilidade de ignição

As figuras seguintes (figura 20, figura 21 e figura 22) apresentam a PI em função do teor de humidade, sendo considerada a probabilidade igual a 1 nos casos em que houve ignição e igual a 0 quando não houve ignição. O número de ignições e não ignições não é diretamente observável nestes gráficos, uma vez que para o mesmo valor de humidade a PI será sempre 1 nos casos em que houve ignição e 0 quando não houve, e assim o gráfico sobrepõe-se nesses pontos.

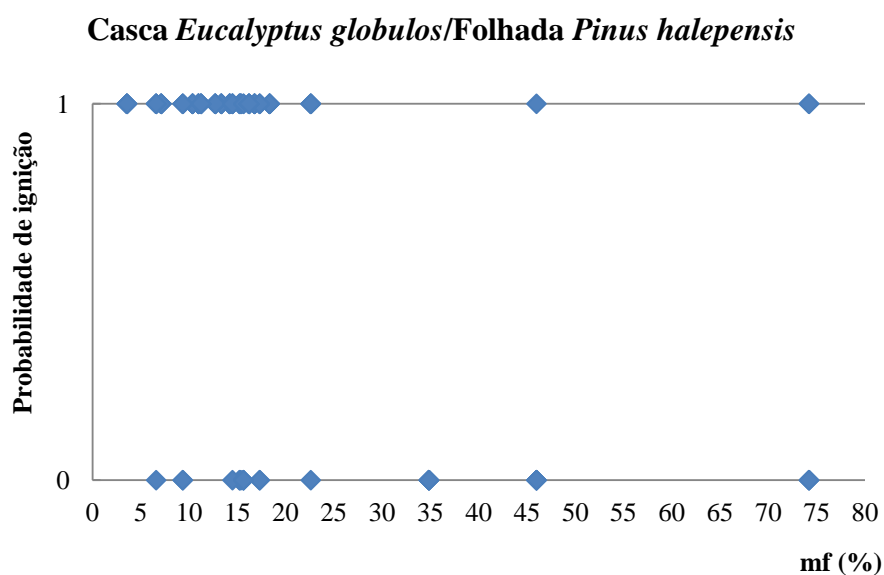


Figura 20 - Probabilidade de ignição das partículas em combustão de casca de *Eucalyptus globulus* sobre folhada de *Pinus halepensis*

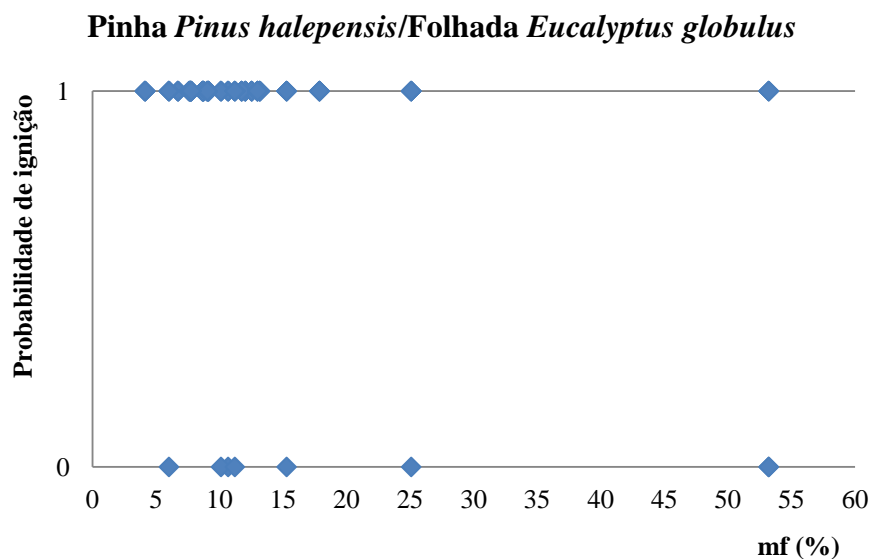


Figura 21 - Probabilidade de ignição das partículas em combustão de pinhas de *Pinus halepensis* sobre folhada de *Eucalyptus globulus*

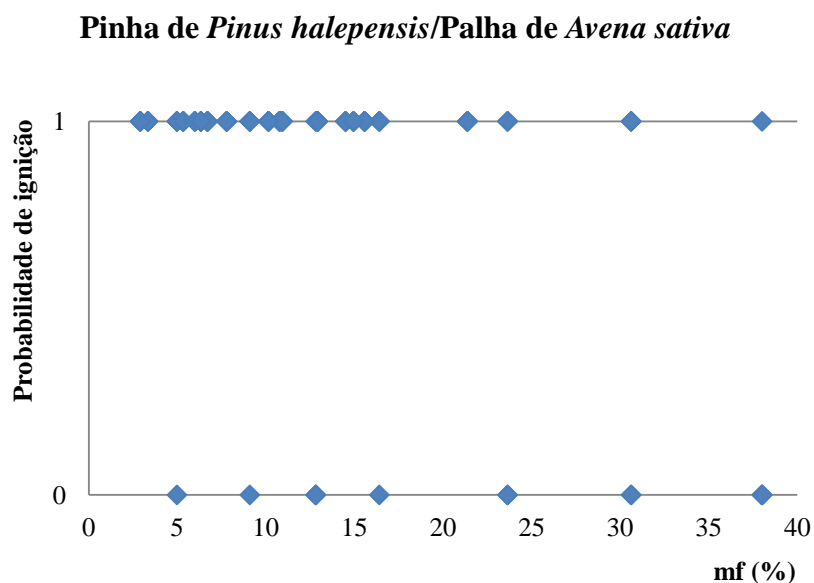


Figura 22 - Probabilidade de ignição das partículas em combustão de pinhas de *Pinus halepensis* sobre palha de *Avena sativa*

Pode ser observado que até cerca de 20 % de teor de humidade do combustível, o número de ignições é elevado, sendo ainda observável que o par que apresenta um maior número de ignições é a pinha sobre o leito de folhada de *Eucalyptus globulus*, seguindo-se a pinha sobre o leito de palha de *Avena sativa* e por fim a casca sobre o leito de folhada de *Pinus halepensis*, o que vai de encontro ao número de ignições observado na tabela 8.

Após tratamento de dados verificou-se que dada a ampla gama de teores de humidade, o valor da PI não era totalmente perceptível. Assim, os teores de humidade foram fracionados em intervalos, sendo esta partição realizada de acordo com a gama onde normalmente os valores são mais comuns de obter. Nas figuras 23 e 24 é observável a PI tendo em conta o intervalo de teores de humidade.

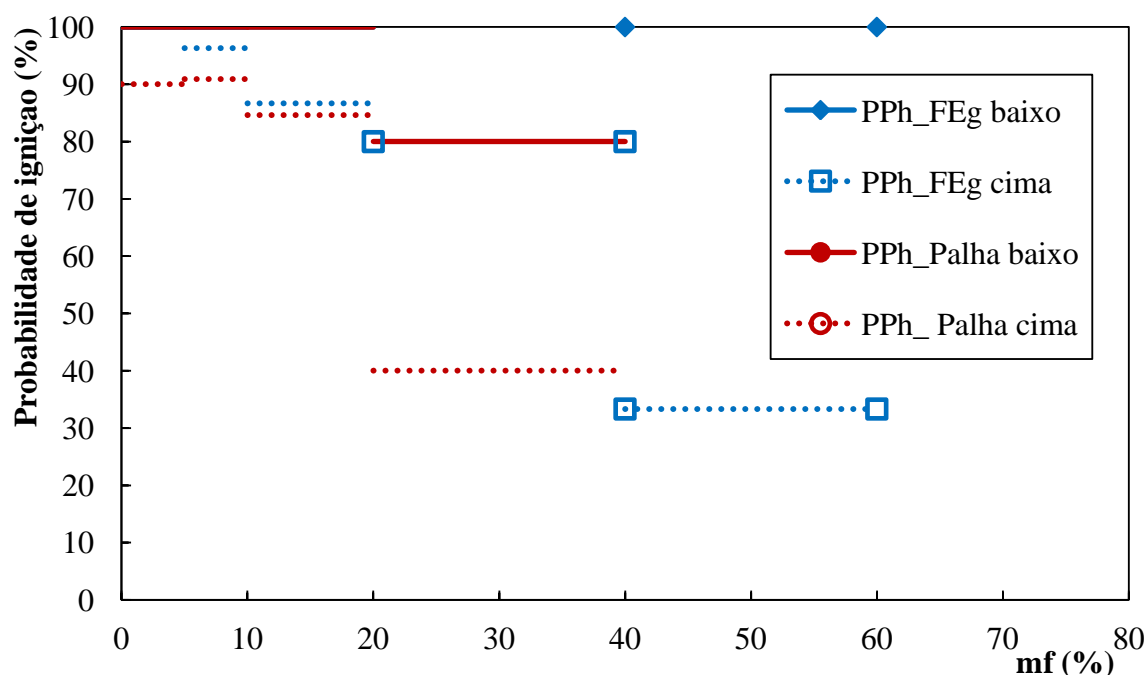


Figura 23 - Probabilidade de ignição das partículas de pinhas de *Pinus halepensis* sobre folhada de *Eucalyptus globulus* e palha de *Avena sativa* em função dos teores de humidade

Verifica-se, através da leitura da figura 23, que na situação em que o leito de combustíveis foi a folhada de *Eucalyptus globulus* e a partícula caiu com a chama voltada para baixo, a PI é igual a 100% para qualquer intervalo dos teores de humidade. Quando o leito combustível foi palha e a pinha caiu com a chama voltada para baixo, a PI é igualmente elevada, sendo igual a 100% na maioria dos casos, exceto no intervalo de humidade mais elevado (entre 20% e 40%), onde a PI foi igual a 80%. Nas situações em que a pinha caiu com a chama voltada para cima o valor da PI baixou para ambos os leitros, tendo apresentado o valor de 100% apenas quando o leito combustível utilizado foi a folhada de *Eucalyptus globulus*, num intervalo de teores de humidade entre 0% e 5%. Mais

uma vez é observável que nos casos em que o intervalo dos teores de humidade foi mais elevado, a PI apresentou valores mais baixos.

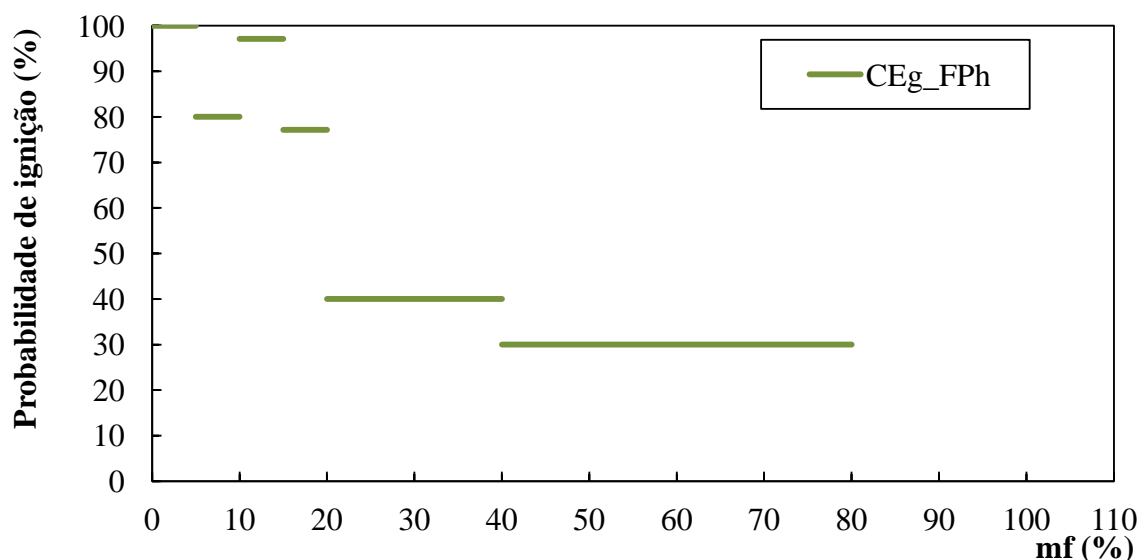


Figura 24 - Probabilidade de ignição das partículas de casca de *Eucalyptus globulus* sobre folhada de *Pinus halepensis* em função dos teores de humidade

Pode ser observado na figura 24 que a PI foi igual a 100% apenas quando os teores de humidade se encontravam entre 0% e 5%. Os outros resultados de PI apresentam, como era esperado, uma diminuição da PI com o aumento do teor de humidade, tendo como incoerência o valor de probabilidade mais baixo no intervalo de teor de humidade entre 5% a 10% (PI igual a 80%) do que no intervalo de 10% a 15% (PI igual a 97,1%). Esta incoerência está relacionada, possivelmente, com a diferença no número de ensaios realizados em cada intervalo, já que no intervalo de 10% a 15% a amostra foi igual a 35 ensaios. A partição dos intervalos do teor de humidade apresenta-se diferente nesta figura, precisamente pela diferença na quantidade de ensaios realizados em determinados intervalos de teores de humidade, tendo sido assim necessário diminuir o intervalo.

3.3.2. Atraso à ignição vs. Teor de humidade

O teor de humidade apresenta uma influência significativa não só no valor da probabilidade de ignição, mas também no valor do atraso à ignição, sendo espectável que quando o teor de humidade tem valores mais elevados o atraso à ignição seja igualmente

maior. As figuras 25 e 26 mostram os resultados relacionados com estes parâmetros, para todos os pares de partículas/leitos combustíveis, de modo a verificar-se quais as espécies mais influenciadas pelo teor de humidade.

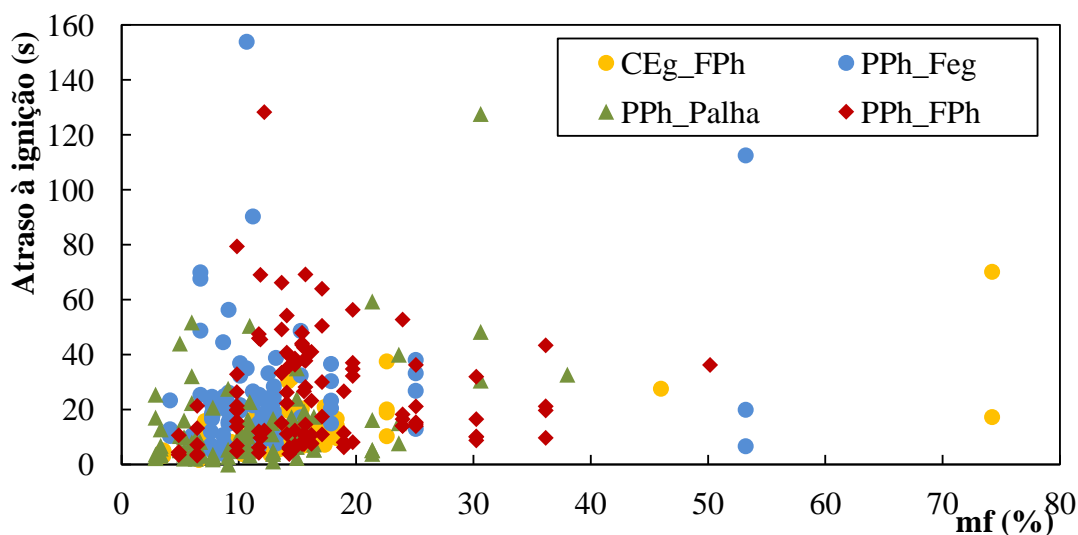


Figura 25 - Atraso à ignição em função dos teores de humidade para os pares de partícula/leito combustível

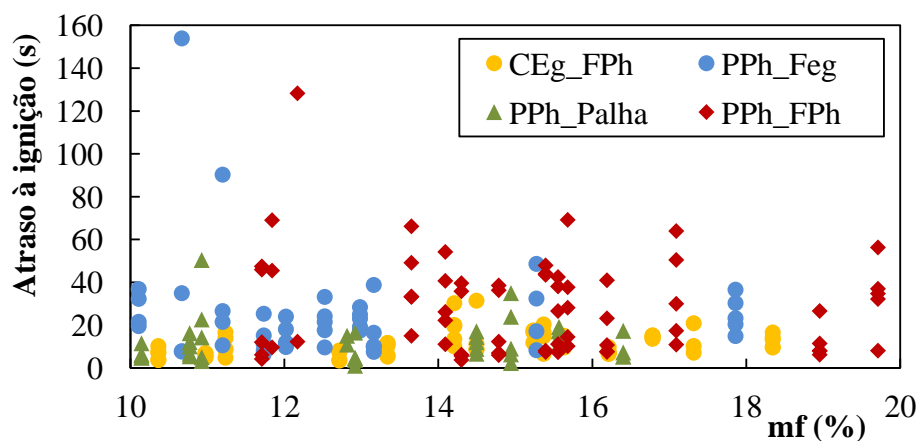


Figura 26 - Atraso à ignição em função dos teores de humidade para os pares de partícula/leito combustível, com teores de humidade entre 10% e 20%

Observando a figura 26, para um teor de humidade entre 10% e 20%, verifica-se, de uma maneira geral, que a pinha de *Pinus halepensis* com leito de palha de *Avena sativa* e a casca de *Eucalyptus globulus* sobre leito de folhada de *Pinus halepensis* apresentam atrasos à ignição menores, com valores muito próximos, não sendo perceptível

qual o par que apresenta um atraso menor. A partícula em combustão de pinha de *Pinus halepensis* sobre o leito combustível de folhada da mesma espécie e a pinha de *Pinus halepensis* sobre o leito combustível de folhada de *Eucalyptus globulus* apresentam, de uma maneira geral, um maior atraso à ignição, não sendo observável um número de ensaios tão concentrado abaixo dos 20 segundos, como nos restantes pares.

Observa-se ainda na figura 25, que nos casos onde os teores de humidade apresentaram valores mais elevados houve também ignições, verificando-se em algumas destas um atraso abaixo de 20 segundos, o que mostra que os combustíveis utilizados podem entrar em combustão na presença de teores de humidade elevados. Nos casos em que foi utilizada a pinha de *Pinus halepensis* verifica-se que, por vezes, houve alguns valores discrepantes no atraso à ignição, pois este foi elevado mesmo com teores de humidade mais baixos, podendo relacionar-se esta situação com o local de queda da partícula, já que quando esta caiu nas extremidades do tabuleiro a ignição foi menos favorável.

Os valores médios destes ensaios vão de encontro ao referido anteriormente, podendo observar-se na figura 27 os valores médios do atraso à ignição em função dos teores de humidade (até 30% para todos os pares de partícula/leito combustível), permitindo perceber qual o par que apresenta um menor atraso à ignição em função dos teores de humidade.

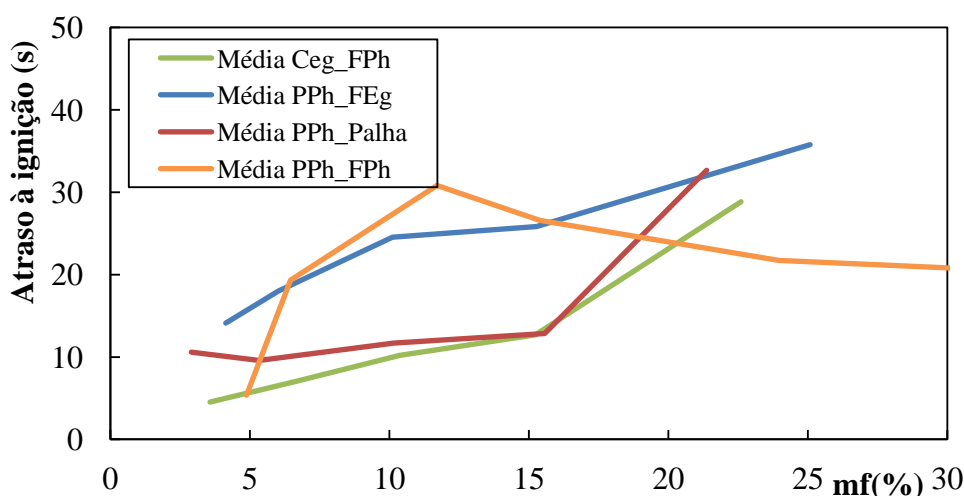


Figura 27 - Valores médios do atraso à ignição em função dos teores de humidade

Constata-se assim que o par de partícula/leito combustível que apresenta o menor atraso à ignição é a casca de *Eucalyptus globulus* sobre a folhada de *Pinus halepensis*, seguido da pinha de *Pinus halepensis* sobre a palha de *Avena sativa*, chegando os valores do atraso à ignição a sobrepor-se para determinados teores de humidade. A pinha de *Pinus halepensis* sobre folhada da mesma espécie e sobre folhada de *Eucalyptus globulus* são os pares que apresentam um maior atraso à ignição, sendo o leito de folhada de *Eucalyptus globulus* o que possui um menor atraso à ignição até cerca de 15% de teor de humidade e passando depois a comportar-se de forma contrária. Os gráficos que mostram as curvas médias, tendo em conta os valores dos ensaios e do desvio padrão acima e abaixo da média (y_1 e y_2 , respetivamente), encontram-se no apêndice A, sendo observável que o par de partícula que apresenta mais valores fora do intervalo médio de ensaio é a pinha de *Pinus halepensis* sobre a folhada da mesma espécie e o par que apresenta um comportamento mais constante ao longo de todos os ensaios é a pinha de *Pinus halepensis* sobre a palha de *Avena sativa*.

Efeito da partícula

Os resultados obtidos permitem fazer observações em relação ao efeito da partícula no atraso à ignição, uma vez que foram utilizadas partículas diferentes num mesmo leito combustível, ou seja, casca de *Eucalyptus globulus* e pinhas de *Pinus halepensis* sobre folhada de *Pinus halepensis*. A figura 28 mostra a comparação de resultados.

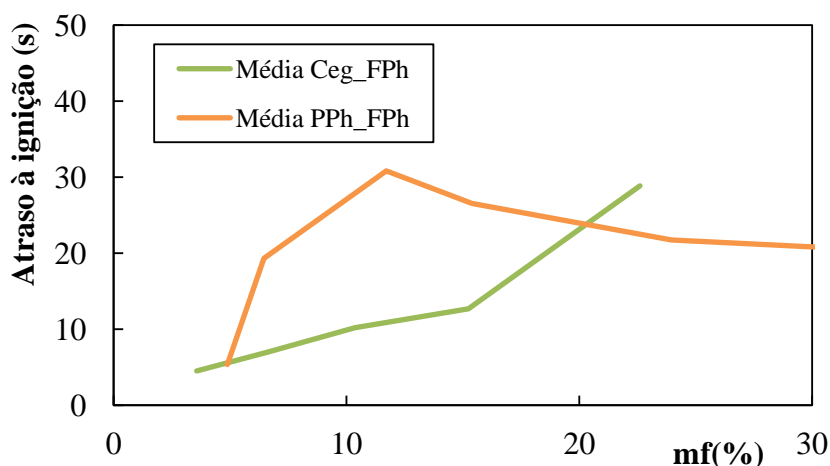


Figura 28 – Efeito da partícula no atraso à ignição no intervalo de teor de humidade até 30%

Verifica-se que utilizando o mesmo leito combustível e dentro da mesma gama de teor de humidade (até 30%) o tipo de partícula tem alguma influência no atraso à ignição. A casca de *Eucalyptus globulus* apresenta um atraso à ignição sempre menor em relação à pinha de *Pinus halepensis*, tendo esta um grande número de ensaios acima de 20 segundos de atraso à ignição.

Durante a realização dos ensaios foi-se observando que no caso em que a partícula era a pinha de *Pinus halepensis*, a posição de queda desta tinha grande influência no atraso à ignição. A figura 29 relaciona o atraso à ignição com os teores de humidade, fazendo uma comparação entre a posição de queda da pinha, nos ensaios onde estas foram utilizadas. Para uma melhor visualização de resultados é apresentado o gráfico com teores de humidade apenas entre 10% e 20%.

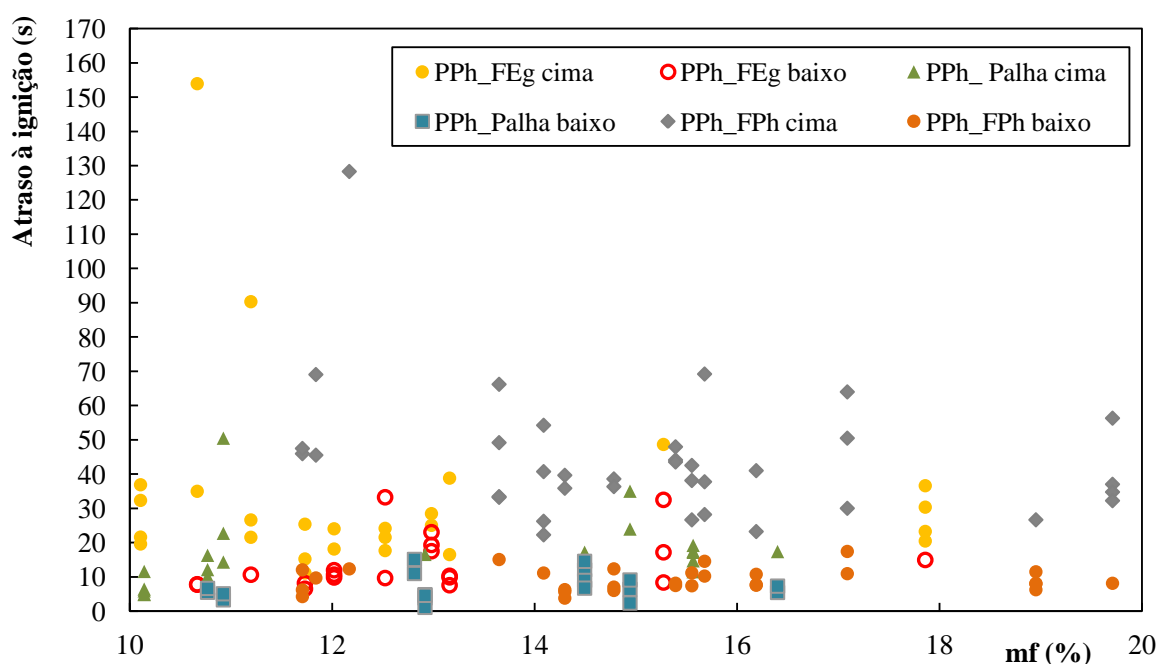


Figura 29 - Atraso à ignição em função do teor de humidade e da posição de queda da pinha de *Pinus halepensis*

Na leitura da figura 29 verifica-se que um dos fatores mais importantes no atraso à ignição, independentemente do teor de humidade, é a posição de queda da pinha. Sempre que a posição de queda foi voltada para baixo o atraso à ignição apresenta valores mais baixos. Até aos 20% de teor de humidade, com a posição de queda voltada para baixo, o atraso à ignição foi sempre inferior a 40 segundos.

Verifica-se, em geral, um atraso à ignição menor quando a pinha caiu voltada para baixo, num leito de palha, sendo os resultados semelhantes no caso em que o leito foi de folhada de *Pinus halepensis*. Quando a pinha caiu voltada para baixo num leito de folhada de *Eucalyptus globulus* os valores do atraso à ignição foram, por vezes, mais elevados, tendo como exemplo a situação onde o teor de humidade foi igual a 12,52% e o atraso à ignição foi igual a 33,25 segundos.

Nas situações em que a pinha caiu voltada para cima, o atraso à ignição apresentou valores menores quando o leito utilizado foi palha, no entanto os valores encontram-se próximos para qualquer um dos leitos combustíveis utilizados. Assim, as situações mais favoráveis à ocorrência de ignição são aquelas em que a pinha cai voltada para baixo num leito de palha, ou num leito de folhada de *Pinus halepensis*.

Efeito do leito combustível

Da mesma forma, é possível fazer observações em relação ao efeito do leito combustível no atraso à ignição, figura 30, uma vez que foi estudada a mesma partícula (pinha) em leitos diferentes (folhada de *Pinus halepensis* e *Eucalyptus globulus* e palha de *Avena sativa*).

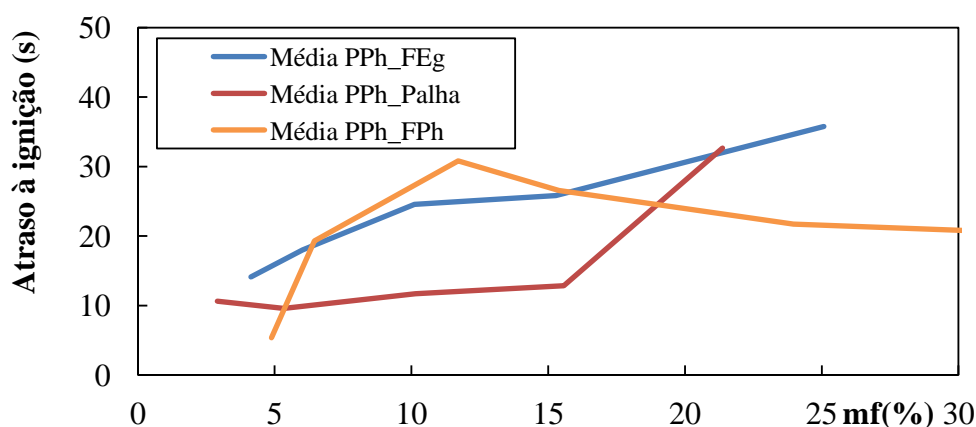


Figura 30 – Efeito do leito combustível no atraso à ignição no intervalo de teor de humidade até 30%

Verifica-se que dentro da mesma gama de teores de humidade (até 30%), os pares pinha de *Pinus halepensis* sobre folhada da mesma espécie e folhas de *Eucalyptus globulus* apresentam resultados semelhantes no atraso à ignição, o que leva a crer que o

tipo de leito não terá uma influência determinante na PI. Nota-se ainda que a palha de *Avena sativa* apresenta uma maior tendência a desencadear a ignição, uma vez que o atraso foi, na maioria das vezes, inferior a 20 segundos. Esta tendência pode estar relacionada com a distribuição do leito combustível na área utilizada, uma vez que o leito de palha apresenta uma tendência natural a adquirir uma maior porosidade, o que permite um encaixe da pinha quando esta impacta com o leito combustível.

3.3.3. Taxa média de perda de massa

A análise da variação de massa ao longo do tempo permite identificar quais os pares de partícula/leito combustível com maior potencial de degradação de massa, assim, a análise dessa variação juntamente com os teores de humidade dos leitos combustíveis são muito importantes.

Partículas em combustão de pinhas de *Pinus halepensis* sobre folhada de *Eucalyptus globulus*

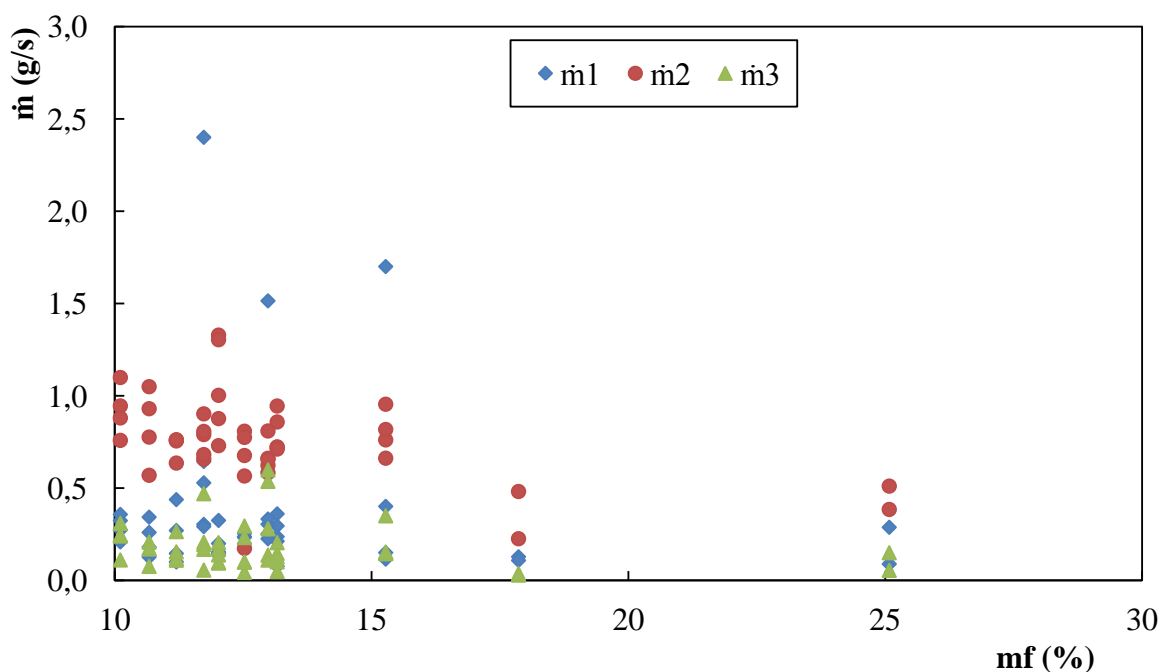


Figura 31 - Taxa média de perda de massa das partículas em combustão de pinhas de *Pinus halepensis* sobre folhada de *Eucalyptus globulus*

A taxa média de perda de massa apresenta, como esperado, valores mais elevados no momento \dot{m}_2 , ou seja, quando o declive das curvas da taxa média de perda de massa é mais elevado. Surgem no entanto alguns ensaios onde \dot{m}_1 apresenta um valor de taxa média de perda de massa maior, podendo significar que houve uma degradação repentina quando a partícula contactou com o leito combustível. O momento \dot{m}_3 apresenta o menor valor de taxa média de perda de massa, como seria de esperar, uma vez que a perda de massa começa a atingir um valor residual, tornando-se constante.

Pode ainda observar-se que teores de humidade mais elevados levam a taxas médias de perda de massa mais baixas, podendo relacionar-se com o facto de os ensaios serem mais lentos ou, por vezes, da chama se extinguir. No intervalo de teor de humidade entre 10% e 15% a taxa média de perda de massa apresentou um comportamento semelhante.

Partículas em combustão de casca de *Eucalyptus globulus* sobre folhada de *Pinus halepensis*

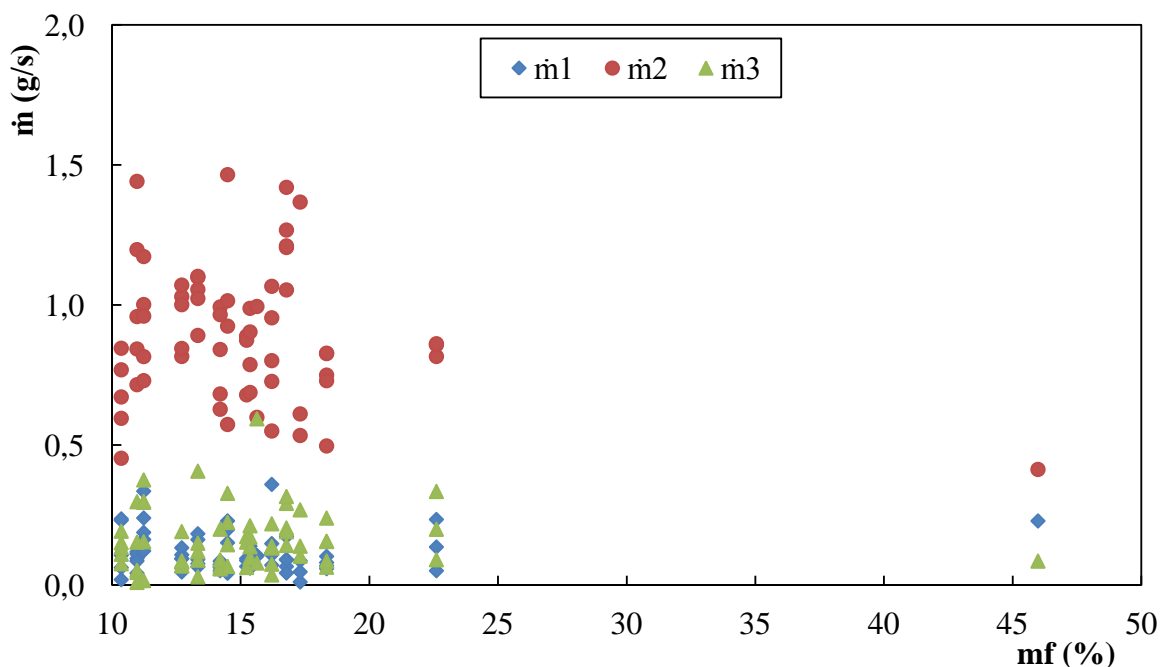


Figura 32 - Taxa média de perda de massa das partículas em combustão de casca de *Eucalyptus globulus* sobre folhada de *Pinus halepensis*

Neste conjunto de par de partícula/leito combustível os resultados vão também de encontro ao esperado. O momento \dot{m}_2 apresenta valores mais elevados para a taxa média de perda de massa. É também verificado que os valores mais baixos da taxa média de perda de massa correspondem às situações onde o teor de humidade foi mais elevado. Entre os 10% e 20% de teor de humidade a taxa média de perda de massa apresenta comportamentos semelhantes.

Partículas em combustão de pinhas de *Pinus halepensis* sobre palha de *Avena*

sativa

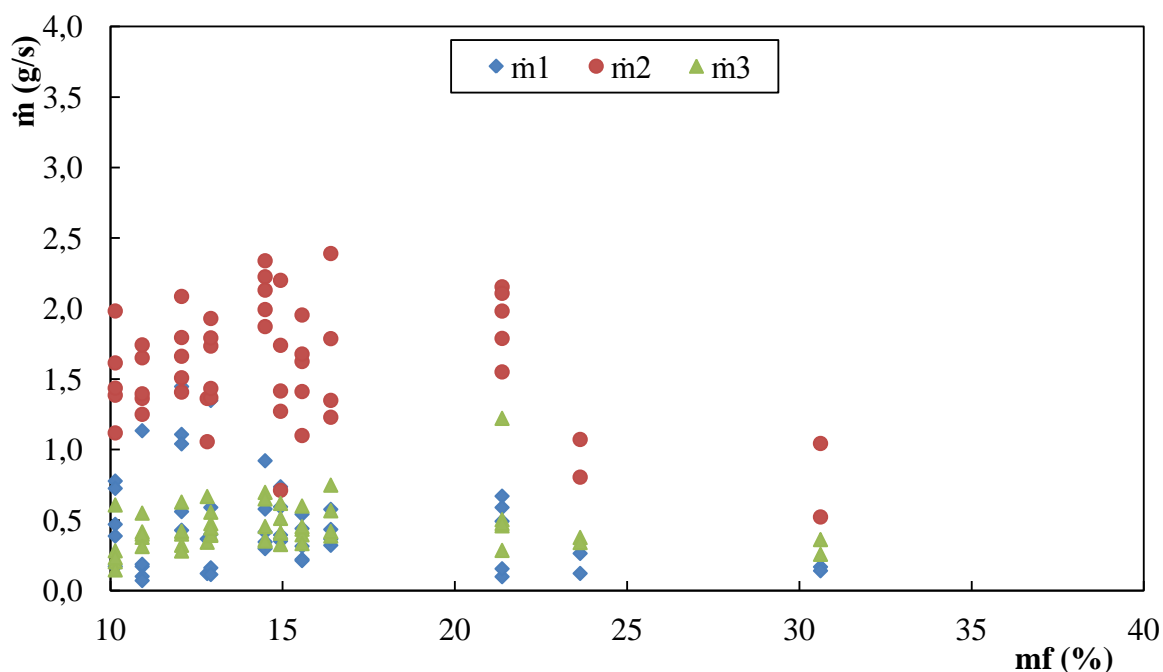


Figura 33 - Taxa média de perda de massa das partículas em combustão de pinhas de *Pinus halepensis* sobre palha de *Avena sativa*

À semelhança dos resultados anteriores, os valores observados na figura 33 mostram que o momento em que a taxa média de perda de massa apresenta um valor mais elevado é \dot{m}_2 , que representa o instante onde a curva de declive é maior. O momento \dot{m}_1 e \dot{m}_3 apresentam taxas médias de perda de massa semelhantes, sendo \dot{m}_1 geralmente mais elevado, o que leva a inferir que nos primeiros instantes, quando a pinha cai sobre o leito combustível, houve uma perda significativa de massa. No caso de \dot{m}_3 verifica-se que há também uma perda de massa com um valor mais elevado, do que nos restantes casos, até

ao final do ensaio. Volta a ser observável que valores mais elevados de teor de humidade levam a taxas médias de perda de massa mais baixas. Neste par de partícula/leito combustível para o mesmo intervalo de humidade (10% a 20%) a taxa média de perda de massa não apresentou um comportamento tão semelhante, como nos anteriores.

Com a leitura das figuras 31, 32 e 33 constata-se que o par de partícula/leito combustível que tem tendência a apresentar uma maior taxa média de perda de massa, dentro do mesmo intervalo de teores de humidade (10% a 20%), é a pinha de *Pinus halepensis* sobre o leito combustível de palha de *Avena sativa*. A menor taxa média de perda de massa corresponde, de uma maneira geral, à casca de *Eucalyptus globulus* sobre a folhada de *Pinus halepensis*.

4. CONCLUSÃO

A realização deste trabalho pretendeu contribuir com conhecimento sobre o fenómeno designado por focos secundários, nomeadamente o estudo da probabilidade de ignição de determinados leitos combustíveis, existentes na floresta portuguesa, através da queda de partículas em combustão.

Através das análises químicas e térmicas (TGA, DTA e calorimétricas) foi possível conhecer o comportamento das partículas e dos leitos combustíveis em função do aumento da temperatura. Determinou-se assim o PCS e o PCI de cada tipo partícula e de cada tipo de leito combustível em estudo, sendo o valor mais elevado de PCI obtido para as folhas de *Eucalyptus globulus* e o mais baixo para a palha de *Avena sativa*, possivelmente pelas suas características físicas, como referido na discussão feita anteriormente. Em relação às análises TGA e DTA verificou-se que as partículas e os leitos combustíveis apresentavam, de uma maneira geral, as mesmas temperaturas de decomposição, concluindo-se que o comportamento foi semelhante em todas as análises, exceto na palha.

Para cada par de partícula/leito combustível foram realizados 110 ensaios para determinação da PI e do atraso à ignição, notando-se uma grande influência do teor de humidade do combustível, das características físicas dos leitos combustíveis e do tipo de partícula. Concluiu-se que, no caso da pinha de *Pinus halepensis*, a posição de queda da chama é um fator determinante, tendo sido a PI igual a 100% na maioria dos casos em que a pinha caiu com a chama voltada para baixo. O maior número de ignições observou-se para o par pinha de *Pinus halepensis* sobre folhada de *Eucalyptus globulus*, com 102 ignições, seguido da pinha de *Pinus halepensis* sobre palha de *Avena sativa*, com 96 ignições, e por fim a casca de *Eucalyptus globulus* sobre folhada de *Pinus halepensis*, com 85 ignições.

O par partícula/leito combustível que apresentou o menor atraso à ignição, em função do teor de humidade, foi a casca de *Eucalyptus globulus* sobre folhada de *Pinus halepensis*, seguido da pinha de *Pinus halepensis* sobre palha de *Avena sativa*.

Concluiu-se que, para o mesmo leito combustível (folhada de *Pinus halepensis*), a casca de *Eucalyptus globulus* apresentou um atraso à ignição sempre

inferior. No caso da utilização da mesma partícula (pinha de *Pinus halepensis*), em diferentes leitos, concluiu-se que o leito combustível com maior tendência a desencadear ignição foi a palha de *Avena sativa*.

Após a ignição cada par de partícula/leito combustível apresentou um comportamento diferente na perda de massa, verificando-se que os valores mais baixos de taxa média de perda de massa correspondem às situações em que o teor de humidade foi mais elevado, e que a maior taxa média de perda de massa, dentro do mesmo intervalo de teor de humidade, correspondeu ao par pinha de *Pinus halepensis* sobre palha de *Avena sativa*.

Como qualquer trabalho experimental, apesar da facilidade do controlo e modelação das variáveis, foram encontradas algumas limitações, nomeadamente em relação à área de leito combustível e ao impacto das partículas nesta. Quando as partículas caíam no leito combustível existia um ressalto que fazia com que estas, principalmente a pinha de *Pinus halepensis* devido à sua massa, caíssem muitas vezes fora do tabuleiro, levando à repetição do ensaio. Noutras situações a partícula caiu numa extremidade do tabuleiro, o que dificultou a ignição, originando valores elevados de atraso à ignição independentemente do teor de humidade e do tipo de combustível.

Este trabalho contribuiu assim para um maior conhecimento do processo de ignição de leitos florestais por partículas em combustão, focando as características dos combustíveis em estudo, é no entanto necessário que no futuro mais trabalhos se continuem a desenvolver, nomeadamente com o uso de partículas diferentes e de outros leitos combustíveis, de modo a estabelecer uma comparação entre a PI e as características destes.

Seria muito enriquecedor o conhecimento das características das espécies predominantes em Portugal e o estudo de outros pares de partícula/leito combustível mais suscetíveis de ocorrer nas nossas florestas, para que existisse um melhor conhecimento da PI e fosse possível melhorar a gestão florestal no momento das reflorestações após um incêndio florestal. Seria ainda interessante a simulação de diferentes condições ambientais, com a introdução do fator vento e com a utilização de radiação, nomeadamente na realização de ensaios de campo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AFN (2012). *Cartografia nacional de áreas ardidas*. Acedido a 29 de Junho de 2012, em: <http://www.afn.min-agricultura.pt/portal/dudf/cartografia/info-geo>.
- Albini, F. A. (1976). Estimating Wildfire behavior and effects. *USDA Forest Service - General Technical Report INT-30*.
- Albini, F. A. (1979). Spot Fire Distance from Burning Trees - A Predictive Model. *USDA Forest Service, Research Paper INT-56, Intermountain Forest and Range Experiment Station*.
- Alexander, M. E. e Cruz, M. G. (2011). Crown Fire Dynamics in Conifer Forests. Em: *Synthesis of extreme fire behavior: volume I for fire managers*. USDA, Forest Service, Pacific Northwest Research Station, Portland, Oregon. pp. 107-121
- Almeida, M. (2011). *Propagação de incêndios florestais por focos secundários*. Tese de Doutoramento em Engenharia Mecânica na Especialidade de Riscos Naturais e Tecnológicos, Universidade de Coimbra, Coimbra. 155 pp.
- Casimiro, M. H., Leal, J. P., Gil, M. H. e Nieto de Castro, C. A. (2006). Análise calorimétrica aplicada a polímeros biológicos. *Química*, 2006. **100**: 91-96
- Cracknell, R. F., Alcock, J.L., Rowson, J. J., Shirvill, L. C. e Üngüt, A. (2002). Safety considerations in retailing hydrogen. *SAE Technical Paper 2002-01-1928*, 2002
- Curry, J. R. e Fons, W. L. (1940). Forest-fire behavior studies. California Forest and Range Experiment Station, Berkeley, California. 7pp.
- Despacho nº 21722/2008 de 20 de Agosto. *Diário da República nº 160 – 2ª Série*. Ministério da Administração Interna. Lisboa
- Ganteaume, A., Lampin-Maillet, C., Guijarro, M., Hernando, C., Jappiot, M., Fonturbel, T., Perez-Gorostiaga, P. e Vega, J.A. (2009). Spot fires: fuel bed flammability and capability of firebrands to ignite fuel beds. *International Journal of Wildland Fire*. **18**: 951-969
- Koo, E., Pagni, P. J., Weise, D. R., e Woycheese, J. P. (2010). Firebrands and spotting ignition in large-scale fires. *International Journal of Wildland Fire* 2010. **19**: 818–843.

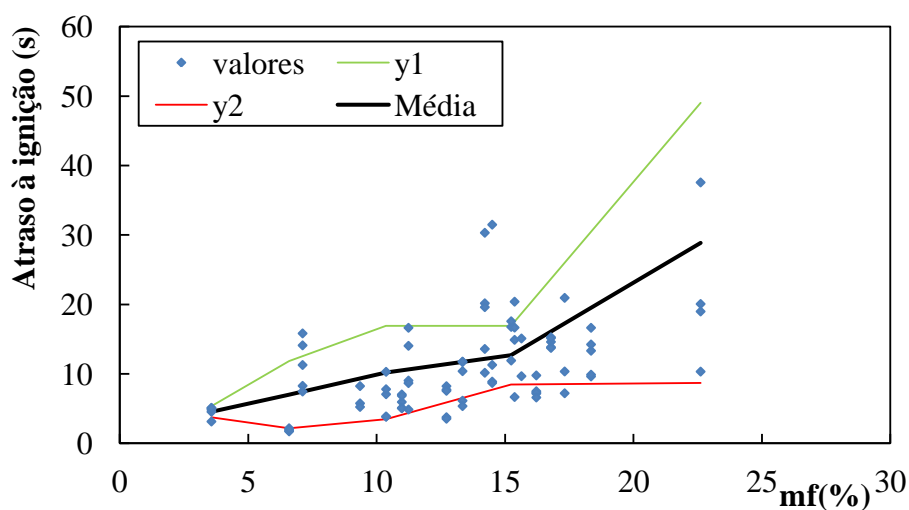
- Lioudakis, S., Bakirtzis e D., Dimitrakopoulos, A. (2002). Ignition characteristics of forest species in relation to thermal analysis data. *Thermochimica Acta* 390, 2002. **83–91**.
- Lopes, S., Lemos, L.T., Viegas, M.T. e Viegas, D.X. (2010). Moisture content of fine forest fuels in central Portugal and its relation with several forest fire related aspects. *VI International Conference on Forest Fire Research D. X. Viegas (Ed.)*, 2010.
- Lourenço, L. (2007). Incêndios florestais de 2003 e 2005. Tão perto no tempo e já tão longe na memória! Em: Riscos ambientais e formação de professores, Actas das VI Jornadas Nacionais do Prosepe.
- Lourenço, L. e Malta, P. (1993). Elementos estatísticos – Incêndios florestais em Portugal Continental na década de 80 e anos seguintes. *Finisterra* XXVIII, 1993. **55-56**: 261 – 277.
- Manzello, S. L., Cleary, T. G., Shields, J. R. e Yang, J. C. (2005). On the ignition of fuel beds by firebrands. *Fire Mater*, 2006. **30**: 77–87.
- Manzello, S. L., Maranghides, A. e Mell, W. E. (2007). Firebrand generation from burning vegetation. *International Journal of Wildland Fire*, 2007. **16**: 458–462
- McArthur, A. G. (1967). Fire behaviour in eucalypt forests. *Commonwealth of Australia Forestry and Timber Bureau Leaflet*. **107**.
- Mendes, R. (2010). Métodos laboratoriais. *3º Ciclo – Engenharia Segurança ao Incêndio*. Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra.
- Oliveira, R. (2010). *Um Estudo sobre os Incêndios Florestais Ocorridos no Estado de Vitória (Austrália), em Fevereiro de 2009*. Tese de Mestrado Interdisciplinar em Dinâmicas Sociais, Riscos Naturais e Tecnológicos, Universidade de Coimbra, Coimbra. 87 pp.
- Pastor, E., Zárate, L., Planas, E., e Arnaldos, J. (2003). Mathematical models and calculation systems for the study of Wildland fire behaviour. *Progress in Energy and Combustion Science*, 29, 139-153.
- Raposo, J. (2011). *Estudo da Interação de Frentes de um Incêndio Florestal*. Tese de Mestrado em Engenharia Mecânica na Especialidade de Energia e Ambiente, Universidade de Coimbra, Coimbra. 55 pp.
- Rocha, S. (2005). *Floresta Portuguesa: o desespero de hoje e a esperança no amanhã*. Acedido a 20 de Março de 2012, em: <http://www.simbiotica.org/incendios2.htm>.
-

- Viegas, D.X. (2006). Parametric study of an eruptive fire behavior model. *International Journal of Wildland Fire*, 15(2), 169-177.
- Viegas, D.X. (2009). Recent Forest Fire Related Accidents in Europe. JRC Scientific and Technical Reports, Joint Research Centre, Institute for Environment and Sustainability, European Commission. Luxembourg. 75p.
- Viegas, D.X. (2012). Extreme Fire Behaviour. Em: Armando C. Bonilla Cruz and Ramona E. Guzman Correa (Ed.), *Forest Management: Technology, Practices and Impact*. Nova Science Publishers, Inc. (In press)
- Vieira, P. A. (2006). *Portugal: o vermelho e o negro – A verdade amarga e a dolorosa realidade dos incêndios florestais*. 1ª edição, Dom Quixote. Lisboa.
- Zhao, Y., Zhu, G. e Cheng, Z. (2010). Thermal analysis and kinetic modeling of manganese oxide ore reduction using biomass straw as reductant. *Hydrometallurgy*, 2010. **105**: 96-102

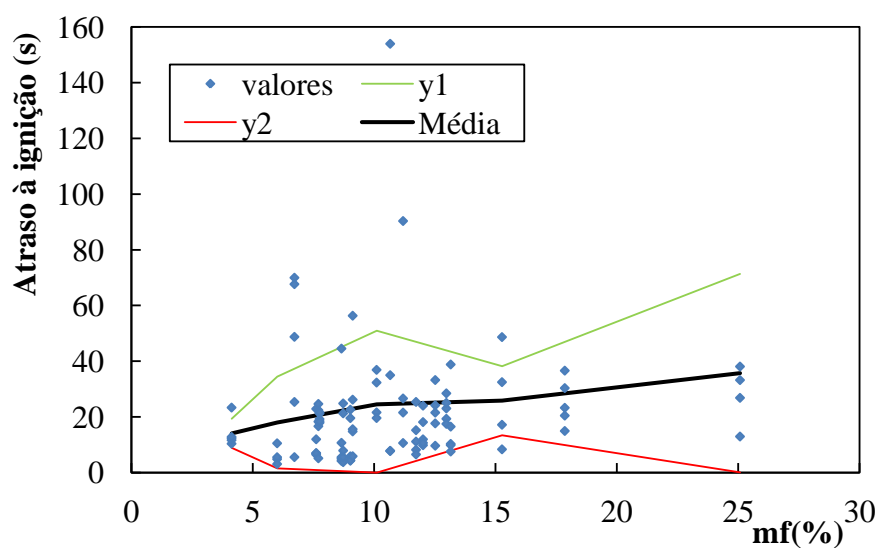
APÊNDICE A – CURVAS MÉDIAS

Curvas médias em relação aos valores dos ensaios e do desvio padrão acima e abaixo dos valores médios do atraso à ignição (y_1 e y_2 , respetivamente)

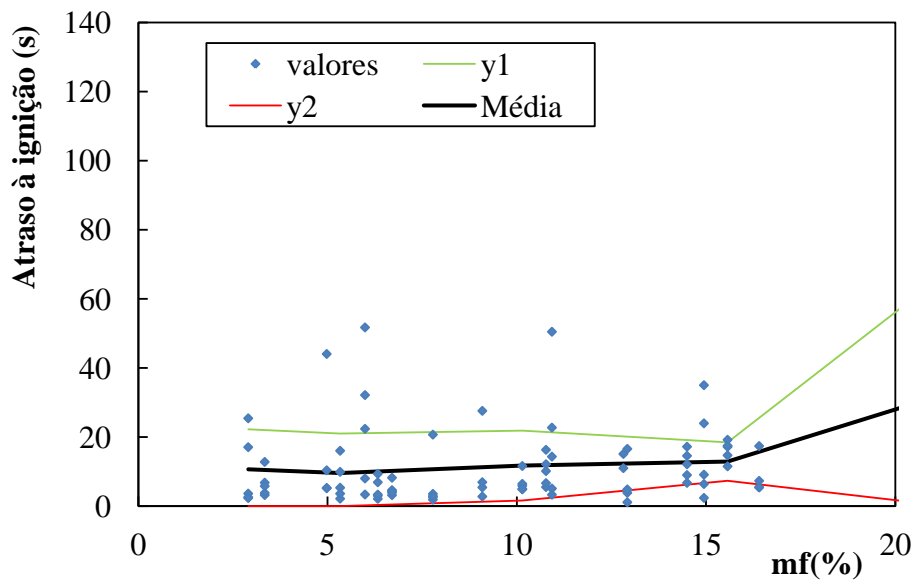
Casca de Eucalyptus globulus sobre folhada de Pinus halepensis



Pinha de Pinus halepensis sobre folhada de Eucalyptus globulus



Pinha de *Pinus halepensis* sobre palha de *Avena sativa*



Pinha de *Pinus halepensis* sobre folhada de *Pinus halepensis*

