



Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra
Departamento de Engenharia Mecânica

Ignição de Combustíveis Florestais
por Partículas com Elevada Temperatura

Tese de Mestrado

Mário António Fonseca Loureiro

Orientadores:

Professor Doutor Domingos Xavier Viegas

Professor Doutor António Rui A. Figueiredo

Coimbra - 2007

Reeditada pelo autor em 25/01/2021 (com acordo ortográfico e mais imagens)

Esta edição e a versão original estão disponíveis em www.marioloureiro.net/conhecimentocentif.htm

Resumo

O presente trabalho tem por base os riscos de ignição de incêndios florestais originados pela libertação de partículas com elevada temperatura de comboios, de camiões e pelo escape de motores de combustão interna. Nos comboios há produção de chispas de metal e a possibilidade de libertação de partículas em combustão provenientes dos calços dos travões. Nos comboios com motor diesel (gasóleo) e noutros veículos, há a possibilidade de libertação de fagulhas em combustão pelo escape. Nos camiões há ainda a possibilidade dos pneus se incendiarem e ou libertarem partículas em combustão. Neste âmbito fizeram-se ensaios de auto inflamabilidade com partículas de calço e de borracha de pneu. A maior parte deste trabalho foi dedicado à determinação da inflamabilidade das três principais espécies florestais de Portugal, caruma de *Pinus pinaster*, folhas mortas de *Eucalyptus globulus* e folhas e extremidades de ramos de feno, através de partículas com elevada temperatura (esferas de aço aquecidas), tendo como variáveis o teor de humidade da amostra, a massa da partícula e a temperatura da partícula. Os ensaios foram filmados, o que possibilitou a medição do tempo de cada ignição, o que foi indispensável para determinar a energia de ignição. Concluiu-se que a probabilidade de ignição aumenta com o aumento da temperatura da partícula e que o principal fator a ter em conta na ignição é a temperatura da partícula em contacto com a amostra.

Palavras-chave: Incêndios florestais, *Pinus pinaster*, *Eucalyptus globulus*, feno, partículas incandescentes, chispas, inflamabilidade, ignição de combustíveis florestais, energia de ignição.

Summary

This work is based on the risk of ignition of forest fires caused by the release of particles with a high temperature of trains, trucks and the exhaust of internal combustion engines. On the trains are producing sparks of metal and the possibility of release of particulates from the burning brake pads. On the trains with diesel engines and other vehicles, there is the possibility of release of sparks into the combustion exhaust. In the truck there is still a possibility if the tyres and we set it on fire or release particulate combustion. In this context have been testing the self flammability with particles of shoe and rubber tire. Most of this work was devoted to determining the flammability of the three main forest species in Portugal, dead leaves of *Pinus pinaster*, *Eucalyptus globulus* and ends of leaves and branches of hay, through particles with high temperature (balls of steel heated) And variables as the moisture content of the sample, the mass of the particle and the temperature of the particle. The tests were filmed, which allowed the measurement of time for each ignition, which was essential to determine the energy of ignition. It was concluded that the probability of ignition increases with increasing temperature of the particle and that the main factor to be taken into account in the ignition temperature of the particle is in contact with the sample.

Keywords - Forest fire, *Pinus pinaster*, *Eucalyptus globulus*, grass, white hot particles, flammability, forest ignition fuel, ignition energy, spark arrester.

Índice

1 Introdução

| | |
|--|----|
| 1.1- O problema dos incêndios florestais | 7 |
| Estatísticas dos incêndios em Portugal | 7 |
| Algumas causas estruturais | 9 |
| Necessidade de remoção da biomassa excessiva | 9 |
| Distribuição da área ocupada por espécies florestais | 16 |
| Distribuição horária dos fogos | 16 |
| Fatores Meteorológicos | 19 |
| Inflamabilidade dos combustíveis | 22 |
| Comportamento extremo do fogo | 24 |
| Causas dos incêndios | 26 |
| Emissão de partículas incandescentes | 27 |
| Pneus de camião | 33 |
| 1.2 – Objetivos | 35 |
| 1.3 – Revisão bibliográfica | 36 |
| 1.4 – Âmbito do presente estudo | 42 |

2 - Ignição de Combustíveis Florestais

| | |
|------------------------------------|----|
| 2.1- Processo físico-químico | 43 |
| 2.1- Parâmetros envolvidos | 47 |

3 – Metodologia

| | |
|--|----|
| 3.1 – Metodologia – Materiais | |
| 3.1.1 - Espécies florestais estudadas e amostragem | 48 |
| 3.1.2 - Teor de humidade | 49 |
| 3.1.3 -Velocidade do ar | 53 |
| 3.1.4 - Partículas aquecidas – esferas | 54 |
| 3.1.4.1 - Coeficiente de convecção | 55 |
| 3.1.5 - Outras partículas testadas | 60 |
| 3.2 – Metodologia de ensaio | |
| 3.2.1- Aquecimento das partículas | 61 |
| 3.2.2- Equipamento de ensaio | 62 |
| 3.2.3- Processo de ensaio | 66 |
| 3.2.3.1 Ensaios com borracha, calços e fuligem | 66 |
| 3.2.3.2 Ensaios com esferas em espécies florestais | 67 |
| 3.2.3.3 Ensaios com partículas do corte abrasivo | 70 |
| 3.2.3.4 Ensaios com fuligem 2º método | 71 |

4- Resultados e Discussão

| | |
|---|----|
| 4.1-Ensaio de inflamabilidade de partículas | |
| 4.1.1- Ensaio de inflamabilidade de partículas de borracha de pneu | 72 |
| 4.1.2- Ensaio de inflamabilidade de partículas de calços de travões de comboios | 73 |

| | |
|--|-----|
| 4.1.3- Ensaio de inflamabilidade de partículas de fuligem de escape de camião | 78 |
| 4.1.4 - Ensaio de inflamabilidade de partículas de fuligem projetadas por explosão | 79 |
| 4.2-Ensaio de ignição de combustíveis por partículas | |
| 4.2.1-Inflamabilidade do feno com cerca de 10% de teor de humidade | 80 |
| 4.2.2-Inflamabilidade do feno “seco” (teor de humidade <5%) | 83 |
| 4.2.3-Inflamabilidade da caruma com cerca de 10% de teor de humidade | 86 |
| 4.2.4-Inflamabilidade da caruma “seca” | 90 |
| 4.2.5-Inflamabilidade do eucalipto com cerca de 10% de teor de humidade | 93 |
| 4.2.6-Inflamabilidade do eucalipto “seco” | |
| 4.3-Inflamabilidade da caruma com 10% de teor de humidade (com 5 massas) | 101 |
| 4.4-Tempo de ignição | |
| 4.4.1-Tempo de ignição das espécies “secas” | 103 |
| 4.4.2-Tempo de ignição da caruma com cerca de 10% de teor de humidade | 105 |
| 4.4.3- Energia de ignição da caruma com cerca de 10% de teor de humidade | 105 |
| 5-Conclusão | |
| 5.1-Ensaio de inflamabilidade de partículas | |
| 5.1.1- Ensaio de inflamabilidade de partículas de borracha de pneu | 110 |
| 5.1.2- Ensaio de inflamabilidade de partículas de calços de travões de comboios | 111 |
| 5.1.3- Ensaio de inflamabilidade de partículas de fuligem no epiradiador | 111 |
| 5.1.4- Ensaio de inflamabilidade de partículas de fuligem projetadas por explosão | 111 |
| 5.2-Inflamabilidade das espécies florestais com esferas aquecidas | |
| 5.2.1- Efeito do teor de humidade da espécie florestal na ignição | 112 |
| 5.2.2- Efeito do tempo de ignição | 113 |
| 5.2.3- Efeito da massa da partícula na ignição | 113 |
| 5.2.4- Efeito da temperatura na ignição | 114 |
| 5.2.5- Trabalhos futuros e metodologia | 114 |
| 6 - Bibliografia | 116 |
| 7 – Agradecimentos | 119 |
| 8– Anexos | |
| 8.1-Tabela 1- Caudal de gases de escape em litros/s =dm ³ /s | 120 |
| 8.2 - Curvas do arrefecimento de esferas | 121 |
| 8.3 - Curvas temperatura - tempo do aço 100 C 6 | 122 |
| 8.4 - Novos filtros para escapes | 122 |
| 8.5 - Diagrama psicrométrico | 123 |
| 8.6 - Tipologia de causas | 123 |
| 8.7 - Lista de patentes sobre “Spark arrester” | 124 |
| 8.8 - Motivos para o corte de árvores junto às estradas | 128 |

Siglas e abreviaturas

ADAI – Associação para o Desenvolvimento da Aerodinâmica Industrial

AISI - American Iron and Steel Institute

CEIF - Centro de Estudos sobre Incêndios Florestais

CO₂ – Dióxido de carbono

CP – Caminhos de Ferros Portugueses EP

DEMUC – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Coimbra

DGF - Direcção Geral das Florestas

DGRF - Direcção Geral dos Recursos Florestais

DL- Decreto-Lei

FWI - *Fire Weather Index* – Índice climático de risco de incêndio

ISO – *International Organisation for Standardisation* – Organismo Internacional para a Normalização

LEIF - Laboratório de Estudos sobre Incêndios Florestais

NF – *Normes Françaises* – Normas Francesas

NRCNGF - Núcleo Regional do Corpo Nacional da Guarda Florestal;

UNE - *Normas Españolas* - Normas Espanholas

USA – *United States of America* – Estados Unidos da América

Símbolos

A [m²] - área

Bi - número de Biot

c [J/(kg.°C)] - calor específico

c_p [J/(kg.°C)] - calor específico a pressão constante

D [m] – diâmetro

dQ_s - quantidade infinitesimal de calor

H [J]- Entalpia

h [W/(m²K)] - coeficiente de convecção

K [W/(m·K)] – condutividade térmica

L_c – comprimento característico

m [kg] - massa

N_{uD} - número de Nusselt

Q [W] - calor

Pr - número de Prandtl

r [m] – raio

u [m/s] - velocidade do fluido

Re_D - número de Reynolds

V [m³] - volume

T[°C], [K] – temperatura

T_{ig} - temperatura de ignição (temperatura de ignição quase instantânea das folhas por partículas)

t [s] – tempo

t_{ig} - tempo de ignição

T_s - temperatura média

μ [N s/m²] - viscosidade dinâmica de um fluido

μ_s [N s/m²] - viscosidade dinâmica de um fluido estimado para a temperatura média

ν [m²/s] - viscosidade cinemática de um fluido

σ [W/(m²·K⁴)] – constante de stefan-Boltzmann (5,67·10⁻⁸)

ρ [kg/m³] - massa volúmica

ε - emissividade (radiação)

φ [cm⁻¹] - relação superfície volume

Nota adicional de 2021 - em Portugal a atualização do Sistema Internacional de Unidades (SI) foi feita pelo DL 76/2020 de 25 de setembro, este diploma está disponível em:

<https://dre.pt/application/file/a/143745978>

1- Introdução

1.1- O problema dos incêndios florestais

Estatísticas dos incêndios em Portugal

Nas últimas três décadas tem-se verificado em Portugal um elevado crescimento na ocorrência de incêndios florestais, tendo havido nos últimos anos, dez vezes mais incêndios quando em comparação com o ano de 1980 (fonte: DGRF - Direcção Geral dos Recursos Florestais), contrastando com outros países, nomeadamente os Estados Unidos, que no mesmo período reduziram para um terço o número de incêndios florestais (fonte: *National Interagency Fire Center, Boise, Idaho, 2000*)

Desde 1980 em que houve 2349 ocorrências de incêndios florestais, a tendência foi de aumento, atingindo-se um máximo relativo em 1998 com 34676 de ocorrências, mas, no ano de 2005 foi alcançado o máximo absoluto, com 35698 ocorrências. Todavia desde o ano de 2000 tem-se verificado a redução, com a exceção do ano de 2005 que foi um ano de reduzida precipitação.

A média anual entre 1995 a 2004 de ocorrências de incêndios florestais foi de 28210.

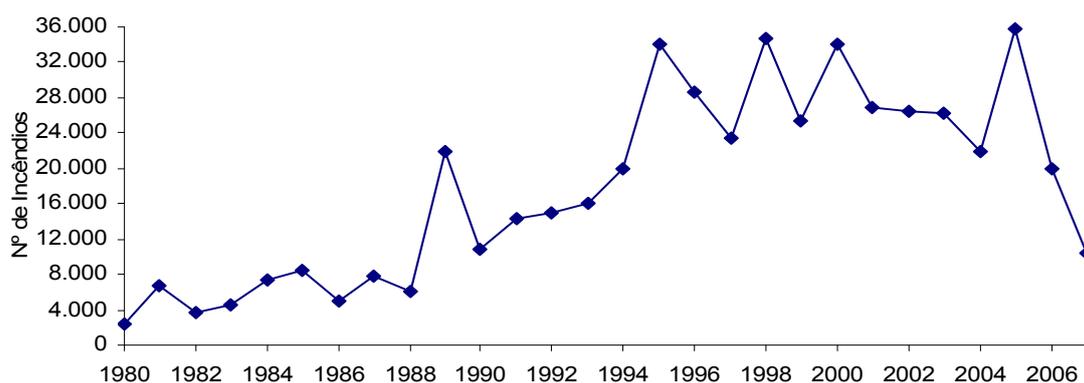


Gráfico1.1 Ocorrências de incêndios florestais em Portugal

Os dados do ano de 2007 da tabela 1.1 e do gráfico 1.2 reportam-se a 30/9/2007 e ainda são provisórios.

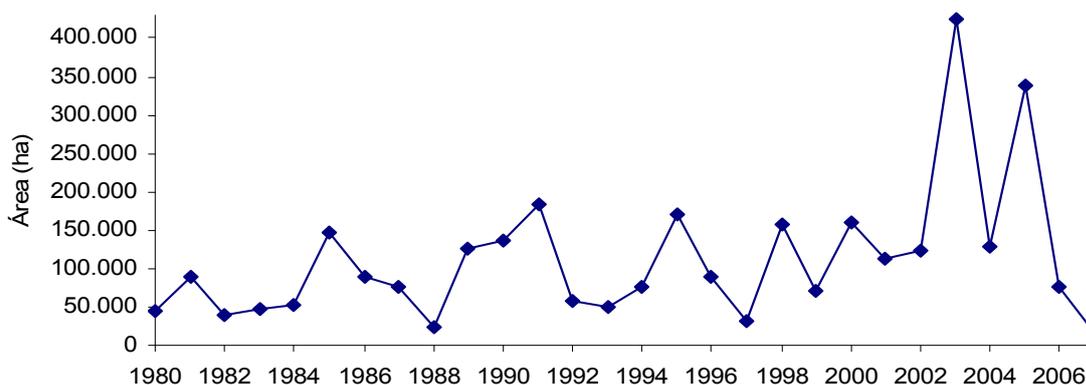


Gráfico1.2 Área ardida total. Fonte: DGRF15/10/2007

Ao analisarmos os resultados anteriores, em que houve uma grande redução de ocorrências em 2007 e de área ardida, este ano apresenta os melhores resultados desde 1980.

Em 2007 o dispositivo de combate a incêndios foi bastante eficiente, como se pode constatar com os dados apresentados na tabela 1.1. Para estes resultados também houve alguma ajuda meteorológica, pois a precipitação esteve acima do normal entre Maio a Agosto, o que contribuiu em parte para a grande redução do número de ocorrências.

A grande parte da redução do número de ocorrências em 2007, terá resultado da maior e melhor prevenção que tem sido cada vez mais implementada. As medidas para a prevenção são apresentadas no relatório da DGRF de 15/10/2007.

| Meses | Área ardida (ha) | | | Média 2002-2006 | Meteorologia* | | | |
|-----------|------------------|-------|--------|--------------------|---------------|-------|-------------|------|
| | 2007 | | | | Precipitação | | Temperatura | |
| | Povoamentos | Matos | Total | | Norte | Sul | Norte | Sul |
| Janeiro | 42 | 51 | 93 | 204 | -117,6 | -73,4 | +0,6 | -0,6 |
| Fevereiro | 2 | 5 | 7 | 958 | +24,6 | -8,7 | +0,8 | +1,1 |
| Março | 193 | 382 | 575 | 2.399 | -43,9 | -41,7 | +0,5 | +0,2 |
| Abril | 87 | 168 | 255 | 992 | -32,7 | -16,3 | +1,5 | +0,9 |
| Maio | 64 | 87 | 151 | 1.246 | +11,6 | +11,4 | +0,8 | +1,2 |
| Junho | 154 | 121 | 275 | 10.981 | +32,5 | +23,0 | -1,5 | +0,2 |
| Julho | 2.172 | 963 | 3.135 | 60.643 | +7,8 | -2,8 | -1,1 | +1,2 |
| Agosto | 3.823 | 3.553 | 7.376 | 118.389 | +1,6 | +4,8 | -0,2 | +0,6 |
| Setembro | 1.046 | 3.692 | 4.738 | 18.073 | -4,4 | +4,2 | +1,6 | +1,4 |
| Total | 7.583 | 9.022 | 16.605 | 213.885 | -- | -- | -- | -- |

Tabela 1.1 Distribuição de áreas ardidas e parâmetros meteorológicos. Fonte: DGRF

Para se verificar a eficiência dos meios de combate a incêndios vai-se dividir a área total ardida pelo número de ocorrências, já que o número de ocorrências depende da prevenção, ao passo que a área ardida depende em boa parte dos meios de combate a incêndios. Assim, ao analisar-se o gráfico 1.3 constata-se que terá havido em 2007 a segunda maior eficiência no combate aos incêndios desde 1980, precedido de 1997 que apresenta o melhor resultado.

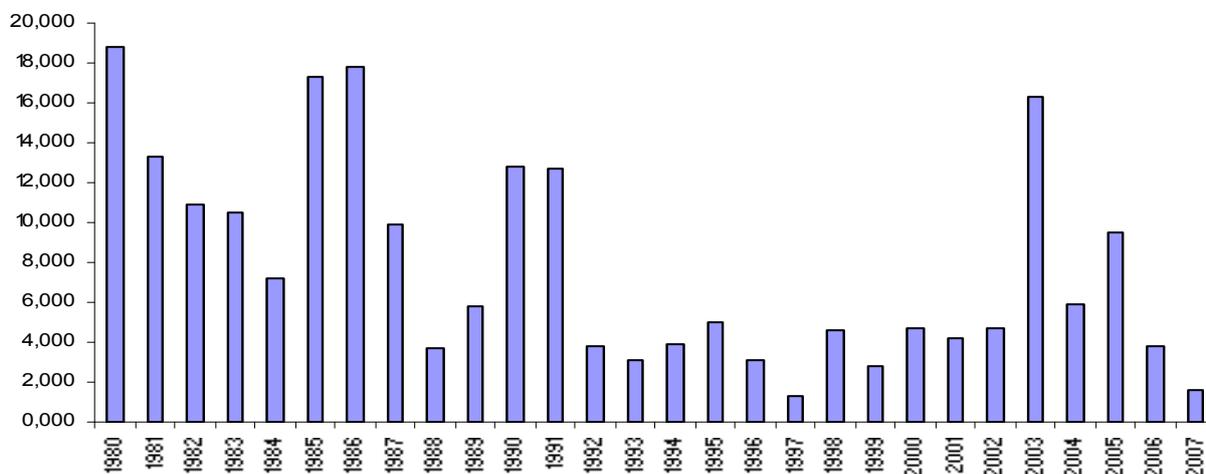


Gráfico 1.3 Eficiência no combate aos incêndios traduzida pela área ardida em média por cada incêndio. Fonte dos dados: DGRF 15/10/2007

Algumas causas estruturais

Este grande aumento de incêndios florestais, em parte, terá como explicação o movimento demográfico do interior para as cidades do litoral, pelo que levou ao abandono dos campos de cultivo. O fenómeno da desertificação do interior não foi exclusivo de Portugal, ele ocorreu a nível europeu, o que levou a que animais selvagens como o urso e o lobo, tornassem a povoar o interior dos países outrora fortemente povoados no seu interior, como a Alemanha.

O outrora, a utilização de matos para as camas dos animais, juntamente com a recolha de lenha, reduzia os riscos de incêndio e assim a desertificação do interior veio facilitar a propagação dos incêndios florestais.

Como havia mais percentagem de terras cultivadas, haveria menor quantidade de vegetação para transmitir aos incêndios florestais. Pelas mesmas razões as terras cultivadas funcionavam como corta-fogos, reduzindo por essa razão a propagação dos mesmos.

Necessidade de remoção da biomassa excessiva

Nos dias de Verão, em que a temperatura ronda os 40°C, e a vegetação tem baixo teor de humidade (10% ou menos), tem havido centenas de incêndios, pelo que o dispositivo de combate aos incêndios existente não tem tido capacidade de resposta nem eficácia, contribuindo em parte para uma grande área ardida.

Os incêndios florestais são uma importante fonte de emissão de CO₂ e de outros compostos poluentes para a atmosfera, razão pela qual Silva et al. (2006) estimaram aqueles montantes. Os ecossistemas vegetais terrestres são uma componente importante do ciclo biogeoquímico do carbono pois armazenam carbono. Os valores obtidos com os incêndios florestais na emissão de gases com efeito de estufa, são importantes pelo que interessa evitá-los, enquanto que a queima controlada do carbono permite a redução destes gases.

A legislação portuguesa, através do DL 71/2006 de 24 de Março que criou o Fundo Português de Carbono, subsidia inclusive a sequestração geológica de CO₂.

Com os incêndios florestais não há aproveitamento do potencial energético dos combustíveis queimados, nem do carbono consumido, Sardinha et al. (2002). Se a biomassa fosse aproveitada para ser destilada, obter-se-ia carvão vegetal que serve como combustível para fazer churrascos, aquecimento, fabricar aço de alta qualidade devido a ser isento de enxofre. Devido à elevada porosidade o carvão vegetal serve para o fabrico de filtros de ar e água. Da destilação da madeira consegue-se metanol, acetona, metil acetato, acetaldeído, ácidos como o acético, propiónico e butírico, creosote, guaiacol e outros fenóis, e ainda éteres de fenol.

Para minimizar os efeitos nefastos dos incêndios florestais a solução estará em reduzir o número de ocorrências. Para a prevenção dos incêndios florestais, é necessário limpar a

vegetação que provoca riscos elevados, como a vegetação em redor de edificações, estradas, caminho-de-ferro e de outros locais de risco.

Não se pode cortar todo o mato no interior das florestas por se pôr em a causa a actividade cinegética e o desenvolvimento do ecossistema. Esta preocupação é apresentada pelo Instituto da Conservação da Natureza no Plano Sectorial da Rede Natura 2000, com a medida número 128: *“Conservar / promover sebes, bosquetes e arbustos – em áreas mais abertas, com o objetivo de compartimentar e diversificar o habitat de uma série de espécies da fauna, favorecendo os locais de refúgio e nidificação. Importante também para a conservação de algumas espécies da flora”*.

Com o mato desenvolvido, o fogo propaga-se com mais facilidade, prolongando-se ao cume das árvores provocando uma maior mortalidade destas (Fonte – Artwork Jim Dawson, National Geographic Society, 1996).

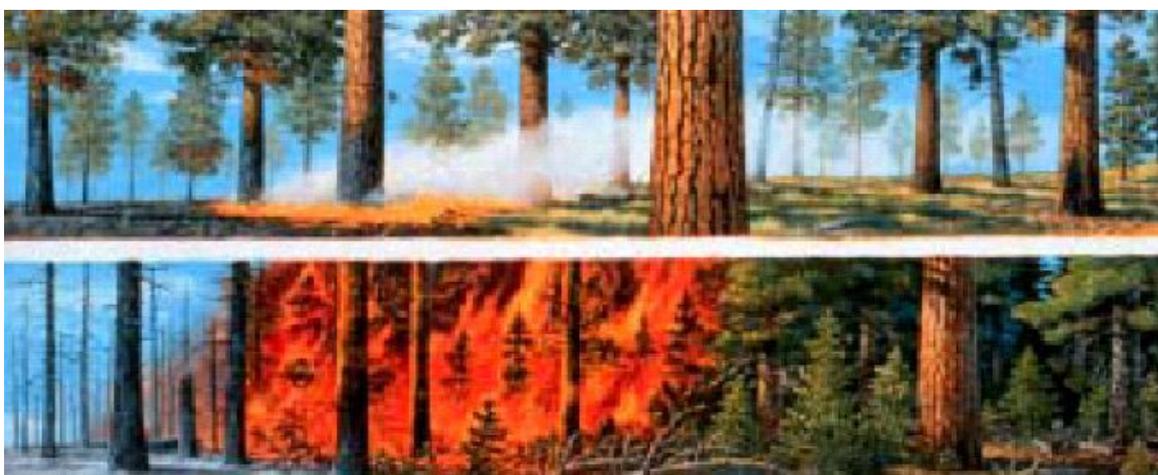


Imagem 1.1 – O fogo propaga-se às árvores se houver mato. Artwork Jim Dawson 1996.

Atualmente é oneroso cortar o mato, pois o seu aproveitamento em Portugal como biomassa ainda está no início.

Será necessário liberalizar o corte do mato, para facilitar a actividade da utilização da biomassa. Contudo terão de se impor algumas reservas, como reservas cinegéticas que estão sinalizadas e quando o proprietário faça a gestão da biomassa o mesmo deve afixar placas na periferia do terreno a proibir o corte.

É necessário desenvolver a utilização da biomassa em especial para produção de electricidade, o que contribuirá para a redução dos incêndios florestais e da emissão de CO₂ e ir ao encontro do acordo das exigências comunitárias a nível de produção de energia a partir de fontes renováveis. O DL 71/2006 de 24 de Março, que criou o Fundo Português de Carbono, tem como objetivo contribuir para o cumprimento dos compromissos quantificados de limitação de emissões de gases com efeito de estufa que o Estado Português se assumiu, ao ratificar o Protocolo de Quioto.

Cortar o mato no interior da floresta acarretará custos elevados devido aos maus acessos e ao transporte, mas há ainda outra questão a considerar, a rentabilidade, interessando o melhor desenvolvimento da floresta. Cabral et al. (1999) defendem que a floresta na sua biodiversidade se desenvolve melhor, não havendo corte de vegetação rasteira.

No âmbito da silvicultura preventiva a desrama e o desbaste de povoamentos florestais melhoram quantitativa e qualitativamente a produção lenhosa, Fernandes et al. (2005). Estas operações visam também reduzir a vulnerabilidade da formação ao incêndio, reduzindo o potencial de desenvolvimento de um fogo de copas que terá uma elevada mortalidade das árvores.

Uma boa solução para esta biomassa é o fabrico de pellets.



Imagem 1.2 – Pellets. Fonte - Google

Notas adicionais de 2021:

1 - O autor utiliza desde 2017 para aquecimento do seu escritório e da sua habitação duas salamandras a pellets da empresa de Viseu “Metlor”.

2 - Segundo a AIMMP em 2017 Portugal produz cerca de 800 000 toneladas de pellets das quais consome apenas 250 000 toneladas, fonte <https://aimmp.pt>.

3 - Em Portugal é lamentável que o imposto sobre o valor acrescentado (IVA) das pellets seja à taxa normal, quando isto na Europa só acontece em Portugal e Espanha.

4 - A [ADAPCDE](#) de qual o autor é presidente, em 2020 solicitou ao governo que o IVA passe à taxa reduzida. O governo responde que o IVA da limpeza florestal é à taxa reduzida e não baixa a taxa apesar das dificuldades adicionais causadas pelo Covid-19.

5 - O autor em 2015 no trabalho que fez para a cadeira “Criação e Gestão de Empresas”, do 5º ano do mestrado em Eng.ª Eletrotécnica da UC, com o título “Plano de Negócios - *Pellets de Coimbra*”, apresenta como vantagens e contributos do fabrico dos pellets:

a) Prevenção de incêndios (DL 17/2009) por limpeza e corte da vegetação até 50 m dos terrenos com produção agrícola, edifícios, estaleiros.

b) Prevenção de acidentes rodoviários, porque as estradas têm muitas árvores que apresentam risco de queda na via, inclusive em cima de veículos e algumas apresentam o risco de colisão com os tejadilhos dos camiões de 4 m de altura.

- c) Incremento da qualidade e fiabilidade do transporte e distribuição da energia eléctrica por corte das árvores que podem tocar com o vento nas linhas e impedir que as árvores se emaranhem nas linhas como acontece atualmente.
- d) Aproveitar os pinheiros secos existentes e cortar os pinheiros com infestantes ou parasitas para reduzir a sua disseminação.
- e) Incrementar o uso de energias renováveis em especial para a confecção na restauração (assar leitões).
- f) Diminuição do risco de explosão e incêndio nas edificações ao substituir os queimadores a gás e gasóleo por queimadores a pellets.
- g) Melhorar a balança comercial por diminuição de importações de gás, electricidade, crude (utilizado p/ produzir gás e gasóleo), e aumento das exportações de pellets.
- h) Facilitar a vida aos agricultores e criar mais-valia para a biomassa que produzem.
- i) Criar uma mais-valia para a biomassa.
- j) A queima de pellets em termos de CO₂ é neutra e poupa-se 70% em custos de energia, fonte - ANPEB.
- k) Contribuir para um planeta mais verde pela redução do efeito estufa por não deixar a biomassa a apodrecer, que gera metano, pela redução da emissão de CO₂ originário da queima de combustíveis fósseis que se substituem, nomeadamente o gasóleo e o gás e pela redução dos incêndios florestais.
- l) Gerador de emprego e riqueza.
- m) A exploração de biomassa torna-se muito dispendiosa quando a distância aumenta em relação à central de processamento, tornando inviável a exploração, fonte - ANPEB.

6 - O DL 123/2015 de 3 de julho procede à primeira alteração ao DL 95/2011, de 8 de agosto, que estabelece medidas extraordinárias de proteção fitossanitária indispensáveis ao controlo do nemátodo da madeira do pinheiro, obriga que a estilha tem de ser menor que 3 cm. Isto é mais uma razão para se fabricar pellets com esta estilha.

7- “Proibir a queima de resíduos como mato, ramos e folhas provenientes do corte de mato, do corte/abate florestal, poda de árvores/arvoredo incluindo da produção agrícola e do corte/gestão da biomassa junto de vias e edifícios que é obrigatória para prevenção de incêndios, incluindo o corte de ramos/árvores para prevenção de acidentes rodoviários. Esta biomassa deve ser revalorizada, seja na produção de estilhas, pellets, briquetes ou fertilizantes. Excetuam-se os casos de proteção fitossanitária, como pragas, em que a melhor solução científica seja a queima, sendo a queimada aprovada pela AFN - Autoridade Florestal Nacional ou ICNF - Instituto da Conservação da Natureza e das Florestas” (parte do texto elaborado pelo autor a 16/12/2019, na Proposta legislativa

nº3/2019 da ADAPCDE ao Primeiro-ministro sobre a Valorização de resíduos florestais/agrícolas e prevenção de incêndios).

Quanto não é viável o aproveitamento da biomassa, uma solução da silvicultura preventiva com aumento da produtividade do pinhal bravo é o desbaste térmico que consiste no uso do fogo controlado. De acordo com o último relatório da DGRF de 15/10/2007, durante os últimos dois anos tem sido intensificado o uso do fogo controlado e este tem sido aplicado com sucesso, pois a área de povoamentos queimada é pequena em termos percentuais.

Em 2002 o Departamento Florestal da Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro editou o Manual de Formação para a Técnica do Fogo Controlado. O fogo controlado é uma técnica em expansão e que inclusive o CEIF já pratica há anos. Tal utilização está regulamentada pela Portaria n.º 1061/2004 de 21 de Agosto. O DL 124/2006 de 28 de Junho, acrescentou que a realização de fogo controlado só é permitida fora do período crítico e desde que o índice de risco temporal de incêndio seja inferior ao nível elevado.

Desde 18 de Dezembro de 1981 com a publicação do Decreto Regulamentar nº55, seguido do DL 156/2004 de 30 de Junho foram estabelecidas medidas mais alargadas e ações a desenvolver no âmbito do Sistema Nacional de Prevenção e Protecção da Floresta contra Incêndios. Este diploma foi revogado e substituído pelo DL 124/2006, disponível em <https://dre.pt/web/guest/pesquisa/-/search/358491/details/normal?q=Decreto-Lei+124%2F2006>.

Este último diploma obriga a limpar uma faixa de 50 m em redor das edificações; contudo é frequente ver muita vegetação em redor das edificações. Os proprietários desses edifícios, em parte não o fazem, por falta da existência em Portugal de uma cultura de prevenção e por também haver pouca actuação das autoridades fiscalizadoras. Assim, aquando dos incêndios, vê-se constantemente os bombeiros a protegerem as casas rodeadas por vegetação.



Imagem 1.3- Distâncias de limpeza. Fonte www.oribeiradepera.com

Nota adicional de 2021 – Só no dia 15 de Outubro de 2017 morreram 51 pessoas por incêndios florestais na região centro, do relatório destes incêndios transcreve-se - *“Análise dos Incêndios Florestais ocorridos a 15 de outubro de 2017”, elaborado pelo Centro de Estudos sobre Incêndios Florestais da Universidade de Coimbra, sob coordenação de Domingos Xavier Viegas, foi tornado público esta quinta-feira pelo Ministério da Administração Interna (MAI).*

“Consideramos que alguns dos incêndios foram causados por reativações de focos de incêndio preexistentes e que não haviam sido devidamente vigiados durante o dia 15. Houve, no entanto, muitas ignições resultantes de queimas e queimadas causadas por pessoas que as realizaram pela necessidade de eliminar vegetação ou resíduos de atividades agrícolas, na convicção de que haveria de ocorrer chuva, como fora anunciado, o que de facto ocorreu, mas apenas no final do dia 16”, indica o documento encomendado pelo Governo.

O relatório adianta que desta situação resultaram sete complexos principais de incêndios, produzidos por uma ou mais ignições, que se propagaram de forma contínua, principalmente no dia 15 e parte do dia 16 outubro, tendo cinco destes fogos causado, no seu conjunto, 51 vítimas mortais, sendo que todos “produziram uma devastação ambiental e patrimonial como nunca se havia visto em Portugal”. Fonte <https://rr.sapo.pt/2019/02/28>.

A nova legislação permite inclusive o corte das árvores que estão junto às edificações, e que são potencialmente perigosas quando não há uma descontinuidade entre elas e a floresta. Se as árvores de grande porte arderem junto a uma edificação torna-se muito perigoso para a segurança do edifício, face ao imenso calor em especial sob a forma de radiação que se pode projetar com a combustão dessas árvores (Artigo 15.º do DL124/2006).

Nos Estados Unidos, as seguradoras recusam-se a fazer o seguro das edificações que sejam construídas exteriormente com materiais combustíveis. Ao mesmo tempo, fazem a análise de risco da edificação, verificam o cumprimento das exigências legais e explicam ao proprietário como reduzir/evitar os riscos contribuindo para uma redução dos problemas relacionados com os incêndios florestais, Arrowood, (2003).

Em Portugal, as seguradoras já assim não procedem, pelo que deveria haver uma legislação no sentido de as seguradoras cooperarem na prevenção dos incêndios, tanto mais que é do seu interesse minimizar os riscos e os danos em caso de sinistro.

Também em Portugal não há ainda legislação específica sobre normas de construção das edificações construídas junto ao perímetro florestal ou envolvidas pela floresta. No mínimo as janelas voltadas para o maciço de árvores e o telhado não deveriam ter materiais combustíveis à vista, e essas janelas deveriam ser feitas com vidro resistente ao calor, como o vidro temperado.

Nota adicional de 2021 – O DL 14/2019 de 21 de janeiro, clarifica os condicionalismos à edificação no âmbito do Sistema Nacional de Defesa da Floresta contra Incêndios, introduzindo por exemplo medidas de minimização do perigo de incêndio “incluindo as medidas relativas à contenção de possíveis fontes de ignição de incêndios nas edificações e nos respetivos acessos, bem como à defesa e resistência das edificações à passagem do fogo;” e “a adotar pelo interessado, incluindo a faixa de gestão de 100 metros;”.

A National Fire Protection Association (NFPA) recomenda no manual de prevenção *Industrial Operations Fire Prevention Field Guide* (1999), que haja uma distância de 30,5m entre as edificações e a copa da vegetação envolvente, para que em caso de incêndio florestal as casas apresentem baixo risco de arderem.

Os incêndios florestais destroem as florestas, podendo por vezes provocar mortes de civis e bombeiros, Viegas (2004). Causam imensos problemas/prejuízos nomeadamente: destruição de casas e outras edificações, morte de animais, poluição do ar, contaminação de águas, queima de plantações agrícolas e intoxicações por monóxido de carbono, cianido, aldeídos, ácido clorídrico, cloro, fosgénio, amónia dióxido sulfúrico e ácido acético, Viegas (1998).

A vegetação ao arder junto das estradas, provoca muitas vezes a interrupção da circulação rodoviária e destrói entre outros, sinais de trânsito, linhas telefónicas, linhas de energia eléctrica e veículos.

Nota adicional de 2021 – Em 2017 veio-se a constatar que também matam pessoas nos veículos quando ficam bloqueados pelo fogo, exemplo de Pedrogão Grande. Pela lei portuguesa em vigor, proposta do autor de 2003, tem de se cortar 10 m de cada lado das estradas, mas há vários motivos para o corte das árvores que serão apresentadas em anexo



Imagem 1.4 – Placa de trânsito da IC1 destruída em Agosto de 2003, captada pelo autor.

É necessário reduzir o número de ocorrências de incêndios florestais para reduzir o número de sinistros e os prejuízos daí resultantes.

Estudar as origens, desenvolvimento e propagação dos incêndios florestais é extremamente importante para que, com esses conhecimentos, se possam tomar medidas preventivas adequadas. Daí é necessário investir fortemente nas investigações científicas de incêndios florestais, para reduzir os riscos, devido à aleatoriedade climática que tem havido, com muitos meses sem chuva e com temperaturas acima do normal, prevendo-se no futuro verões ainda mais quentes e secos do que 2005.

Distribuição da área ocupada por espécies florestais

As espécies florestais que ocupam a maior área em Portugal, são em primeiro o pinheiro bravo 29,97%, em segundo o eucalipto 22,93% e em terceiro o sobreiro 19,85%. Fonte - Educação para a Cidadania (2006), editado pelo Ministério da Educação.

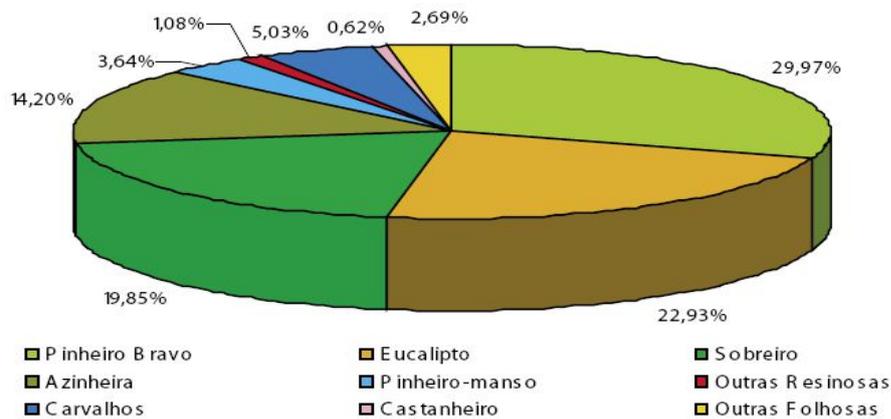


Gráfico 1.4 Áreas de Povoamentos Florestais segundo a espécie

O gráfico 1.5 mostra percentualmente a utilização do solo. Fonte – DGRF.

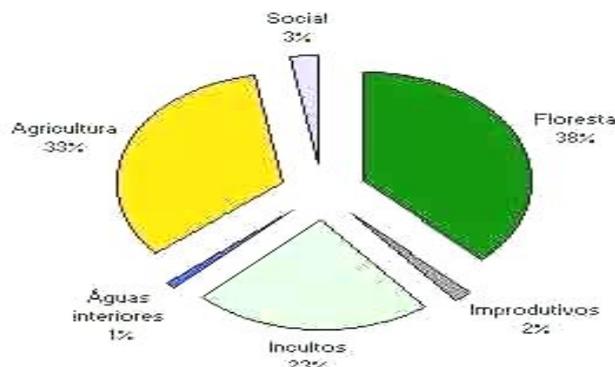


Gráfico 1.5 Utilização do solo

No verão, em Portugal a vegetação espontânea mais abundante em incultos é o feno (mistura de várias herbáceas). Por outro lado a vegetação herbácea seca, tal como pastos e searas no caso de incêndio além de transmitir o incêndio ao mato/floresta, quando arde sob vento “Ignição de Combustíveis Florestais por Partículas com Elevada Temperatura” por Mário Loureiro, UC

forte pode libertar grandes quantidades de calor e ser mortal mesmo quando é rasteiro, Viegas (2004) página 135.

No Laboratório de Estudos sobre Incêndios Florestais da Lousã, o feno é uma das espécies mais utilizadas na investigação da propagação de incêndios florestais. Assim, nesta investigação, o feno é uma das principais espécies a ser utilizada.

O gráfico 1.6 mostra a evolução da composição da floresta ao longo do tempo. Fonte Estratégia Nacional Para As Florestas (2006).

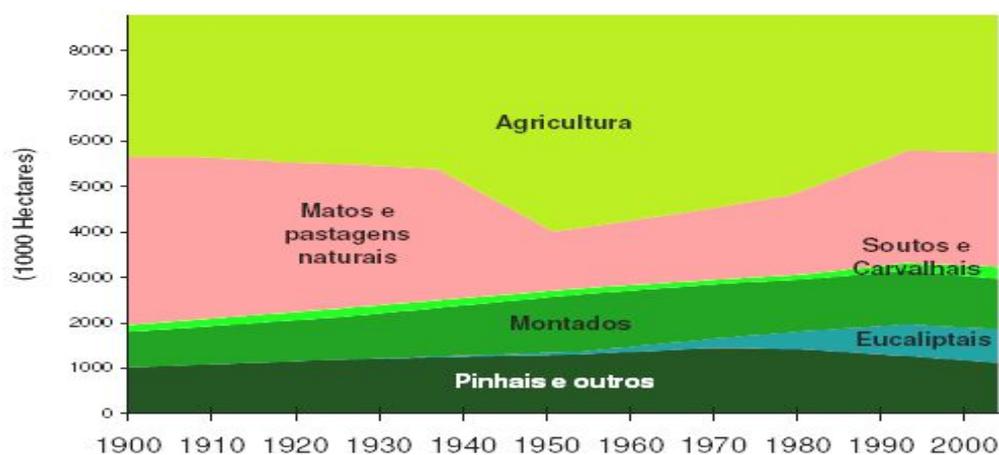


Gráfico 1.6 - Evolução da composição da floresta portuguesa

As principais espécies florestais a ocupar mais área em 2001 eram, por ordem decrescente, o pinheiro bravo *Pinus pinaster*, o sobreiro *Suber*, o eucalipto *Eucalyptus Glabulus*. É de salientar que o sobreiro tem um índice de ocupação inferior quando comparado com as outras duas espécies. Também ao analisar o gráfico anterior constata-se a tendência dum grande crescimento do eucalipto e que em 2006 já ultrapassou a área coberta por sobreiros de acordo com o gráfico 1.4. Como o sobreiro é predominante da região alentejana, com menor densidade de povoamento, não contribuirá tanto em elementos, pelo que haverá seguramente também mais elementos de eucaliptos do que sobreiros, ainda mais que os eucaliptos são plantados com poucos metros de espaçamento entre si.

Normalmente não se verificam grandes incêndios no Alentejo, sendo possível efetuar as queimadas e o fogo controlado sem grande risco devido em parte ao grande espaçamento entre sobreiros. Estes terrenos agrícolas, normalmente de grande área, são quase todos aproveitados para exploração agrícola pelo que há menores zonas de mato. Assim em grande parte dos incêndios, estes serão sobretudo rasteiros. No relatório da DGF de 4/10/2002 as percentagens de área ardida eram: 52% de pinheiro bravo; 3% de sobreiro e 23% de eucalipto.

Nesta zona de Portugal a vegetação rasteira junto às estradas não é cortada com os métodos tradicionais, devido ao risco de incêndio com essa operação de corte. Para prevenção os serviços de limpeza destas vias preferem passar um trator a fresar a terra, assim mesmo que o trator criasse uma ignição, a terra ao ser revolvida acaba com essa ignição.

As espécies que normalmente mais têm ardido são o pinheiro bravo e o eucalipto, como se pode ver no gráfico 1.7, que apresentava 52% e 23% respetivamente para cada espécie da área de povoamentos consumida pelos incêndios. O eucalipto apresenta menor incidência devido aos eucaliptais terem geralmente pouco mato. O sobreiro, apesar de ser a segunda espécie existente a ocupar maior área, tem uma parte com baixa densidade de povoamento, o que não implica tanto risco de incêndio.

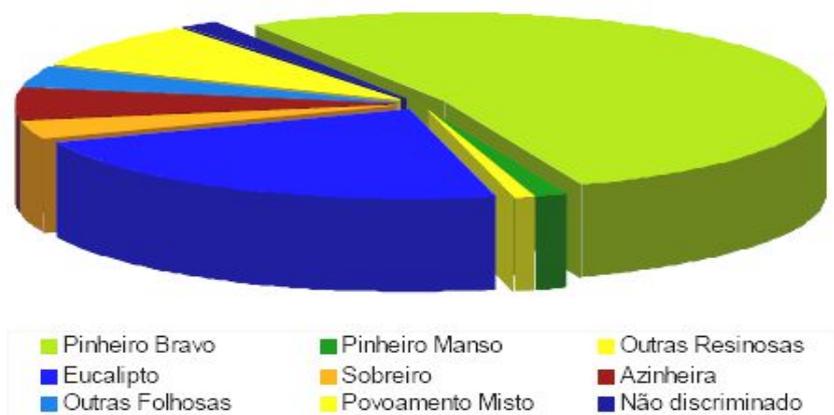


Gráfico 1.7 Distribuição da área ardida por espécies (DGF-2002)

Distribuição horária dos incêndios

O gráfico 1.8 apresenta as ocorrências do território continental referente ao ano de 1994, sendo característico da distribuição horária dos incêndios, pois é normal o máximo de incêndios ocorrer entre as 14:30 e as 15:30h. A partir das 21h nota-se que a tendência é aumentar o que, segundo o pessoal do Centro Operacional de Coimbra, tem origem no lançamento de foguetes, pois há inúmeras chamadas a alertar incêndios provocados por foguetes lançados durante os festejos anuais das povoações (não se apresentam dados mais recentes porque a DGRF deixou de apresentar a hora de alarme).

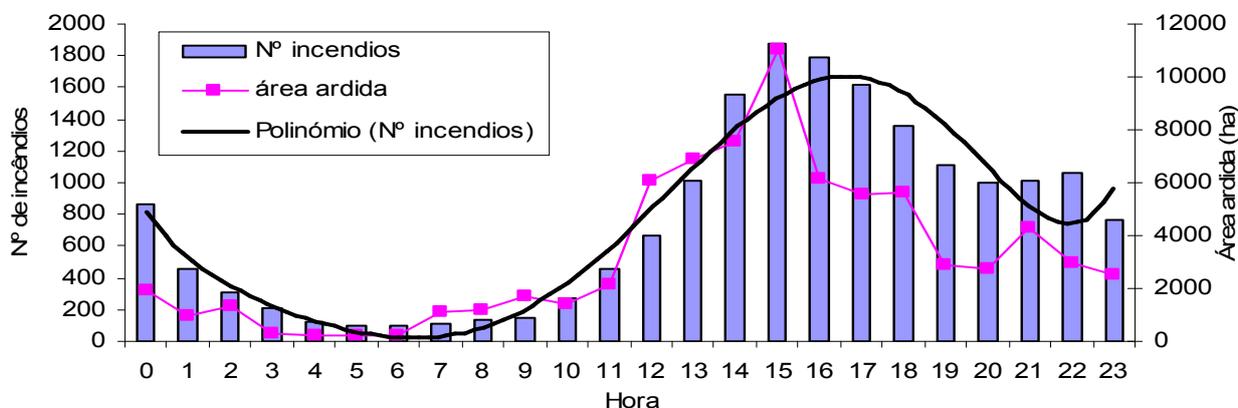


Gráfico 1.8 Número de incêndios em Portugal, ano de 1994 (DGF)

O gráfico 1.9, elaborado pelo autor com os dados de 2498 incêndios florestais ocorridos no

Verão do ano de 2000 na zona Centro, mostra que os incêndios nesta região apresentam o mesmo tipo de curva, inclusive tanto para os dias da semana como para o fim-de-semana, quando em comparação com os gráficos dos incêndios anuais de Portugal, sendo a zona centro uma região representativa de Portugal para o estudo dos incêndios florestais.

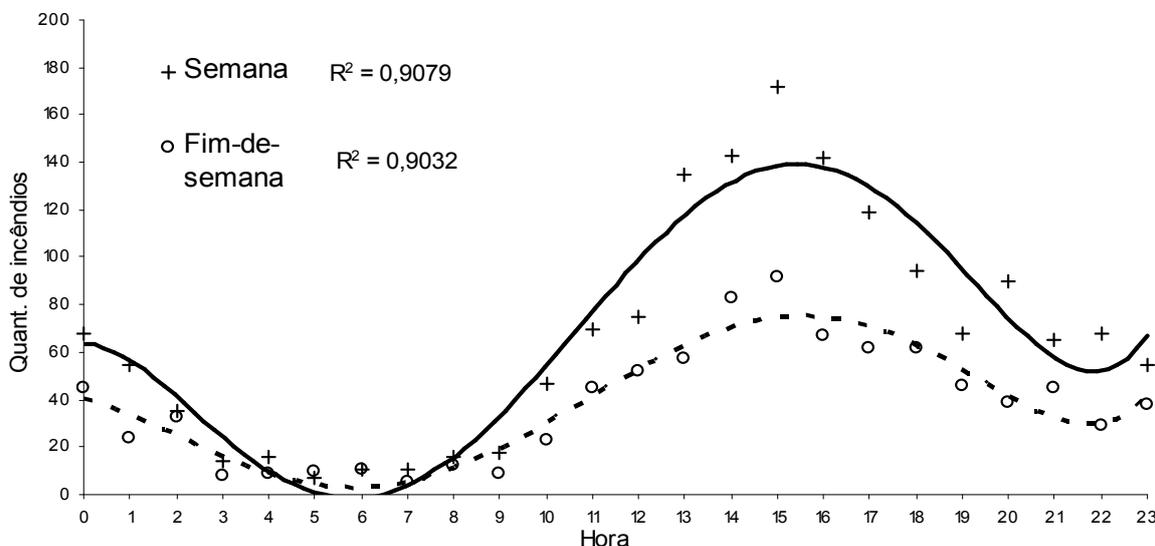


Gráfico 1.9 incêndios florestais na zona Centro, Junho a Setembro de 2000

Fatores Meteorológicos

A ocorrência de incêndios depende essencialmente da temperatura e da humidade relativa do ar, que condicionam o teor de humidade dos combustíveis.

Viegas et al. (2004), aplicando um conjunto de testes estatísticos, concluíram que o sistema Canadano, caracterizado pelo seu índice de perigo de incêndio “Fire Weather Index” (FWI) era de um modo consistente aquele que tinha um melhor desempenho, quer na discriminação de número de incêndios por dia, quer da área ardida por dia numa dada área geográfica. Assim Viegas et al. descreveram o Sistema Canadano de indexação do perigo de incêndio, indicando o significado de cada um dos seus sub-índices. Com base em resultados de medições diárias do teor de humidade de combustíveis florestais finos estabeleceram equações para estimativa do teor de humidade de combustíveis da folhada e do estrato arbustivo. Mostraram existir uma relação direta entre a velocidade de propagação do fogo em vegetação arbustiva e o índice de propagação inicial ISI. Apresentaram a metodologia empregada para calibrar as classes de perigo, em cada um dos dezoito distritos de Portugal Continental, com base nos valores estatísticos de FWI e do número e área ardida diariamente por distrito e apresentaram o valor médio do índice de secura DC como sendo um bom caracterizador da gravidade relativa de um dado ano.

O diagrama seguinte mostra os parâmetros meteorológicos que o Sistema Canadano requer como dados de entrada são, como se pode ver naquele diagrama, os seguintes:

- a) A temperatura do ar;
- b) A humidade relativa do ar;
- c) A velocidade do vento, medida a 10m de altura;
- d) A precipitação ocorrida nas últimas 24 horas.

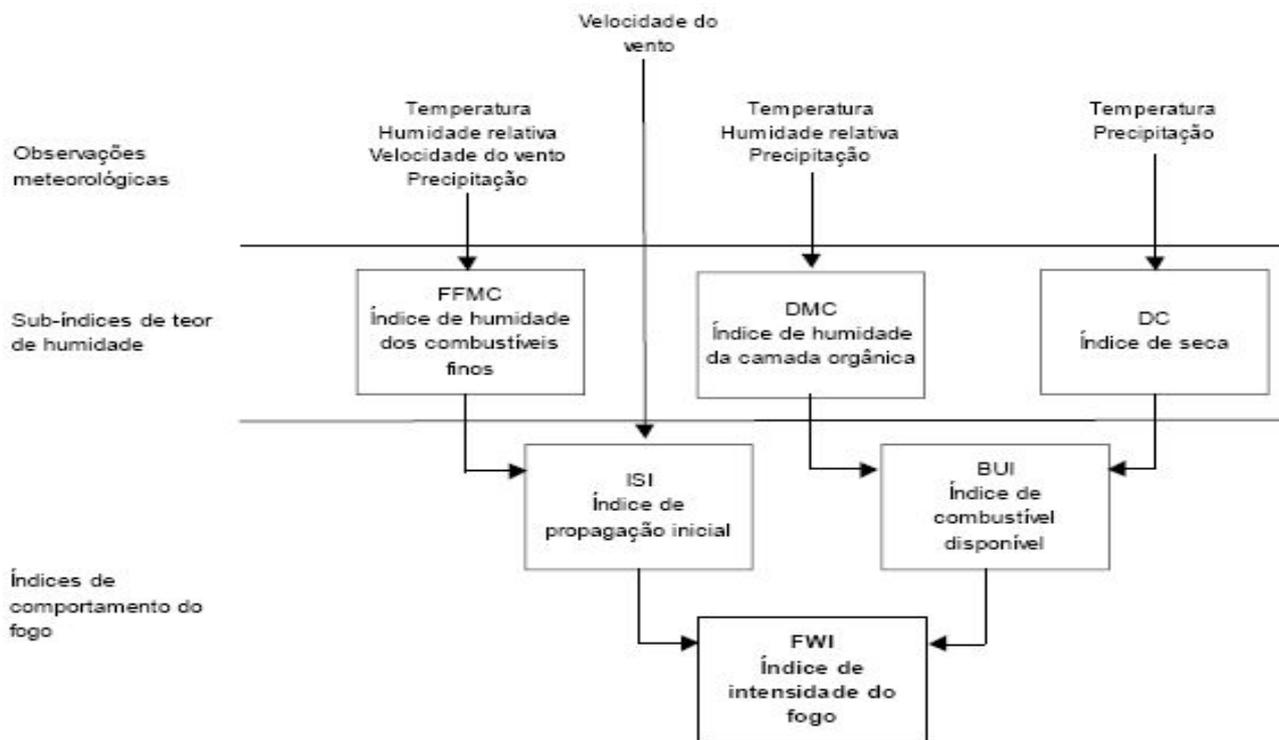


Diagrama 1 - Estrutura do sistema de indexação de perigo de incêndio Canadiano (FWI), Fonte- Viegas et al. (2004),

O gráfico 1.10 mostra que a área queimada em Portugal entre 1987 a 2000 aumenta exponencialmente com o valor médio do índice de secura.

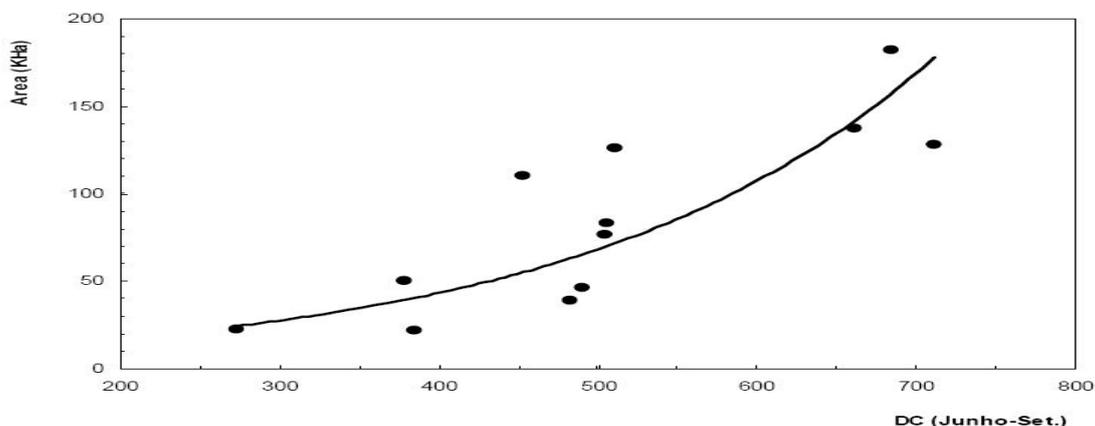


Gráfico 1.10 Fonte - Viegas et al. (2004),

O gráfico 1.11, com dados adquiridos pela estação do DEMUC, é característico da evolução da temperatura ao longo de um dia de verão. Neste dia a temperatura máxima foi de 28,66°C às 14:10, o valor da humidade relativa mínimo, 93,7%, foi alcançado uma hora antes da maior temperatura.

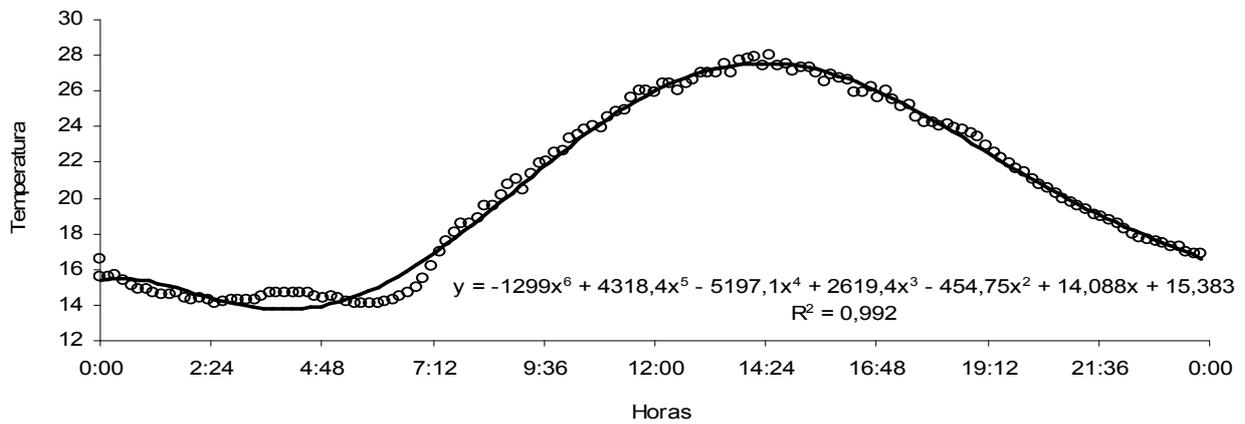


Gráfico 1.11 Temperatura do ar (27/7/2000, Polo II, [DEMUC])

A temperatura máxima do ar é normal ocorrer entre as 14 e as 15 h. O normal da média máxima do mês de Agosto em Coimbra apurado pelo Instituto Geofísico da Universidade de Coimbra, foi 28,8°C (1961-1990), apesar da temperatura máxima rondar os 40°C.

Comparando os últimos dois gráficos (número de incêndios e temperatura) constata-se que apresentam curvas semelhantes e depreende-se que o risco de incêndio florestal é resultante da temperatura que se verifica ao longo do dia.

Com a vegetação seca, quanto maior for a temperatura maior será o número de incêndios florestais.

Nota adicional de 2021 – No verão as folhas secas expostas ao sol, em dias com 38 °C ou mais terão com certeza menos de 5% de humidade e terão grande probabilidade de ter ignição pois nestas circunstâncias os veiculos pesados libertarem partículas em combustão em especial durante os dias úteis quando há mais veículos a circular, já ao domingo serão 40%, sendo a maioria de passageiros em que o motor não vai sobrecarregado ao ponto de libertar partículas com tanta facilidade, ver gráfico 1.12 que apresenta as relações de tráfego para tratores, veículos ligeiros e pesados, entre o verão e o inverno e entre domingo e dia útil por cada tipo de veículo.

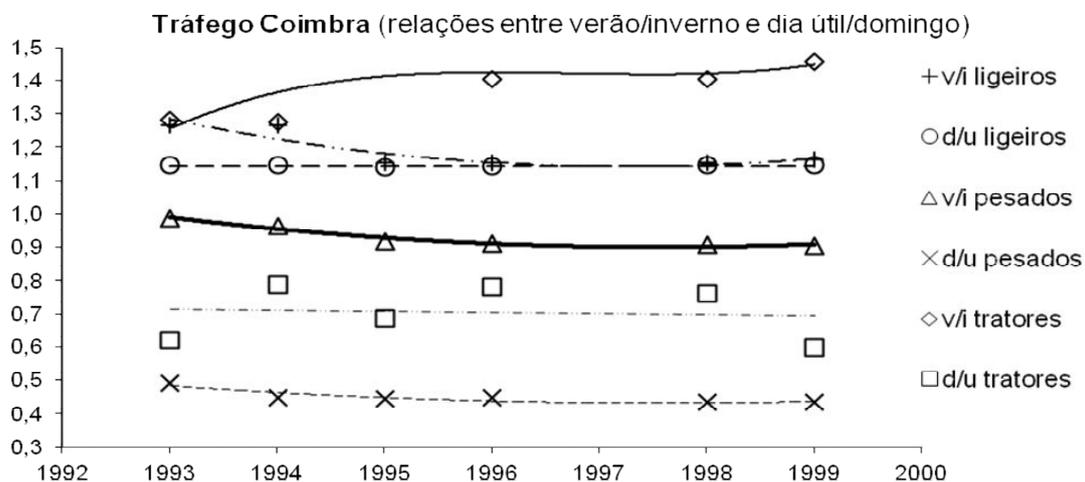


Gráfico 1.12: Tráfego Coimbra (relações entre verão/inverno e dia útil/domingo)

É normal haver um atraso entre meia hora a uma hora da ocorrência máxima de incêndios florestais e a temperatura máxima diária. Este atraso em parte é devido ao alcançar-se o teor mínimo de humidade nos combustíveis (espécies florestais) só após estes terem estado algum tempo expostos às máximas temperaturas do ar.

O teor de humidade dos combustíveis depende, além da temperatura, da velocidade do ar e da humidade relativa do ar, Viegas (2002). O aumento da temperatura faz reduzir o teor de humidade. A redução da humidade relativa do ar faz reduzir o teor de humidade dos combustíveis. O aumento da velocidade do ar faz reduzir o tempo que as espécies levam a atingir o equilíbrio higroscópico.

As curvas de equilíbrio higroscópico dão, a cada temperatura, a relação entre o teor de água presente na espécie e a pressão de vapor que aquela impõe à superfície do mesmo Figueiredo (1999).

Figueiredo apresentou uma tabela em que a madeira de pinheiro com 0% de teor de humidade tem cerca de 1100 kJ/kg e com 8% de teor de humidade tem cerca de 350 kJ/kg. Com o aumento do teor da humidade há uma forte redução da energia disponível.

Inflamabilidade dos combustíveis

Dimitrakopoulos, no estudo que fez sobre inflamabilidade de espécies florestais apresentado na III International Conference on Forest Fire Research (1998), utiliza a equação determinada por Trabaud, L. (1976) para a inflamabilidade dos combustíveis florestais incluindo espécies herbáceas em que foi determinada uma relação entre a curva de regressão hiperbólica e o tempo de ignição, a qual se compila de seguida:

$$I_{ft} = \frac{\alpha}{H_{\max} - h} \quad (\text{eq. 1.1.1})$$

I_{ft} – Tempo para a inflamação em segundos

h – Teor da humidade da amostra

H_{\max} - Teor da humidade máximo da espécie

α – Coeficiente específico de cada espécie, correspondente ao valor inverso do declive da curva determinada para a regressão hiperbólica.

Da equação 1.1.1 verifica-se que se h for igual a zero então teremos

$$I_{ft} = \frac{\alpha}{H_{\max}} \quad (\text{eq. 1.1.2})$$

Esta dá o tempo mínimo de inflamação. Quanto maior for o h maior será o tempo de inflamação.

Dos últimos dois parágrafos antecedentes, constata-se que quanto maior for o teor de humidade do combustível florestal, maior será a energia para a respectiva ignição.

No Laboratório de Estudos sobre Incêndios Florestais (LEIF), situado junto ao aeródromo da Lousã, no Verão, faz-se diariamente recolha de vegetação para verificar o seu teor de humidade para apurar qual é o risco de incêndio florestal.

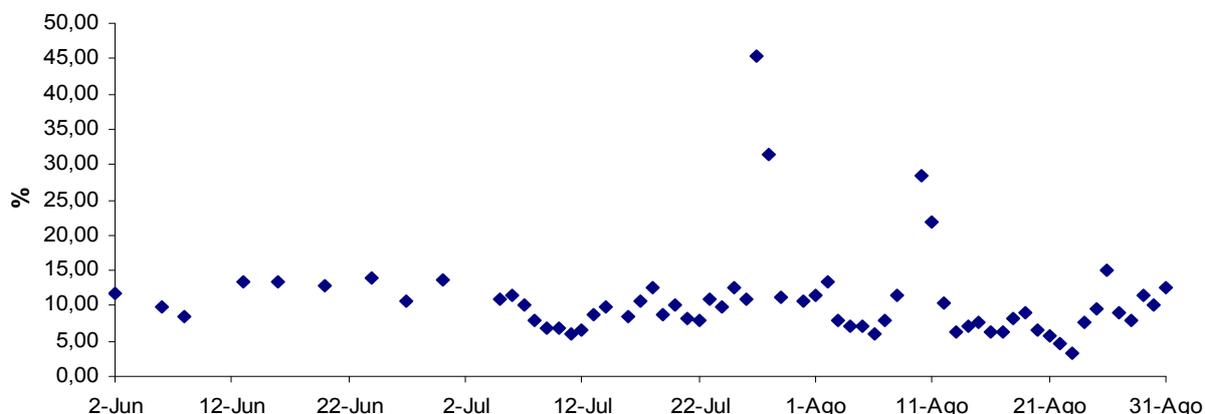


Gráfico 1.13: Teor de humidade da caruma, Lousã, 2005

No gráfico 1.13 pode-se ver o mínimo absoluto de 3,25% verificado no dia 23/8/2005.

Se a vegetação tiver mais de 15% de teor de humidade o risco de incêndio é reduzido. É por este motivo que países do norte da Europa, e mesmo o Brasil, apesar de atingirem temperaturas elevadas, não têm grande risco de incêndio florestal, porque mesmo no Verão há normalmente uma regular precipitação que evita que a vegetação fique muito seca, não se tornando tão combustível como acontece nos países mediterrânicos, Califórnia e sul da Austrália.

No mediterrâneo, Califórnia e sul da Austrália, a vegetação é do tipo matos esclerofílicos, devido aos verões serem secos, Menzel-Teltenborn et Al., mostram a distribuição da vegetação no mundo. A cor rosa representa a zona de matos esclerofílicos. Fonte: ISBN 972-95979-4-4 tradução de “Das Reich der Pflanzen”,



Imagem 1.5 – Reinos florísticos e zonas de vegetação. “Das Reich der Pflanzen”.

Quando não chove durante semanas ou meses como aconteceu em 2005, a vegetação fica com o seu teor de humidade muito reduzido, atingindo valores da ordem dos 5%, tornando-se muito mais energética, fazendo com que o risco de incêndio florestal seja muito elevado. Com baixo teor de humidade a vegetação é mais propensa a ignições, como também aumenta a propagação de incêndios florestais o que acarreta enormes áreas queimadas.

A quantidade de incêndios depende bastante do teor de humidade dos combustíveis. O normal da média máxima do mês de Julho em Coimbra também ronda os 28 °C como em Agosto, mas a quantidade de incêndios florestais em Julho é normalmente muito menor do que em Agosto, devido ao maior teor de humidade dos combustíveis em Julho. Normalmente em Julho ainda chove e assim os combustíveis ainda têm um certo teor de humidade o que reduz a probabilidade de incêndio mesmo quando expostos a dias quentes.

O maior problema aquando de incêndios florestais é a presença de ventos fortes, sobretudo se o teor de humidade da vegetação for reduzido, na ordem dos 10% ou menos e se o vento estiver a favor do avanço do incêndio a velocidade da propagação do incêndio será muito maior, Viegas (2004).

O vento forte foi o principal problema que os bombeiros portugueses tiveram de enfrentar em meados de Agosto de 2007. Também os ventos fortes foram os responsáveis pelo grande incêndio florestal, que ocorreu na Califórnia em Outubro de 2007, originado por uma brincadeira de criança.

Comportamento extremo do fogo

Um outro problema que tem a ver com elevadas velocidades de propagação dos incêndios florestais e que tem ocasionado inúmeras mortes de bombeiros, surge quando um incêndio florestal ocorre no fundo do vértice formado pela convergência de duas encostas.

Com o desenrolar do fogo, a propagação é acelerada devido ao efeito de chaminé e o incêndio propaga-se a alta velocidade, Viegas e Pita (2004). Este efeito chaminé, tem de ser conhecido pelos bombeiros, que têm sido ao longo dos anos as principais vítimas, Viegas et al. (2000) e por todas as pessoas que estão relacionadas com a gestão da floresta, para que se reduzam os riscos/perigos de incêndio nesta zona.

O próprio incêndio faz surgir ventos que aceleram a combustão, pelo que neste caso os incêndios não devem ser combatidos de cima para baixo, pois a área ascendente pode arder em poucos minutos, não dando tempo de fuga a quem lá se encontrar, Viegas (2002). Estas zonas potencialmente perigosas são as que não deviam ter vegetação florestal.

Uma solução seria a conversão destas zonas em plantações de árvores frutíferas ou sem vegetação alguma, que faria de corta-fogo.

Quando os incêndios deflagram nestas zonas, não é preciso haver vento forte para que muitas partículas incandescentes se elevem na atmosfera e sejam projetadas a quilómetros de distância, criando fogos secundários.

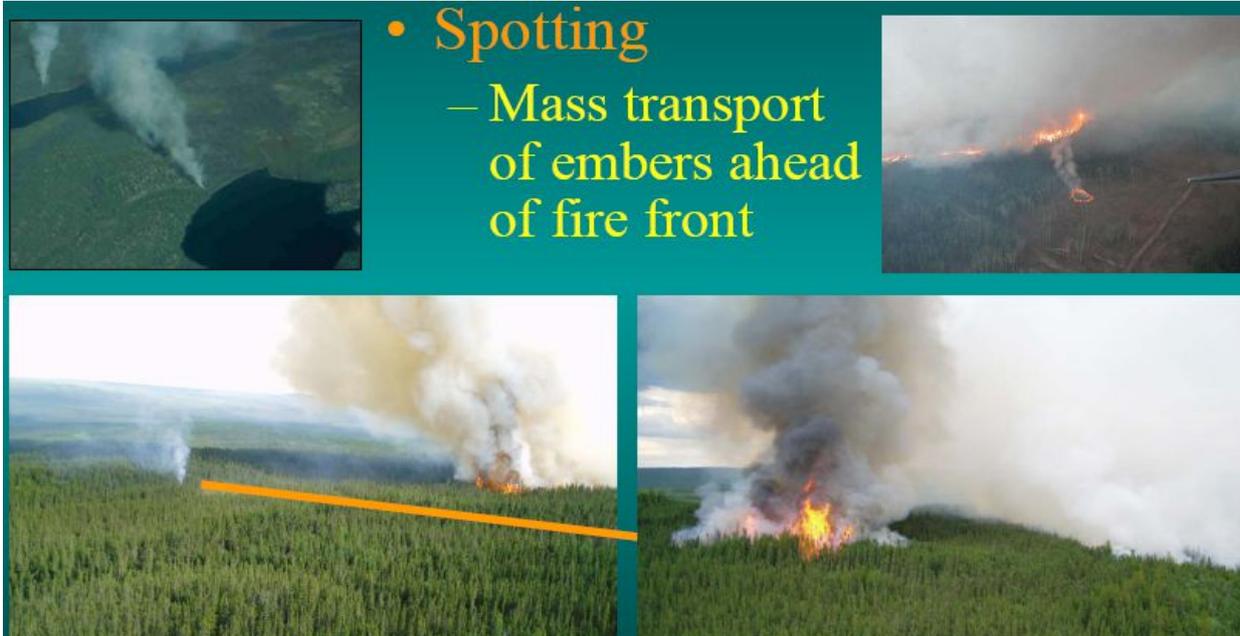


Imagem1.6 - Fogos secundários. Chisholm, DogRib, and Lost Creek Fires Post-Fire Research Workshop 27/4/2005

Investigadores como Manzello et al. (2006), fizeram experiências neste campo com discos combustíveis e com projeção de partículas, ver capítulos seguintes.

Este efeito é conhecido na literatura anglo-saxónica por “Firebrand”. Manzello et al. (2007) fizeram ensaios de geração de partículas em combustão, queimaram pequenas árvores em laboratório, com o intuito de quantificar a quantidade e tamanho dos mesmos.

Na propagação rápida de incêndios sob a ação do vento e com o efeito chaminé partículas em combustão ultrapassam distâncias superiores a 1000m, provocando novos focos de incêndio.

Nestas condições, são necessários ainda mais bombeiros para combater os diversos focos de incêndio que vão surgindo à sua frente, na direcção do vento.

Um exemplo disto foi o incêndio de 22 de Agosto de 2005 que deflagrou na zona de Poiares, segundo o diário do Público (25/8/2005) terá sido um trator a origem do incêndio. *“...deverá ter começado com o incêndio de um trator, numa zona florestal do concelho de Vila Nova de Poiares, às 13h de sábado. Essa é pelo menos a convicção do comandante dos Sapadores de Coimbra, José Almeida”*. Este incêndio com o vento a soprar na direcção noroeste, rapidamente se propagou até Coimbra. O incêndio florestal rodeou Coimbra desde a zona Nascente (freguesia dos Olivais), passou pelo Alto de S. João que se situa a sul, propagou-se ao Pinhal de Marrocos e chegou ao Pólo II da Universidade de Coimbra aonde se conseguiu extinguir localmente. O incêndio continuou a avançar para Sul, passou pela freguesia de Almalaguês e propagou-se ao concelho de Condeixa-a-Nova, atingindo terça-feira a cidade de Penela, onde foi circunscrito.

Perto da meia-noite de 22/8/2005, Joel Vale, captou a imagem seguinte de Coimbra a arder. Fonte - <http://sic.sapo.pt>



Imagem 1.7 - Coimbra rodeada a nascente e a sul por um fogo secundário, a 22/8/2005

Causas dos incêndios

Do relatório de 15/10/2007 da DGRF, selecionou-se o gráfico 1.13, o qual mostra a distribuição da causalidade entre 2000 a 2006 do conjunto de ocorrências investigadas.

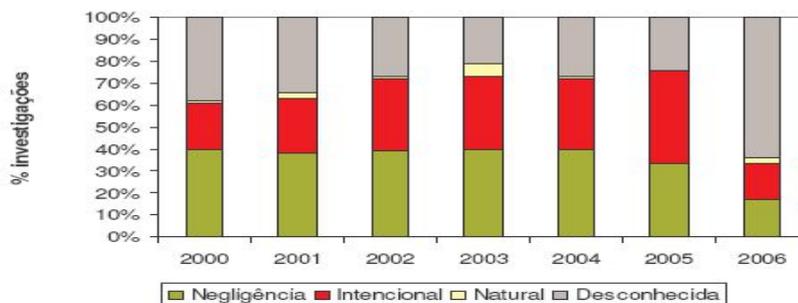


Gráfico 1.14 Causas de incêndios entre 2000 a 2006 Fonte DGRF Janeiro de 2007

Deste gráfico apura-se que em 2006 cerca de 2/3 das causas foram desconhecidas. Apesar de ter havido evolução no sentido de apurar as causas no último ano tal não aconteceu pois dos 2234 incêndios investigados cerca de 66% de incêndios foram indeterminados, pelo que interessa identificar para assim se poder fazer a adequada prevenção.

O gráfico 1.15, retirado do Resumo Técnico da Determinação das causas dos incêndios florestais em 2002, elaborado pelo Corpo Nacional da Guarda Florestal (CNGF) pertencente à ex. DGF, apresenta as principais causas relacionadas com o uso do fogo.

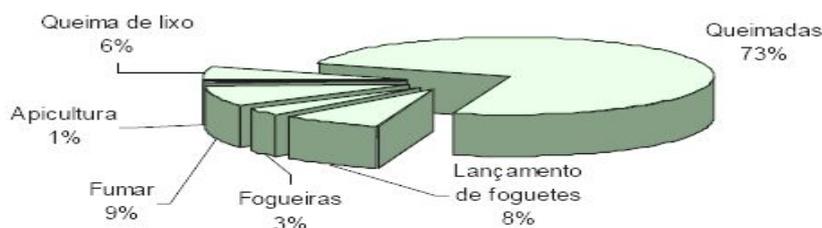


Gráfico 1.15 Causas relacionadas com o uso do fogo – 2002

Apesar dos foguetes serem neste gráfico a terceira causa, muitas vezes os foguetes têm provocado elevados custos humanos e materiais, pelo que se transcreve o texto da CNF - *“Esta foi a causa que esteve na origem do maior incêndio florestal registado em 2000 e originou 3 “Ignição de Combustíveis Florestais por Partículas com Elevada Temperatura” por Mário Loureiro, UC*

grandes incêndios em 2001 dos quais resultaram uma área ardida de 512 ha. Em 2002 registaram-se 6 grandes incêndios que consumiram 2885 ha. Importa, ainda, salientar que deste conjunto de incêndios, 4 tiveram origem em auto-ignições de bombas dos foguetes que não explodiram no ar.”

A nova legislação sobre prevenção de incêndios florestais é ainda insuficientemente quanto aos foguetes e à pirotecnia. Continua a existir a lacuna legislativa sobre a qualidade do material pirotécnico. O DL 265/94 de 25 de Outubro impôs qualidade aos materiais explosivos mas não se aplicou aos materiais pirotécnicos.

Além de um elevado controlo da qualidade que deveriam ter os foguetes para utilização pirotécnica aquando do seu fabrico, os materiais constituintes dos invólucros das cargas pirotécnicas deviam dentro do possível ser feitos com materiais biodegradáveis, para que no caso de falha de explosão/combustão, se degradem no solo, diminuindo assim o risco de virem a explodir mais tarde, às vezes nas mãos de crianças.

Sem uma adequada legislação, aquando do lançamento dos foguetes pirotécnicos vão continuar a chegar ao chão muitas partículas incandescentes e cargas explosivas, para além de inúmeros acidentes que envolvem a utilização dos foguetes que não apresentam qualidade.

Nota adicional de 2021 – O autor andou a solicitar ao governo português desde 3/08/2003, que a pirotecnia fosse obrigada a ter qualidade, o que só aconteceu em 2010 com a publicação do DL 34/2010 de 15 de Abril, que procedeu à definição das regras que permitem a livre circulação de artigos de pirotecnia e estabelece os requisitos essenciais de segurança que esses artigos devem satisfazer tendo em vista a sua colocação no mercado, transpondo para a ordem jurídica interna a Directiva n.º 2007/23/CE, do Parlamento Europeu e do Conselho, de 23 de Maio.

Emissão de partículas incandescentes

O gráfico 1.16 apresenta a distribuição de ignições investigadas por causas acidentais.

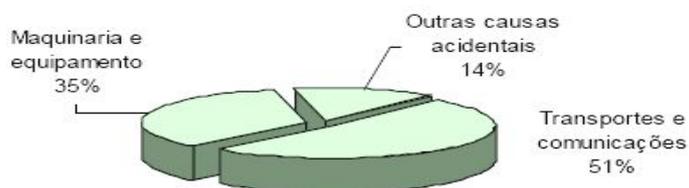


Gráfico 1.16 Causas acidentais – 2002

Como se vê neste gráfico as máquinas e equipamentos são a segunda causa dos incêndios investigados com 35%.

Sobre as causas devidas à emissão de partículas incandescentes, “As causas acidentais continuam a ter um peso elevado na causalidade investigada pelo NRCNGF do Alentejo. Estas acontecem sobretudo devido à emissão de partículas incandescentes, faíscas e transmissão de calor por condução, decorrente da actividade agrícola mecanizada (máquinas e alfaias agrícolas).”

Caso as elevadas temperaturas se prolongassem até à noite no resto do país, a emissão de partículas incandescentes seriam visíveis, já que este fenómeno resulta da libertação de material em combustão que estava agarrado no sistema de exaustão de gases e normalmente só ocorre sob temperaturas elevadas, quando o motor deixa de estar à carga máxima, passa a haver oxigénio nos escapes de escape, o que faz com que estes resíduos entrem e combustão e se libertem em combustão, ver imagens com este fenómeno a ocorrer em comboio mais à frente.

O autor enquanto viajava na A1 na zona de Alenquer, nos finais da década de oitenta, ao final de um dia bastante quente, constatou que cerca de metade das dezenas de viaturas pesadas que se deslocavam na autoestrada libertavam chispas, havendo muitos incêndios junto à berma da autoestrada, bem como nas serras que se avistavam a norte. Este acontecimento singular, deixou-o intrigado acerca da percentagem dos incêndios florestais originados pelos camiões, ficando desde aí interessado em investigar este fenómeno, o que em parte levou a esta investigação.

Este fenómeno não é novo, bem pelo contrário, é muito antigo. Já em 1925 foi patenteado nos USA um filtro para escape de automóvel, pois era normal saírem fagulhas do escape. Fonte www.uspto.gov. Na altura os motores eram pouco eficientes e a gasolina continha muitas impurezas, principalmente enxofre e não retinham tão bem o óleo, acumulando assim muita fuligem no escape, originando com facilidade fagulhas.

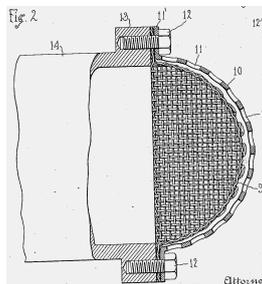


Imagem 1.8 - Patente US 1532473

Nota adicional de 2021 - É apresentado em anexo uma lista de patentes de filtros para escape, designados nos EUA por “Spark arrester”.

As viaturas ao longo dos tempos são cada vez mais eficientes e a quantidade de enxofre presente na gasolina e no gasóleo é insignificante (ver DL 235/2004 de 16 de Dezembro) pelo que isto deixou de ser necessário e entrou em esquecimento.

Para o autor que desde 1974 é experiente em motores de combustão interna, (motores de motobombas, ciclomotores, automóveis e tratores), a maior origem de partículas incandescentes provém, dos motores que consomem óleo, especialmente os motores com grande desgaste nos segmentos do óleo e dos motores a dois tempos que usam óleo misturado com o combustível

para lubrificação interna (cambota, viela, pistão, rolamentos) nomeadamente: motocultivadores, cortadores de relva, motobombas, ciclomotores, alguns motociclos, moto-quatro e motosserra. Os ciclomotores utilizam motores a dois tempos de 50 cm³ que são pouco eficientes, são muito poluentes e apresentam algum risco de incêndio, quando em dias quentes se deslocam por cima de vegetação seca. Estes motores deviam ser substituídos por motores a quatro tempos de 100 cm³ que apresentam uma potência semelhante, sendo necessário que a legislação o imponha.

O autor sabe por experiência própria que os motores de grande cilindrada, por exemplo depois de 500.000 km de uso, aumentam progressivamente o consumo de óleo, devido principalmente ao desgaste dos segmentos de raspagem do óleo, dos vedantes das guias das válvulas de admissão e do desgaste dos cilindros.

Nota adicional de 2021 - O autor é da opinião que motores diesel de veículos pesados com um milhão de km deviam ser substituídos por motor novo que já poupar mais de 10% em combustível, sem ter o risco tão elevado de emissão de partículas em combustão pelo escape, fará menos poluição e emitindo menos CO₂.

A legislação atual de prevenção de incêndios florestais exige no artigo 30º do DL 124/2006 de 28 de Junho, a utilização de dispositivos de retenção de fagulhas mas continua sem regulamentar estes dispositivos: *“Durante o período crítico, nos trabalhos e outras actividades que decorram em todos os espaços rurais e com eles relacionados, é obrigatório:*

a) Que as máquinas de combustão interna e externa a utilizar, onde se incluem todo o tipo de tratores, máquinas e veículos de transporte pesados, sejam dotadas de dispositivos de retenção de faíscas ou faúlhas e de dispositivos tapa-chamas nos tubos de escape ou chaminés”;

Apesar da legislação portuguesa obrigar à utilização de filtro no escape para prevenção de incêndios florestais, as viaturas do Estado quando se deslocam aos espaços rurais também não utilizam estes dispositivos de retenção de fagulhas.

Outrora as viaturas de transporte de materiais perigosos eram obrigadas a usar *tapa-chamas* no escape. Atualmente a legislação portuguesa transposta das directivas comunitárias nomeadamente o DL 267-A/2003 de 27 de Outubro, não o exige, mas nas refinarias portuguesas, nenhuma viatura entra sem ter filtro no escape.

A empresa de transportes TJA - Transportes J Amaral, S.A, utiliza nos seus tratores Renault que são utilizados no transporte de combustíveis, um filtro para enfiar no topo do escape. Este filtro em rede fina é comprado ao importador da Renault. Por vezes quando circulam com

eles fora das refinarias os motores deixam de desenvolver pelo que os retiram, como foi referido pelo engenheiro mecânico responsável pela manutenção, tal deve acontecer quando se libertam imensas partículas que chegam a entupir o filtro, devido a esse problema o presente autor apresenta em anexo uma imagem (modelações em 3D) com cinco soluções para os vários tipos de escape, que são condicionados pelo espaço livre não podendo o filtro sobressair muito para fora do escape por vários motivos em especial a sua durabilidade (quanto mais sobressaído maior a probabilidade de choque).

Apesar da exigência legislativa a eficácia de prevenção de incêndios florestais era nula, porque os filtros chegavam a ter furos de 8 mm de diâmetro, quando deveriam ser furos com 1mm no máximo.

A legislação portuguesa peca por ainda não regulamentar estes filtros nem regulamentar a respectiva inspeção; só depois destas regulamentações é que adiantará o seu uso para prevenir incêndios florestais.

Nos Estados Unidos os dispositivos de retenção de fagulhas, conhecidos por “spark arrester” não podem deixar passar partículas superiores a cerca de 0,6mm de diâmetro.

Não se sabe se é correta esta dimensão, indicada pelo Laboratório de San Dimas pertencente ao Departamento Florestal do Ministério da Agricultura dos Estados Unidos. Procurou-se tal investigação na Internet, mas, como não se encontrou qualquer publicação, solicitou-se então, por e-mail a vários investigadores ligados a San Dimas, mas sem êxito.

A única publicação europeia que há sobre o risco de incêndio originado pela emissão de chispas de escape, é a norma ISO9467, que é dedicada aos riscos das motosserras poderem incendiar a vegetação seca quando o escape está voltado para ela.

A tabela 1.2 mostra alguns dos casos de incêndios provocados por viaturas. Fonte - *Industrial Operations Fire Prevention Field Guide*, página 140.

| ano | 1986 | 1990 | 1992 | 1994 | 1994 | 1995 | 1996 | 1996 | 1996 |
|----------------------------------|------|------------|-----------|------|---------|------------|------|------|-----------|
| nº de focos por ocorrência | 11 | 7 | 4 | 5 | 1 | 1 | 4 | 4 | 6 |
| marca e modelo do veículo | ? | 78 Ford SU | ? | ? | Dolphin | 91 Ford PU | ? | ? | 92GMC van |
| dist. entre o 1º e último foco m | 66 | 400 | 16000 | 122 | - | - | 8200 | 91 | 251 |
| dist. da origem à estrada m | 2,4 | 0,6 a 10,7 | 0,8 a 1,2 | 2,4 | 1,5 | 1,8 | | 4,6 | 0,3 a 0,9 |

Tabela1.2 Incêndios originados por partículas incandescentes provenientes de viaturas

Os incêndios originados pela libertação de partículas incandescentes de viaturas, provocam geralmente múltiplos focos. O máximo de focos por incêndio nesta tabela foi de 11 e a distância entre o primeiro e o último foco foi de cerca de 16 km; também a distância máxima do ponto de ignição à linha da estrada foi de cerca de 11 m.

A tabela 1.3 retirada do Resumo Técnico identifica as principais causas verificadas nas diversas regiões agrárias.

| Região Agrária | Principais causas |
|---------------------|---|
| Entre Douro e Minho | Uso do Fogo - Queimadas para a limpeza de solo florestal e do solo agrícola, borralheiras e renovação de pastagens; Lançamento de foguetes; Beatas de cigarros; Estruturais – Conflitos de caça; Incendiarismo – Irresponsabilidade de menores e Práticas de vandalismo |
| Trás-os-Montes | Uso do Fogo – Queimadas para a limpeza de solo agrícola, borralheiras e renovação de pastagens; Lançamento de foguetes; Acidentais – Material incandescente proveniente do sistema de locomoção ferroviária; Estruturais – Uso do fogo para afastar animais selvagens das culturas agrícolas; Incendiarismo – Práticas de vandalismo |
| Beira Litoral | Uso do Fogo – Queimadas para a limpeza do solo agrícola e florestal, borralheiras e renovação de pastagens; Acidentais – Faíscas com origem em linhas eléctricas; Estruturais – Uso do fogo para afastar animais selvagens das culturas agrícolas; Incendiarismo – Práticas de vandalismo |
| Beira Interior | Uso do Fogo – Queimadas para a limpeza do solo florestal e para a renovação de pastagens, borralheiras; Estruturais – Provocação aos meios de combate |
| Ribatejo e Oeste | Uso do Fogo – Borralheiras; Acidentais – Faíscas com origem em linhas eléctricas; Incendiarismo – Práticas de vandalismo |
| Alentejo | Acidentais – Emissão de partículas incandescentes, faíscas e transmissão de calor por condução a partir de alfaías e máquinas agrícolas; Estruturais – Conflitos de caça |
| Algarve | Uso do Fogo – Borralheiras e Fogueiras para a confecção de comida; Estruturais – Conflitos de caça; Incendiarismo – Práticas de vandalismo |

Tabela1.3 - Resumo das principais causas por região – 2002 (DGF)

Durante o verão de 2003 o presente autor registou e fotografou os incêndios florestais junto da autoestrada A1. Destes 15 incêndios, dois terão tido origem exterior à autoestrada pois a zona queimada estendia-se perpendicularmente à via numa extensão mínima de um quilómetro e só um terá sido originado por viatura que se incendiou, os restantes ocorreram junto à via por causas desconhecidas. O autor suspeita que as partículas libertadas pelo escape tenham sido a principal causa.

| | km | origem | descrição |
|----|---------|----------|--|
| 1 | 91 | | sentido SN pinhal cerca de 100m ext por 50m larg |
| 2 | 98 | | sentido NS lateral junto viaduto |
| 3 | 102,5 | exterior | sentido SN pinhal, cerca de 0,5km ext por 1 km larg |
| 4 | 130 | | sentido SN |
| 5 | 132 | | sentido NS encosta de pinheiros cerca de 150 m ext |
| 6 | 147,5 | | sentido NS berma de pinheiros cerca de 10 m ext |
| 7 | 189,5 | | sentido SN junto via rápida |
| 8 | 196 | viatura | viatura ardeu na berma e incendiou arriba |
| 9 | 200 | | sentido SN há registo da ocorrência |
| 10 | 212 | | sentido SN |
| 11 | 216,5 | | sentido SN |
| 12 | 219,6 | | sentido SN cerca de 100m ext por 3m de largura |
| 13 | 244-245 | exterior | ardeu dos dois lados 1km ext por mais de 1 Km de larg |
| 14 | 279,5 | | sentido NS eucaliptal, cerca de 100m ext por 200 largura |
| 15 | 281,7 | | sentido NS |

Tabela1.4 - Incêndios florestais junto da A1 (Autoestrada nº1) em 2003

Nos Estados Unidos os comboios a motor diesel levam vagões cisterna com cerca de 50.000 litros de água para pulverizar a linha férrea, por causa da emissão pelo escape de material com elevada temperatura e sprays para pulverizar os trilhos por causa de partículas que se podem libertar tanto dos travões como das rodas e trilhos



Imagem1.8 - Pulverização de toda a linha



Imagem1.9 - Pulverização junto aos carris

Várias publicações sobre prevenção de incêndios, donde foram retiradas estas imagens estão disponíveis no site <http://osfm.fire.ca.gov>.



Imagem1.10 - Escape de locomotiva com muita fuligem

A imagem anterior mostra uma grande quantidade de fuligem acumulada. Esta fuligem contém muito óleo, além de gásóleo mal queimado, denominado *Particulate*, Heywood (1988). Quando esta fuligem se liberta em combustão poderá originar vários focos de incêndio ao longo da linha, incêndios que poderão ser difíceis de combater se originarem extensas frentes.



Imagem 1.11 - Comboio com spark-arrester

As imagens seguintes mostram a autolimpeza do escape de comboio a diesel. Fonte - Spark Arresters and the Prevention of Wildland Fires, video NFES 2237 (1998)

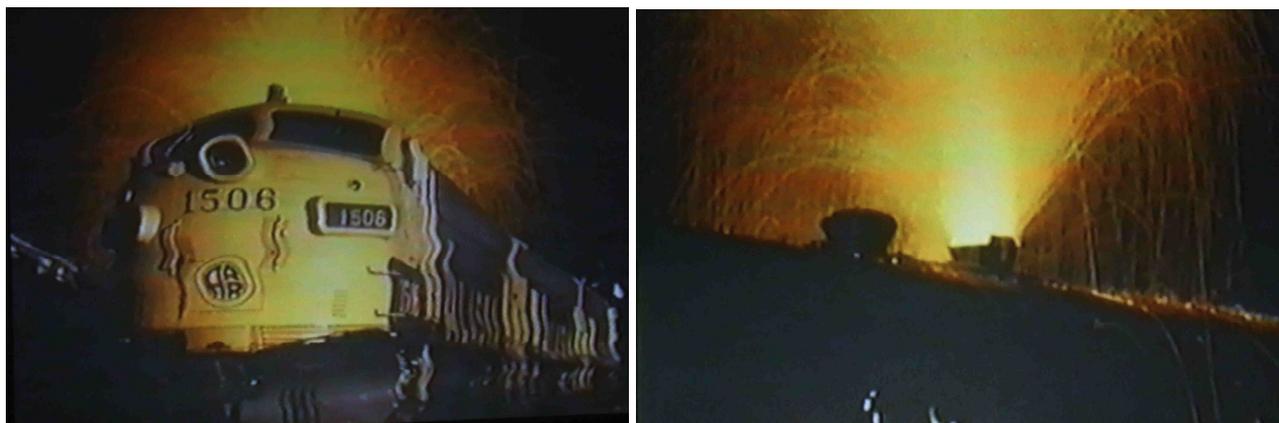


Imagem 1.12 e 1.13 - Autolimpeza do escape de comboio

Num inquérito levado a cabo pelo autor em 2002 no quartel dos bombeiros sapadores de Coimbra, 84% dos 66 bombeiros inqueridos respondeu que já tinham visto fagulhas a saírem de escapes de viaturas. As viaturas mais apontadas como libertadoras de fagulhas foram camiões e tratores.

Pneus de camião

Quando durante uma viagem, se um pneu de camião se começar a desfazer, mesmo que a temperatura não seja suficientemente elevada para a borracha se autoinflamar, as partículas de borracha ao soltarem-se no meio de chispas geradas pelos arames de aço que fazem parte do pneu em contacto com o pavimento, podem provocar a inflamação. Se os bocados de borracha em combustão alcançarem a vegetação da berma será provável a ocorrência de incêndio. Terá sido esta a causa de um incêndio em 2004, ocorrido na berma da A1, ao km 168 no sentido, norte-sul em que bombeiros combatiam um pequeno foco de incêndio que deflagrava numa arriba com pinheiros, enquanto mais à frente, a cerca de 100 m, o motorista do camião substituíu um pneu da frente parcialmente desfeito.



Imagem 1.14 - Zona queimada da A1 ao km 168, devido a pneu em julho de 2004.

Os profissionais de manutenção dos travões de camiões sabem que os pneus de camião se podem inflamar nas seguintes condições:

- a) Pneus sob baixa pressão em simultâneo com sobrecarga;
- b) Quando a válvula de travagem deixa passar algum ar para os diafragmas dos cilindros dos travões, obriga os calços a irem encostados ao tambor da roda com uma pressão constante, provocando assim um aquecimento exagerado dos pneus e dos calços, ao ponto de algum pneu se desfazer e nalguns casos se incendiar;

Alguns motoristas relataram ao presente autor, casos dos pneus se autoinflamarem. Também é possível que a origem de incêndio possa começar nos calços que vão constantemente a travar podendo os gases libertados destes se inflamarem e propagar o fogo aos pneus.

Do inquérito feito aos bombeiros sapadores em 2002, foi apontado que cerca de 70% das origens de incêndios ocorriam junto a vias como estradas e caminhos.

Para confirmação do elevado risco de incêndio junto às estradas apresentam o autor deste trabalho relata o que presenciou em 16/8/2005 pelas 10h:

“Quando regressava de férias pela autoestrada em direcção a Sevilha, numa das serras junto a Málaga, vi que havia fumo na autoestrada. Constatei que o fumo vinha dos arbustos que estão na divisória central da autoestrada. Não vi chamuscas algumas mas do outro lado da autoestrada estava estacionada uma viatura pesada de combate a incêndios, na altura não haveria muito calor pois o sol ainda estava encoberto com neblina matinal, enquanto percorria cerca de 100km da autoestrada A92 na direcção de Sevilha, contei 31 zonas centrais da autoestrada que arderam nas últimas semanas, sem nunca encontrar alguma berma próxima queimada”.

A quantidade de ocorrências durante o verão de 2005 nesta estrada foi de tal modo tão elevada, que houve uma ocorrência em média por cada 3 km.

As únicas causas possíveis destes incêndios ocorrerem somente no centro da via excluem por exemplo o fogo posto, que normalmente é apontado por muitas pessoas, bem como muitas outras causas, assim deduz-se que as únicas causas destes incêndios terão sido provocadas por partículas libertadas do escape, cigarros e pneus.

A causa mais provável será por partículas, ainda mais, que o escape das viaturas pesadas aponta geralmente para a sua esquerda, e está a cerca de meio metro do chão, assim as partículas libertadas, podem ser directamente projetadas nas folhas secas.

A imagem seguinte, mostra que a vegetação queimada é unicamente a zona central, fotografia ao km 70, da A92.



Imagem 1.15 - A92 ao km 70, sentido Granada-Sevilha, 16/8/2005.

Em anexo a este trabalho, apresenta-se no final uma lista com as causas mais frequentes de incêndios florestais.

1.2 – Objetivos

É um dado que o conhecimento mais exato das causas dos incêndios permite melhorar a sua prevenção.

Certas origens dos incêndios florestais sendo confirmadas cientificamente, levarão a que haja mais prevenção.

Atendendo a que uma parte considerável dos incêndios florestais têm origem desconhecida é conveniente investigar todas as origens que são consideradas duvidosas ou que são negadas pelos intervenientes, pois estes têm interesse que não lhes sejam imputadas responsabilidades. Por exemplo, em tribunal pessoas prejudicadas com incêndios originados junto à linha férrea poderão ter dificuldade em fazer prova de que a origem vem dos comboios, em parte porque há falta de dados científicos acerca da possibilidade de os comboios libertarem partículas incandescentes que possam provocar incêndios. Atualmente a legislação já exige através da alínea b) do art.º 15º do DL 124/2006, que a entidade responsável pela rede ferroviária providencie a gestão do combustível, no mínimo 10m para cada lado da linha a partir do carril.

Muitas pessoas inclusive os bombeiros, afirmam que a maior parte das origens é intencional.

O presente autor está convicto que a maioria não terá origem intencional e que é

necessário provar tais origens, contudo há origens intencionais nomeadamente relacionadas com a renovação de pastagens, indivíduos com problemas psiquiátricos ou desajustados da sociedade, vinganças pessoais ou quando alguém menos escrupuloso lucra com o incêndio.

Uma medida para reduzir a origem intencional e desconhecida, consiste na existência de brigadas de investigação que se deslocam imediatamente após o sinal da alarme ao local do incêndio para indagarem do local exato da origem e as respetivas causas, deste modo a incerteza das causas tende a ser reduzida a valores aceitáveis para que não aconteça como no ano de 2007 em que a indeterminação foi de cerca de 66% dos fogos investigados. Se os investigadores chegarem rapidamente ao local da ocorrência, poderão recolher dados meteorológicos e estimar a velocidade de avanço do fogo. Deste modo será mais fácil encontrar vestígios que tenham originado a ocorrência, devido à zona de procura de indícios ser menor.

A estas equipas de investigação poderá ser valiosa a utilização de cães treinados para detetar através do seu olfato resíduos de combustíveis ou de produtos químicos, a utilização de câmaras de infravermelhos, que apesar de serem bastantes caras, seriam muito importantes para determinar o local exato da origem devido ao terreno queimado, que durante o percurso do fogo atingirá um valor máximo e com o decorrer do tempo o terreno arrefecerá, ao filmar-se a área queimada poderá constatar-se qual é zona mais fria (em iguais circunstâncias) que corresponderá ao local de origem desse incêndio florestal.

Os objetivos deste trabalho de investigação são:

- 1 - Apurar como os travões dos comboios e outros equipamentos mecânicos podem provocar risco de incêndio nos espaços rurais nos quais são incluídos os incêndios florestais.
- 2 - Determinar as curvas de inflamabilidade das espécies florestais mais vulgares com esferas aquecidas.
- 3 - Apurar os riscos de incêndio nos espaços rurais por partículas com elevada temperatura.
- 4 - Propor medidas adequadas para prevenção dos respetivos riscos.

1.3 – Revisão bibliográfica

Trabaud (1976), é um dos pioneiros a estudar a inflamabilidade da folhagem das espécies florestais mediterrâneas. Os ensaios foram efectuados através de fluxo de radiação de 25kW/m^2 , e por autoignição, tendo determinado o respectivo tempo de ignição de cada espécie. Como a metodologia difere do presente estudo e como há investigações mais recentes, os resultados não irão servir de comparação.

Su et al. (1981) referem a ignição de combustíveis por partículas inertes quentes em especial incêndios/explosões em minas de carvão, acidentes de aviação e projéteis quentes (balas) ao penetrarem o tanque de combustível de um avião. Se a atmosfera de uma mina de carvão possuir um dado valor misturado com o ar, torna-se explosiva e bastará uma partícula com elevada temperatura para causar a explosão dessa atmosfera. Os autores apresentaram a respectiva formulação para a ignição do combustível, mas esta investigação por partículas inertes quentes em combustíveis líquidos não é aplicável à ignição de espécies florestais que são combustíveis sólidos.

Viegas et al. (1989) utilizaram o espirador do LEIF para determinarem a inflamabilidade da folhagem de várias espécies florestais, tendo apurado que o tempo mínimo de ignição da caruma, recolhida em Maio/Junho com 10% de teor de humidade, era de 10 segundos. O ensaio foi feito a 400°C com chama piloto. Este resultado servirá para comparação dos resultados obtidos de inflamabilidade da caruma, borracha e calços.



Imagem 1.3.0 – Interior do espirador

Dimitrakopoulos et al. (1998) utilizaram a norma ISO 5656-1986E para determinar a inflamabilidade de algumas espécies mediterrânicas em função do teor de humidade. O aparelho de ensaios possui um cone aquecido por resistência eléctrica que transmite o calor à amostra. O cone com o vértice voltado para baixo e por ação da gravidade vai penetrando na amostra enquanto se dá a pirólise. Os resultados desta investigação, apesar de advirem duma metodologia diferente da que se vai empregar, seriam dentro do possível utilizados nesta investigação para comparação com os resultados obtidos. Para tal compilaram-se os resultados da tabela apresentada para uma folha de cálculo e ao fazerem-se os respetivos gráficos de inflamabilidade expressos em tempo de ignição em função do teor de humidade, constatou-se que todas as curvas eram retas coincidentes em todos os pontos indicados na tabela. Tal não será possível à exceção de se terem determinado unicamente dois pontos e com eles por interpolação determinarem-se os dados restantes. Devido à falta de credibilidade desta investigação os

resultados obtidos não poderão servir como referência.

Guijarro et al. (2002) fizeram ensaios de inflamabilidade das espécies florestais mais vulgares no Sul da Europa empregando partículas em combustão, que eram depositadas em cima das amostras.

Os ensaios foram efectuados com dois níveis de teor de humidade do combustível, um com o teor de acordo com as condições climáticas da época e outro com as amostras secas em estufa a 100°C.

Unicamente é comum a metodologia descrita até aqui, sendo diferente em:

- a) - As amostras foram condicionadas a uma certa carga (kg/m^2),
- b) - Para os ensaios empregaram como partículas em combustão bocados com $2 \times 2 \times 1 \text{ cm}^3$, feitos de Madeira de "*Pinus sylvestris*" (Pinheiro Silvestre), com 12 % teor de humidade.
- c) - A ignição das partículas em combustão foi efetuada por contacto (condução) com irradiador eléctrico, de acordo com a norma UNE 23729-90-1R, correspondente à NF P 92-509-1985.

Neste estudo a fonte é um combustível florestal em combustão sem chamas, depositado em contacto com a amostra. Os resultados deste estudo não servem para comparação devido ao tipo de fonte de ignição diferir, às partículas não serem em material inerte e a não estar quantificado a temperatura de combustão da fonte.

Pérez-Gorostiaga et al (2002) apresentaram a probabilidade de ignição de algumas espécies florestais, utilizando tamanhos variados de partículas em combustão com as variáveis de velocidade e a direcção do vento ser paralela ao leito da amostra ou fazendo um ângulo de 45° com o leito. Apesar de ser uma extensa investigação, ela incidiu sobretudo no contributo do vento para a ignição e atendendo a que não se vai empregar a variável do vento estes resultados não são relevantes para o presente estudo.

Smith (2005), estudou a inflamabilidade de várias folhas utilizando um fluxo de calor de proveniente da queima de gás metano ou hidrogénio que atravessava um painel horizontal perfurado. O ensaio consistia em segurar com um alicate a folha por cima do painel, numa zona que atingia facilmente os 1000 °C e registar o tempo de ignição. Apresentam-se vários gráficos que são relevantes:

A figura 1.3.1 mostra que as espécies têm diferentes tempos de ignição, tal é o que se espera neste estudo.

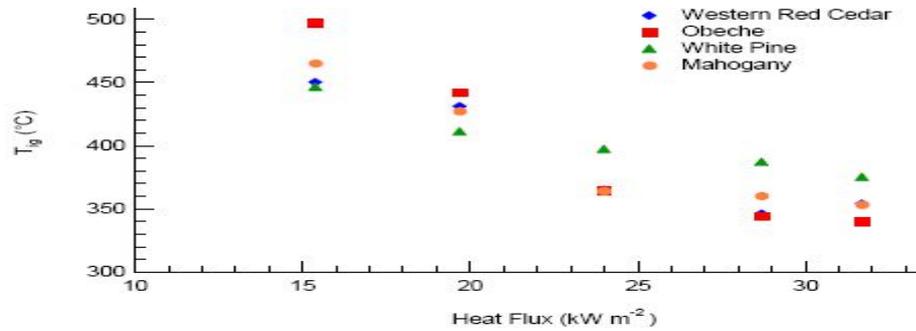


Figura 1.3.1 - Efeito do calor nas várias espécies (Com piloto aceso. Fonte. Li and Drysdale)

A figura 1.3.2 e 1.3.3 mostram que a redução do teor de humidade da amostra reduz o tempo de ignição, tal também se espera que aconteça neste estudo.

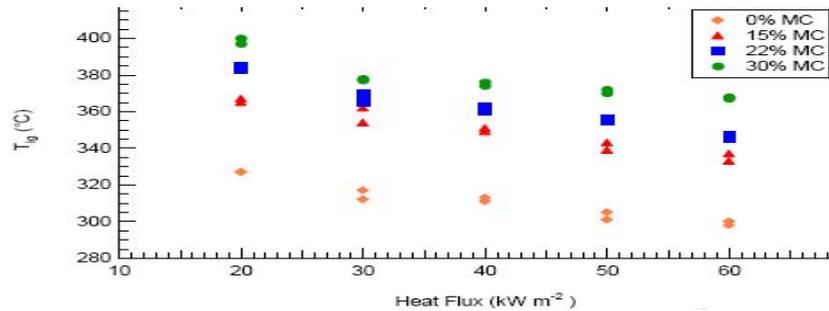


Figura 1.3.2 - Efeito do teor de humidade para a espécie Pinheiro *radiata*

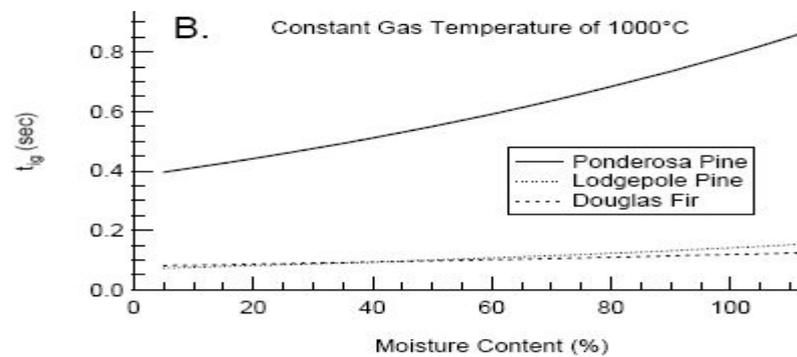


Figura 1.3.3 - Efeito do teor de humidade das espécies pinheiro manso Ponderosa, pinheiro de Lodgepole (*pinus contorta*) e Douglas fir (*Pseudotsuga menziesii*).

A figura 1.3.4 mostra para as mesmas espécies que há redução do tempo de ignição quando se aumenta a temperatura, tal também se espera que aconteça neste estudo.

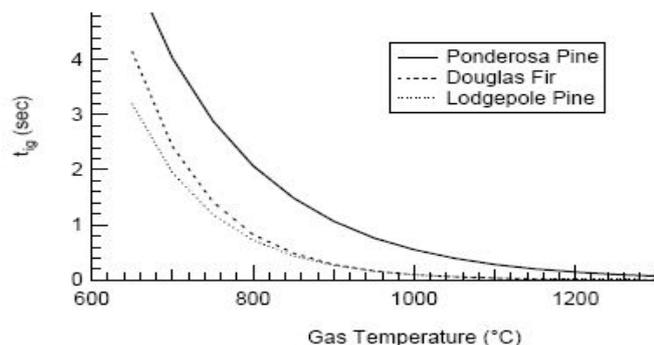


Figura 1.3.4 - Efeito da temperatura em amostra com 50% de teor de humidade da amostra

A figura 1.3.5 mostra que há redução da temperatura de ignição quando se diminui a espessura da folha.

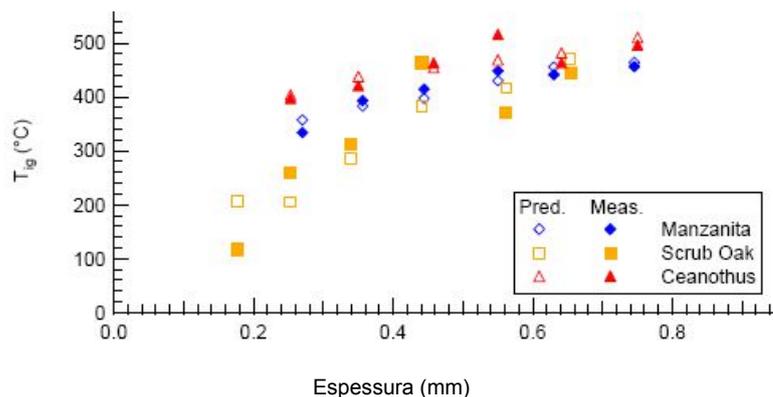


Figura 1.3.5 - Efeito da espessura das folhas de várias espécies

Manzello et al. (2005 e 2006) utilizam partículas em combustão redondas de 25 e 50 mm, para ensaios de ignição por deposição das mesmas em amostras de espécies florestais, com o teor de humidade em seco e a 11%, com a velocidade do ar a 0,5 e a 1m/s. A ignição das partículas em combustão é feita por chamas de gás metano. Utilizaram em ensaios de partículas em combustão além das espécies florestais como amostras, papel fino cortado em tiras a imagem 1.3.1 mostra uma ignição. A imagem 1.3.2 mostra um dos ensaios com resultado negativo com partículas em combustão de 25mm de diâmetro em caruma seca.



Imagem 1.3.1 - Ensaio em papel



Imagem 1.3.2 - Ensaio em caruma seca

Como se pode ver nesta imagem a disposição da caruma foi aleatória com ocorre na natureza. Este estudo tem semelhanças à metodologia que se vai utilizar, mas os resultados apresentados só confirmam que o vento aumenta a ignição e que o baixo teor de humidade da amostra aumenta também a ignição.

No presente estudo a disposição aleatória das folhas foi posta de lado, porque nos primeiros ensaios a esfera passava pelo meio das folhas da caruma ficando em contacto com o fundo do recipiente da amostra, assim optou-se por ensaios com as folhas de caruma e de feno alinhadas paralelamente umas às outras.

Manzello et al. (2007), fizeram ensaios de ignição com partículas em combustão para apurar a ocorrência de incêndios em habitações. Utilizaram como alvo quadros em rede com malha de 1,5 mm, 3 mm e 6mm, de modo que o ar circulasse pelo quadro. A ignição das partículas em combustão é feita por queimadores de propano. A imagem 1.3.3 mostra o esquema “Ignição de Combustíveis Florestais por Partículas com Elevada Temperatura” por Mário Loureiro, UC

do gerador para os ensaios.

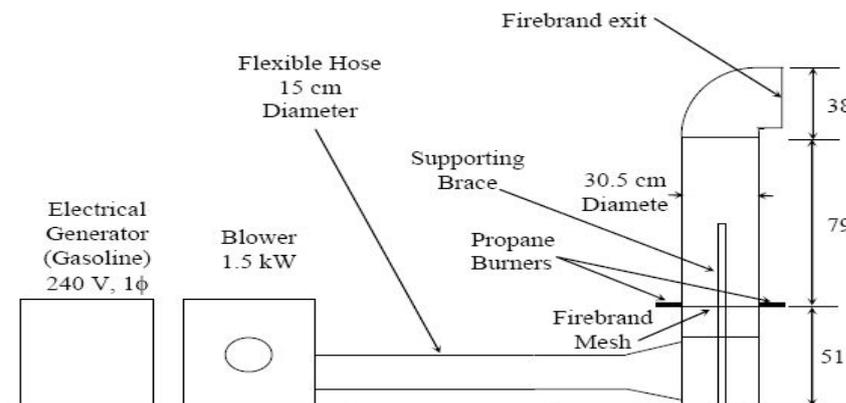


Imagem 1.3.3 Vista lateral do gerador de partículas em combustão

A imagem 1.3.4 mostra algumas ignições enquanto que a imagem 1.4.5 mostra a emissão de partículas em combustão e o pormenor da localização do quadro alvo por onde passa o ar.



Imagem 1.3.4 Quadro com 5 ignições



Imagem 1.3.5 geração de fagulhas

A utilização de um quadro é uma boa ideia. A partícula em combustão ao colidir com a tela pode provocar ignição. Mesmo que não ocorra ignição a partícula em combustão pode perfurar a tela de tecido e será fácil de apurar o diâmetro da partícula que a atravessou.

A utilização do quadro com tecido também já foi utilizado no início deste estudo para tentar apurar o tamanho de partículas libertadas do escape de camiões, contudo em todos os ensaios realizados nunca houve libertação de partículas.

Quanto ao ensaio de partículas inertes aquecidas o presente autor desconhece qualquer publicação dedicada a este assunto envolvendo espécies florestais, pelo que serão inéditos os resultados obtidos com esta investigação. Contudo, Gavriil Xanthopoulos (informação de D.X. Viegas), realizou na Grécia ensaios de ignição em amostras florestais, com esferas aquecidas, mas não obteve resultados conclusivos.

Os resultados obtidos com este estudo por partículas de elevada temperatura, só foram possíveis utilizando parte da sua metodologia que consistia em utilizar uma esfera metálica aquecida com um termopar inserido nela.

1.4 – Âmbito do presente estudo

Da tabela 1.1 foram selecionadas duas causas que vão ser averiguadas no âmbito do estudo desta investigação:

1 - *Material incandescente proveniente do sistema de locomoção ferroviária;*

2 - *Emissão de partículas incandescentes, faíscas e transmissão de calor por condução a partir de alfaías e máquinas agrícolas;*

Da primeira causa irá determinar-se a inflamabilidade dos calços utilizados pelos comboios utilizando para tal o epiradiador do Laboratório de Incêndios Florestais da Lousã, regulado para a temperatura de 600°C, com chama piloto e ventilação ligada.

Além da inflamabilidade dos calços vai-se determinar ainda outras características e estudar o risco de incêndio associado aos travões, nomeadamente partículas em combustão libertadas dos calços e partículas metálicas incandescentes libertadas das rodas e trilhos.

Por ser importante apresenta-se uma imagem dos travões de um comboio da CP, onde se pode visualizar um calço igual ao um dos que foram utilizados nos ensaios e duas imagens em que se mostra um calço todo calcinado e um outro que ardeu parcialmente, na parte final de acordo com o sentido de rotação donde se libertarão as partículas em combustão e chispas. Fonte - Railroad Fire Prevention Field Guide, (26/04/1999), Department of Forestry and Fire Protection, US.

Em qualquer destas duas situações do parágrafo anterior, libertaram-se imensas partículas do calço em chamas, que poderiam ter originado um ou mais focos de incêndio em especial se ocorrer durante o período crítico em que a vegetação é normal apresentar baixo teor de humidade.



Imagem 1.4.1
Calço de comboio da CP



Imagem 1.4.2
Calço de comboio queimado



Imagem 1.4.3
Calço parcial/queimado

Além destas causas irá determinar-se a inflamabilidade da borracha de pneu de camião e

enunciar os riscos associados.

Da segunda causa seleccionada da tabela 1.3 e do gráfico 1.15, o estudo irá incidir sobre o risco de incêndio da vegetação por partículas com elevada temperatura e ainda sobre o risco de incêndio provocado por condução, contacto do sistema de escape com a vegetação.

2 - Ignição de Combustíveis Florestais

2.1 - Processo físico-químico

O processo físico-químico da ignição de combustíveis florestais inicia-se por aquecimento. A fonte de aquecimento pode ser de acordo com Babrauskas (2001) por:

- 1- Radiação;
- 2- Chamas – convecção;
- 3- Contacto direto – condução;
- 4- Radiação e convecção (a fonte é mista);

Dimitrakopoulos (1998), que realizou ensaios de inflamabilidade de diversas espécies florestais, utilizou a descrição da publicação de Brown e Davis (1973) sobre a energia necessária para a combustão de 1 g de madeira:

- a) Aquecimento da água de 17 °C até 100 °C, 347,27 J;
- b) Separar a água da madeira, 117,15 J;
- c) Vaporização da água livre, 2255,18 J;
- d) Aquecimento do vapor da água desde 100 °C até 871 °C (temperatura da chama), 1623,39 J;
- e) Vaporização da água ligada à estrutura da madeira (entalpia de ligação), 1259,39 J;

Do parágrafo antecedente, verifica-se que a maior parte da energia envolvida (5602,35 J), para alcançar-se a ignição, foi necessária a energia de 4342,96 J (soma das alíneas a) a d)), para remover e aquecer a água que não faz parte da estrutura da madeira, enquanto que para vaporizar a água ligada à estrutura foi necessário menos de um terço dessa energia (1259,39 J), constata-se que quanto maior for o teor de humidade do combustível florestal, maior será a energia para a respectiva ignição, contudo a inflamação da madeira é mais complexa, que convém explicar.

André (1996) apresenta os mecanismos físico-químicos de absorção de calor pela partícula de madeira. O primeiro é o calor sensível, processo de aquecimento reversível, que não

envolve reações químicas nem transformações de fases da partícula sendo assim um fenómeno puramente físico.

Sendo dQ_s , uma quantidade infinitesimal de calor uniformemente absorvida em volume, (como calor sensível), por uma partícula δm , em que a partícula se comporta como termicamente fina, provoca um aumento na temperatura da partícula, de T para T+dT, dado por:

$$dT = \frac{1}{c} \left(\frac{dQ_s}{\delta m} \right) \quad (\text{eq 2.1})$$

O parâmetro c [J/(kg.°C)] é o calor específico que nos casos dos sólidos, é praticamente independente da condição de fronteira relativa à pressão na superfície da partícula, durante o processo de aquecimento, sendo apenas, função da temperatura da partícula ou seja $c=c(T)$. Para madeiras secas há correlações aproximadamente lineares até 100 °C e com pequeno erro até cerca de 200 °C. Acima dos 200 °C não é possível desacoplar o mecanismo de absorção de calor de um outro, associado à pirólise da madeira. A pirólise é o conjunto de reações químicas endotérmicas e exotérmicas, termodinamicamente irreversíveis, mas que não incluem reações de combustão. A pirólise é a responsável pela geração de gases combustíveis, absorvendo mais calor do que aquele que gera com as reações exotérmicas,

O estudo da pirólise tem sido efectuado de modo que o aquecimento da amostra do material seja o mais uniforme possível e tenha uma evolução temporal simples. Daqui resulta que as amostras são muito pequenas, sendo a amostra submetida a aquecimentos quasi-estáticos, em que se mantém a amostra em patamares térmicos com duração suficiente para que se completem as correspondentes reações.

As técnicas básicas mais comumente usadas são a análise termo-diferencial (DTA, *Differential Thermal Analysis*), a análise calorimétrica diferencial de varrimento (DTA, *Differential Scanning Calorimetry*) e a análise termo-gravimétrica (TGA, *Termogravimetric Analysis*). Utilizam-se ainda técnicas combinadas e a *Evolved Gás Analysis* (EGA). Para este estudo não interessa aprofundar o estudo da pirólise devido a não ser esse o âmbito de estudo, mas, essencialmente compreender a ignição de produtos florestais.

Vaz (2001) apresenta um modelo simplificado baseado na correlação empírica de Dunlap para madeira seca, em que o mecanismo de calor sensível, pode ser unicamente emulado do ponto de vista energético, por um mecanismo equivalente de calor sensível, caracterizado por um calor específico c_s [J/(kg.°C)], crescente com a temperatura da partícula T_f [°C]:

$$c_s(T_f) = 1110 + 4,86T_f \quad (\text{eq 2.2})$$

Como é necessário saber quais são os produtos químicos envolvidos na combustão dos produtos florestais, interessa fazer uma descrição química da sua composição. Há dois grandes grupos nestes materiais, André (1996) a saber, um grupo principal de componentes poliméricos, constituído pela celulose, um seu derivado (a hemicelulose), a lenhina, e um grupo secundário

composto por “extratáveis” e minerais. Na vegetação viva, a hemicelulose tem intervalo de fração mássica de 0,5 a 0,75, e a lenhina tem intervalo de fração mássica de 0,15 a 0,35 enquanto que na vegetação morta esta pode alcançar com o tempo 0,75. Os produtos “extratáveis” são aqueles que mais facilmente se libertam da partícula e que dão o cheiro característico da espécie. Podem variar de 0,002 a 0,15, e costumam incluir polímeros de baixo peso molecular (terpenos), bem como resinas, as quais têm composições variadas à base de ácidos gordos e álcoois. Os minerais alcançam 0.02 na massa da madeira, mas nas folhas, o intervalo vai de 0,05 a 0,1.

André (1996) a propósito da pirólise diz que a orientação dominante das fibras influencia significativamente a pirólise abaixo dos 300 °C e que quando o aquecimento não é de acordo com os ensaios térmicos standard a pirólise não ocorre nem progride homoganeamente em todo o seu volume, havendo heterogeneidades de reações na partícula.

Tal é o que vai suceder na maioria dos ensaios de ignição de combustíveis florestais e de outras partículas, a realizar no presente estudo. No caso das partículas de borracha e de calços de travões estas não se vão comportar como termicamente finas nos ensaios de ignição a realizar utilizando o epirradiador. O mesmo sucederá nos ensaios de ignição com estas partículas, em que o aquecimento das amostras florestais será pontual e não uniforme, pelo que as equações atrás apresentadas não serão aplicáveis no presente estudo.

A quantidade de produtos voláteis varia muito de espécie para espécie. A mesma espécie pode apresentar ao longo do ano grandes diferenças de volatilidade, o que foi verificado por Viegas et al. (1989), em que o tempo de ignição de várias espécies (caruma, agulhas de pinheiro bravo e urze) apresentava variações superiores a 300%. Constata-se que a percentagem de óleos presentes nas folhas vivas varia ao longo do ano. A inflamabilidade das folhas mortas terá a ver com a quantidade de óleos existentes aquando da queda e com a degradação dessas folhas. Quanto maior a degradação das espécies menor será a percentagem de óleos existentes.

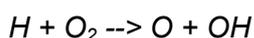
Nuno Leitão apresenta uma explicação química da combustão e como ela se inicia, a propósito dos fogos florestais, que se compila parcialmente:

“No início do processo, uma molécula estável fragmenta-se devido ao calor, originando-se dois ou mais radicais. Por exemplo:



A molécula de propano (C₃H₈) origina dois radicais muito instáveis, que interagem com outras moléculas, tornando-se centros de cadeias envolvidas em novas reações, um processo em cascata que leva à ocorrência de uma sequência de ramificações.

Uma das reações mais significativas da propagação envolve o hidrogénio atómico (H) e o oxigénio molecular, com a produção de oxigénio atómico (O) e um radical de hidroxilo (OH), extremamente ativos:



A propagação é garantida porque cada reacção mantém ou multiplica o número de produtos disponíveis para reacções subsequentes, numa sequência de processos, sendo a zona de chama a mais importante para a sua ocorrência.

A ignição é uma fase instável e corresponde ao processo transitório que conduz à combustão, que é de novo uma fase estável. A ignição não se verifica a uma única temperatura. A forma do combustível, nomeadamente a sua relação superfície/volume, está diretamente relacionada com a quantidade de calor que pode ser absorvida por unidade de massa ou volume e por unidade de tempo, da condutividade térmica dos combustíveis, e depende também de outros fatores físicos”.

Quando os gases voláteis ou radicais libertados de uma amostra florestal, sujeita a processo de aquecimento, existirem em quantidade, em que haja uma concentração mínima para a reacção em cadeia, e oxigénio em percentagem suficiente (neste estudo, vamos lidar com pequenas quantidades de matéria e ao ar livre, em que a percentagem de oxigénio não será tão reduzida), podendo então os gases libertados inflamar-se, mesmo que a quantidade de radicais livres não seja suficiente para a auto inflamação poderá uma pequena energia externa iniciar ou auxiliar a inflamação, que atuará com energia de ativação. Esta energia de ativação poderá ser muito pequena quando comparada com a energia de aquecimento. Poderá ser suficiente uma faísca, uma chispa ou o contacto com um corpo quente. Se a libertação dos gases ocorrer a uma temperatura bastante elevada, essa temperatura será suficiente para que os radicais/gases voláteis reajam com o oxigénio contido no ar.

A ignição de combustíveis florestais termina numa reacção química ou passa por duas reacções químicas de oxidação, pois ela pode ocorrer por dois modos:

- 1- Chamas;
- 2- Incandescência seguida de chamas;

No primeiro modo a reacção química ocorre só com a combustão em chamas, enquanto que no segundo modo a combustão inicia-se sem chamas, geralmente por falta de oxigénio, passando posteriormente a combustão com chamas.

Os testes de inflamabilidade para determinar as características das espécies florestais e alguns parâmetros como o teor de humidade podem ser de dois tipos: autoignição e ignição pilotada. Na ignição pilotada utiliza-se uma chama piloto para ativar a combustão através da inflamação dos gases voláteis libertados ou de energia de ativação da reacção em cadeia dos radicais livres.

A combustão apresentará diferenças com a altitude devido a variação da pressão as quais não irão ser discutidas neste trabalho.

A velocidade do vento pode contribuir muito para haver ignição como se verificou durante muitos ensaios com resultado negativo, em que a temperatura já tinha baixado entre 10 a 20% do valor inicial e que bastava um pequeno sopro para o material da amostra em combustão sem chamas passasse a ser com chamas, contudo não será estudada. A ignição ocorre porque os gases libertados afastam o ar que contém o oxigénio reduzindo assim a percentagem do oxigénio necessária à autoinflamação. Decidiu-se por ensaios sem vento, pois já havia muitas variáveis envolvidas no estudo.

2.1- Parâmetros envolvidos

Face ao exposto nos parágrafos precedentes tem-se que os parâmetros envolvidos são:

1- Teor de humidade das espécies;

2- Temperatura inicial da espécie, que terá a ver com a temperatura ambiente ou no caso de estar exposta ao sol, devido à radiação solar incidente apresentará uma temperatura maior (tal será visto mais à frente). Quanto mais elevada for a temperatura inicial da espécie menor será a energia necessária para a aquecer ao ponto de alcançar a respectiva inflamação, como exemplo a caruma que esteja horas exposta ao sol terá a temperatura de ignição mais reduzida do que uma que esteja à sombra mesmo que o teor de humidade fosse igual);

3 -Tipo de fonte de calor;

4- Posição da fonte de calor. Quando a fonte de calor estiver posicionada por cima, ela estará em contacto com os gases libertados, provocando também a ativação da inflamação, enquanto que se a fonte de calor estiver por baixo os gases libertados sobem sem tocar na fonte quente, tornando-se mais difícil a ignição, sendo necessárias temperaturas mais elevadas para se conseguir a ignição.

5- Temperatura da fonte de calor;

Face ao exposto conclui-se que a ignição ocorrerá para menores temperaturas da fonte de calor para uma dada espécie quando:

1- Tiver menor teor de humidade;

2- A espécie tiver uma temperatura inicial elevada (menor será a energia necessária para alcançar a inflamação);

3- O tipo de fonte de calor for chama, seguindo-se o contacto direto;

4- A fonte quente estiver posicionada pelo lado de cima da amostra, nos casos de radiação e contacto direto, pois, a mesma fonte também fará a ativação da inflamação;

Vaz, G.C. (2001) e André, J.C.S. *et al* (2001) para efeitos de propagação de fogos consideraram que a temperatura de ignição da madeira (T_{ig}) é 320 °C.

Neste estudo vai-se utilizar como único tipo de fonte de calor a condução, ou seja o contacto direto das amostras com corpos quentes.

Quanto ao teor de humidade das amostras relativo à massa seca, os ensaios serão realizados com valores deste parâmetro compreendidos no intervalo de 0% a 10%.

3 – Metodologia

3.1 – Metodologia - Materiais

3.1.1 - Espécies florestais estudadas e amostragem

A maior parte dos incêndios tem origem na vegetação rasteira, e propaga-se muitas vezes por meio desta, sendo por isso investigadas as espécies mais abundantes.

De acordo com Godinho-Ferreira (2005) o pinheiro bravo ocupa 27,3% e o eucalipto 16,2% da área ocupada pelos diversos tipos florestais.

Viegas et al. (2004) consideraram três tipos de combustíveis florestais, representativos do coberto florestal nacional, representados na sua análise pelas seguintes espécies, na Calibração do Sistema Canadano de Perigo de Incêndio para Aplicação em Portugal, que são as seguintes:

- a) Caruma de *Pinus pinaster* (pinheiro bravo);
- b) Folhas mortas de *Eucalyptus globulus* (eucalipto);
- c) Folhas e extremidades de ramos de feno;

As duas primeiras amostras são representativas dos combustíveis finos da folhagem, ao passo que a terceira representa os combustíveis arbustivos.

O manto que normalmente está debaixo dos principais povoamentos destas espécies florestais são folhas mortas, caruma no caso de pinheiro bravo e folhas secas de eucalipto.

As espécies selecionadas como amostras, tiveram também em conta a sua disponibilidade. Assim as espécies do presente estudo, devido à sua grande representatividade na problemática dos incêndios florestais, serão:

- a) Caruma do pinheiro bravo (folhas caídas);
- b) Folhas mortas de eucalipto;
- c) Folhas e extremidades de ramos de feno;

As folhas utilizadas do feno e pinheiro bravo estavam armazenadas nas instalações do Centro de Estudos sobre Incêndios Florestais (CEIF) e as de eucalipto vieram do terreno a nascente da ADAI tendo-se tido o cuidado de rejeitar as folhas mais degradadas. A preparação das amostras consistia em retirar outras espécies que estivessem misturadas. Finalmente eram cortadas com uma tesoura, com um comprimento de 9 a 10 cm para caberem ao comprido dentro das formas retangulares de alumínio, de tal modo que preenchessem todo o fundo e ficassem acamadas com uma altura de 1 a 2 cm à exceção das de eucalipto para as quais bastavam três camadas sobrepostas para que quando uma esfera estivesse em contacto com a espécie não tocasse no fundo e dissipasse algum calor e ou reduzisse o calor transferido para a amostra, alterando assim o resultado.

3.1.2- Teor de humidade

Dos ensaios a realizar com espécies florestais, cerca de metade seriam com o teor de humidade próximo dos 10%, valor normal de Verão, enquanto que a outra metade seria com teor de humidade inferior a 5% (teor de humidade das amostras, relativo à massa seca), imediatamente depois de serem retirados da estufa.

O teor de humidade é definido por:

$$X = \frac{m_i - m_f}{m_f} \quad (\text{eq.3.1})$$

em que m_i é a massa inicial da amostra e m_f é a massa final após secagem.

O teor de humidade das amostras depende da humidade atmosférica, por serem produtos higroscópios. As madeiras e folhas são constituídas por estruturas com matrizes capilares, nas quais armazenam água em menor ou maior grau. A água nestas estruturas não é livre existindo uma influência do tipo de ligação água-matriz sólida Figueiredo (1999), que se reflete na diminuição da pressão de vapor devida à retenção de água nos capilares, à existência de solutos e à adsorção química ou física sobre as superfícies sólidas. Assim a pressão parcial do vapor com a qual se encontra em equilíbrio, a uma dada temperatura, é inferior à correspondente pressão de saturação. O efeito de retenção provocado pela capilaridade é justificado pela equação de Kelvin que mostra que o fenómeno da diferença de pressões é importante se os capilares forem extremamente finos, $r < 1 \mu\text{m}$.

O comportamento higroscópico da madeira pode ser descrito pelas curvas chamadas de equilíbrio higroscópico, que dão, a cada temperatura, a relação entre o teor de água presente no produto e a pressão do vapor que aquela impõe à superfície do mesmo. Deste modo assim a

secagem com ar aquecido a dada temperatura e a certa humidade relativa impõe então ao produto um teor final determinado pela correspondente curva de equilíbrio.

O fenómeno da higroscopicidade da madeira é mostrado pela curva de secagem ou desorção (a madeira cede água ao ar) e curva de humedificação ou de adsorção (é conhecido também por intumescimento, a madeira absorve água). As duas não são coincidentes apresentando uma histerese como se pode ver no gráfico 3.1. A curva à esquerda corresponde à humedificação e a da direita corresponde à secagem.

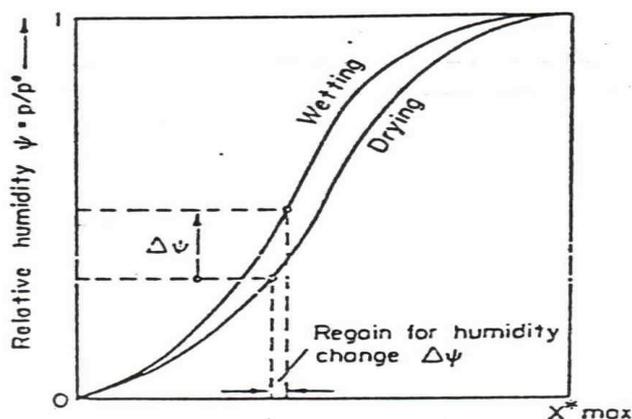


Gráfico 3.1 – Curvas de equilíbrio higroscópico.

Cada espécie florestal, e cada parte dessa espécie (tronco, casca, folhas,...) terá curvas distintas. A tabela 3.1 apresenta os valores do teor de humidade de madeira, em função da temperatura e da humidade relativa do ar (Fonte – Forest products laboratory “Wood handbook” 1999).

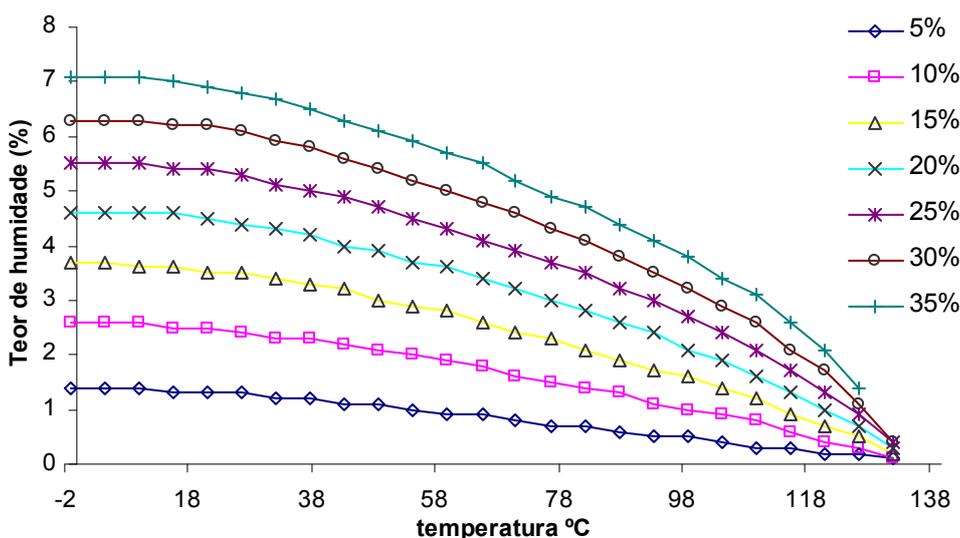


Tabela 3.1 - Teor de humidade da madeira face à temperatura e humidade relativa do ar

O gráfico 3.2 retirado da sebenta de operações industriais de secagem mostra que a entalpia de ligação da madeira de pinheiro, aumenta muito com a diminuição do teor X.

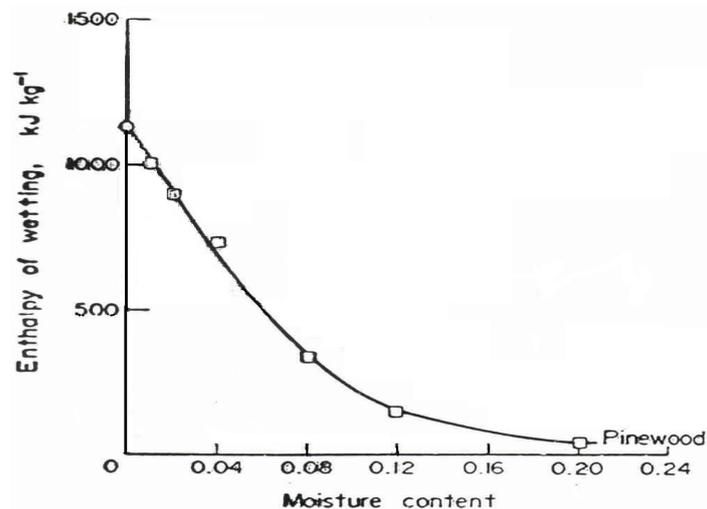


Gráfico 3.2 - Variação da entalpia de secagem em função do teor de humidade da madeira do pinheiro

O aquecimento da amostra na estufa faz aumentar a pressão parcial do vapor de água na amostra, tornando-a superior à do vapor presente na atmosfera envolvente. Esta diferença de pressões provoca a passagem de vapor para o ar de secagem e a amostra perde progressivamente água até que se atinja um estado de equilíbrio.

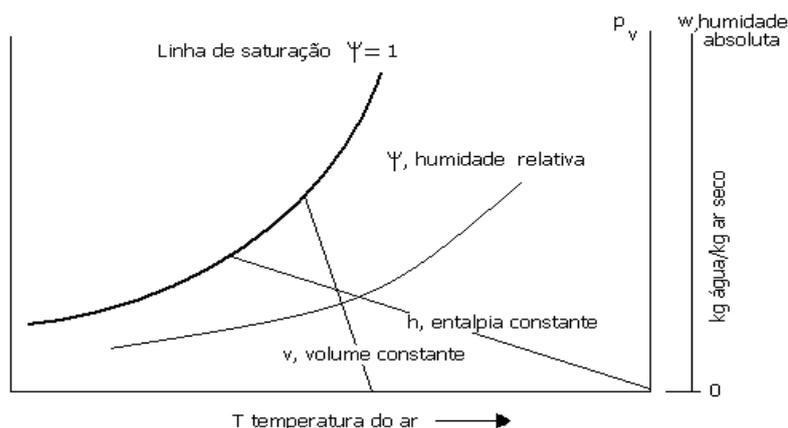


Diagrama 3.1 do ar húmido (psicrométrico)

Em anexo apresenta-se o diagrama psicrométrico.

Ao longo de um dia de Verão em que a temperatura aumenta fazendo diminuir a humidade relativa do ar (o valor humidade relativa do ar à beira do mar ou rio é maior que no interior). O exemplo dado no primeiro capítulo da humidade relativa medida junto ao rio Mondego (Polo II) em que o valor mínimo foi de 93,7%, foi muito superior ao valor obtido na parte alta da cidade que já é afastado do rio, rondando os 50% (dados do IGUC). Normalmente durante um dia quente de Verão se não houver precipitação há muitos dias, as folhas secas expostas ao sol, terão por volta das 14 h um valor muito baixo de teor de humidade, podendo mesmo ser inferior a 5%.

O tempo para dar início a cada experiência poderia ser 5 s ou menos nalguns casos, mas, na realidade nem ao sol as folhas estão a 100 °C nem com 0% de teor de humidade. Assim dava-

se algum tempo para que a amostra ficasse à temperatura ambiente enquanto absorvia alguma água. Para que não houvesse muita disparidade entre as medições do teor de humidade e as experiências, devido à rápida absorção de água, a medição é feita entre 10 a 20 s, após as amostras serem retirados da estufa, o mesmo tempo que se demorava até dar início à respectiva experiência.

Sabe-se que quando a vegetação rasteira está exposta ao sol a sua temperatura aumenta significativamente. Para se quantificar qual seria esse aumento de temperatura, o Eng.º Luís Paulo da ADAI teve amabilidade de no dia 20/09/2005, depois do meio-dia, fotografar com a máquina de infravermelhos *Agema* pertencente à ADAI, a vegetação rasteira, junto ao aeródromo da Lousã. Fotografou caruma à mistura com feno, expostos ao sol ou à sombra. Da análise da imagem 3.1; captada às 12:09:04, da vegetação exposta ao sol, constata-se que a temperatura atinge os 65 °C com o ponto sp1 a 57.9 °C. Da análise da imagem 3.2; captada às 12:09:04, da vegetação sem estar exposta ao sol, constata-se que a temperatura atinge os 30 °C com o ponto sp1 a 27.2 °C; resulta assim uma diferença de cerca de 30 °C.

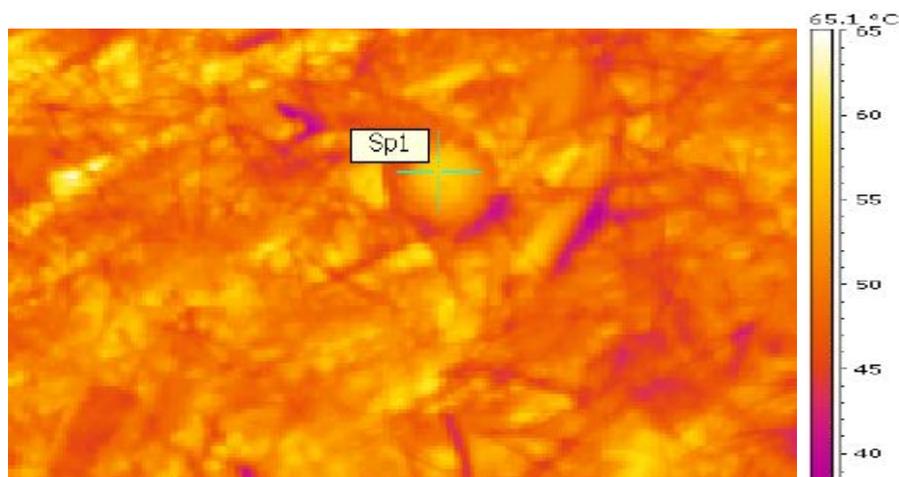


Imagem térmica 3.1 solo com caruma exposta ao sol

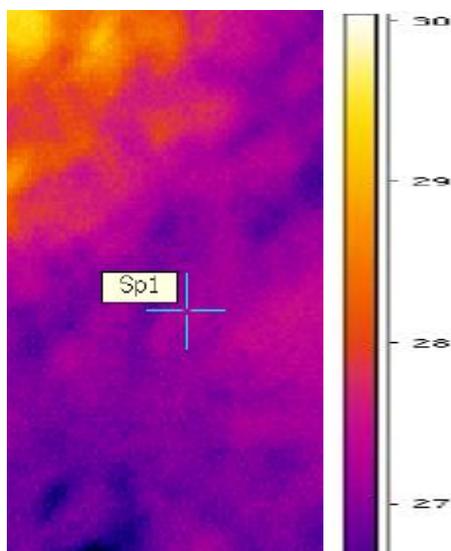


Imagem térmica 3.2, solo com caruma à sombra

Poderia ter-se constatado uma maior diferença de temperatura, uma vez que ainda não se tinha atingido o meio-dia solar, que no horário de verão ocorre por volta das 13 horas. Se um corpo betuminoso preto, no verão pelas 13:15 de acordo com o valor tabelado na página 62 por Moita (1987), alcança os 96 °C, a caruma que é castanha, de tonalidade escura alcançará ainda temperaturas superiores ao valor de 65 °C obtido em Setembro. Nesta altura a radiação solar já é menor por metro quadrado pois o ângulo de declinação solar é menor do que nos meses de Julho e Agosto (a declinação solar é igual a zero nos equinócios, +23°27' no Verão e -23°27' no Inverno isto para o Hemisfério Norte), assim nestes meses a temperatura da caruma exposta ao sol poderá alcançar os 80 °C.

Seria interessante captar-se mais imagens térmicas da vegetação nos meses de Julho e Agosto, por volta das 14 horas, para se determinar a temperatura máxima que a vegetação pode alcançar quando exposta ao sol.

Como a vegetação exposta ao sol inflamará mais facilmente devido à sua temperatura e a menor teor de humidade, mas, como os ensaios realizados são dentro do edifício da ADAI sem que as amostras estejam expostas ao sol, os resultados terão a ver com vegetação que esteja à sombra. No caso de ensaios com simulação da radiação solar, as temperaturas serão certamente inferiores às verificadas ao ar livre.

É conveniente que o ensaio de inflamabilidade das espécies florestais no parâmetro do teor da humidade seja comparável à realidade da maior ocorrência de incêndios florestais.

Assim realizaram-se os ensaios em dois intervalos de teor de humidade, um perto de 5% relativo às amostras das espécies secas na estufa e o outro intervalo próximo de 10%, teor mais ou menos constante no feno e caruma armazenados no laboratório e do eucalipto apanhado à sombra durante o dia.

3.1.3 - Velocidade do ar

Optou-se por ensaios sem vento, pois junto ao solo a velocidade do vento é zero. Contudo pode-se verificar na imagem 3.1 que a vegetação mais saliente apresenta uma redução da temperatura de cerca de 25 °C, esta diferença explicar-se-á por efeitos de convecção local e haver alguma velocidade do ar.

Constatou-se que durante os ensaios, a velocidade do vento contribuía muito para a inflamabilidade, pois observaram-se casos em que não houve ignição durante dez segundos, mas posteriormente um pequeno sopro facilmente provocava a inflamação, quando a temperatura já se tinha reduzido 100 °C ou mais. Este efeito foi mais visível na caruma. Apurou-se também que o aumento da massa das partículas quentes (esferas) incrementa o abaixamento da temperatura de

ignição das espécies em presença de vento.

Seria conveniente em trabalho futuro investigar com mais rigor o efeito da velocidade do ar, já que o seu efeito não vai ser estudado nesta tese.

3.1.4 - Partículas aquecidas - esferas

Para a ignição das amostras de espécies florestais vão-se empregar esferas de aço aquecidas. As esferas sendo um corpo regular são caracterizadas por um único parâmetro geométrico, que é o seu diâmetro. O estado térmico da esfera será caracterizado pela sua temperatura média. A fim de saber qual o valor da temperatura a tomar como referência, vamos começar por demonstrar que as esferas de aço que se utilizaram neste estudo, por serem de pequeno diâmetro se podem considerar como corpos de resistência interna desprezável. Assim sendo a temperatura da esfera será uniforme, tornando-se assim fácil definir e determinar o valor de referência da temperatura da esfera a tomar.

O número de Bi é dado por Figueiredo (1993)

$$Bi = h * L_c / k \quad (\text{eq. 3.2})$$

onde $L_c = V / A_s$;

V é o volume do sistema;

A_s é a superfície de transferência do sistema.

Assim para uma esfera:

$$L_c = \frac{4/3 \pi r_o^3}{4\pi r_o^2} = r_o/3 \quad (\text{eq. 3.3})$$

Verifica-se que o valor de Bi aumenta com o diâmetro assim interessa trabalhar com esferas com o menor diâmetro possível.

Se o número de Biot (Bi) for menor que 0,1 o erro cometido em desprezar a variação de temperatura no corpo é pequeno, podendo-se desprezar a diferença interna de temperaturas.

A hipótese de temperatura uniforme no interior do sólido é válida se a condutividade térmica do sólido for muito maior do que o coeficiente de transferência de calor por convecção.

A análise de um sistema de transferência de calor pelo método de Biot é exato quando Bi é zero, pois neste caso a resistência da condução dentro do sistema é nula e a temperatura é uniforme.

Nos casos reais é impossível que seja $Bi = 0$ pois todos os sistemas apresentam alguma resistência à condução térmica em maior ou menor grau. Sendo $Bi > 0$, a análise será aproximada. Segundo Figueiredo et al. (1993) pode-se usar o método quando $Bi \leq 0,1$.

Para uma esfera de 10 mm de diâmetro o raio, $r_0=0,005$ m e se a temperatura for 800 °C e por sugestão pessoal de Figueiredo o valor do coeficiente de convecção (h) será inferior a 25 W/(m².°C), assim considera-se $h=25$ W/(m².°C) e se a esfera for em aço com 1% de C, da tabela A2, de Figueiredo et al.(1993), para 800 °C, têm-se $k=29$ W/(m °C)

Resolvendo então a equação 3.3, obtém-se $L_c=0,001666$, substituindo L_c na equação 3.2, obtém-se $Bi=0,001436$ logo $Bi < 0,1$, assim a temperatura à superfície da esfera será muito próxima da do seu interior.

3.1.4.1 – Coeficiente de convecção

Para se determinar ao certo o valor do coeficiente de convecção, h, pode-se empregar a equação do balanço energético.

A energia libertada pela esfera, que estará associada á variação da sua temperatura, será igual à soma do calor libertado por convecção e do calor emitido por radiação.

$$-m \cdot c_p \cdot dT/dt = A \cdot h \cdot (T - T_{ar}) + A \cdot \sigma \cdot \epsilon \cdot (T^4 - T_{ar}^4) \quad (\text{eq. 3.4})$$

Apresenta-se um método para a determinação do h, baseado na equação atrás definida.

A determinação do coeficiente h a partir de uma curva de arrefecimento pode ser feita do modo seguinte: na equação do balanço o único parâmetro desconhecido é o h:

Uma vez obtida experimentalmente uma curva de arrefecimento, que terá esquematicamente a forma da figura 3.3.

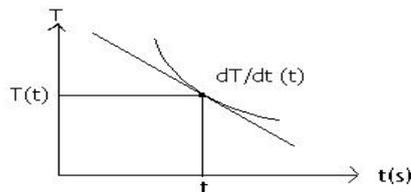


Figura 3.3 Tipo de curva de arrefecimento

É possível calcular a respectiva derivada $dT/dt (t)$ em cada instante e a correspondente temperatura T, recorrendo, por exemplo, ao software da Kaleida Graph. Assim todos os termos da equação 3.4 são calculáveis à exceção da primeira parcela do 2º membro. O valor do h determina-se em seguida, reescrevendo a equação na forma:

$$h = \frac{-m \cdot c_p \cdot dT/dt - A \cdot \epsilon \sigma \cdot (T^4 - T_{ar}^4)}{A \cdot (T - T_{ar})} \quad (\text{eq. 3.5})$$

Dividindo os dois termos da fracção do segundo membro da equação anterior por A vem:

$$h = \frac{-m \cdot c_p \cdot dT/dt / A - \epsilon \sigma \cdot (T^4 - T_{ar}^4)}{(T - T_{ar})} \quad (\text{eq. 3.6})$$

Do registo da temperatura do arrefecimento de uma esfera ao ar, de $10,1 \cdot 10^{-3}$ m de

diâmetro e massa de $4,1 \cdot 10^{-3}$ kg, entre os $978,25$ °C e os $223,31$ °C, experiência numero 706, calculou-se o valor do h recorrendo a uma folha de cálculo.

O volume da esfera é $5,235 \cdot 10^{-7}$ m³ e a superfície é $3,204 \cdot 10^{-4}$ m².

Não se sabendo ao certo a composição desta esfera, não se sabe o valor de emissividade, nem o de c_p correto, assim por tentativas após se tentarem valores na folha de cálculo, atribuiu-se à emissividade (ϵ) 0,68. Considerou-se este parâmetro como sendo constante devido à dificuldade em encontrar uma correlação adequada, todavia uma folha de cálculo mostra que normalmente o valor desce com o aumento da temperatura.

Para o valor de c_p empregou-se a correlação: $c_p = 0,15 T + 469,97$ [J/(kg.°C)].

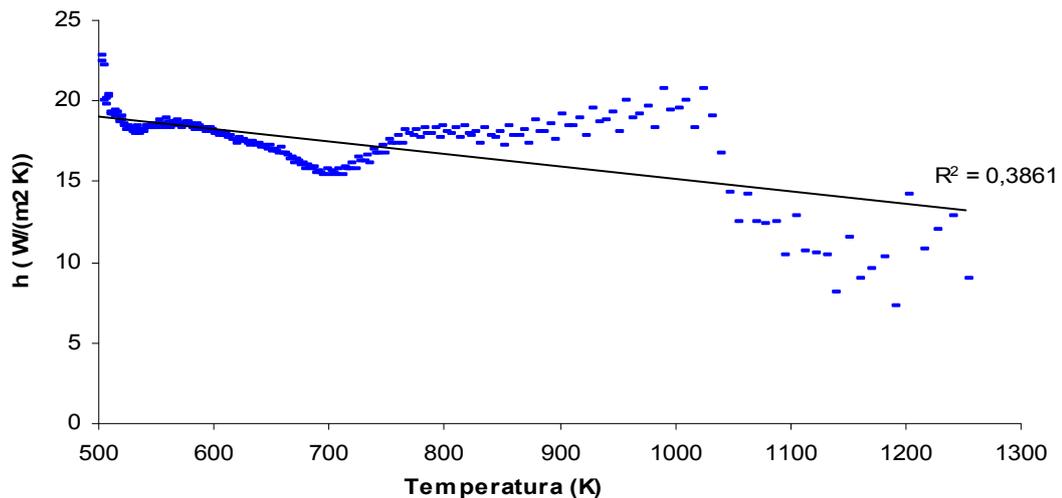


Gráfico 3.2 -Valor do coeficiente de convecção da esfera de 10,1 mm de diâmetro, calculado pelo autor

Verifica-se que o valor do h varia com a temperatura e a tendência é de diminuir com o aumento desta. Como se verifica no gráfico, há uma forte redução a partir dos 1050 K.

Por estes cálculos verifica-se que o valor de h é inferior a 25 W/(m²K) atribuído inicialmente no ponto 1.4.1, no cálculo de Bi e varia de uma forma não monotónica com a temperatura da esfera, ao longo do processo de arrefecimento.

Um outro método será apresentado em seguida para determinar o valor do coeficiente de convecção h.

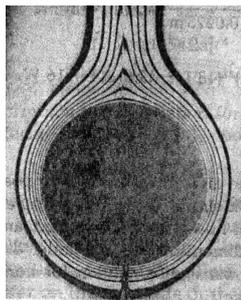


Imagem 3.4 - Efeitos da convecção em redor de cilindro de 6cm de diâmetro com uma diferença de 9 °C entre o ar e o cilindro. Fonte - Professor U. Grigull da Universidade Técnica de Munique

Num trabalho publicado sobre o cálculo do valor da convecção média para escoamentos transversais a uma esfera de gases e líquidos, originário de Whitaker e publicado por Frank P. Incropera et al. (1990), apresenta-se uma equação para determinar número médio de Nusselt.

A solução do número médio de Nusselt segundo Whitaker é:

$$N_{uD} = 2 + (0,4Re_D^{1/2} + 0,06Re_D^{2/3})Pr^{0,4}(\mu/\mu_s)^{1/4} \quad (\text{eq. 3.7})$$

Sendo válida nos seguintes intervalos: $0,71 < Pr < 380$; $3,5 < Re_D < 76000$; $1 < (\mu/\mu_s) < 3,2$ com uma variação de $\pm 30\%$.

em que:

μ (viscosidade dinâmica) refere-se às propriedades do fluido à temperatura ambiente [N s/m²]

μ_s refere-se às propriedades da película do fluido estimados para a temperatura média da esfera T_s .

Pr (número de Prandtl) parâmetro adimensional refere-se às propriedades do fluido.

Re_D é número de Reynolds para uma esfera.

$$Re_D = uD/\nu \quad (\text{eq. 3.8})$$

em que:

u é a velocidade do fluido [m/s]

D é o diâmetro da esfera [m]

ν é a viscosidade cinemática [m²/s]

Para determinar o valor da convecção média Frank (1990) emprega a equação:

$$h = N_{uD} \cdot k/D \quad (\text{eq. 3.9})$$

Para determinar o tempo de arrefecimento Frank emprega a equação desprezando a radiação libertada:

$$t = \frac{\rho V C_p}{h A_s} \ln \frac{T_i - T_\infty}{T - T_\infty} \quad (\text{eq. 3.10})$$

em que V é o volume de uma esfera com $V = \pi D^3/6$ [m³] (eq. 3.11a);

A_s é a superfície de uma esfera com

$$A_s = \pi D^2 \text{ [m}^2\text{]} \quad (\text{eq. 3.11b});$$

ρ é a massa volúmica da esfera [kg/m³]

Para uma esfera substituindo a eq. 3.11 a e b na eq. 3.10, vem

$$t = \frac{\rho \cdot c_p \cdot D}{6h} \ln \frac{T_i - T_\infty}{T - T_\infty} \quad (\text{eq. 3.12})$$

Atendendo a que as esferas empregues nesta investigação, à exceção de uma única esfera proveniente de um rolamento com 14,3 mm de diâmetro, têm uma baixa concentração de elementos como o C, Ni, Cr, Mn, Si,... com o desenrolar das experiências aliado às altas temperaturas as esferas irão segregar parte desses elementos ficando a sua composição mais parecida com a do ferro puro. Assim vai-se determinar o valor de h com as características de uma esfera de ferro puro arrefecido com ao ar a 30 °C à velocidade de 0,1 m/s entre 75 °C a 35 °C.

$$T_{\infty} = 303,15 \text{ K}$$

$$T_i = 348,15 \text{ K}$$

$$T = 308,15 \text{ K}$$

$$T_s = 328,15 \text{ K}$$

Da tabela A1 o ferro puro para $T_s = 328,15 \text{ K}$: $\rho \approx 7870 \text{ kg/m}^3$; $k = 78,3 \text{ W/(m K)}$; $c_p = 451,9 \text{ J/(kg K)}$

Da tabela A4 o ar para $T_s = 328,15 \text{ K}$:

$$\mu_s = 197,88 \cdot 10^{-7} \text{ N s/m}^2; \text{ e para } T_{\infty} = 303,15 \text{ K: } \mu = 186,08 \cdot 10^{-7} \text{ N s/m}^2; \nu = 16,2 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}; k = 0,0265 \text{ W/(m K)}; Pr = 0,706$$

$$\text{Da eq. 3.8 vem } Re_D = 0,1 \text{ m/s} \cdot 0,01 \text{ m} / (16,2 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}) = 61,7$$

Este valor obtido para Re_D é válido no intervalo da eq 3.7 pois é superior a 3,5.

Da eq. 3.7 substituindo os valores vem

$$Nu_{uD} = 2 + (0,4 \cdot 61,7^{1/2} + 0,06 \cdot 61,7^{2/3}) \cdot 0,706^{0,4} [186,08 \cdot 10^{-7} \text{ N s/m}^2 / (197,88 \cdot 10^{-7} \text{ N s/m}^2)]^{1/4} = 5,49$$

$$\text{Então da eq. 3. 9 vem } h = 5,49 \cdot 0,0265 \text{ W/(m K)} / 0,01 \text{ m} = 14,55 \text{ W/(m}^2 \text{ K)}$$

Como o valor médio do h obtido é inferior ao valor arbitrado, 25 W/(m² K), certamente o número de Biot ainda é mais reduzido sendo garantido que $Bi \ll 0,1$ o que prova que a temperatura na esfera é aproximadamente uniforme. A propósito Frank et al. (1990) afirmam que o número de Biot é definido em termos da condutibilidade térmica do material. Como quase todos os metais apresentam uma boa condutibilidade térmica, então para qualquer esfera metálica de raio suficientemente pequeno ela terá uma resistência interna desprezável.

O tempo de arrefecimento será de acordo com a eq. 3. 12:

$$t = \frac{7870 \cdot 451,9 \cdot 0,01}{6 \cdot 14,55} \ln \frac{75 - 30}{35 - 30} = 895 \text{ s}$$

Atendendo às temperaturas elevadas nas experiências que quase alcançaram 1400 K o aço utilizado não será o mais indicado pois oxida-se com a repetição das experiências e também

porque o valor de c_p é muito irregular a elevadas temperaturas pelo que estes factos condicionarão o cálculo da energia que provocará a ignição das espécies florestais. Também o valor de ϵ (emissividade) deve ser conhecido para o cálculo. Seria conveniente que seja baixo para que a esfera não arrefeça tão rapidamente e assim seja mais fácil ter a temperatura desejada no início de cada experiência.

Atendendo a que se irão fazer experiências entre os 800 K e os 1400 K vai-se estimar qual será a convecção média para 1100 K com a temperatura ambiente também de 30 °C (303,15 K).

Da tabela A1 o ferro puro para $T_s = 1100$ K: $\rho \approx 7870 \text{ kg/m}^3$ (considera-se constante); $k = 30,5 \text{ W/(m K)}$; $c_p = 792 \text{ J/(kg K)}$

Da tabela A4 o ar para $T_s = 1100$ K: $\mu_s = 449 \cdot 10^{-7} \text{ N s/m}^2$

Da eq. 3.7 substituindo os valores vem

$$N_{\text{UD}} = 2 + (0,4 \cdot 61,7^{1/2} + 0,06 \cdot 61,7^{2/3}) \cdot 0,706^{0,4} [186,08 \cdot 10^{-7} \text{ N s/m}^2 / (449 \cdot 10^{-7} \text{ N s/m}^2)]^{1/4} = 4,84$$

$$\text{Então da eq. 3. 9 vem } h = 4,84 \cdot 0,0265 \text{ W/(m K)} / 0,01 \text{ m} = 12,8 \text{ W/(m}^2 \text{ K)}$$

O valor do coeficiente de convecção coincide precisamente com o valor do gráfico 3.2 para 1100 K se a emissividade (ϵ) for igual a 0,68.

O tempo de arrefecimento por exemplo entre 1200 K e 1000 K não pode ser calculado unicamente pela eq. 3.12, nesta gama de temperaturas, o calor libertado por radiação é muito superior ao libertado por convecção, devido à grande diferença entre temperaturas, cerca de 1000 K. O calor libertado por radiação é

$$Q_{\text{rad}} = A \cdot \sigma \cdot \epsilon (T^4 - T_{\text{ar}}^4) \quad (\text{eq.3.13})$$

Durante o desenrolar dos ensaios houve a necessidade de se monitorizar a temperatura da esfera. Para este fim foi utilizado um termopar tipo K para o que houve necessidade de furar as esferas. Conseguiu-se furar com muita dificuldade mesmo após retirar a dureza de têmpera (aquecimento até ficar ao rubro, seguido de arrefecimento lento) uma esfera de 10 e uma de 14.3 mm com um furo de 1 e 1,5 mm de diâmetro e cerca de 5 a 6 mm de profundidade. Posteriormente devido à grande dificuldade em furar as esferas devido a grande dureza interna, optou-se por tornear aço até conseguir a esfera de 20 mm. Mais tarde o autor fez ao torno mais esferas com 5, 10 e 37 mm de diâmetro para completar este estudo.

Realça-se que o diâmetro indicado para inserir o termopar sem dar muitos problemas de medição (bom acoplamento térmico) era de 1 mm. Uma vez que os fios enrolados do termopar entram à justa no furo, tornava-se necessário deformar a esfera em redor do furo onde estava inserido o termopar, para que os valores de leitura durante os testes fossem os mais corretos, pois inicialmente tiveram-se vários problemas, devido a mau contacto entre o termopar e o material da esfera. Durante os ensaios o termopar acabava por partir-se, o que levou a optar-se por enrolar as

suas pontas, uma vez que a soldadura não resultava.

Devido à soldadura formava-se uma esfera na ponta do termopar entre os 1,2 e 1,4 mm de diâmetro que por sua vez não permitia a entrada no furo de 1mm, pelo que se alargou o furo para 1,5 mm. Com o diâmetro de 1,5 mm tentou-se evitar falhas de leitura durante os ensaios recorrendo a folha de alumínio a preencher o restante espaço do furo.

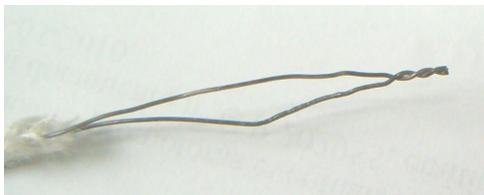


Imagem 3.5 - Pormenor da junção do termopar

Apurou-se com a pesagem das esferas que as esferas de rolamentos são ligeiramente mais densas. Espera-se que esta pequena diferença não altere os resultados pois há a possibilidade da diferença da composição influenciar a capacidade calorífica. Contudo os resultados de ignição serão referenciados à massa respectiva de cada esfera estando também indicado o seu diâmetro. Durante os ensaios constatou-se que as esferas iam perdendo massa com a oxidação superficial provocada pelo calor, registando-se o respectivo peso e diâmetro ao fim de cada série de ensaios. Esta oxidação foi mais evidente na esfera de 10 mm.

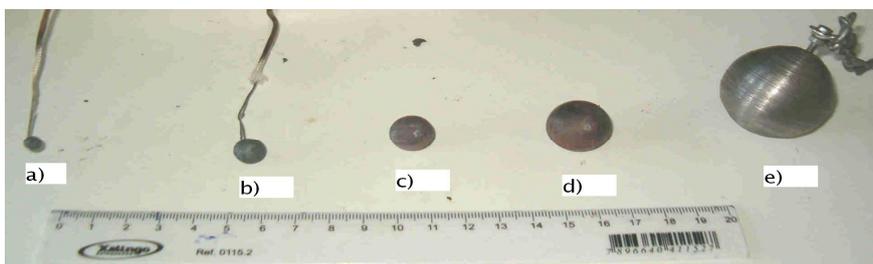


Imagem 3.6 - Vista geral de algumas das esferas utilizadas

- a) – 5mm;
- b) – 10,1mm;
- c) – 14,3mm,
- d) – 20,2 mm;
- e) – 37mm

3.1.5- Outras partículas testadas

Pelo exposto no capítulo 1 decidiu-se testar partículas de diferentes naturezas: borracha de pneu, calços de travões ferroviários e fuligem do escape de motores.

Sabe-se que as partículas libertadas no corte abrasivo do aço também podem provocar incêndios pelo que se realizaram também algumas experiências com partículas libertadas pelo corte abrasivo do aço.

3.2 – Metodologia de ensaio

3.2.1- Aquecimento das partículas

O aquecimento das esferas nos primeiros ensaios foi realizado com as esferas parcialmente imersas em metal fundido para que assim se tivesse a certeza de qual era a temperatura da esfera quando fosse lançada sobre a amostra. O metal empregue foi uma liga de estanho-chumbo (60%Sn; 40%Pb): A liga era aquecida dentro de uma malga de aço inox, empregando como fonte de calor um maçarico de propano. Quando o metal ficava no estado líquido, inseria-se um termopar tipo k e a partir daí controlava-se a temperatura regulando a válvula do maçarico.



Imagem 3.2.1.1 – Aquecimento das esferas por imersão em metal líquido, e uso de multímetro/ termopar

Como as temperaturas máximas rondavam apenas os 600 °C sem que se obtivessem resultados positivos tentou-se fazer os ensaios com outro metal. O metal escolhido foi o antimónio (Sb) mas também não resultou, ainda mais porque as esferas mergulhavam completamente no líquido não sendo fácil retirá-las com segurança. Havia ainda outros problemas, tais como a acumulação de óxidos do metal à superfície, oxidação que aumentava com a subida da temperatura, o que exigia a constante remoção desses óxidos, para não alterar o valor da massa da esfera, que tinha de ser constante nos diversos ensaios realizados com a mesma partícula.

A temperatura máxima obtida nestes ensaios foi de 655 °C. Esperava-se que com esta gama de temperaturas na ordem de 600 °C se conseguisse produzir a ignição das amostras florestais. Contudo o único resultado em que ocorreu ignição foi ao fim de três minutos com uma amostra de feno com 2,2% de teor de humidade e com a esfera à temperatura inicial de 625 °C.

Desistiu-se então de aquecimento das esferas por imersão em metal líquido.

Passou-se a aquecer as esferas diretamente com uma chama de gás propano. Para tal teve de se fabricar um suporte próprio em chapa perfurada para segurar a esfera enquanto ela era aquecida. O maçarico, devido a ter um grande bocal de saída, teve de ser apertado pois originava uma chama de grande diâmetro, provocando aquecimento em demasia no termopar tendo como consequência a sua degradação.



Imagem 3.2.1.2 – Aquecimento das esferas por propano

3.2.2- Equipamento de ensaio

Para se monitorizar a temperatura empregou-se a câmara de infravermelhos pertencente à ADAI marca **AGEMA Thermovision** modelo 550, que tem uma precisão de medida de $\pm 2\%$. Durante os ensaios as esferas quentes foram fotografadas e filmadas com a câmara de infravermelhos. As esferas eram fotografadas, imediatamente antes de cair, a cerca de 10 cm de distância, por cima da amostra. Se houvesse ignição tirava-se imediatamente uma outra fotografia.



Imagem 3.2.2.1 - medição de temperatura por camara de infravermelhos



Imagem 3.2.2.2 – Ensaio de ignição com caruma, 13/06/2005

Este equipamento de medição apresenta no visor uma escala de medida por cores e a temperatura máxima. Desta forma ao analisar-se as imagens era possível determinar-se a temperatura da esfera.

Após a captação das imagens no formato digital “.img”, eram convertidas no formato digital “.rep”, para visualização.

Ao analisar-se as primeiras imagens térmicas constatou-se que a gama de temperaturas seleccionada de 250-750 °C, era inadequada pois em muitas imagens de infravermelhos quando era ultrapassado o valor máximo as temperaturas só apareciam com o sinal de maior, sem se poder saber qual seria a temperatura correta. Assim passou a seleccionar-se a escala seguinte de 750-1200 °C.

Constatou-se também que a utilização da câmara fica condicionada quando a esfera ao queimar as folhas da amostra penetrava nela, às vezes até se ocultava totalmente debaixo das folhas, obstruindo assim a captação dos infravermelhos pela câmara. Para ultrapassar esta dificuldade passou-se a empregar a câmara quase na vertical para diminuir a obstrução.

Mais tarde ao analisarem-se outras imagens deparou-se com um outro problema, as imagens ficavam a preto. Aquando da conversão todas as imagens ficavam sempre a preto, apesar das fotografias antes de serem convertidas encontravam-se a cores. Tentou-se todas as possibilidades de configuração mas não se conseguiu resolver o problema. Verificou-se que apesar das imagens estarem totalmente a preto os dados estavam lá, pois, ao colocarem-se os pontos sp1 com o cursor, encontrava-se a imagem térmica, mas era extremamente difícil de acertar com a esfera. Este facto que obrigou a fazer uma média de um conjunto de pontos na vizinhança estimada da esfera para determinar a sua temperatura o que originaria erros, porque alguns pontos poderiam ser da vegetação em combustão sem chama.

Foi necessário instalar um software mais recente, que não obriga a conversão dos formatos, para resolução do problema das imagens ficarem a preto. O software denominado *ThermaCAM Quikyview 1.3*, permite mover o cursor Sp1 que indica a temperatura nesse ponto, podendo posicioná-lo onde desejarmos. Também existe uma ferramenta denominada *Flying spot* que se seleccionada, indica a temperatura mediante a posição dada pelo rato do computador (PC).

Após os contratemplos atrás enunciados deparou-se outro problema. A temperatura da esfera devia ser toda igual mas as cores não mostravam isso. Normalmente havia uma ou mais manchas de cor clara (branco) que não eram concêntricas. Este facto seria de esperar devido ao formato da esfera, uma vez que a radiação emitida devia ser perpendicular à sua superfície. A imagem 3.2.1 (*Filename F0719-05.IMG*) é exemplificativa do problema em que o ponto Sp1 apresenta 875,5 °C.

Resolveu-se então furar as esferas para se inserir um termopar tipo k para assim se poder averiguar qual era a temperatura correta e acompanhar a temperatura da esfera antes e durante a ignição.

[Nota adicional de 2021 - Para melhor acoplamento térmico podia-se ter usado massa térmica de semicondutores para encher o furo. Para proteger os fios do termopar das chamas, podia-se ter usado anéis cerâmicos, utilizados em resistências eléctricas de aquecimento.](#)

O aparelho de aquisição utilizado inicialmente foi um multímetro da marca *Metex* modelo M3850D e o termopar com fios de ½ mm de diâmetro.



Imagem 3.16 – Medição por multímetro, 14/07/2005

Mais tarde por sugestão e colaboração do professor Rui Figueiredo, empregou-se uma interface mais fiável e mais precisa, pertencente ao laboratório de Transmissão de Calor do DEMUC, da marca *Pico*, modelo **TC-08** com uma precisão de $\pm 0.3\%$ e $0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ligada a um PC portátil da marca *Toshiba*, que permitia registar o gráfico da temperatura ao longo do tempo.

Os ensaios foram filmados com uma máquina fotográfica digital da marca *HP* modelo 735, até à experiência nº 207. Como as filmagens não tinham muita nitidez aliado à memória se esgotar com poucos ensaios, a partir da experiência nº 208, passou-se a filmar com uma máquina da marca *Sony* de formato vídeo-8 (o mais indicado seria uma máquina de filmar digital).

Posteriormente todas as filmagens obtidas foram copiadas para uma cassete de formato VHS. Assim pode-se rapidamente ver e visualizar todos os ensaios. O número da experiência (colou-se por cada uma, ao bordo do monitor do PC, um papel numerado coincidente com o nº. do ficheiro de registo térmico), a temperatura do ar, a humidade do ar e as horas num aparelho portátil; a temperatura da esfera (monitorizada de segundo a segundo no monitor do PC portátil).

Para apurar o tempo de ignição empregou-se um cronómetro ao visualizar-se as filmagens. Repetiram-se as visualizações de cada ignição, até não haver dúvidas de que o erro cometido ao cronometrar o tempo de que ele era inferior a um décimo de segundo.

Questionou-se se a câmara de infravermelhos estaria a indicar a temperatura correta, assim analisando uma imagem a 3.2.2 (*Filename F0719-06.IMG*), também da experiência nº 164, verifica-se que o ponto Sp1 está a $875,3\text{ }^{\circ}\text{C}$, enquanto o termopar indicou $816\text{ }^{\circ}\text{C}$, resultando daqui uma diferença entre a temperatura dada pelo termopar e a dada pela zona mais quente de $59\text{ }^{\circ}\text{C}$. Atendendo à diferença temporal entre estas duas imagens é somente de 3 s, não poderia haver uma diferença tão grande entre elas como se verifica com as diferenças constatadas com as zonas brancas. Na imagem anterior o termopar indicava uma temperatura de $818\text{ }^{\circ}\text{C}$.

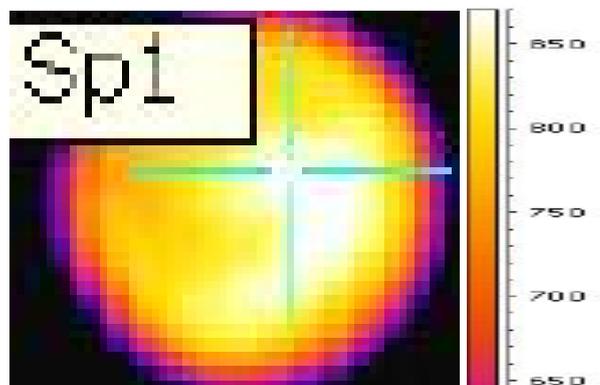


Imagem 3.2.2.3 – Imagem a IR, experiência nº 164, com Sp1 a 875,3°C

Esta diferença de temperaturas explicada pelo professor Rui Figueiredo, terá a ver com zonas superficiais da esfera com diferentes emissividades e que vão ser registadas pela câmara como tendo temperaturas diferentes, o que é impossível devido à esfera estar toda à mesma temperatura, como foi verificado pelo número de Biot ser extremamente baixo. Se desprezarmos a mancha branca e considerarmos a tonalidade de amarelo predominante a temperatura parece coincidir, mas esta análise é subjetiva e como tal originará erros de leitura. Pode-se reduzir o erro utilizando o software *IRwin 5.1* para fazer uma média com pontos de zonas amareladas e centrais inserindo pontos Sp1 a Sp10. Após leitura, registo e soma dos respetivos valores, apurava-se a média. Esta análise obrigava a um trabalho demorado.

A utilização da câmara de infravermelhos também obriga a um operador especializado por parte da ADAI e como a maior parte das experiências foi realizada durante a época dos fogos de 2005 que este ano começou mais cedo, obrigou a mais trabalho externo, condicionando bastante a realização destas experiências. Por tudo o que foi atrás exposto deixou-se de utilizar a câmara de infravermelhos nos ensaios com esferas.

A estufa onde se secaram as amostras é da marca *Memmert* modelo ULM600, com a potência eléctrica de 2400 W e temperatura máxima de 220 °C, tendo a temperatura sido regulada para 100 °C (se quiséssemos o produto mais seco e em menos tempo a temperatura devia ser a 105°C).

A verificação do teor da humidade foi efetuada com uma balança de humidade por infravermelhos da marca *AND* modelo AD4714A, em que a secagem é feita a cerca de 105 °C por lâmpada interna. Para se fazer uma medição após o equipamento se auto calibrar inserem-se no prato da balança algumas folhas, tendo o cuidado de elas não ficarem sobrepostas para que a luz incida diretamente nas folhas.

3.2.3 - Processo de ensaio

Para determinar a inflamabilidade da maior parte dos sólidos, como por exemplo a madeira e folhas, é frequente utilizar a norma ISO 5656-1986E. De acordo com esta norma emprega-se um cone aquecido por resistência eléctrica (mantendo-se a temperatura do cone constante).

Para determinar a reacção dos materiais ao fogo pode-se empregar o epiradiador que é uma alternativa à norma atrás referida.

Este epiradiador é constituído por um prato cerâmico com cerca de 80 mm de diâmetro, aquecido por resistência eléctrica interna, envolvido por paredes metálicas com uma porta de vidro, e possuindo ventilação forçada com chaminé para o exterior. Tem uma chama piloto por cima do prato cerâmico, a uns 60 mm, para pilotar a ignição dos gases voláteis que se libertam. Pode-se seleccionar a temperatura de ensaio no controlador electrónico exterior ao dispositivo. O controlador emprega como sensor térmico um termopar encostado à face de cima do prato. Antes de se começarem os ensaios, após ligar o aquecimento, tem de se aguardar alguns minutos, para que a temperatura do prato estabilize nos 600 °C.

Este dispositivo, além de prático, pode-se assemelhar como fonte de calor à superfície quente dos escapes de motores de combustão interna que podem causar incêndios por contacto direto com vegetação ou por radiação emitida para a vegetação que se encontra por baixo do sistema de escape enquanto a viatura está estacionada e com o motor a trabalhar em esforço. Um exemplo desta última causa foi relatada pelo mestre florestal, o Sr. Fernando Ramos, “...ouvi um crepitar debaixo da viatura, enquanto o jipe com o motor a trabalhar bombeava água para combater um incêndio, então quando me agachei vi que a vegetação (por baixo do escape) estava em chamas ...”.

Se uma viatura com catalisador for estacionada em cima de vegetação, a radiação emitida pelo catalisador pode incendiá-la. Por prevenção de vários riscos os catalisadores costumam ser resguardados por baixo com chapa de alumínio.

3.2.3.1 Ensaios com borracha, calços e fuligem

Antes dos ensaios as amostras de borracha e calços eram pesadas e no caso dos cubos de calço também foram pesadas no final para se poder determinar a percentagem de massa volátil.

O aquecimento das amostras de borracha, de calços e de fuligem foi efectuado no epiradiador, com a ventilação ligada e a chama piloto acesa.

Os ensaios foram realizados à temperatura de 600 °C, mas é possível que a temperatura ultrapassasse este valor porque o termopar não tem um bom acoplamento térmico ao prato.

Para cada ensaio depositou-se a amostra no prato, e cronometrou-se o tempo até, haver inflamação e no caso dos calços utilizou-se o tempo parcial para se poder continuar a cronometrar até à extinção das chamas provenientes da amostra.

3.2.3.2 Ensaios com esferas em espécies florestais

As amostras para ensaiar sem teor de humidade foram medidas de véspera aos ensaios planeados, a secar na estufa a 100 °C, com a ventilação de ar fresco ligada a meio, entre 18 a 24 horas.

Durante os ensaios faziam-se várias medições do teor de humidade com a balança de medir o teor de humidade, dos valores registados apurava-se a média.

As amostras de espécies florestais foram pesadas nos ensaios iniciais para se determinar a carga por cm², contudo decidiu-se abandonar a pesagem porque neste tipo de ensaio não ia ter utilidade. O importante era que a amostra tivesse uma camada suficientemente espessa e compacta para que durante o ensaio a esfera não tocasse no fundo da forma de alumínio.

Para cada série de ensaios aquecia-se diretamente uma esfera (diâmetros de 5; 10; 14,3 e 20 mm) com a chama de um maçarico de gás propano, num suporte feito de chapa perfurada, tendo-se previamente inserido na esfera um termopar tipo k. Para aquecer e manobrar a esfera de 37 mm teve de se empregar uma corrente e fabricar outro suporte. O aquecimento com chama direta tinha a desvantagem de aquecer em demasia os fios do termopar provocando em parte a sua rutura ao fim de alguns ensaios, pelo que passou-se a proteger os fios das chamas, fazendo-os passar por detrás da chapa que servia de suporte. Por baixo do suporte da esfera colocaram-se vários tabuleiros de alumínio com o fundo voltado para cima para proteger o tampo da bancada da radiação emitida pelas chamas do maçarico.

A temperatura era monitorizada no PC e quando se alcançava uma temperatura superior numas dezenas de graus à da temperatura de ensaio, metia-se a amostra no local de ensaio, situada à direita do maçarico junto ao monitor do PC para que a câmara situada a cerca de ½ m filmasse a operação, permitindo mais tarde visualizar o ensaio. De fundo ficava o aparelho que indicava a temperatura do ar, a humidade relativa e as horas.

Todos os relógios (PC, máquina filmar e relógio de fundo) eram previamente acertados para que não houvesse desfasamento no tempo registado.

Pegava-se então na esfera segura pelo termopar às vezes com a ajuda de uma pinça e esperava-se, uns 100 mm por cima da amostra, que a temperatura baixasse até o valor pretendido para o ensaio. Assim que se alcançasse a temperatura desejada poisava-se ou deixava-se cair conforme o que fosse possível, ao mesmo tempo que se dava início à gravação de dados da temperatura num ficheiro com o mesmo nº do ensaio. Era lida em voz alta a temperatura inicial para que um colaborador registasse a temperatura inicial.

Fixou-se em dez segundos o tempo limite de inflamação (combustão com chamas) para que o ensaio de amostras de espécies florestais fosse considerado positivo (1) e ultrapassando este tempo sem ignição o resultado seria negativo (0).

Como o sistema de aquisição só apresenta visualizações da temperatura de 1 Hz, a esfera era sempre inserida aquando da mudança de segundo. Às vezes acontecia que a temperatura baixava mais do que o pretendido, mas era mais fiável fazer com uma temperatura mais reduzida do que calcular por interpolação qual seria a temperatura o que poderia originar erros. Nalguns casos levou a várias tentativas em que se elevava a temperatura inicial, para se conseguir ensaiar à temperatura pretendida ou próxima desta, pois a espera de 1 s da leitura era demasiada.

Para bem o sistema de aquisição deveria apresentar visualizações da temperatura de 10 Hz para que se pudesse fazer o ensaio á temperatura desejada de acordo com os resultados que se estavam a obter e a registar.

As temperaturas pretendidas eram aquelas que provocassem a ignição da espécie com chamas. Assim quando se conseguia uma ignição a uma dada temperatura seguiam-se testes com a temperatura a ser reduzida 10 °C ou mais entre cada um deles. Caso não tivesse havido ignição no espaço de 10 s aumentava-se a temperatura do teste seguinte até haver testes com ignição.

Em função dos resultados obtidos durante cada sessão exploravam-se os extremos. Apurava-se qual era a temperatura mais baixa em que havia ignição e a temperatura mais alta em que não se verificava ignição, para tal faziam-se experiências com a temperatura próxima dos valores fronteiros para se tentar conseguir um novo máximo e um novo mínimo.

Para cada tipo de ensaio haveria uma zona de incerteza onde tanto pode haver ou não ignição. Abaixo dessa zona não haverá ignição e acima desta zona haverá sempre ignição. Esta zona em parte será devida a: diferenças de volatilidade das folhas, idade das folhas, degradação das folhas, diferentes zonas de contacto das folhas, diferenças de oxidação superficial da esfera.

Em algumas séries de ensaios tiveram de se fazer mais ensaios porque os mínimos e os máximos respetivos estavam muito próximos, mesmo assim restou uma série em que se deviam realizar mais uns dez ensaios.

Por detrás da máquina de filmar, a um metro, tinha-se um tabuleiro com água, para quando houvesse ignição se pudesse despejar rapidamente a amostra devido aos riscos provocados pela grande proximidade das chamas com o PC e porque os fumos libertados eram incómodos.



Imagem 3.2.3.2.1 - aquecimento da esfera de 37mm

A imagem 3.2.3.2.2 mostra a disposição dos vários equipamentos.



Imagem 3.2.3.2.2 - Disposição dos vários equipamentos



Imagem 3.2.3.2.3 – Panorama da metodologia utilizada, 19/09/2005

Os ensaios com a esfera de 5 mm obrigavam a uma rápida execução do ensaio devido ao elevado arrefecimento na gama de 1000 °C em que o arrefecimento era cerca de 25 °C/s. Podem-se consultar as curvas de arrefecimento das várias esferas em anexo nº 2.

3.2.3.3 Ensaio com partículas do corte abrasivo

Sabendo-se que as partículas incandescentes do corte abrasivo podem provocar incêndios fez-se um ensaio preliminar em que se cortou um bocado de aço com uma rebarbadora. Durante o corte as partículas eram projetadas à distância de 80 cm para caruma com cerca de 10% de teor de humidade.

Ao lado tinha-se uma tina com água para apagar a combustão de algumas partículas e assim permitir saber qual era o seu diâmetro.

A recolha foi feita com um íman para não se medirem as partículas cerâmicas que como não irão em combustão rapidamente arrefecem não apresentando assim risco de incêndio.

Como os parâmetros envolvidos são o diâmetro das partículas, a sua temperatura e o teor de humidade das espécies florestais terá se saber qual a temperatura.

Poderá saber-se por consulta de tabelas a temperatura da reacção de oxidação do ferro, contudo poderá a temperatura diferir muito da realidade, devido ao facto de que a partícula enquanto viaja a grande velocidade, vai-se oxidando mas como o ar tem mais componentes além do oxigénio e devido ao pequeno volume da partícula poderá haver diminuição de temperatura de reacção, além disto estava-se a desprezar o efeito do carbono existente no aço.

Assim o processo de ensaio será o descrito inicialmente e vai-se filmar de perto a projecção de partículas com a câmara de infravermelhos para apurar a temperatura da combustão destas partículas.

Nota adicional de 2021 - Foram feitos alguns ensaios, mas todos sem ignição imediata, pelo que não será apresentados resultados.



Imagem 3.2.3.3.1 – Ensaio de projecção de partículas incandescentes de aço em feno, 9/11/2005

3.2.3.4 Ensaio com fuligem 2º método

A projeção de partículas de escape ocorre num meio quase isento de oxigénio (dentro do escape quando a viatura vai em esforço) e a cerca de 20 m/s (valor determinado a partir de tabela de exaustão de gases que é apresentada em anexo). As partículas quentes saem do escape a cerca de 500 °C, e quando entram em contacto com o ar aumentarão a sua temperatura. Enquanto as partículas viajam podem-se consumir totalmente no ar se o trajeto disponível for suficiente para a sua combustão ou podem colidir com algum obstáculo. Caso os obstáculos sejam folhas mortas de espécies florestais com baixo teor de humidade, haverá risco de incêndio.

Para se simular esta projeção de partículas nas espécies vegetais o autor concebeu e fez uma espécie de espingarda. Este dispositivo utiliza fulminantes de 6 mm para projetar as partículas que previamente serão aquecidas até 500 °C numa câmara, recorrendo ao maçarico de propano.

A temperatura é controlada com a interface Pico TC-08 e um termopar tipo k que está fixo pelo lado de baixo no cilindro que envolve a câmara. A 500 °C posiciona-se a amostra da espécie florestal contida num tabuleiro de alumínio com 30*20 cm² à distância de 1.5 m na zona onde vão ser projetadas as partículas. Introdz-se o fulminante e então bate-se no fulminante por meio de um veio afiado na ponta, usando um disco na extremidade como o efeito de inércia.

Os ensaios foram filmados com a máquina Sony vídeo 8.



Imagem 3.2.3.4.1 - aquecimento da fuligem seguida de explosão

4- Resultados e Discussão

4.1-Ensaio de inflamabilidade de partículas

4.1.1- Ensaio de inflamabilidade de partículas de borracha de pneu

Foram efectuados previamente alguns ensaios de inflamabilidade com borracha de pneu de camião que levaram às experiências números 1 a 12 resultando no gráfico 4.1.1, em que se apresenta o tempo de ignição da amostra de borracha em função da massa da partícula:

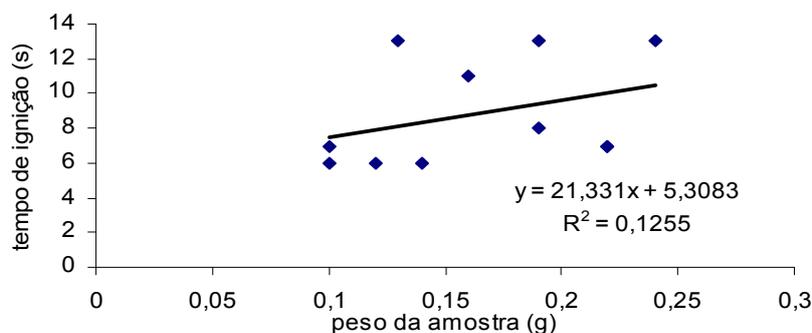


Gráfico 4.1.1 - Ignição de partículas de borracha de pneu de camião

Experiências realizadas a 600 °C no epiradiador com chama piloto acesa e ventilação ligada.

- Tempo de ignição mínimo = 6 s.
- Tempo de ignição máximo = 13 s.
- Tempo de ignição médio = 8,8 s.
- Quantidade de ensaios total: 12
- Quantidade de ensaios positivos 11.

Durante esta série de ensaios só houve um resultado negativo, que coincidiu com a amostra que apresentava a menor massa de todos os ensaios, 0,08 g. Durante o ensaio a amostra libertou fumo (processo de gasificação), restando somente resíduos na forma de pó de carvão (processo de carbonização). A não ignição explica-se por a quantidade de fumos libertada ser diminuta, sem uma concentração mínima de gases combustíveis necessários à reacção química de oxidação (combustão).

As amostras tinham formato retangular, (lascas) com 1 a 3 mm de espessura, com uma largura de 2 a 5 mm, com um comprimento médio de 10 mm, sendo a superfície de contacto direto com a fonte quente muito elevada em relação ao volume, o que levará a tempos mais diminutos de ignição devido a uma maior transferência de calor para a amostra quando comparado com um cubo.

Conclui-se pela inclinação da reta obtida do gráfico 4.1 que nos dá a variação média do tempo de ignição com a massa da partícula, o valor obtido foi 21,3, logo o valor da inclinação de reta sendo positivo indica que é crescente, assim, quanto maior for a massa, maior será o tempo de ignição; isto explica-se pelo maior tempo de aquecimento de amostras com maior massa pois só de seguida ao aquecimento é que virá a gasificação.

4.1.2- Ensaios de inflamabilidade de partículas de calços de travões de comboios

Efetuarão-se previamente dois ensaios com amostras retiradas de um calço de comboio de carga aquando as primeiras experiências com borracha de pneu constatando-se então que se inflamavam e ardião durante algum tempo. Posteriormente realizaram-se as experiências números 13 a 24 com amostras de calço de comboio usado (modelo com 32 cm de comprimento por 8 cm de largura, sendo já antiga a sua composição) o que resultou no gráfico 4.1.2.

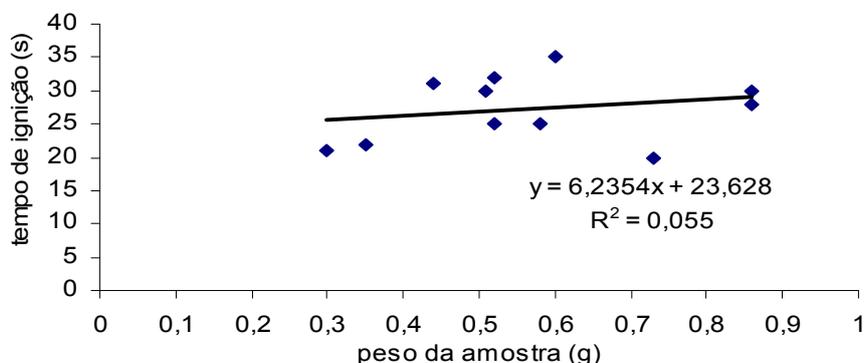


Gráfico 4.1.2 -Ignição de partículas de calço de comboio usado (modelo antigo de 32 cm)

Experiências realizadas a 600 °C no dispositivo de determinação da inflamabilidade com chama piloto acesa e ventilação ligada.

- Tempo de ignição mínimo = 20 s.
- Tempo de ignição máximo = 35 s.
- Tempo de ignição médio = 27,1 s.
- Quantidade de ensaios total: 12
- Quantidade de ensaios positivos 11.

Durante esta série de ensaios só houve um resultado negativo, em que a amostra que apresentava a massa 0,4 g. A amostra libertou fumo (processo de gasificação), restando somente um sólido de material cerâmico com alguma fuligem dispersa sobre a sua superfície. O sólido remanescente manteve a sua forma e parecia ter propriedades semelhantes ao gesso, desfazendo-se superficialmente com uma certa facilidade em pó. A não ignição explica-se por a quantidade de fumos libertada ser diminuta associada à forma aleatória das amostras, sem uma concentração mínima de gases combustíveis necessários à reacção química de oxidação (combustão).

As amostras tinham formato retangular, (lascas) com 2 a 4 mm de espessura, com uma largura de 4 a 8 mm, com um comprimento de 10 a 25 mm, sendo a superfície de contacto direto com a fonte quente muito elevada em relação ao volume, o que levará a tempos mais diminutos de ignição devido a uma maior transferência de calor para a amostra quando comparado com um cubo.

De amostras semelhantes na forma e dimensões ao calço anterior realizaram-se as experiências números 25 a 36 com amostras retiradas de um calço novo de comboio (modelo com 25 cm de comprimento por 9 cm de largura, sendo já a sua composição recente denominada sintética) com o que resultou no gráfico 4.1.3.

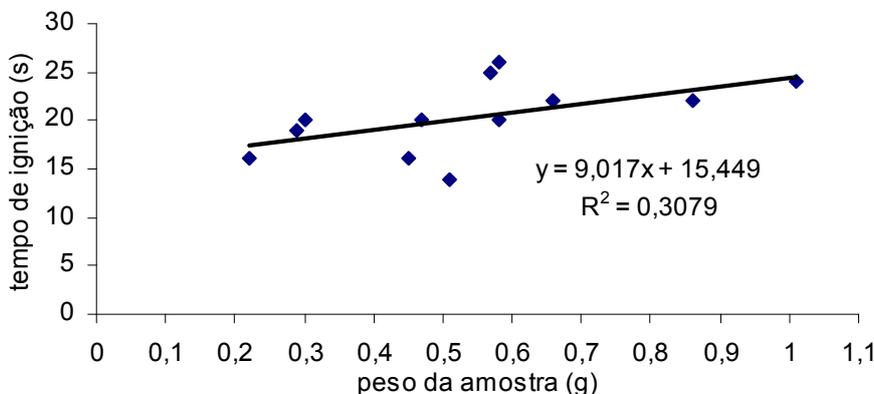


Gráfico 4.1.3 - Ignição de partículas de calço sintético de comboio (modelo de 25 cm)

Experiências realizadas a 600 °C no dispositivo de determinação da inflamabilidade com chama piloto acesa e ventilação ligada.

- Tempo de ignição mínimo = 14 s.
- Tempo de ignição máximo = 26 s.
- Tempo de ignição médio = 20,3 s.
- Quantidade de ensaios total: 12
- Quantidade de ensaios positivos 12.

Todos os ensaios foram positivos contudo realizou-se um ensaio o nº 37, com pó resultante do corte das amostras que deu um resultado negativo. O pó numa massa total de 0,54 g, em contacto com o prato quente de porcelana do dispositivo de ensaio libertou fumo, restando somente pó com alguma fuligem. O motivo da não ignição não foi indagado.

De amostras semelhantes na forma e dimensões aos calços anteriores realizaram-se as experiências números 38 a 50 com amostras retiradas de um calço novo de comboio (modelo de 32 cm de comprimento por 8 cm de largura, sendo já a sua composição também recente denominada sintética) com o que resultou no gráfico 4.1.4.

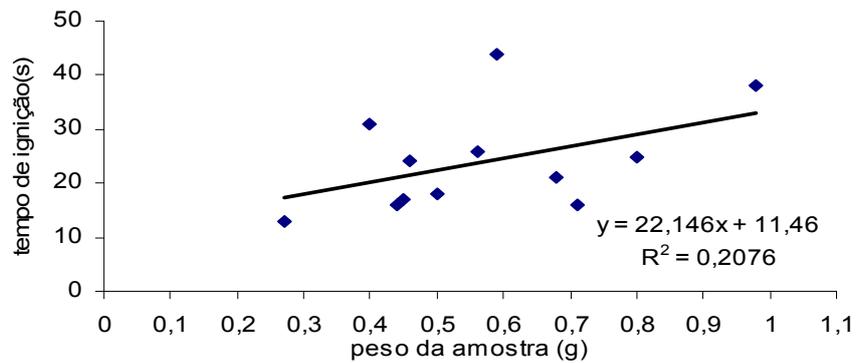


Gráfico 4.1.4 - Ignição de partículas de calço sintético de comboio (modelo de 32 cm)

Experiências realizadas a 600°C no dispositivo de determinação da inflamabilidade com chama piloto acesa e ventilação ligada.

Tempo de ignição mínimo = 13 s.

Tempo de ignição máximo = 44 s.

Tempo de ignição médio = 23,5 s.

Quantidade de ensaios total: 13

Todos os ensaios foram positivos

Conclui-se pelas inclinações das retas obtidas nas três figuras (média do tempo de ignição) que quanto maior é a massa, maior será o tempo de ignição; isto explica-se pelo maior tempo de aquecimento de amostras com maior massa pois só de seguida ao aquecimento é que virá a gasificação.

Constata-se que os novos calços com material sintético são mais inflamáveis que os antigos, (possivelmente os antigos foram substituídos devido a questões de segurança porque ainda continham amianto ou outras substâncias do género nocivas para o ser humano).

Estas experiências mostram que os calços dos travões utilizados nos comboios são combustíveis, podendo inflamar-se quando sujeitos a um processo de aquecimento, tal como pode suceder numa manobra de travagem de uma composição. Nestes ensaios não foi possível determinar qual será a temperatura e o correspondente tempo de ignição na prática. A temperatura será porventura mais baixa do que a utilizada nestes ensaios, uma vez que a quantidade de superfície de um calço de um comboio em contacto com a roda é muito maior do que as amostras. Cada calço tem respetivamente 225 cm² e 256 cm². Como as amostras não tinham forma precisa nem dimensão precisa não se podem determinar alguns parâmetros, tais como a percentagem da massa volátil, nem o tempo de duração da queima nem fixar a relação superfície volume.

Planearam-se novas experiências para se determinar os parâmetros referidos no parágrafo antecedente, para tal cortaram-se de um calço novo de comboio (32*8 cm material sintético) com um serrote manual de aço, várias amostras cúbicas de 1 cm³, mas a dificuldade da operação de

corte (as serras ao cortarem o calço ficavam rapidamente inutilizadas), devido à elevada dureza do calço, só se fez um cubo de 1 cm de aresta o mais preciso na forma e nas dimensões e uma dúzia com mais de 5 mm de aresta que posteriormente foram limados até ficarem com cerca de 5 mm de aresta e o formato próximo do cúbico.



Imagem 4.1.1 - Amostras de calços de comboio antes dos ensaios



Imagens 4.1.2 e 4.1.3 – Obtidas do filme de ensaio nº 58 com calço de comboio de 1 cm³

Estavam planeadas os ensaios do nº 51 à 63, mas face aos resultados obtidos tiveram que se adaptar. Realizaram-se então os ensaios nº 51 a 58, vindo os resultados na tabela 4.1:

| | cubos | | pesos | | % | | tempos | | φ | | ρ |
|-----|-------|----------------|-------|----------------|---------------|-----------|--------|-----------|------------------|-----------------|-------------------|
| exp | 5mm | amostras | total | após combustão | massa volátil | ig | total | comb. | sup/vol | vol | densi. |
| nº | qt. | g | g | g | g | s | s | s | cm ⁻¹ | cm ³ | g/cm ³ |
| 51 | 1 | 0,18 | 0,18 | 0,13 | 27,78 | - | | | 12 | | |
| 52 | 1 | 0,27 | 0,27 | 0,2 | 25,93 | - | | | 12 | | |
| 53 | 1 | 0,26 | 0,26 | 0,18 | 30,77 | - | | | 12 | | |
| 54 | 1 | 0,26 | 0,26 | 0,2 | 23,08 | - | | | 12 | | |
| 55 | 2 | 0,29;0,26 | 0,55 | 0,39 | 29,09 | - | | | | | |
| 56 | 3 | 0,24;0,26;0,26 | 0,76 | 0,53 | 30,26 | 36 | 59 | 23 | | | |
| 57 | 3 | 0,22;0,24;0,2 | 0,66 | 0,48 | 27,27 | 29 | 57 | 28 | | | |
| | | soma | 1,42 | 1,01 | 57,54 | 65 | 116 | 51 | | | |
| | | média | 0,71 | 0,505 | 28,77 | 32,5 | 58 | 25,5 | | | |
| | 10mm | | | | | | | | | | |
| 58 | 1 | 2,07 | 2,07 | 1,49 | 28,02 | 49 | 126 | 77 | 6 | 1,168 | 1,772 |

T4.1 Resultados de ignição das experiências nº 51 a 58

Como todos os ensaios estavam a ser negativos o autor constatou que a relação superfície volume seria baixa $\varphi = 12$ (cm⁻¹) ou então a massa era também reduzida não havendo uma concentração mínima de gases voláteis, assim no ensaio nº 55 empregaram-se dois cubos idênticos, mas continuou sem resultado positivo, daí que nos ensaios seguintes utilizou três cubos obtendo então resultados positivos.

Com o cubo de 10 mm de aresta, a relação superfície volume, $\phi = 6 \text{ (cm}^{-1}\text{)}$, obteve-se ignição ao fim de 49 s estando o cubo a arder até os 126 s o que perfaz um tempo de combustão de 77 s. Este tempo, superior quando comparado com as experiências de 3 cubos, está de acordo com as razões já explicadas.

Como resultado da massa volátil do calço obteve-se a percentagem de 28,02. Esta percentagem será mais precisa do que a obtida com os cubos de 5 mm visto que a massa no cubo de 10 mm é superior na ordem de uma dezena, reduzindo assim o erro de medição pela balança (Mettler PM600)

Com estes resultados constata-se que os calços de comboio apresentarão um elevado risco de incêndio. Foram efectuados posteriormente mais alguns ensaios para verificar se as amostras de calços sintéticos se inflamavam sem chama piloto. Constatou-se que todos os resultados foram negativos. Porém caso haja chispas a atravessar os gases libertados é natural que elas possam inflamar podendo o calço incendiar-se, tanto mais que a massa do calço é elevada (alguns kgs). Na realidade quando um comboio trava bruscamente pode haver produção de chispas e estas podem facilitar a inflamação dos gases libertados pelo aquecimento dos calços.

4.1.3 - Ensaios de inflamabilidade de partículas de fuligem de escape de camião

Fizeram-se unicamente três ensaios com fuligem retirada do tubo de escape de um camião da marca Volvo. A fuligem retirada com uma espátula era um pó fino e seco (diâmetro de cada partícula menor ou igual a 0,1 mm). Cada amostra com alguns gramas, quando em contacto com o prato quente a 600 °C ficava ao rubro e as partículas fundiram-se em partículas maiores com aproximadamente 1 mm de diâmetro, sem se inflamarem. Sob a ação de alguma velocidade do ar uma pequena percentagem de partículas libertava-se sob a forma de fagulhas as quais se consumiam ao fim de poucos dm de percurso.

A fuligem como era seca devido ao motor ter pouco desgaste e não consumir óleo (foi confirmado pelo proprietário de que o motor praticamente não consumia óleo) não se inflamou. Concluímos assim que fuligens sem conterem produtos voláteis não se inflamarão. Todavia não se sabe se mesmo a fuligem sem óleo face a temperaturas da ordem dos 500 °C se fundem, formando esferas enquanto avança pelas paredes do tubo de escape até serem projetadas pelo escape a velocidades da ordem dos 20 m/s. Estas só serão visíveis se ocorrer durante a noite.

Apresenta-se em anexo uma tabela com os caudais de gases de escape em dm^3/s , pelo que basta encontrar para a cilindrada e rotação de cada caso o valor tabelado e se dividirmos esse valor pela área do tubo de escape (dm^2) obtemos a velocidade em dm/s .

4.1.4- Ensaios de inflamabilidade de partículas de fuligem projetadas por explosão

Foram feitas várias experiências com fuligem contendo produtos voláteis devido a serem retirados do escape de um trator alemão com motor a dois tempos com cerca de 40 anos. As amostras eram carregadas dentro do dispositivo e após aquecimento até 500 °C e depois eram projetados por explosão contra o feno acabado de ser retirado da estufa, prevendo-se que na distância a percorrer de cerca de 1,5 m as partículas se oxidassem mais e assim ao colidirem com o feno tivessem a sua temperatura mais elevada.



Imagem 4.1.4 – Dispositivo de ensaio para projeção de partículas de escape por explosão, 21/10/2005

Durante o aquecimento libertou-se fumo pela extremidade do cano por onde seria projetada a fuligem e donde também escorreu óleo proveniente da destilação da fuligem. O produto explosivo empregue para projetar a fuligem foi unicamente um fulminante de cartucho de caça.

Verificou-se que não houve uma única ignição. Analisando o que estava a acontecer, apurou-se que em todos os ensaios a fuligem projetada estava fria apesar de ter sido previamente aquecida a 500 °C. Como se tinham dois tipos de fulminantes utilizou-se o outro tipo mas o resultado foi o mesmo pelo que se conclui que o emprego destes explosivos não resulta e desistiu-se deste tipo de ensaio.

Nota adicional de 2021 – Concluiu-se na altura que a explosão apaga a combustão. A projeção devia ser por ar comprimido e aquecido a 500 °C, temperatura de saída dos gases de escape de motores pesados a diesel.

4.2-Ensaio de ignição de combustíveis por partículas quentes

Após dezenas de experiências preliminares de inflamabilidade do feno e caruma, com esferas quentes e de se ter confirmado que o processo de ensaio era adequado e não apresentava problemas, realizaram-se então mais de 500 experiências, cujos resultados se vão apresentar em gráficos.

Os resultados obtidos em todas as experiências com as esferas quentes, serão aqui apresentados em gráficos em que as temperaturas indicadas são as das esferas quando entram em contacto com a amostra de combustível florestal.

Os resultados com o valor 0 (zero) representam que não houve ignição durante os primeiros 10 s e os resultados com o valor 1 representam que houve ignição.

Por cada conjunto de resultados será apresentado o número de experiências realizadas e as condições ambientais do meio em que foram realizadas.

A seguir a cada conjunto de resultados obtidos será apresentada uma tabela com as temperaturas das partículas dos ensaios positivos e os respetivos tempos de ignição, bem como uma análise estatística desses tempos de ignição.

Serão apresentados os resultados das três espécies florestais estudadas, pela ordem: feno, caruma, eucalipto.

Por cada espécie apresentar-se-ão em primeiro os resultados com o maior teor de humidade ensaiado (a 10%) e depois apresentar-se-ão os resultados com o menor teor de humidade (0% a 5%).

A ordem de apresentação das séries de experiências será por massa crescente.

Após a apresentação dos resultados das três séries de ensaios realizados, um por cada valor da massa da esfera, apresentar-se-á uma tabela com os dados mais relevantes dos três conjuntos de ensaios. Depois com esta tabela será elaborado um gráfico de inflamabilidade com os resultados extremos de cada série de ensaios. Estes extremos serão:

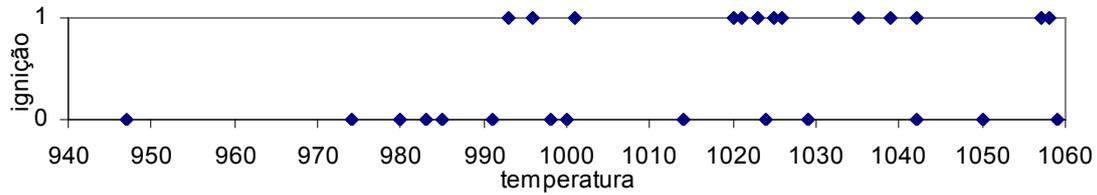
A - temperatura mínima de ignição (temperatura mais baixa em que ocorreu ignição). Pode-se considerar como limite inferior da zona de inflamabilidade.

B - temperatura máxima sem ignição (temperatura mais alta sem ocorrer ignição) Pode-se considerar como limite superior da zona de inflamabilidade.

Durante a realização de ensaios constatou-se que a esfera de 10 mm de diâmetro perdeu massa, a perda de massa foi provocada pela oxidação sob elevada temperatura. Para algumas séries realizadas com a esfera de 10 mm, entre as medições iniciais e finais de massa e diâmetro os valores foram calculados por interpolação linear Assim passou-se a pesar e a medir as esferas também no final de cada série de ensaios.

4.2.1-Inflamabilidade do feno com cerca de 10% de teor de humidade

Os resultados obtidos com esferas quentes de 9 mm de diâmetro e 3 g de massa, são apresentados no gráfico G4.2.1.



G4.2.1 Ensaios de ignição com esfera de 9 mm em feno a 8,3% de humidade

Quantidade de ensaios total - 28

Condições ambientais: Humidade máxima do ar 60%; Humidade mínima do ar 42%

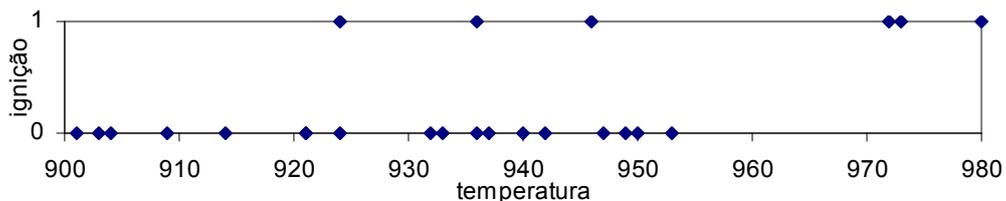
Temperatura mínima do ar 26 °C; Temperatura máxima do ar 30 °C

O valor máximo sem ignição foi 1059 °C e o valor mínimo com ignição foi 993 °C.

| Tig(°C) | tig(s) | Análise do tempo de ignição | |
|-------------|--------|-----------------------------|-------------|
| 993 | 0,3 | Desvio-padrão | 0,28 |
| 996 | 0,2 | Erro-padrão | 0,08 |
| 1001 | 0,4 | Máximo | 1,1 |
| 1020 | 0,3 | Média | 0,37 |
| 1021 | 0,2 | Mediana | 0,25 |
| 1023 | 0,2 | Mínimo | 0,2 |
| 1025 | 0,2 | Moda | 0,20 |
| 1026 | 0,4 | Variância da amostra | 0,08 |
| 1035 | 0,4 | | |
| 1039 | 1,1 | | |
| 1042 | 0,2 | | |
| 1057 | 0,2 | | |
| 1058 | 0,9 | | |
| 1062 | 0,2 | | |
| 1028 | média | | |

T4.2.1 Tempo de ignição com esfera de 9mm em feno a 8,3% humidade

Os resultados obtidos com esferas quentes de 14,3 mm de diâmetro e 11,88 g de massa, são apresentados no gráfico G4.2.2.



G4.2.2 Ensaios de ignição com esfera de 14,3mm em feno a 9,9% de humidade

Quantidade de ensaios total - 24

Condições ambientais: Humidade máxima do ar 50%; Humidade mínima do ar 45%

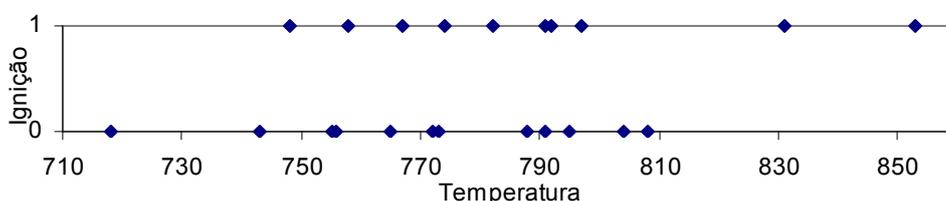
Temperatura mínima do ar 29 °C; Temperatura máxima do ar 30 °C

O valor máximo sem ignição foi 953 °C e o valor mínimo com ignição foi 924 °C.

| Tig(°C) | tig(s) | Análise do tempo de ignição | |
|--------------|--------|-----------------------------|-------------|
| 924 | 0,3 | Desvio-padrão | 0,59 |
| 936 | 0,3 | Erro-padrão | 0,24 |
| 946 | 1 | Máximo | 1,8 |
| 972 | 1,8 | Média | 0,72 |
| 973 | 0,5 | Mediana | 0,45 |
| 980 | 0,4 | Mínimo | 0,3 |
| 955,2 | média | Moda | 0,30 |
| | | Variância da amostra | 0,35 |

T4.2.2 Tempo de ignição com esfera de 14,3mm em feno a 9,9% de humidade

Os resultados obtidos com esferas quentes de 20,2 mm de diâmetro e 33,33 g de massa, são apresentados no gráfico G4.2.3



G4.2.3 Ensaio de ignição com esfera de 20,2mm em feno a 6,5% humidade

Quantidade de ensaios total - 23

Condições ambientais: Humidade máxima do ar 60%; Humidade mínima do ar 48%

Temperatura mínima do ar 25 °C; Temperatura máxima do ar 27 °C

O valor máximo sem ignição foi 808 °C e o valor mínimo com ignição foi 748 °C.

| Tig(°C) | tig(s) | Análise do tempo de ignição | |
|--------------|--------|-----------------------------|-------------|
| 748 | 0,5 | Desvio-padrão | 0,12 |
| 758 | 0,5 | Erro-padrão | 0,04 |
| 767 | 0,5 | Máximo | 0,8 |
| 774 | 0,4 | Média | 0,49 |
| 782 | 0,5 | Mediana | 0,50 |
| 791 | 0,4 | Mínimo | 0,4 |
| 792 | 0,4 | Moda | 0,50 |
| 797 | 0,8 | Variância da amostra | 0,01 |
| 831 | 0,5 | | |
| 853 | 0,4 | | |
| 789,3 | média | | |

T4.2.3 Tempo de ignição com esfera de 20,2 mm em feno a 6,5% de humidade

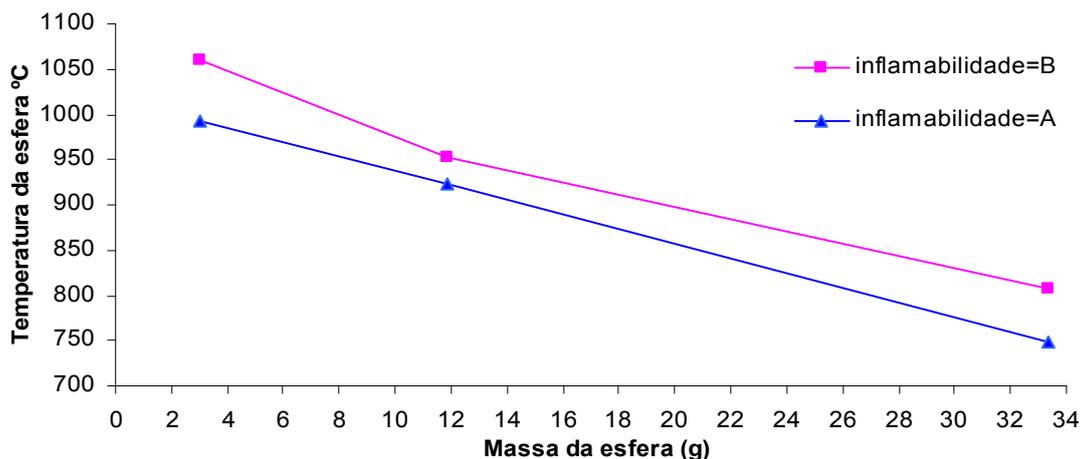
Apresentam-se todos os resultados obtidos na tabela T4.2.4.

| A | B | C | D | E | F1 | G1 | F2 | G2 | H | I | J |
|------------|-------------|------|--------|--------------|------|--------|------|--------|------|------|-------|
| t min | t máx. | hum. | diam | massa | Tmin | hr máx | Tmáx | hr min | n° | larg | tig |
| c/ig | s/ig | esp. | esfera | esfera | atm | atm | atm | atm | exp. | B-A | médio |
| °C | °C | % | (mm) | (g) | °C | % | °C | % | Qt. | °C | (s) |
| 993 | 1059 | 8,3 | 9 | 3 | 26 | 60 | 30 | 42 | 28 | 66 | 0,37 |
| 924 | 953 | 9,9 | 14,3 | 11,88 | 29 | 50 | 30 | 45 | 24 | 29 | 0,72 |
| 748 | 808 | 6,45 | 20,2 | 33,33 | 25 | 60 | 27 | 48 | 23 | 60 | 0,49 |

T4.2.4 Resultados de inflamabilidade com esferas em feno com cerca de 10% de humidade

A coluna I é a diferença de temperaturas obtida entre o valor mínimo com inflamação e o valor máximo sem ignição. Representa uma largura de incerteza de resultado, valor em °C, devido a vários fatores tais como, diferenças de volatilidade, diferenças de teor de humidade, diferenças de orientação, diferenças físicas e diferenças de degradação. Este valor tenderá a aumentar com o aumento da quantidade de experiências. Verifica-se que para 14,3 mm, o valor obtido de 29 °C é insuficiente.

Com os resultados obtidos das três séries de experiências, valores a negrito da tabela T4.2.4, realizou-se o gráfico G4.2.4.



G4.2.4 Inflamabilidade do feno com cerca de 10% de humidade

Entre a linha A e a linha B é uma zona onde tanto pode haver ignição como não haver, acima da linha B houve sempre ignição, abaixo da linha A nunca houve ignição.

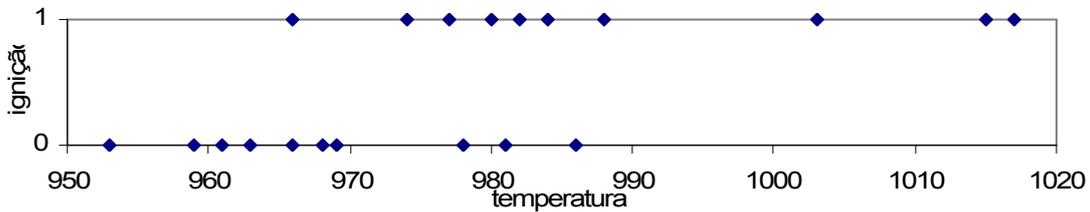
Os resultados obtidos com a linha B, são coerentes com o esperado, à medida que se aumenta a massa da partícula quente, a temperatura necessária para haver ignição diminui. Será natural que para massas maiores que 34 g a inclinação da curva se reduza, tendendo no infinito para uma reta horizontal, supondo-se que o valor mínimo seja superior a 200 °C, enquanto que à medida que a massa se aproxima do zero a temperatura aumenta.

Nota-se que este gráfico pode pecar no ponto definido pela reta A para a massa de 11,88 g por falta de experiências. O valor obtido foi de 924 °C mas prevê-se que um valor próximo se possa determinar com o extremo B (953 °C), subtraindo 63 °C, valor da média de intervalo (coluna I), obtido com os ensaios das outras massas 66 e 60 °C respetivamente, obteríamos 890°C.

O valor que se deveria ter obtido na reta A em 11,88g, seria próximo de 890 °C, pois era esperado que a linha A fizesse uma curva do tipo da B. Para se ter evitado esta falha, deviam-se ter feito mais ensaios com a temperatura a variar entre os 880 °C e os 924 °C, e provavelmente iria haver ignição para temperaturas mais baixas do que 924 °C. Esta situação foi detetada ainda durante os ensaios, pelo que se realizaram mais experiências até se obterem os resultados previstos.

4.2.2-Inflamabilidade do feno “seco” (teor de humidade <5%)

Os resultados obtidos com esferas quentes de 8.5 mm de diâmetro e 2,5 g de massa, são apresentados no gráfico G4.2.5.



G4.2.5 Ensaio de ignição com esfera de 8,5 mm em feno “seco”

Quantidade de ensaios total - 21

Condições ambientais: Humidade máxima do ar 55%; Humidade mínima do ar 45%

Temperatura mínima do ar 30 °C; Temperatura máxima do ar 31 °C

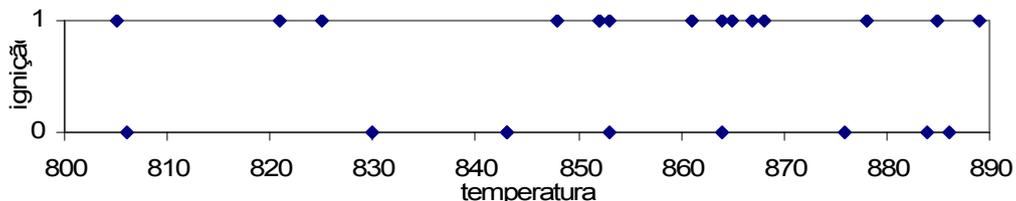
Teor de humidade - 4 medições, média de 2,3%

O valor máximo sem ignição foi 986 °C e o valor mínimo com ignição foi 966 °C.

| Tig(°C) | tig(s) | Análise do tempo de ignição | |
|------------|--------|-----------------------------|-------------|
| 966 | 0,2 | Desvio-padrão | 0,11 |
| 974 | 0,3 | Erro-padrão | 0,03 |
| 977 | 0,4 | Máximo | 0,5 |
| 980 | 0,2 | Média | 0,30 |
| 982 | 0,2 | Mediana | 0,30 |
| 984 | 0,3 | Mínimo | 0,2 |
| 988 | 0,5 | Moda | 0,20 |
| 1003 | 0,4 | Variância da amostra | 0,01 |
| 1015 | 0,2 | | |
| 1017 | 0,3 | | |
| 989 | média | | |

T4.2.5 Tempo de ignição com esfera de 8,5mm em feno “seco”

Os resultados obtidos com esferas quentes de 14 mm de diâmetro e 10,68 g de massa, são apresentados no gráfico G4.2.6.



G4.2.6 Ensaio de ignição com esfera de 14mm em feno “seco”

Quantidade de ensaios total - 24

Condições ambientais: Humidade máxima do ar 70%; Humidade mínima do ar 56%

Temperatura mínima do ar 25 °C; Temperatura máxima do ar 27 °C

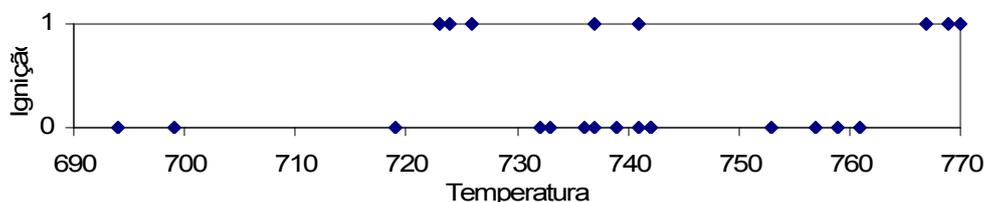
Teor de humidade - 1 medição de 0,1%

O valor máximo sem ignição foi 886 °C e o valor mínimo com ignição foi 805 °C.

| Tig(°C) | tig(s) | Análise do tempo de ignição | |
|--------------|--------|-----------------------------|-------------|
| 805 | 0,9 | Desvio-padrão | 0,38 |
| 821 | 1,1 | Erro-padrão | 0,10 |
| 825 | 0,3 | Máximo | 1,5 |
| 848 | 1,5 | Média | 0,51 |
| 852 | 0,2 | Mediana | 0,40 |
| 852 | 0,4 | Mínimo | 0,2 |
| 853 | 0,3 | Moda | 0,30 |
| 861 | 0,5 | Variância da amostra | 0,14 |
| 864 | 0,3 | | |
| 865 | 0,4 | | |
| 867 | 0,2 | | |
| 868 | 0,2 | | |
| 878 | 0,3 | | |
| 885 | 0,5 | | |
| 889 | 0,5 | | |
| 855,5 | média | | |

T4.2.6 Tempo de ignição com esfera de 14mm em feno “seco”

Os resultados obtidos com esferas quentes de 20,1 mm de diâmetro e 32,77 g de massa, são apresentados no gráfico G4.2.7.



G4.2.7 Ensaio de ignição com esfera de 20,1mm em feno “seco”

Quantidade de ensaios total - 24

Condições ambientais: Humidade máxima do ar 72%; Humidade mínima do ar 62%

Temperatura mínima do ar 25 °C; Temperatura máxima do ar 26 °C

Teor de humidade - 3 medições, média 4,2%

O valor máximo sem ignição foi 761 °C e o valor mínimo com ignição foi 723 °C.

| Tig(°C) | tig(s) | Análise do tempo de ignição | |
|--------------|--------|-----------------------------|-------------|
| 723 | 0,3 | Média | 0,64 |
| 724 | 0,4 | Erro-padrão | 0,13 |
| 726 | 0,8 | Mediana | 0,55 |
| 737 | 0,7 | Moda | 0,30 |
| 741 | 0,3 | Desvio-padrão | 0,37 |
| 767 | 1,1 | Variância da amostra | 0,14 |
| 769 | 0,3 | Mínimo | 0,3 |
| 770 | 1,2 | Máximo | 1,2 |
| 744,6 | média | | |

T4.2.7 Tempo de ignição com esfera de 20,1mm em feno “seco”

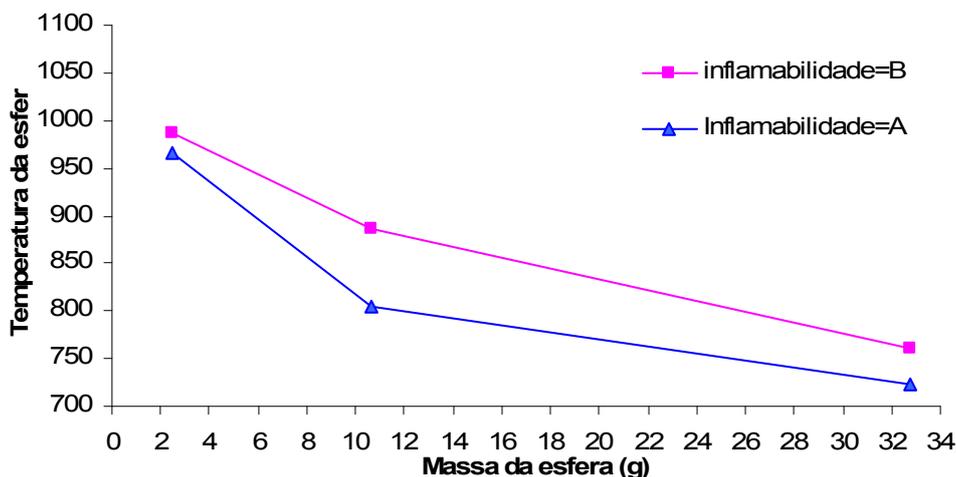
Apresentam-se todos os resultados obtidos na tabela T4.2.8.

| A | B | C | D | E | F1 | G1 | F2 | G2 | H | I | J |
|------------|------------|------|--------|--------------|------|--------|------|--------|------|------|-------|
| t min | t máx. | hum. | diam | massa | Tmin | hr máx | Tmáx | hr min | n° | larg | tig |
| c/ig | s/ig | esp. | esfera | esfera | atm | atm | atm | atm | exp. | B-A | médio |
| °C | °C | % | (mm) | (g) | °C | % | °C | % | Qt. | °C | (s) |
| 966 | 986 | 2,3 | 8,5 | 2,5 | 30 | 55 | 31 | 45 | 21 | 20 | 0,3 |
| 805 | 886 | 0,1 | 14 | 10,68 | 25 | 70 | 27 | 56 | 24 | 81 | 0,51 |
| 723 | 761 | 4,15 | 20,1 | 32,77 | 25 | 72 | 26 | 62 | 24 | 38 | 0,64 |

T4.2.8 Resultados de inflamabilidade com esferas em feno “seco”

Verifica-se que para 8,5 mm, o valor obtido de 20 °C da coluna I é insuficiente e que para 14 mm, o valor da largura obtido de 81 °C foi o máximo de todas as séries que se ensaiaram incluindo ainda as que irão ser apresentadas.

Com os resultados obtidos das três séries de experiências, valores a negrito da tabela T4.2.8, realizou-se o gráfico G4.2.8.

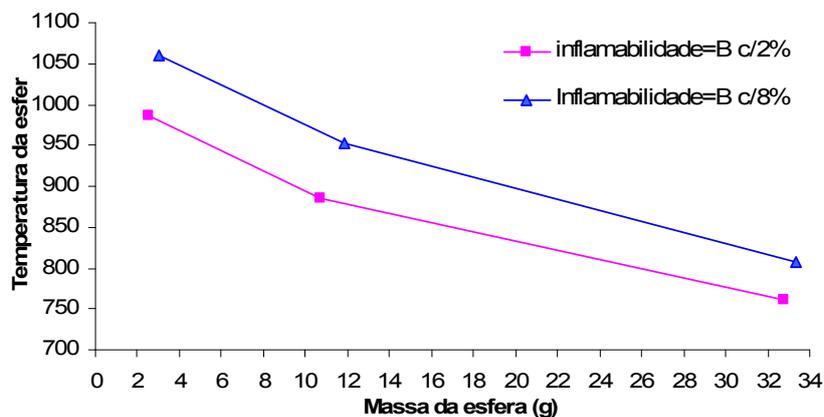


G4.2.8 Inflamabilidade do feno “seco”

Os resultados obtidos com a linha B, são coerentes com o esperado, à medida que se aumenta a massa da partícula quente, a temperatura necessária para haver ignição diminui.

Nota-se que este gráfico peca no ponto definido pela reta B para a massa de 2,5 g também por falta de experiências. Se olharmos para o gráfico G4.2.5 pode-se verificar que a gama de temperaturas 960-970 °C foi toda varrida com ensaios, na gama de 990 a 1020 °C. Só se realizaram três ensaios, pelo que será de prever que a temperatura máxima sem ignição aumente.

Para se saber qual o efeito do teor de humidade far-se-á uma comparação entre as linhas B dos gráficos G4.2.4 e G4.2.8 com o gráfico G4.2.9.



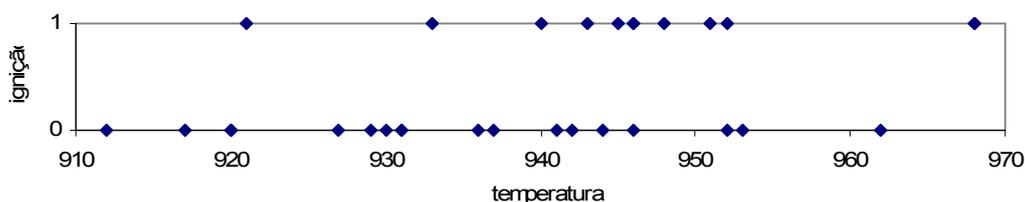
G4.2.9 Inflamabilidade do feno em função do teor de humidade

Nota: o teor de humidade indicado é a média arredondada à unidade dos ensaios respetivos.

Como era esperado a redução do teor de humidade reduziria a temperatura de ignição, isto confirma-se ao analisar o gráfico G4.2.9. A redução do teor de humidade em cerca de 6%, reduziu a temperatura de ignição em cerca de 50 °C.

4.2.3-Inflamabilidade da caruma com cerca de 10% de teor de humidade

Os resultados obtidos com esferas quentes de 10,1 mm de diâmetro e 4,1 g de massa, são apresentados no gráfico seguinte G4.2.10.



G4.2.10 Ensaios de ignição com esfera de 10,1mm em caruma a 7,7% de humidade

Quantidade de ensaios total - 30

Condições ambientais: Humidade máxima do ar 52%; Humidade mínima do ar 52%

Temperatura mínima do ar 26 °C; Temperatura máxima do ar 28 °C

O valor máximo sem ignição foi 962 °C e o valor mínimo com ignição foi 921 °C.

| Tig(°C) | tig(s) | Análise do tempo de ignição | | Tig(°C)* | tig(s)* |
|--------------|--------|-----------------------------|-------------|--------------|-------------|
| 921 | 1,1 | Desvio-padrão | 0,69 | 921 | 1,1 |
| 933 | 0,5 | Erro-padrão | 0,20 | 933 | 0,5 |
| 940 | 0,5 | Máximo | 2,6 | 940 | 0,5 |
| 943 | 1,1 | Média | 1,06 | 943 | 1,1 |
| 945 | 1,1 | Mediana | 0,90 | 945 | 1,1 |
| 946 | 1,2 | Mínimo | 0,5 | 946 | 1,2 |
| 946 | 2,6 | Moda | 1,10 | | |
| 948 | 0,5 | Variância da amostra | 0,47 | 948 | 0,5 |
| 951 | 0,6 | | | 951 | 0,6 |
| 952 | 2,2 | | | | |
| 968 | 0,7 | | | 968 | 0,7 |
| 968 | 0,6 | | | 968 | 0,6 |
| 946,8 | média | | médias | 946,3 | 0,79 |

T4.2.9 Tempo de ignição com esfera de 10,1mm em caruma a 7,7% de humidade

O valor máximo sem ignição foi 946 °C e o valor mínimo com ignição foi 865 °C.

Verifica-se ao analisar este gráfico que o valor máximo de ignição pode estar diminuído. Deviam-se ter efectuado mais experiências acima de 889 °C pois o valor máximo sem ignição devia ter sido inferior a valores de experiências com ignição. Havia a regra de que as experiências de temperaturas mais elevadas tinham de ser sempre com resultados positivos, tal regra não foi verificada nesta série.

| Tig(°C) | tig(s) | Análise do tempo de ignição | | Tig(°C)* | tig(s)* |
|--------------|--------|-----------------------------|-------------|--------------|-------------|
| 865 | 1,5 | Desvio-padrão | 2,94 | 865 | 1,5 |
| 869 | 2,6 | Erro-padrão | 1,04 | 869 | 2,6 |
| 871 | 9,5 | Máximo | 9,5 | | |
| 876 | 1,1 | Média | 2,53 | 876 | 1,1 |
| 876 | 2,8 | Mediana | 1,50 | 876 | 2,8 |
| 882 | 1,5 | Mínimo | 0,3 | 882 | 1,5 |
| 883 | 0,9 | Moda | 1,50 | 883 | 0,9 |
| 883 | 0,3 | Variância da amostra | 8,64 | 883 | 0,3 |
| 875,6 | Média | | Médias | 896,3 | 1,53 |

T4.2.11 Tempo de ignição com esfera de 2 0mm em caruma a 9% de humidade

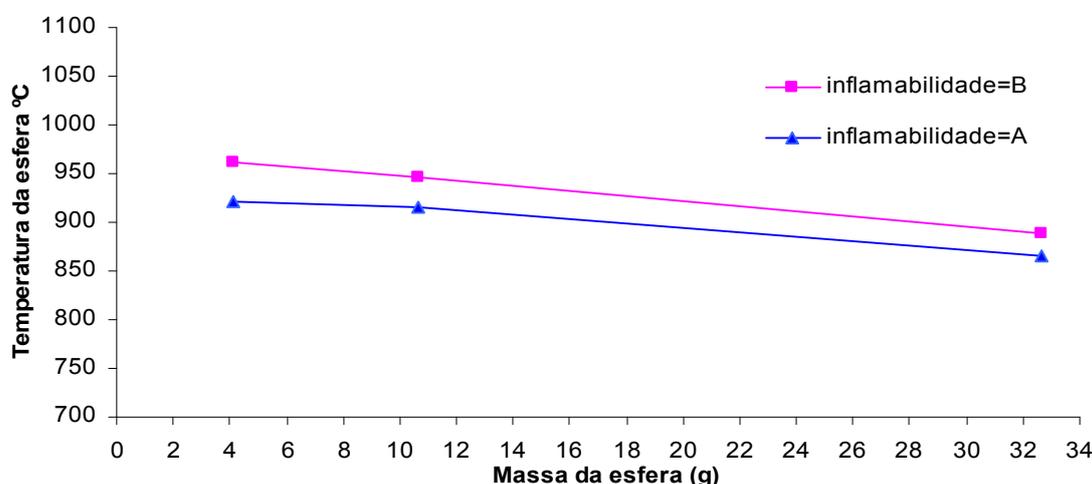
* Nesta tabela para efeito do cálculo das médias de temperatura e tempo de ignição foi retirado um resultado com tempo excessivo, estas médias* serão utilizadas na secção 4.4.2.

Apresentam-se todos os resultados obtidos na tabela T4.2.12.

| A | B | C | D | E | F1 | G1 | F2 | G2 | H | I | J |
|------------|------------|------|--------|--------------|------|--------|------|--------|------|------|-------|
| t min | t máx. | hum. | diam | massa | Tmin | hr máx | Tmáx | hr min | n° | larg | tig |
| c/ig | s/ig | esp. | esfera | esfera | atm | atm | atm | atm | exp. | B-A | médio |
| °C | °C | % | (mm) | (g) | °C | % | °C | % | Qt. | °C | (s) |
| 921 | 962 | 7,65 | 10,1 | 4,1 | 26 | 52 | 28 | 42 | 30 | 41 | 1,06 |
| 915 | 946 | 9,6 | 14 | 10,68 | 28 | 54 | 30 | 46 | 35 | 31 | 1,49 |
| 865 | 889 | 8,95 | 20 | 32,63 | 25 | 62 | 28 | 46 | 25 | 24 | 2,53 |

T4.2.12 Resultados de inflamabilidade com esferas em caruma com cerca de 10% de humidade

Com os resultados obtidos das três séries de experiências, valores a negrito da tabela T4.2.12, realizou-se o gráfico G4.2.13.



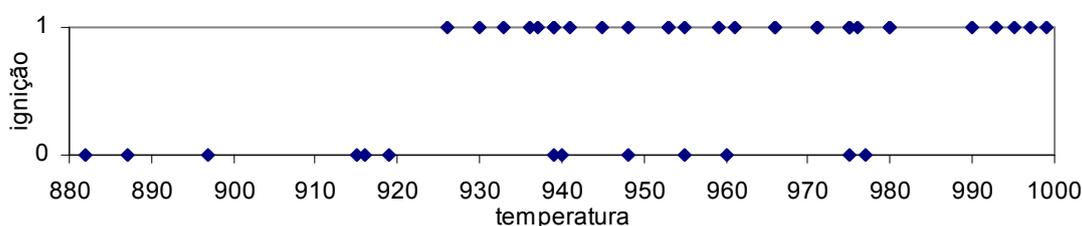
G4.2.13 Inflamabilidade da caruma cerca de 10% de humidade

Sabendo-se que o valor da linha B, em 32,63 g, pode ser insuficiente, o valor mais provável seria 865 °C acrescido de 36 °C, média da coluna I das outras massas, ou seja 901 °C.

O valor da linha B em 32,63 seria então 901 °C.

O esperado neste gráfico era que a curva definida pelos três pontos tivesse a concavidade voltada para cima o que não aconteceu. Uma explicação possível seria o termopar nesta série de ensaios não estar muito bem acoplado termicamente e então os valores indicados serem inferiores à realidade. Esta inflexão contrária só aconteceu nesta série. Para bem esta série deveria ser repetida e assim no dia 8/11/2005 realizaram-se 43 experiências com uma esfera de 9,9 mm e 3,87 g de massa, em que as condições ambientais eram: 18 °C e 80%HR.

Os resultados obtidos com esferas quentes de 9,9 mm de diâmetro e 3,87 g de massa, são apresentados no gráfico G4.2.14.



G4.2.14 Ensaio de ignição com esfera de 9,9 mm em caruma a 8,5% de humidade (repetição)

O valor máximo sem ignição foi 977 °C e o valor mínimo com ignição foi 926 °C.

Durante esta repetição de ensaios reparou-se que no caso de ignição as chamas desenvolviam-se muito menos, que as realizadas no período de verão, e por vezes, quando se retirava a esfera do leito em combustão as chamas extinguíam-se. Atendendo a que a repetição ocorreu sob maior humidade ambiente e a uma temperatura inferior ao verão, facilmente se explicam as pequenas diferenças obtidas com as condições ambientais do ar a 18 °C e 80%HR. Calculando as pequenas diferenças obtidas apura-se que: $926-921=5$ °C, resultou em mais 5 °C para o valor mínimo com ignição; $977-962=15$ °C resultou em mais 15 °C para o valor máximo sem ignição.

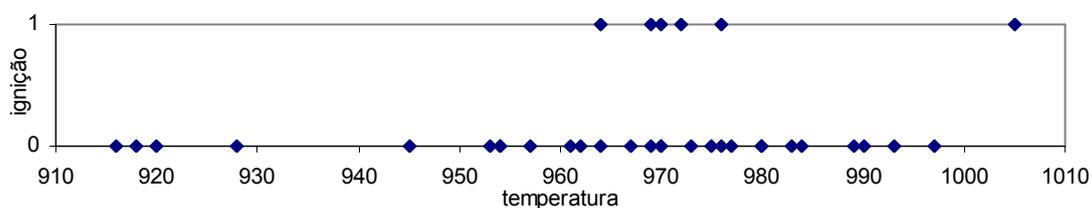
Conclui-se que os valores obtidos anteriormente são corretos, pelo que se deduz que não houve falha de aquisição de dados com o termopar.

Das aquisições de temperatura com termopares inseridos em esferas, constatou-se que o furo com 5 mm de profundidade era insuficiente pelo que o mesmo deveria ter 10 mm de profundidade e no caso de esferas de diâmetro menor que 10 mm o furo deve atravessar a esfera, como se fez com a esfera de 5 mm.

Uma solução para garantir maior precisão da temperatura seria empregar dois termopares, contudo já foi muito difícil a realização das experiências devido à degradação e quebra dos termopares, provocada pela oxidação dos respetivos fios constituintes do termopar devido às chamas também incidirem diretamente no termopar.

4.2.4-Inflamabilidade da caruma “seca” (teor de humidade <5%)

Os resultados obtidos com esferas quentes de 10 mm de diâmetro e 3,59 g de massa, são apresentados no gráfico G4.2.15.



G4.2.15 Ensaio de ignição com esfera de 10 mm em caruma a 2,4% de humidade

Quantidade de ensaios total - 35

Condições ambientais: Humidade máxima do ar 55%; Humidade mínima do ar 46%

Temperatura mínima do ar 26 °C; Temperatura máxima do ar 30 °C

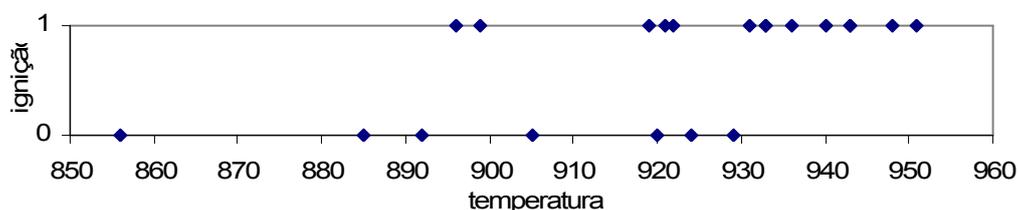
Teor de humidade - 5 medições, média 2,4%

O valor máximo sem ignição foi 997 °C e o valor mínimo com ignição foi 964 °C.

| Tig(°C) | tig(s) | Análise do tempo de ignição | |
|------------|--------|-----------------------------|-------------|
| 964 | 0,3 | Desvio-padrão | 0,18 |
| 969 | 0,5 | Erro-padrão | 0,07 |
| 970 | 0,8 | Máximo | 0,8 |
| 972 | 0,5 | Média | 0,48 |
| 976 | 0,3 | Mediana | 0,50 |
| 1005 | 0,5 | Mínimo | 0,3 |
| 976 | média | Moda | 0,50 |
| | | Variância da amostra | 0,03 |

T4.2.13 Tempo de ignição com esfera de 10mm em caruma “seca”

Os resultados obtidos com esferas quentes de 14,3 mm de diâmetro e 11,88 g de massa, são apresentados no gráfico G4.2.16.



G4.2.16 Ensaio de ignição com esfera de 14,3 mm em caruma a 0,3% de humidade

Quantidade de ensaios total - 21

Condições ambientais: Humidade máxima do ar 60%; Humidade mínima do ar 45%

Temperatura mínima do ar 27 °C; Temperatura máxima do ar 30 °C

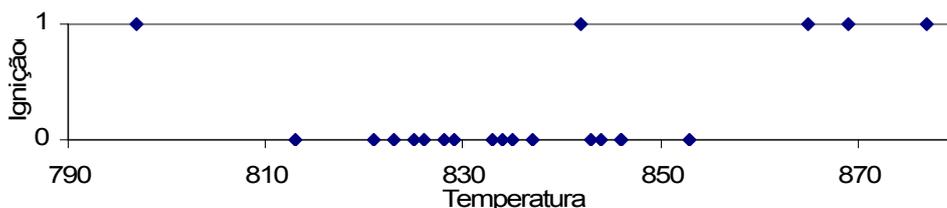
Teor de humidade - 1 medição de 0,3%

O valor máximo sem ignição foi 929 °C e o valor mínimo com ignição foi 896 °C.

| Tig(°C) | tig(s) | Análise do tempo de ignição | |
|--------------|--------|-----------------------------|-------------|
| 896 | 1 | Desvio-padrão | 2,23 |
| 899 | 1 | Erro-padrão | 0,60 |
| 919 | 9 | Máximo | 9,0 |
| 921 | 0,5 | Média | 1,28 |
| 922 | 0,8 | Mediana | 0,70 |
| 931 | 0,5 | Mínimo | 0,3 |
| 933 | 0,7 | Moda | 0,50 |
| 933 | 1,1 | Variância da amostra | 4,99 |
| 936 | 0,5 | | |
| 940 | 0,7 | | |
| 943 | 0,6 | | |
| 943 | 0,5 | | |
| 948 | 0,3 | | |
| 951 | 0,7 | | |
| 929.6 | média | | |

T4.2.14 Tempo de ignição com esfera de 14,3mm em caruma “seca”

Os resultados obtidos com esferas quentes de 20 mm de diâmetro e 32,63 g de massa, são apresentados no gráfico G4.2.17.



G4.2.17 Ensaios de ignição com esfera de 20mm em caruma a 1,2% de humidade

Quantidade de ensaios total - 21

Condições ambientais: Humidade máxima do ar 50%; Humidade mínima do ar 49%

Temperatura mínima do ar 27 °C; Temperatura máxima do ar 27 °C

Teor de humidade - 1 medição de 1,2%

O valor máximo sem ignição foi 853 °C e o valor mínimo com ignição foi 797 °C.

| Tig(°C) | tig(s) | Análise do T.ignição | |
|------------|--------|----------------------|-------------|
| 797 | 1,7 | Desvio-padrão | 3,38 |
| 842 | 1,8 | Erro-padrão | 1,51 |
| 865 | 8,8 | Máximo | 8,8 |
| 869 | 1,3 | Média | 2,82 |
| 877 | 0,5 | Mediana | 1,70 |
| 850 | média | Mínimo | 0,5 |
| | | Moda | #N/D |
| | | Variância da amostra | 11,44 |

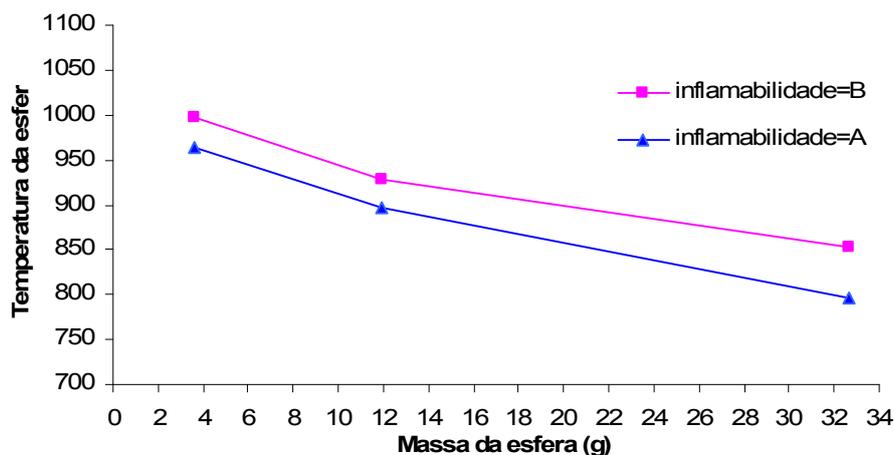
T4.2.15 Tempo de ignição com esfera de 20mm em caruma “seca”

Apresentam-se todos os resultados obtidos na tabela T4.2.16.

| A | B | C | D | E | F1 | G1 | F2 | G2 | H | I | J |
|------------|------------|------|--------|--------------|------|--------|------|--------|------|------|-------|
| t min | t máx. | hum. | diam | massa | Tmin | hr máx | Tmáx | hr min | nº | larg | tig |
| c/ig | s/ig | esp. | esfera | esfera | atm | atm | atm | atm | exp. | B-A | médio |
| °C | °C | % | (mm) | (g) | °C | % | °C | % | Qt. | °C | (s) |
| 964 | 997 | 2,38 | 10 | 3,59 | 26 | 55 | 30 | 46 | 35 | 33 | 0,48 |
| 896 | 929 | 0,3 | 14,3 | 11,88 | 27 | 60 | 30 | 45 | 21 | 33 | 1,28 |
| 797 | 853 | 1,2 | 20 | 32,63 | 27 | 50 | 27 | 49 | 21 | 56 | 2,82 |

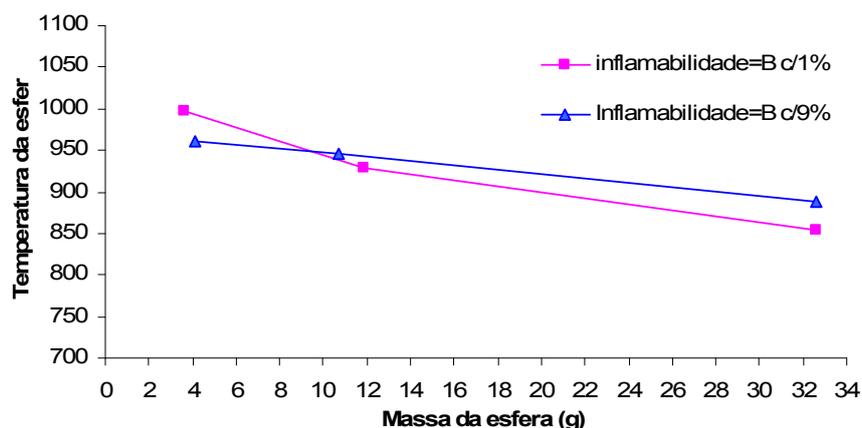
T4.2.16 Resultados de inflamabilidade com esferas em caruma com cerca “seca”

Com os resultados obtidos das três séries de experiências, valores a negrito da tabela T4.2.16, realizou-se o gráfico G4.2.18.



G4.2.18 Inflamabilidade da caruma “seca”

Para se saber qual o efeito do teor de humidade far-se-á uma comparação entre as linhas B dos gráficos G4.2.13 e G4.2.18 no gráfico G4.2.19.

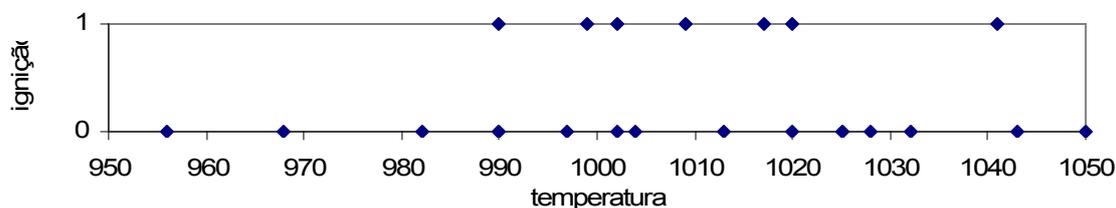


G4.2.19 Inflamabilidade da caruma em função do teor de humidade

A redução do teor de humidade reduziu a temperatura de ignição como era esperado mas à exceção de para a massa com cerca de 4 g. Para esta exceção não há explicação, não se compreendem totalmente os mecanismos físico-químicos da secagem, Figueiredo (1999) e da pirólise, André (1996).

4.2.5-Inflamabilidade do eucalipto com cerca de 10% de teor de humidade

Os resultados obtidos com esferas quentes de 9,5 mm de diâmetro e 3,3 g de massa, são apresentados no gráfico G4.2.20 3.5.1.



G4.2.20 Ensaio de ignição com esfera de 9,5 mm em eucalipto a 6,9% de humidade

Quantidade de ensaios total - 24

Condições ambientais: Humidade máxima do ar 46%; Humidade mínima do ar 42%

Temperatura mínima do ar 30 °C; Temperatura máxima do ar 30 °C

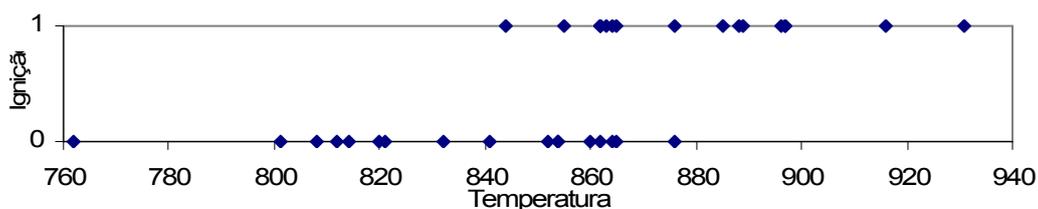
O valor máximo sem ignição foi 1050 °C e o valor mínimo com ignição foi 990 °C.

Nota - pode haver falta de ensaios visto que o valor máximo sem ignição supera o valor máximo com ignição apesar de a diferença entre extremos ser de 60 °C. Deviam-se ter feito mais ensaios acima de 1050 °C pois será provável que o valor sem ignição se aproxime de 1100 °C.

| Tig(°C) | tig(s) | Análise do tempo de ignição | |
|-------------|--------|-----------------------------|-------------|
| 990 | 0,3 | Desvio-padrão | 0,10 |
| 999 | 0,5 | Erro-padrão | 0,04 |
| 1002 | 0,3 | Máximo | 0,5 |
| 1009 | 0,3 | Média | 0,36 |
| 1017 | 0,3 | Mediana | 0,30 |
| 1020 | 0,5 | Mínimo | 0,3 |
| 1041 | 0,3 | Moda | 0,30 |
| 1011 | média | Variância da amostra | 0,01 |

T4.2.17 Tempo de ignição com esfera de 9,5 mm em eucalipto a 6,9% de humidade

Os resultados obtidos com esferas quentes de 14 mm de diâmetro e 10,68 g de massa, são apresentados no gráfico G4.2.21.



G4.2.21 Ensaio de ignição com esfera de 14 mm em eucalipto a 7,8% de humidade

Quantidade de ensaios total - 34

Condições ambientais: Humidade máxima do ar 75%; Humidade mínima do ar 52%

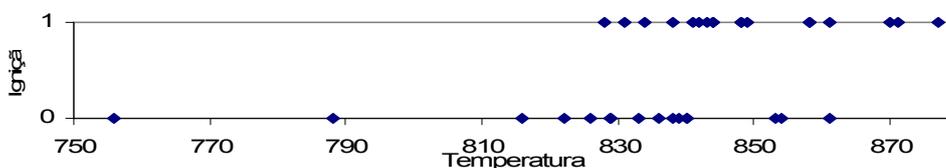
Temperatura mínima do ar 24°C; Temperatura máxima do ar 30°C

O valor máximo sem ignição foi 876 °C e o valor mínimo com ignição foi 844 °C.

| Tig(°C) | tig(s) | Análise do tempo de ignição | |
|--------------|--------|-----------------------------|------------|
| 844 | 1,7 | Desvio-padrão | 0,82 |
| 855 | 2,3 | Erro-padrão | 0,20 |
| 862 | 1,9 | Máximo | 3,8 |
| 862 | 2 | Média | 1,4 |
| 862 | 1,4 | Mediana | 1,20 |
| 863 | 1,7 | Mínimo | 0,5 |
| 864 | 3,8 | Moda | 0,70 |
| 865 | 1,6 | Variância da amostra | 0,68 |
| 876 | 1,2 | | |
| 885 | 0,7 | | |
| 888 | 0,8 | | |
| 889 | 0,7 | | |
| 896 | 1 | | |
| 897 | 0,7 | | |
| 897 | 1,1 | | |
| 916 | 0,7 | | |
| 931 | 0,5 | | |
| 879,5 | média | | |

T4.2.18 Tempo de ignição com esfera de 14 mm em eucalipto a 7,8% de humidade

Os resultados obtidos com esferas quentes de 20mm de diâmetro e 32,63g de massa, são apresentados no gráfico seguinte G4.2.22.



G4.2.22 Ensaio de ignição com esfera de 20mm em eucalipto a 7,7% de humidade

Quantidade de ensaios total - 35

Condições ambientais: Humidade máxima do ar 56%; Humidade mínima do ar 46%

Temperatura mínima do ar 25 °C; Temperatura máxima do ar 28 °C

O valor máximo sem ignição foi 861 °C e o valor mínimo com ignição foi 828 °C.

| Tig(°C) | tig(s) | Análise do tempo de ignição | |
|------------|--------|-----------------------------|-------------|
| 828 | 6 | Desvio-padrão | 1,59 |
| 831 | 5,5 | Erro-padrão | 0,38 |
| 834 | 3,3 | Máximo | 6,0 |
| 838 | 2,2 | Média | 2,49 |
| 841 | 0,9 | Mediana | 2,00 |
| 842 | 0,9 | Mínimo | 0,8 |
| 843 | 1,9 | Moda | 0,90 |
| 844 | 1,7 | Variância da amostra | 2,54 |
| 844 | 2,1 | | |
| 848 | 1,4 | | |
| 848 | 1,6 | | |
| 849 | 5,2 | | |
| 858 | 3,1 | | |
| 858 | 3 | | |
| 861 | 1,8 | | |

| | | | |
|--------------|-------|--|--|
| 870 | 1,3 | | |
| 871 | 2,1 | | |
| 877 | 0,8 | | |
| 849,1 | média | | |

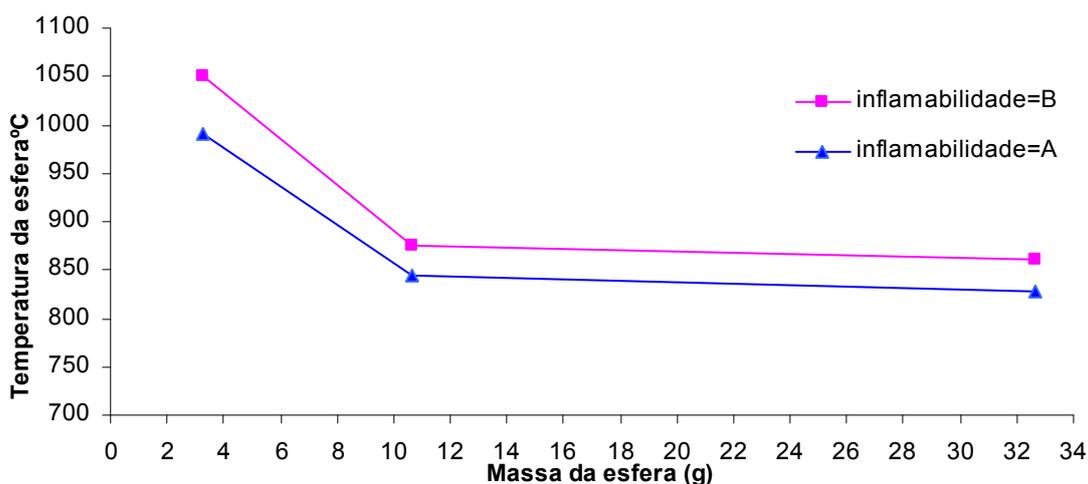
T4.2.19 Tempo de ignição com esfera de 20mm em eucalipto a 7,7% de humidade

Apresentam-se todos os resultados obtidos na tabela T4.2.20.

| A | B | C | D | E | F1 | G1 | F2 | G2 | H | I | J |
|------------|-------------|------|--------|--------------|------|--------|------|--------|------|------|-------|
| t min | t máx. | hum. | diam | massa | Tmin | hr máx | Tmáx | hr min | nº | larg | tig |
| c/ig | s/ig | esp. | esfera | esfera | atm | atm | atm | atm | exp. | B-A | médio |
| °C | °C | % | (mm) | (g) | °C | % | °C | % | Qt. | °C | (s) |
| 990 | 1050 | 6,9 | 9,5 | 3,3 | 30 | 46 | 30 | 42 | 24 | 60 | 0,3 |
| 844 | 876 | 7,75 | 14 | 10,68 | 24 | 75 | 30 | 52 | 34 | 32 | 1,4 |
| 828 | 861 | 7,7 | 20 | 32,63 | 25 | 56 | 28 | 46 | 35 | 33 | 2,49 |

T4.2.20 Resultados de inflamabilidade com esferas em eucalipto com cerca de 10% de humidade

Com os resultados obtidos das três séries de experiências, valores a negrito da tabela T4.2.20, realizou-se o gráfico G4.2.23.



G4.2.23 Inflamabilidade do eucalipto com cerca de 10% de teor de humidade

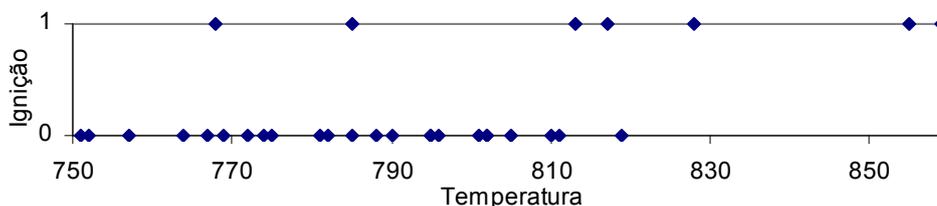
Os resultados estão de acordo com o esperado mas a concavidade parece ser exagerada. Ao comparar-se os resultados obtidos pela esfera de 14 mm com os dados que já se possuíam para eucalipto seco também pela esfera de 14 mm, estes valores eram inferiores quando deviam ser superiores, pelo que se suspeitou que estariam errados. Assim, foi repetida esta série de ensaios mas os novos resultados vieram confirmar os resultados obtidos anteriormente.

O valor máximo sem ignição foi 905 °C e o valor mínimo com ignição foi 858 °C.

| Tig(°C) | tig(s) | Análise do tempo de ignição | |
|--------------|--------|-----------------------------|-------------|
| 858 | 1,5 | Desvio-padrão | 2,04 |
| 872 | 0,8 | Erro-padrão | 0,53 |
| 872 | 0,6 | Máximo | 8,6 |
| 886 | 8,6 | Média | 1,33 |
| 890 | 1,1 | Mediana | 0,60 |
| 893 | 0,6 | Mínimo | 0,4 |
| 894 | 1,3 | Moda | 0,60 |
| 896 | 0,6 | Variância da amostra | 4,17 |
| 901 | 0,6 | | |
| 901 | 1,4 | | |
| 906 | 0,5 | | |
| 908 | 0,6 | | |
| 912 | 0,4 | | |
| 930 | 0,7 | | |
| 931 | 0,6 | | |
| 896,7 | média | | |

T4.2.22 Tempo de ignição com esfera de 14mm em eucalipto “seco”

Os resultados obtidos com esferas quentes de 20 mm de diâmetro e 32,77 g de massa, são apresentados no gráfico G4.2.26.



G4.2.26 Ensaio de ignição com esfera de 20mm em eucalipto a 1,3% de humidade

Quantidade de ensaios total - 32

Condições ambientais: Humidade máxima do ar 62%; Humidade mínima do ar 50%

Temperatura mínima do ar 26 °C; Temperatura máxima do ar 27 °C

Teor de humidade - 8 medições, média 1,3%

O valor máximo sem ignição foi 819 °C e o valor mínimo com ignição foi 768 °C.

| Tig(°C) | tig(s) | Análise do tempo de ignição | |
|--------------|--------|-----------------------------|-------------|
| 768 | 2,9 | Desvio-padrão | 0,82 |
| 785 | 0,6 | Erro-padrão | 0,31 |
| 813 | 1,8 | Máximo | 2,9 |
| 817 | 1,2 | Média | 1,27 |
| 828 | 0,7 | Mediana | 0,90 |
| 855 | 0,8 | Mínimo | 0,6 |
| 859 | 0,9 | Moda | #N/D |
| 817,8 | média | Variância da amostra | 0,68 |

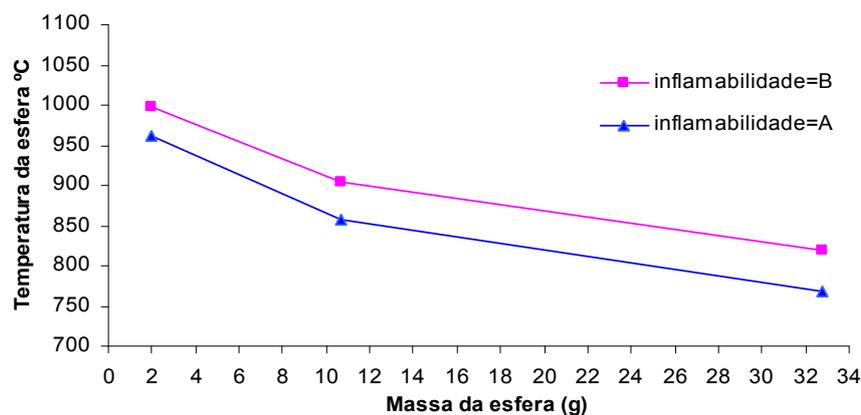
T4.2.22 Tempo de ignição com esfera de 20 mm em eucalipto “seco”

Apresentam-se todos os resultados obtidos na tabela T4.2.23.

| A | B | C | D | E | F1 | G1 | F2 | G2 | H | I | J |
|------------|------------|------|--------|--------------|------|--------|------|--------|------|------|-------|
| t min | t máx. | hum. | diam | massa | Tmin | hr máx | Tmáx | hr min | nº | larg | tig |
| c/ig | s/ig | esp. | esfera | esfera | atm | atm | atm | atm | exp. | B-A | médio |
| °C | °C | % | (mm) | (g) | °C | % | °C | % | Qt. | °C | (s) |
| 961 | 997 | 1,6 | 8 | 2 | 30 | 50 | 31 | 46 | 23 | 36 | 0,64 |
| 858 | 905 | 0,7 | 14 | 10,68 | 25 | 61 | 30 | 44 | 33 | 47 | 1,33 |
| 768 | 819 | 1,26 | 20 | 32,77 | 26 | 62 | 27 | 50 | 32 | 51 | 1,27 |

T4.2.23 Resultados de inflamabilidade com esferas em eucalipto com cerca de 0% de humidade

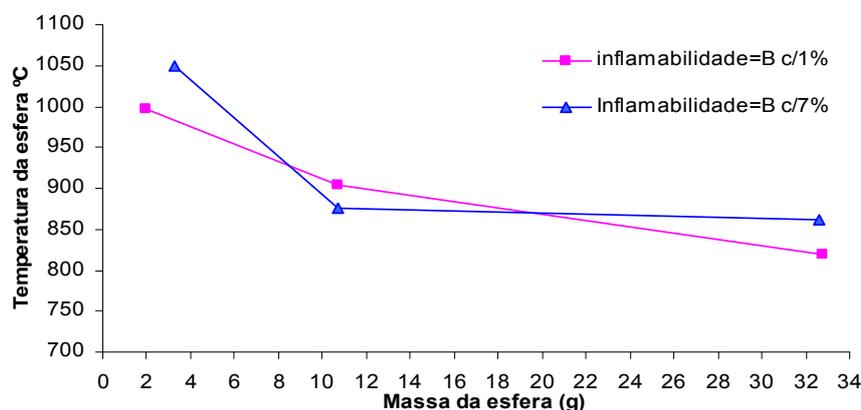
Com os resultados obtidos das três séries de experiências, valores a negrito da tabela T4.2.23, realizou-se o gráfico G4.2.27.



G4.2.27 Inflamabilidade do eucalipto "seco"]

Os resultados estão de acordo com o esperado.

Para se saber qual o efeito do teor de humidade far-se-á através de gráfico G4.2.28, uma comparação entre as linhas B dos gráficos G4.2.23 e G4.2.27

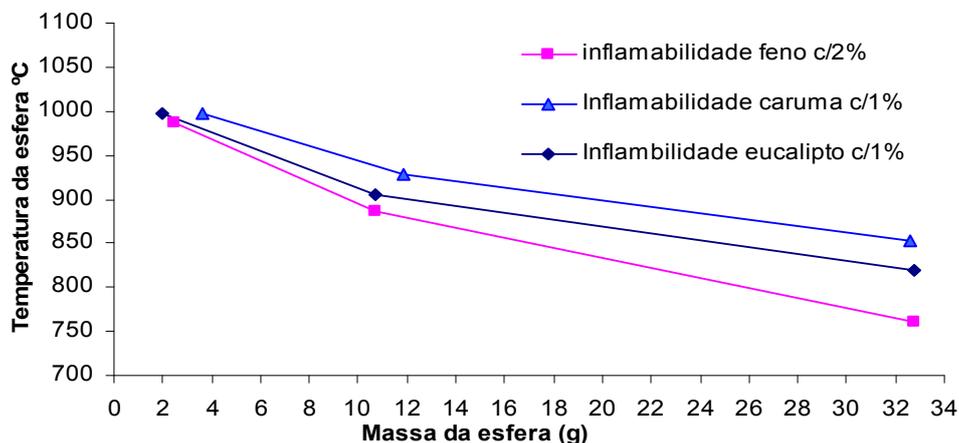


G4.2.28 Inflamabilidade do eucalipto em função do teor de humidade

A redução do teor de humidade reduziu a temperatura de ignição como era esperado só em dois pontos. O normal seria em todos os pontos. Como foi confirmado que não terá havido erros de leitura de temperatura, uma explicação provável terá a haver que para esta massa, com

cerca de 10% teor de humidade, esta pequena quantidade de água contribuirá para uma redução da energia necessária nos mecanismos físico-químicos de calor sensível e pirólise, baixando a temperatura de ignição.

Para saber qual será a espécie mais inflamável e a menos inflamável far-se-á uma comparação entre as linhas B com o teor a cerca de 0% de humidade dos gráficos G4.2.8, G4.2.19 e G4.2.28 no gráfico G4.2.29.

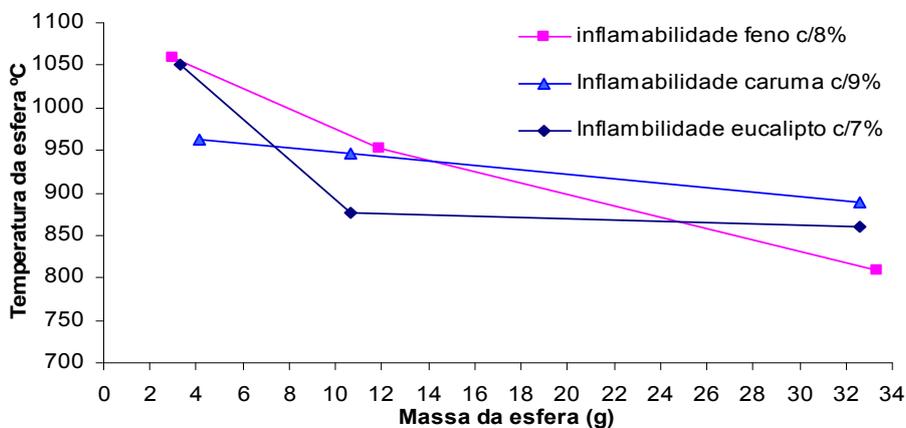


G4.2.29 Inflamabilidade das três espécies (limite superior) cerca de 1% de teor de humidade

Verifica-se que a espécie mais inflamável é o fenó e a menos inflamável é a caruma.

Pela análise do gráfico parece que quanto maior é a massa da partícula maior são as diferenças de inflamabilidade, quando a massa da partícula tende para zero parece que existirá uma temperatura de ignição comum às três espécies.

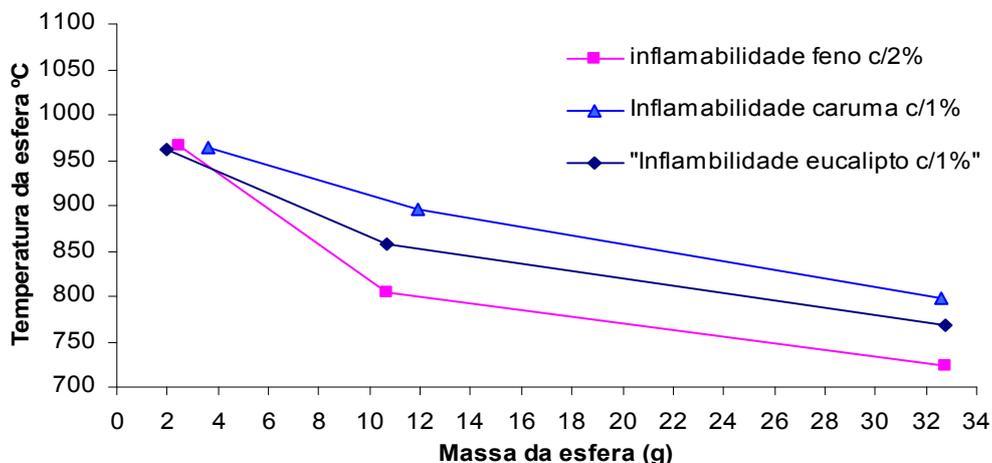
Para apurar melhor as diferenças entre as espécies e a tendência da inflamabilidade em função da massa das partículas far-se-á uma comparação entre as linhas B, agora com o teor a cerca de 10% de humidade dos mesmos gráficos G4.2.8, G4.2.19 e G4.2.28 no gráfico G4.2.30.



G4.2.30 Inflamabilidade das três espécies (limite superior) a cerca de 8% de teor de humidade

Pela análise do gráfico G4.2.30, depreende-se que as espécies quando têm 10% de teor de humidade têm um comportamento muito diferente entre elas para partículas entre 11 a 12 g.

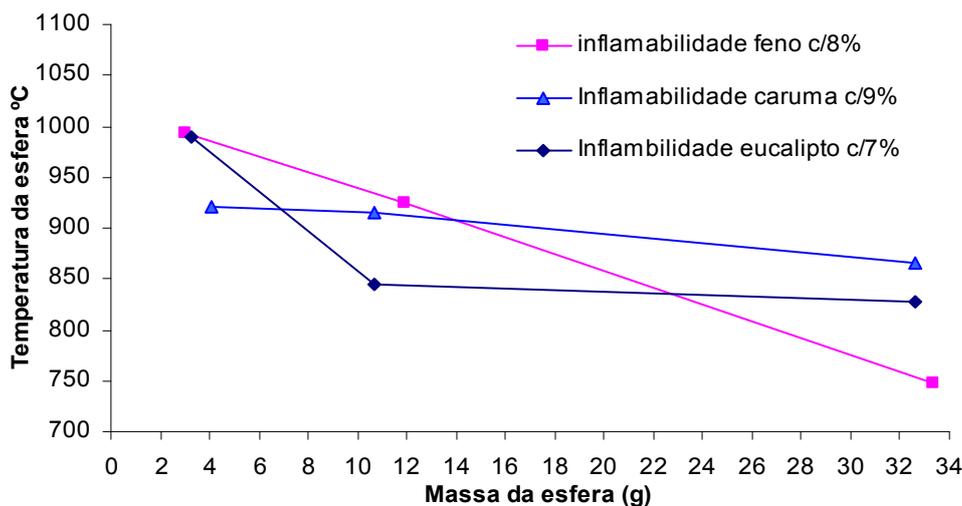
Para apurar melhor as diferenças entre as espécies e a tendência da inflamabilidade em função da massa das partículas far-se-á uma comparação entre as linhas A, com o teor a cerca de 0% de humidade no gráfico G4.2.31.



G4.2.31 Inflamabilidade das três espécies (limite inferior) a cerca de 1% de teor de humidade

Este gráfico vem confirmar os resultados obtidos com o gráfico G4.2.29 - quanto maior é a massa da partícula maior são as diferenças de inflamabilidade, enquanto que quando a massa da partícula tende para zero parece que existirá uma temperatura de ignição comum às três espécies.

O gráfico G4.2.32, fará uma comparação entre as linhas A, com o teor a cerca de 10% de humidade.



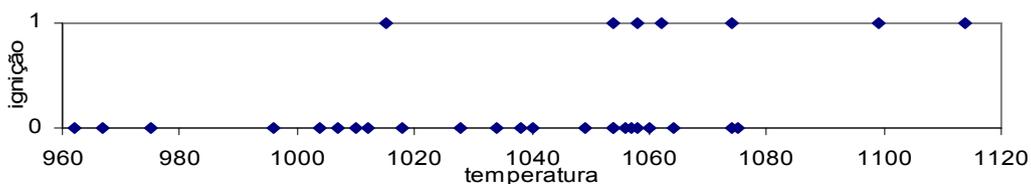
G4.2.32 Inflamabilidade das três espécies (limite inferior) a cerca de 8% de teor de humidade

Pela análise do gráfico G4.2.32, confirma-se que as espécies quando têm 10% de teor de humidade têm um comportamento muito diferente entre elas, para ignições provocadas com partículas com cerca de 11 a 12 g.

4.3-Inflamabilidade da caruma com cerca de 10% de teor de humidade (5 massas)

Para se saber qual a tendência da inflamabilidade em função da massa nos seus extremos, teriam que se fazer mais ensaios com outras massas, uma mais pequena e uma muito maior, assim fabricaram-se duas esferas, uma de 5 mm e uma de 37 mm, com as quais se realizaram mais ensaios com caruma, cujos resultados se apresentam neste capítulo, para que as comparações atrás expostas, entre as três espécies tivessem em comum três valores diferentes de massas.

Os resultados obtidos com esferas quentes de 5mm de diâmetro e 0,52 g de massa, são apresentados no gráfico G4.3.1



G4.3.1 Ensaios de ignição com esfera de 5mm em caruma a 7,7% de humidade

Quantidade de ensaios total - 30

Condições ambientais: Humidade máxima do ar 52%; Humidade mínima do ar 38%

Temperatura mínima do ar 26 °C; Temperatura máxima do ar 30 °C

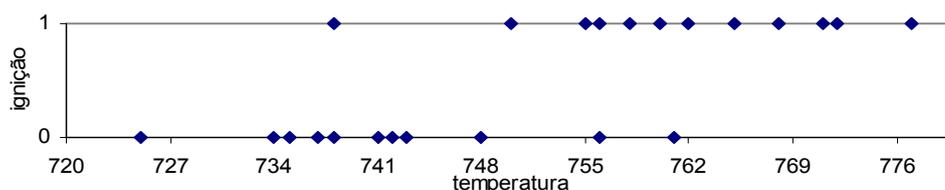
O valor máximo sem ignição foi 1075 °C e o valor mínimo com ignição foi 1015 °C.

| Tig(°C) | tig(s) | Análise do tempo de ignição | | Tig(°C)* | tig(s)* |
|-------------|--------|-----------------------------|------|---------------|-------------|
| 1015 | 0,4 | Média | 0,66 | 1015 | 0,4 |
| 1054 | 0,4 | Erro-padrão | 0,17 | 1054 | 0,4 |
| 1058 | 0,7 | Mediana | 0,40 | | |
| 1062 | 1,5 | Moda | 0,40 | | |
| 1074 | 1 | Desvio-padrão | 0,45 | | |
| 1099 | 0,2 | Variância da amostra | 0,21 | 1099 | 0,2 |
| 1114 | 0,4 | Mínimo | 0,2 | 1114 | 0,4 |
| 1068 | média | Máximo | 1,5 | 1070,5 | 0,35 |

T4.3.1 Tempo de ignição com esfera de 5mm em caruma a 7,7% de humidade

* Nesta tabela para efeito do cálculo das médias de temperatura e tempo de ignição foram retirados três resultados com tempo excessivo, estas médias* serão utilizadas na secção 4.4.2.

Os resultados obtidos com esferas quentes de 37 mm de diâmetro e 206,6 g de massa, são apresentados no gráfico G4.3.2.



G4.3.2 Ensaios de ignição com esfera de 37mm em caruma a 8,2% de humidade

Quantidade de ensaios total - 24

Condições ambientais: Humidade máxima do ar 40%; Humidade mínima do ar 32%

Temperatura mínima do ar 25 °C; Temperatura máxima do ar 33 °C

O valor máximo sem ignição foi 761°C e o valor mínimo com ignição foi 738 °C.

| Tig(°C) | tig(s) | Análise do tempo de ignição | | Tig(°C) | tig(s) |
|------------|--------|-----------------------------|-------------|--------------|-------------|
| 738 | 2,8 | Desvio-padrão | 1,89 | 738 | 2,8 |
| 750 | 7,8 | Erro-padrão | 0,55 | | |
| 755 | 7,1 | Máximo | 7,8 | | |
| 756 | 6,4 | Média | 4,68 | | |
| 758 | 5,5 | Mediana | 5,00 | 758 | 5,5 |
| 760 | 3 | Mínimo | 2 | 760 | 3 |
| 762 | 5 | Moda | 3 | 762 | 5 |
| 765 | 5,5 | Variância da amostra | 3,57 | 765 | 5,5 |
| 768 | 5 | | | 768 | 5 |
| 771 | 2 | | | 771 | 2 |
| 772 | 3 | | | 772 | 3 |
| 777 | 3 | | | 777 | 3 |
| 761 | média | | | 763,4 | 3,87 |

T4.3.2 Tempo de ignição com esfera de 37mm em caruma a 8,2% de humidade

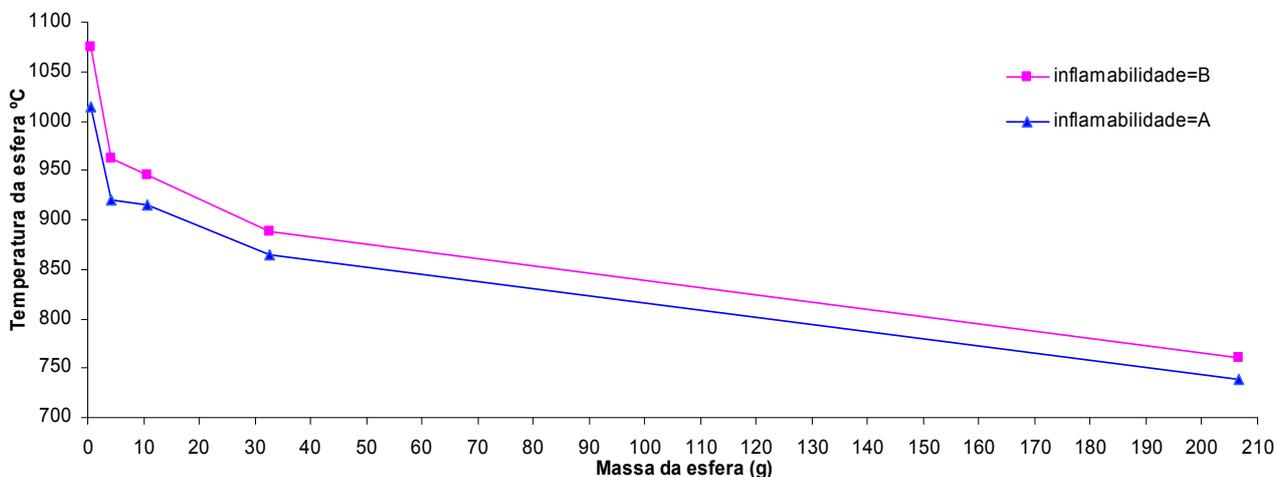
* Nesta tabela para efeito do cálculo das médias de temperatura e tempo de ignição foram retirados três resultados com tempo excessivo, estas médias* serão utilizadas na secção 4.4.2.

Apresentam-se todos os resultados agora obtidos juntamente com os já apresentados na tabela T4.2.12 na tabela T4.3.3.

| t min | t máx. | hum. | diam | massa | Tmin | hr máx | Tmáx | hr min | n° | larg | tig | Tig |
|-------------|-------------|------|--------|--------------|------|--------|------|--------|------|------|-------|-------|
| c/ig | s/ig | esp. | esfera | esfera | atm | atm | atm | atm | exp. | B-A | médio | média |
| °C | °C | % | (mm) | (g) | °C | % | °C | % | Qt. | °C | (s) | °C |
| 1015 | 1075 | 7,7 | 5 | 0,52 | 26 | 52 | 30 | 38 | 30 | 60 | 0,4 | 1068 |
| 921 | 962 | 7,65 | 10,1 | 4,1 | 26 | 52 | 28 | 42 | 30 | 41 | 1,06 | 946,7 |
| 915 | 946 | 9,6 | 14 | 10,68 | 28 | 54 | 30 | 46 | 35 | 31 | 1,49 | 938,3 |
| 865 | 889 | 8,95 | 20 | 32,63 | 25 | 62 | 28 | 46 | 25 | 24 | 2,53 | 875,6 |
| 738 | 761 | 8,2 | 37 | 206,6 | 25 | 40 | 33 | 32 | 24 | 23 | 4,68 | 761 |

T4.3.3 Resultados de inflamabilidade com esferas em caruma com cerca de 10% de humidade

Com os resultados obtidos das cinco séries de experiências, valores a negrito, realizou-se o gráfico G4.3.3.



G4.3.3 Inflamabilidade da caruma c/ humidade [7,7;9,6]

Confirma-se que a temperatura de inflamabilidade depende da massa da esfera, quanto maior a massa da partícula menor será a temperatura que é necessária para se conseguir a inflamação da caruma. Será natural que para massas ainda maiores que 210 g a inclinação da curva se reduza, tendendo no infinito para uma reta horizontal.

Constata-se que quando a massa tender para zero a temperatura crescerá exponencialmente.

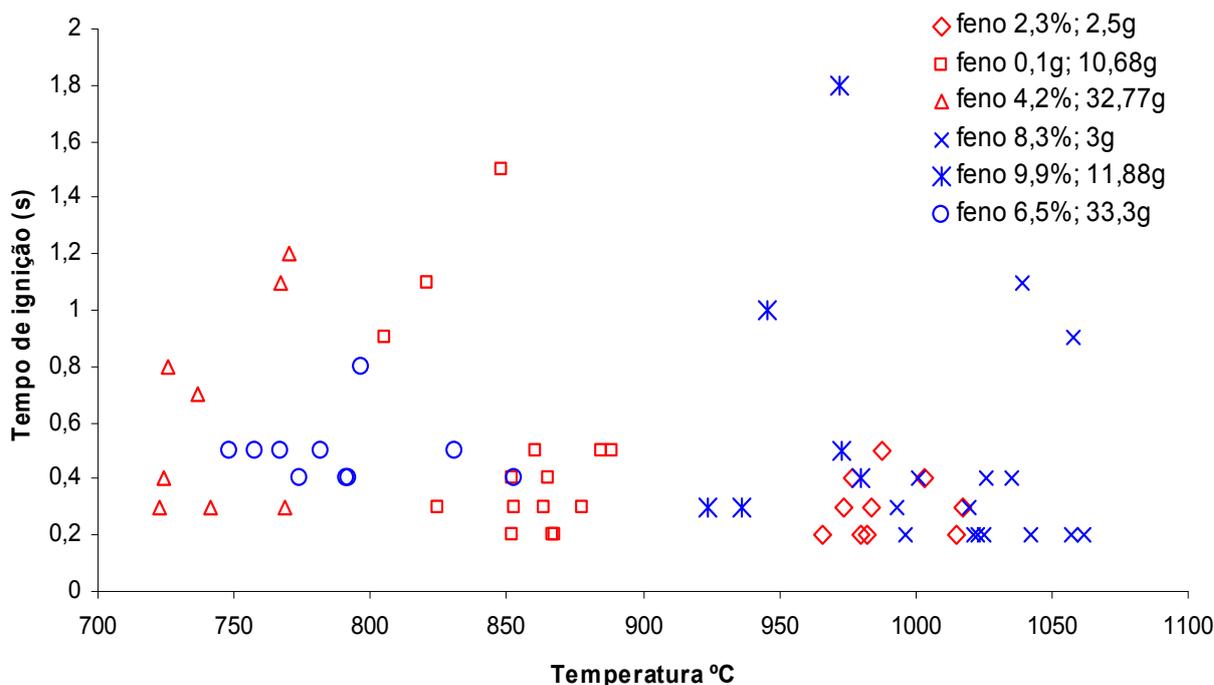
O mesmo comportamento se prevê para as outras espécies.

4.4-Tempo de ignição

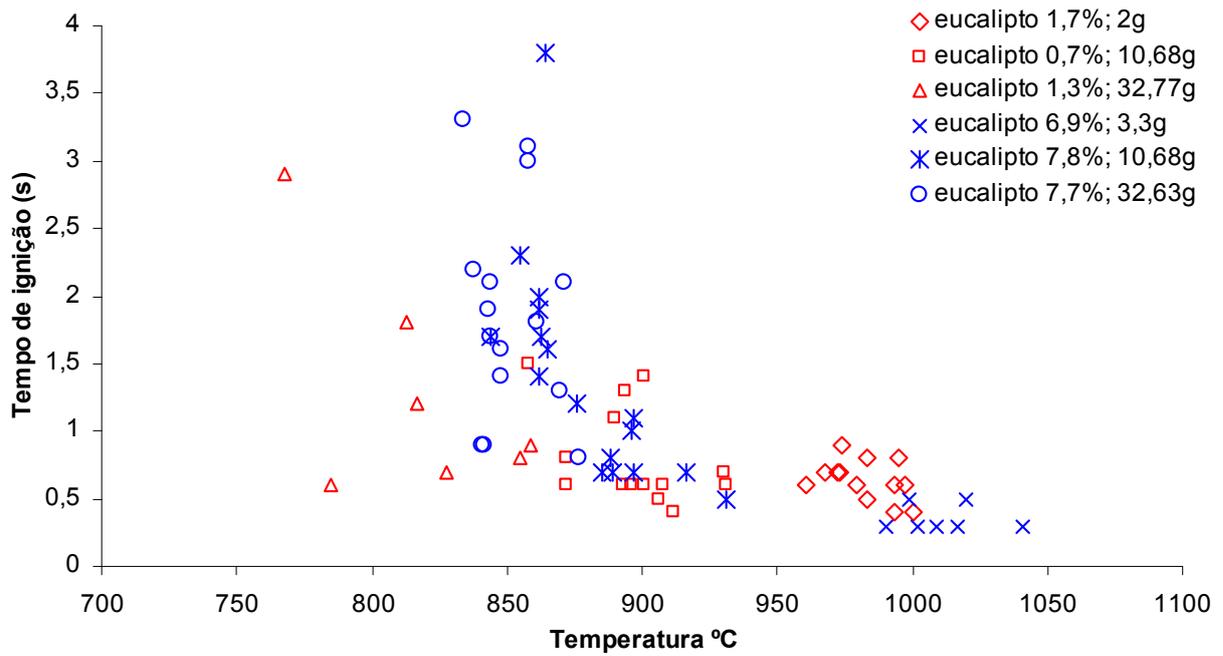
Em cada experiência positiva foi cronometrado o tempo de ignição aquando da visualização dos filmes dos ensaios em que se repetiam as vezes necessárias até apurar o respectivo tempo de ignição em especial quando os tempos eram inferiores a um segundo.

Não foi apurado o efeito da massa no tempo de ignição, visto que para tal teríamos de fazer as experiências das diferentes massas, a uma temperatura constante. Isto não será fácil porque aquecer a esfera de 37 mm a 1100 °C é inviável com propano, obrigando a uma chama muito grande, o que iria danificar os termopares, só será possível por exemplo com maçarico a funcionar a acetileno e oxigénio, que tem uma chama pequena e mais energética.

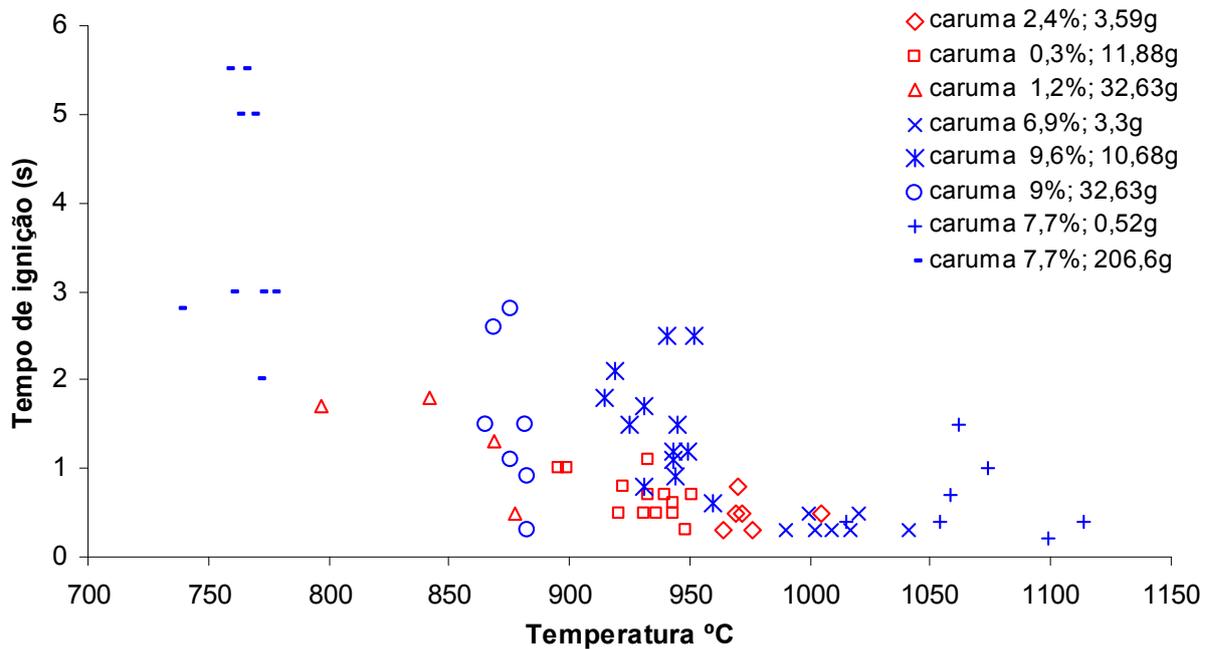
Para uma visão mais ampla dos resultados do tempo de ignição versus temperatura apresentam-se gráficos por cada espécie com todos os resultados positivos:



G4.4.1 Tempo de ignição do feno



G4.4.2 Tempo de ignição do eucalipto



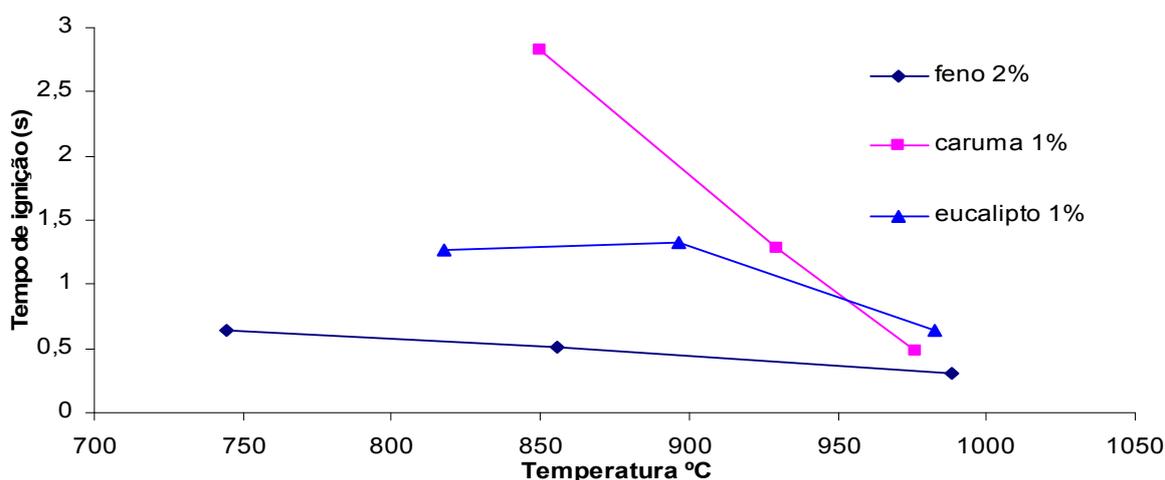
G4.4.3 Tempo de ignição da caruma

4.4.1-Tempo de ignição das espécies “secas” (próximas de 1% de teor de humidade)

Para a elaboração do gráfico de comparação do tempo de ignição foi necessário determinar previamente as temperaturas médias correspondentes aos tempos de ignição que se apresentam na tabela T4.4.1.

| | A | B | B | C | D | J | K |
|-----------|------|-------|------|--------|--------|-------------|--------------|
| | Tmin | Tmáx. | hum. | diam | massa | tig | Tig |
| | c/ig | s/ig | esp. | esfera | esfera | médio | médio |
| espécie | °C | °C | % | (mm) | (g) | (s) | °C |
| feno | 966 | 986 | 2,3 | 8,5 | 2,5 | 0,3 | 988,6 |
| feno | 805 | 886 | 0,1 | 14 | 10,68 | 0,51 | 855,5 |
| feno | 723 | 761 | 4,15 | 20,1 | 32,77 | 0,64 | 744,6 |
| caruma | 964 | 997 | 2,38 | 10 | 3,59 | 0,48 | 976 |
| caruma | 896 | 929 | 0,3 | 14,3 | 11,88 | 1,28 | 929,6 |
| caruma | 797 | 853 | 1,2 | 20 | 32,63 | 2,82 | 850 |
| eucalipto | 961 | 997 | 1,6 | 8 | 2 | 0,64 | 982,4 |
| eucalipto | 858 | 905 | 0,7 | 14 | 10,68 | 1,33 | 896,7 |
| eucalipto | 768 | 819 | 1,26 | 20 | 32,77 | 1,27 | 817,9 |

Tabela 4.4.1 temperaturas e tempos médios de ignição das três espécies



G4.4.4 Tempo de ignição das três espécies

Os valores variam em função da temperatura. Quanto maior a temperatura, menor será o tempo de ignição. Quando o tempo se aproxima de zero segundos, parece que todas as espécies convergem para uma dada temperatura que será superior a 1000 °C.

Da análise deste gráfico consta-se que a espécie mais rápida a inflamar-se é o feno a mais lenta a inflamar-se é a caruma.

4.4.2-Tempo de ignição da caruma com cerca de 10% de teor de humidade

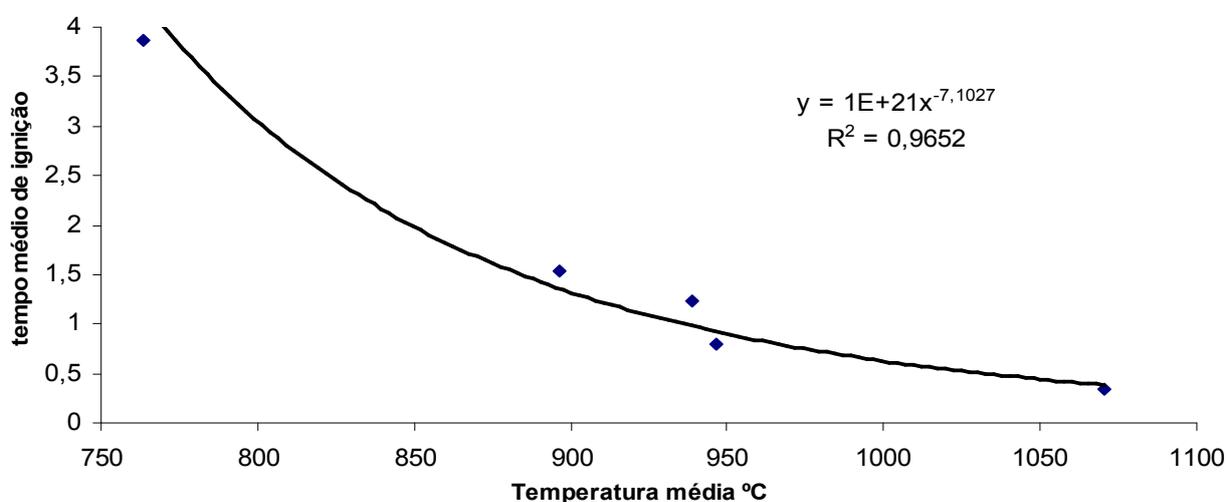
Como a temperatura e a massa estão interligadas, serão apresentados gráficos do tempo de ignição em função da temperatura e da massa para a caruma, já que temos cinco massas

diferentes o que permite melhores resultados do que com três séries. Para a elaboração deste gráfico foi feita uma correção às médias do tempo e temperaturas de ignição, para tal foram retirados os resultados com tempo excessivo.

A tabela T4.3.2 apresenta os dados obtidos das cinco séries de caruma para a realização do gráfico G4.4.5

| Tmin | Tmáx. | hum. | diam | massa | tig* | Tig* |
|------|-------|------|--------|--------|-------------|---------------|
| c/ig | s/ig | esp. | esfera | esfera | médio | médio |
| °C | °C | % | (mm) | (g) | (s) | °C |
| 1015 | 1075 | 7,7 | 5 | 0,52 | 0,35 | 1070,5 |
| 921 | 962 | 7,65 | 10,1 | 4,1 | 0,79 | 946,3 |
| 915 | 946 | 9,6 | 14 | 10,68 | 1,23 | 938,6 |
| 865 | 889 | 8,95 | 20 | 32,63 | 1,53 | 896,3 |
| 738 | 761 | 8,2 | 37 | 206,6 | 3,87 | 763,44 |

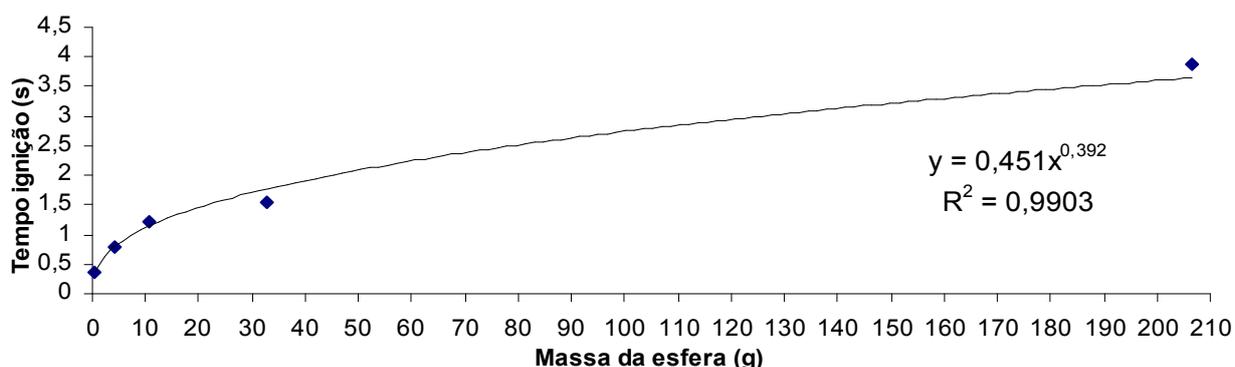
T4.3.2 Tempos e temperaturas médias de ignição da caruma c/ humidade [7,7;9,6]



G4.4.5 Tempo de ignição/temperatura da caruma c/ humidade [7,7;9,6]

O tempo de ignição da caruma diminui com o aumento da temperatura, em que a curva faz uma concavidade voltada para cima parecendo convergir para 1200°C quando se aproxima de zero segundos.

Para terminar apresenta-se o gráfico G4.4.6 relativo ao tempo de ignição em função das massas em jogo, para ignição da caruma.



G4.4.6 Tempo médio de ignição da caruma c/ humidade [7,7;9,6]

Conclui-se pela análise deste gráfico que quanto mais pequena for a massa quente, o que implica maior temperatura da esfera, mais pequeno será o respectivo tempo de ignição. Quando a massa tende para zero o tempo de ignição também tende para zero.

Com a equação apresentada no gráfico podem-se calcular os valores do tempo de ignição para esferas com outras massas.

4.4.3- Energia de ignição da caruma com cerca de 10% de teor de humidade

Supunha-se que a capacidade calorífica do metal fosse importante talvez mais do que a temperatura para a ignição das espécies, assim terá de se determinar qual a energia em questão. Acontece que a utilização das esferas sem a preocupação do material que elas são constituídas levou a que este trabalho se atrasasse pois deparava-se num beco sem saída. Desconhece-se a composição de cada esfera. Também das tabelas existentes, a tabela A1 só apresenta valores do calor específico (c_p) para o ferro puro e o aço inox AISI 304, até 1500 K, enquanto que para os outros aços só apresenta valores até 1000 K.

Sabendo-se que algumas das esferas foram feitas com aço ordinário, as percentagens de carbono e de outros elementos é desconhecida mas ela será diminuta, assim vai-se basear os cálculos do calor específico no ferro puro.

Ao aplicar-se os dados para 1000 K e 1200 K constatou-se que face aos resultados os dados deveriam estar errados pois com um máximo do calor específico para cerca de 1000 K que é de 975 J/(kg.k) e aos 1200 K descia para 609 J/(kg.k), os cálculos apresentam mais energia para temperaturas mais baixas, o que era impossível, pois, as esferas durante o arrefecimento ao emitirem radiação estão a perder energia e não a aumentá-la. Teria que se encontrar algum aço que tivesse uma curva de c_p adequado às curvas de arrefecimento obtidas, após alguma pesquisa das características térmicas dos metais, o gráfico do c_p exibido na página 402, volume I de Metals Handbook, mostra para dois tipos de ferro fundido (3 a 4% em C) uma variação brusca do c_p para cerca de 723 F devido a uma transformação metalúrgica que ocorre não a essa temperatura pois terá de ser a 723 °C de acordo com Honeycombe (1982). Terá havido um erro na publicação na conversão das unidades do gráfico que foi retirado de (publicação europeia, que estaria em unidades internacionais) para o sistema imperial.

Honeycombe explica que nas ligas ferro-carbono há transformação austenite-ferrite, entre 600 e 910 °C de acordo com as percentagens em jogo, o que provoca queda brusca do c_p na transição. Para o ferro puro a transformação ocorre a 910 °C. Com este dado, com os dados seis pontos de c_p do ferro puro apresentados na tabela A1 de Figueiredo et al.(1993) e com o tipo de gráfico apresentado para o ferro fundido no Metals Handbook, estimou-se o c_p do ferro puro.

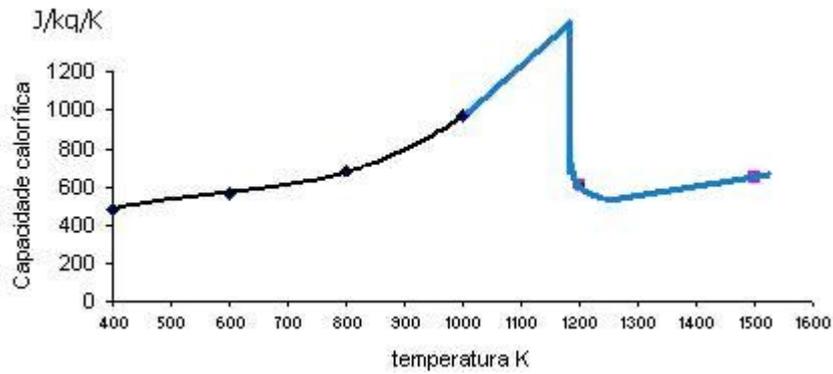


Figura 4.4.7 Estimativa do calor específico do Ferro puro

No gráfico de arrefecimento ao ar da esfera de 14 mm, experiência nº707, parece haver uma falha de leitura aos 600 °C, possivelmente devido ao mau acoplamento do termopar à esfera, mas poderá haver outra explicação para tal. Esta esfera é utilizada em rolamentos, normalmente o aço é do tipo 100 C6 ou AISI52100.

A composição principal do aço 100 C6 é 1% em C e 1,4% em Cr. Segundo o parecer pessoal da professora Teresa Vieira da FCTUC, após ela ter analisado as curvas temperatura - tempo desse aço, é que a anomalia registada aos 600 °C para essa curva de arrefecimento durante o arrefecimento, poderá ser oriunda das alterações metalúrgicas.

Apresentam-se em anexo o gráfico com as curvas de arrefecimento do aço 100 C6 (Fonte - norma NF A 35-551) e os gráficos de arrefecimento das esferas.

No gráfico de arrefecimento ao ar da esfera de 37 mm, experiência nº763, parece haver a transição de fase aos 653 °C, cerca de 100 segundos decorridos, pois a temperatura permaneceu constante durante algum tempo, a partir daí a curva de temperatura fica instável o que leva a supor que a transformação de fase parece ter contribuído para tal, assim sendo o teor de C será inferior a 1%.

No gráfico de arrefecimento da esfera de 10 mm ao ar, experiência nº706 parece não haver influência da transformação de fase pois a curva é sempre uniforme sem oscilações.

No gráfico de arrefecimento ao ar da esfera de 5 mm, experiência nº738, parece não haver transição de fase. Apesar de algumas pequenas oscilações a temperatura nunca se manteve constante.

Durante o desenrolar das experiências com todas as esferas, elas nunca se realizaram na zona de transição pelo que não terá havido influência das alterações metalúrgicas dos aços, que

poderiam originar desvios do c_p para efeitos do cálculo da energia de ignição.

Na determinação da energia de ignição vai-se só basear os cálculos da capacidade calorífica no ferro puro para os dados de 1200 K e 1500 K e determinando-se todos os valores de c_p através da interpolação de Lagrange. Nesta gama de temperatura a diferença do c_p entre o ferro puro e o aço inox AISI 304, que deveria ter sido utilizado para fabricar as esferas, é de cerca de 5% no máximo.

O cálculo da energia de ignição será determinado com os resultados das experiências positivas à temperatura mais baixa.

Vai-se considerar que na esfera de 5 mm foi transferida metade da energia para o leito da espécie, atendendo que a esfera sendo pequena penetra bastante na caruma e a principal perda de energia é por radiação enquanto que a perda por convecção se pode desprezar a esta temperatura de cerca de 1000 °C. Para a esfera maior considerou-se que um quarto da energia foi transmitido à caruma. Para as esferas de tamanho intermédio atribuíram-se valores intermédios.

O cálculo da energia será uma estimativa dado a várias variáveis com alguma incerteza nomeadamente a emissividade, o valor incerto de c_p , o índice de transferência, também a aleatoriedade da temperatura de ignição e ao ponto de só se utilizar um resultado de ignição por cada esfera, diminuem a precisão do cálculo, contudo espera-se que o erro seja inferior a 50%.

A tabela 4.4.1 mostra todos os dados e resultados obtidos.

| T1 | T1 | diâmetro | massa | exp | tig | c_p 1 | H1 | T2 | c_p 2 | H2 | Variação. H | Índice transf. | Energia |
|-------------|---------|----------|---------|-----|-----|----------|----------|------|----------|----------|----------------|-------------------|-----------|
| inicial | inicial | esfera | esfera | nº | | Cap. cal | entalpia | | Cap. cal | entalpia | entalpia | para a | ignição |
| °C | K | mm | kg | | s | J/(kg.k) | s | K | J/(kg.k) | J | J | esfera | J |
| 1015 | 1288 | 5 | 0,00052 | 736 | 0,4 | 622 | 417 | 1261 | 618 | 405 | 11 | 0,5 | 6 |
| 921 | 1194 | 10,1 | 0,0041 | 676 | 1,1 | 608 | 2977 | 1176 | 605,4 | 2919 | 58 | 0,45 | 26 |
| 915 | 1188 | 14 | 0,01068 | 673 | 1,8 | 607 | 7702 | 1178 | 605 | 7612 | 91 | 0,4 | 36 |
| 865 | 1138 | 20 | 0,03263 | 629 | 1,5 | 599,7 | 22272 | 1129 | 598,3 | 22041 | 231 | 0,3 | 69 |
| 738 | 1011 | 37 | 0,2066 | 757 | 2,8 | 580,6 | 121289 | 1009 | 580,3 | 120969 | 320 | 0,25 | 80 |

Tabela 4.4.1 Resultados e cálculo da energia de ignição da caruma com cerca de 10% de teor de humidade

Pelos resultados obtidos da energia necessária para a ignição o c_p parece ser insignificante o seu contributo, pois a variação máxima do c_p é de cerca de 7% enquanto que a variação da entalpia é de cerca de 30 vezes mais.

O gráfico 4.4.8 mostra a energia utilizada na ignição da caruma com cerca de 10% de teor de humidade.

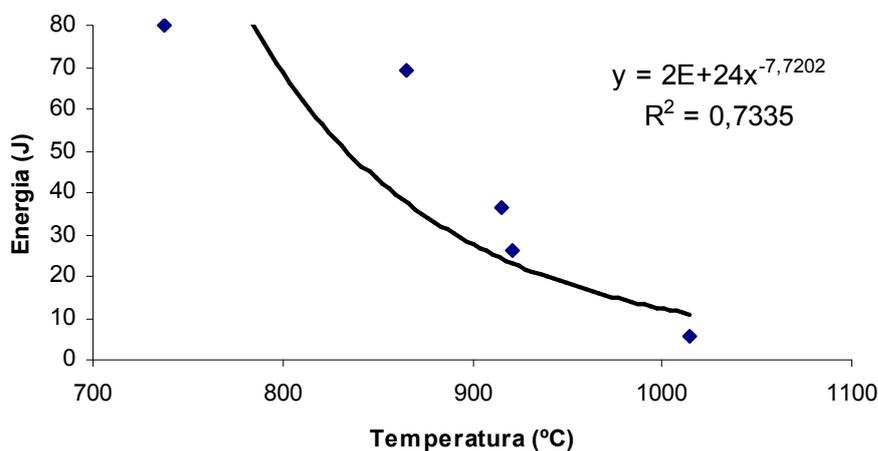


Gráfico 4.4.8 Energia utilizada na ignição da caruma com cerca de 10% de teor de humidade

Este gráfico mostra que a energia necessária para a ignição da caruma, com combustão em chamas, diminui com o aumento da temperatura e parece que se aproximará de zero Joules para uma temperatura da ordem de 1100 °C.

Atendendo ao aumento da temperatura em cerca de 300 °C diminui a energia necessária à ignição em mais de dez vezes, pode-se concluir que o fator mais importante que importa na ignição das espécies florestais em estudo é a temperatura.

5-Conclusão

5.1-Ensaio de inflamabilidade de partículas

5.1.1- Ensaio de inflamabilidade de partículas de borracha de pneu

Estas experiências não demonstram qual será a temperatura e o tempo de ignição na prática. A temperatura será mais baixa do que 600 °C, pois a quantidade de superfície de um pneu de um camião em contacto com a estrada é muito maior o que origina uma elevada relação superfície volume (ϕ). A superfície por exemplo para um pneu com 0,2 m de largura de contacto e 1 m de perímetro terá uma área de 0,62 m², conseqüentemente a superfície de atrito que provocará o aquecimento é elevada e a massa do pneu é de dezenas de kg.

O tempo médio obtido foi de 9 s, quando comparado com as espécies florestais, que é da mesma ordem, pois o tempo mínimo ao longo do ano, obtido com a caruma a 10% de teor de humidade determinado por Viegas em 1989 foi de 10 s.

Como prevenção todos os camiões deveriam ser obrigados a estar equipados com extintor de 6 kg, ainda mais que pode haver mais causas de incêndio num camião e por outro lado é facilmente transmissível ao espaço florestal que geralmente é contíguo à berma das estradas,

apesar do DL 124/2006 exigir uma faixa limpa de vegetação com 10 m de largura.

5.1.2- Ensaios de inflamabilidade de partículas de calços de travões de comboios

Com os resultados obtidos conclui-se que os calços de comboio apresentarão um elevado risco de incêndio.

Pode acontecer que um calço, com uma travagem brusca, se inflame na sua extremidade, devido à libertação de gases inflamáveis do calço que contem um elevado teor de materiais inflamáveis e assim se ficar em combustão irá libertar partículas em chamas.

Além da elevada inflamabilidade dos calços, quando um comboio trava bruscamente há produção de chispas que poderão provocar incêndios se houver vegetação junto aos trilhos e se ela estiver seca, mesmo que não se libertem partículas em combustão do calço.

Face ao atrás determinado e descrito, como prevenção deve-se evitar travagens bruscas, deve haver uma regular inspeção e revisão dos travões dos comboios para prevenir que os calços fiquem bloqueados.

Além da manutenção mecânica dos travões, os comboios deviam ser equipados com regadores junto aos trilhos do lado externo aos carris, para manter durante o período crítico a vegetação próxima dos trilhos húmida. Esta rega entre outras medidas, é feita pelos comboios norte-americanos em zonas florestais, para prevenir a ocorrência de incêndios. Aplicar quantidades diminutas de herbicida junto aos trilhos talvez seja uma boa solução para reduzir a quantidade de biomassa junto à linha-férrea e ao mesmo tempo mantinha-se os resíduos húmidos, caso contrário o risco do feno seco se incendiar é elevado e no caso de haver ignição pode propagar-se o fogo ao mato, povoamentos, searas ou outras produções agrícolas.

5.1.3- Ensaios de inflamabilidade de partículas de fuligem no epiradiador

A fuligem de escape de motores a diesel se for seca, devido ao motor não consumir óleo não se inflamará, pois fuligens sem conterem produtos voláteis como o óleo não se inflamarão. Todavia não se sabe se mesmo a fuligem sem óleo face a temperaturas da ordem dos 500 °C se funde, formando esferas enquanto avança pelas paredes do tubo de escape até serem projetadas pelo escape a velocidades da ordem dos 20 m/s.

Se empregássemos neste tipo de ensaio a fuligem em pasta que foi posteriormente retirada de um trator diesel a dois tempos, ela inflamava-se devido ao elevado conteúdo de óleo.

5.1.4- Ensaios de inflamabilidade de partículas de fuligem projetadas por explosão

Neste tipo de ensaio previa-se que na distância a percorrer de cerca de 1,5 m pelas partículas de fuligem aquecidas a 500 °C, que é a temperatura de libertação dos gases de escape, elas aumentassem a sua temperatura ao se oxidarem com o oxigénio do ar e ao colidirem com o feno

provocassem a sua ignição simulando assim a libertação de gases do escape de uma viatura. Pelo que se depreende dos ensaios realizados os detonadores apesar de explodirem extinguem a combustão, assim teria de se encontrar um produto explosivo que não extinguisse a reacção. Não sendo fácil esta solução terá de se encontrar outro método para a projecção, do género do gerador de partículas de Manzello et al. (2007).

Uma possível resolução do problema será empregar ar libertado sob pressão e a 500 °C, assim talvez se consiga obter resultados se prosseguir com esta investigação em trabalhos futuros.

5.2 - Inflamabilidade das espécies florestais com esferas aquecidas

5.2.1 - Efeito do teor de humidade da espécie florestal na ignição

Os gráficos G4.2.9 (inflamabilidade do feno em função do teor de humidade) G4.2.19 (inflamabilidade da caruma em função do teor de humidade) e o G4.2.28 (inflamabilidade do eucalipto em função do teor de humidade), gráficos comparativos feitos com a linha B onde acima desse valor há sempre ignição, entre 0% e 10% de teor de humidade para as três espécies, mostram que em sete dos nove pontos há ignição a temperatura inferior para 0% e a temperatura de ignição é mais elevada para 10%. Nos dois pontos de nove em que sucedeu o contrário, haverá alguma aleatoriedade dos resultados na ignição para 10% de teor. Se repararmos que no gráfico G4.3.3 o ponto (4,1g; 962 °C) um dos que apresentou um valor mais baixo está mais abaixo da curva descrita pelos restantes pontos pelo que se pode concluir que seria normal ocorrer um valor superior.

Da análise do gráfico G4.2.29 (inflamabilidade das três espécies (limite superior) a 0% de teor de humidade) e G4.2.31 (inflamabilidade das três espécies (limite inferior) a 0% de teor de humidade) conclui-se que as três espécies apresentam um comportamento muito homogéneo sem nenhuma aleatoriedade, que com o aumento da temperatura e a diminuição da massa convergem para valores de ignição próximos uns dos outros enquanto que no oposto com o aumento da massa as três espécies divergem na temperatura de ignição.

Se a espécie tiver 10% de teor de humidade os resultados não serão homogéneos como se vê no gráfico G4.2.32 (inflamabilidade das três espécies, limite inferior, a 10% de teor de humidade) há uma certa aleatoriedade na ignição.

Face aos resultados destes ensaios conclui-se que a temperatura de ignição das espécies florestais baixa com a diminuição de teor de humidade contido na espécie como era previsto no capítulo 1.4.

5.2.2 - Efeito do tempo de ignição

Da análise do gráfico G4.4.1 constata-se que o tempo de ignição do feno não varia muito com a temperatura e parece ser independente do teor de humidade da amostra.

Da análise do gráfico G4.4.2 constata-se que o tempo de ignição do eucalipto quando possui algum teor de humidade reduz-se muito com o aumento da temperatura, mas quando seco varia pouco com a temperatura.

Da análise do gráfico G4.4.3 constata-se que o tempo de ignição da caruma reduz-se muito com o aumento da temperatura e quando seco tem um tempo menor de ignição.

Da análise do gráfico G4.4.4 (tempo de ignição das três espécies com 0% de teor de humidade) para 850 °C o tempo de ignição varia de cerca de 3 s para a caruma, a 0,5 s para o feno. Com o aumento da temperatura diminui o tempo de ignição, convergindo todas as espécies para um tempo menor que 0,5 s para uma temperatura que rondará os 1000 °C.

Da análise do gráfico G4.4.5 (tempo de ignição/temperatura da caruma com cerca de 10% de teor de humidade), gráfico feito com cinco massas diferentes mostra que o tempo de ignição pode ser descrito por uma curva com a concavidade voltada para cima tendendo o tempo de ignição para zero quando a temperatura tende para infinito.

Da análise do gráfico G4.4.6 (tempo médio de ignição da caruma com cerca de 10% de teor de humidade) constata-se que o tempo de ignição tende para zero quando a massa necessária para a ignição tende para zero implicando também que a temperatura aumente.

Face aos resultados destes ensaios conclui-se que o tempo de ignição das espécies florestais baixa com o aumento da temperatura como também era previsto no capítulo 1.4.

5.2.3 - Efeito da massa da partícula na ignição

Neste estudo não se fizeram experiências mantendo constante a temperatura e variando a massa.

A temperatura de ignição ia diminuindo à medida que aumentava a massa e se quisemos fazer todas as ignições a 1015 C° que foi a temperatura mínima de ignição para a massa de 0,52 g, seria cada vez mais difícil à medida que aumentássemos a massa.

Caso as experiências fossem feitas mantendo constante a temperatura de 1015 °C, com o aumento da massa, o tempo de ignição diminuiria.

Da tabela T4.3.3 (Resultados de inflamabilidade com esferas em caruma com cerca de 10% de humidade) pode-se ver que a temperatura variou 277 °C, e a massa variou 397 vezes pelo que a massa tem de aumentar exponencialmente à medida que baixa a temperatura.

Da análise do gráfico G4.4.6 (tempo médio de ignição da caruma com cerca de 10% de teor de humidade) vê-se que a massa necessária para a ignição tende para zero quando o tempo

de ignição tende para zero.

Face aos resultados destes ensaios conclui-se que a massa necessária à ignição das espécies florestais pode ser infinitamente pequena se a temperatura for muito elevada, antevendo-se que partículas pequenas com a temperatura entre os 1100 a 1200 °C, provocarão em frações de segundos a inflamação das espécies florestais.

5.2.4- Efeito da temperatura na ignição

Da análise do gráfico 4.4.8 (energia utilizada na ignição da caruma com cerca de 10% de teor de humidade) constata-se que a energia de ignição diminui com o aumento da temperatura e parece que se aproximará de zero Joules para uma temperatura da ordem de 1100 °C, enquanto que no gráfico G4.3.3 constatou-se que quando a massa tendia para zero a temperatura crescia exponencialmente e também no gráfico G4.4.5, parece que é necessária para a ignição uma temperatura infinita para se conseguir ter um tempo de zero segundos.

Já se tinha visto que a massa não é importante para a ignição, pois basta aumentar a temperatura, o Cp também não é relevante e nem a energia de ignição o é pois ela reduz-se muito com o aumento da temperatura, assim é a temperatura da partícula o fator mais importante para a ignição.

Face aos resultados dos ensaios, ao calculado e ao exposto a temperatura de uma partícula inerte é o fator mais importante para haver ignição das espécies florestais, em que se uma partícula mesmo que seja pequena mas se estiver a cerca de 1100 °C ao colidir com uma espécie florestal a inflamará em frações de segundo.

5.2.5 - Trabalhos futuros e metodologia

Em trabalhos futuros será conveniente fazer mais ensaios de ignição de caruma a 10% de teor de humidade, com esferas mais pequenas, nomeadamente esferas de 3 mm de diâmetro, feitas em aço inox AISI304, inseridas em termopar e se for viável tentar ainda com 2 mm de diâmetro, com o objetivo de melhorar os resultados já obtidos, descobrindo a tendência à medida que a massa se aproxima do zero, pois é de extrema importância este estudo para ser aplicado na prevenção dos incêndios florestais.

A utilização do aço AISI304 tem grandes vantagens: evita que a temperatura da esfera baixe tão rapidamente devido à menor emissividade de radiação quando comparada com outros aços, não se oxidará tanto como os outros aços, evitando-se assim que haja perda de massa durante os ensaios, possuir o calor específico (c_p) e a emissividade tabelados até 1500 K e não apresentar variações bruscas de c_p , o que também contribuirá para reduzir os erros no cálculo da energia de ignição.

Sugere-se que se solde por resistência eléctrica os fios do termopar à esfera, empregando

termopares com fios de 0,1 mm de diâmetro em vez de 0,5 mm, pois os fios de 0,5 mm de diâmetro condicionam a medição devido a contribuírem para um arrefecimento mais rápido da esfera e não permitirem estabilidade no manuseamento da esfera, já que a esfera tem um peso insignificante quando comparado com a rigidez dos fios do termopar, o que também dificulta a sua introdução no meio da amostra.

Atendendo a que as condições em que ocorrem mais ignições florestais são:

- a) Às 15:00h, meia hora após ocorrer a temperatura máxima diária;
- b) Em dias muito quentes, com a temperatura ambiente superior a 30 °C;
- c) Ao sol;
- d) Durante o mês de Agosto quando normalmente a vegetação está mais seca;

As condições atrás expostas devem ser simuladas em laboratório, já que não é possível fazê-las ao ar livre. Elas têm de ser feitas durante o verão, para que as condições ambientais sejam mais próximas da realidade, temperatura elevada e reduzida humidade relativa do ar, devido aos fumos libertados das combustões provocarem intoxicação e irritação, o que obriga a uma boa circulação de ar no laboratório. Empregar caruma seca em estufa e possuir uma fonte de radiação luminosa com cerca de 1000 W/m² a incidir na amostra, apontada de cima para baixo, para simular o sol sem interferir no resto do ensaio e que terá também a vantagem de evitar que a temperatura da esfera baixe tão rapidamente.

Nestas condições iremos ter temperaturas mais baixas de ignição, talvez uma redução de 100 °C, o que virá facilitar a investigação de partículas pequenas, já que é necessário atingir a temperatura necessária para a ignição respectiva.

O sistema de aquecimento deve ser por maçarico oxiacetileno.

O sistema de aquisição deve permitir visualizações de 10 Hz, para se poder inserir a esfera na amostra com a temperatura que se pretender e não estar à espera de a poder inserir de um em segundo.

Os ensaios devem ser filmados com mini DVD possuindo a opção de visualização temporal de cada “frame”, para assim poder ver o início e final do ensaio, determinando assim o tempo de duração da ignição, desde o contacto da partícula com a amostra até ela se inflamar, visualizando-se também quais as temperaturas (inicial e final) para se determinar com exatidão a variação de energia da esfera durante esse tempo.

Nota adicional de 2021- em dias úteis de verão com a vegetação seca, com temperatura > 37 °C haverá muitos focos de incêndio devido a fagulhas de pesados, em especial a seguir ao almoço, pelo que tem de haver uma elevada capacidade de combate a incêndios e ter muitos meios aéreos, os quais devem ser equipados com câmaras de infravermelhos para maior eficiência a apagar fogos como a visualizar a localização de pessoas que possam estar em perigo.

6 - Bibliografia

- American Society for Metals. (1969). Metals Handbook. Metals Park. Ohio
- André, Jorge Campos da Silva. (1996). Uma Teoria Sobre a Propagação de Frentes de Fogos Florestais de Superfície. Tese de Doutoramento. Departamento de Engenharia Mecânica da Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade de Coimbra
- André, J.C.S e D.X. Viegas. (2001). Modelos de propagação de fogos florestais. Estado-da-arte para utilizadores – parte I: Introdução e modelos locais. Silva Lusitânia
- Arrowood, Janet C.(2003). Living With Wilfires. Bradford Publishing Company. Denver. Colorado
- Cabral, Francisco Caldeira; Gonçalo Ribeiro Telles. (1999), A Árvore em Portugal, Assírio & Alvim, Lisboa
- Dimitrakopoulos, A.P., V. Manteva (1998). III International Conference on Forest Fire Research. 14th Conference on Fire and Forest Meteorology. Associação para o Desenvolvimento da Aerodinâmica Industrial. Coimbra. Pág. 455 e 466.
- Fernandes, Paulo; Loureiro, Carlos; Botelho, Hermínio. (2005). Alterações estruturais num pinhal bravo de regeneração natural submetido a desbaste térmico. Actas das Comunicações do 5º Congresso Florestal Nacional, Silva, R. e Páscoa, F. (Eds.), Viseu, Instituto Politécnico, (poster/CD). 16-19 Maio 2005.
- Figueiredo, António Rui A.; Costa, José Joaquim; Raimundo, António M.M. (1993). Transmissão de Calor. Departamento de Engenharia Mecânica da Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade de Coimbra
- Figueiredo, António Rui A.; Apontamentos da cadeira de mestrado de Operações industriais de Secagem. (1999). Departamento de Engenharia Mecânica da Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade de Coimbra.
- GODINHO-FERREIRA, Paulo, AZEVEDO, Anamaria e REGO, Francisco. (2005). Carta da Tipologia Florestal de Portugal Continental. Silva Lusitânia
- Heywood, Jonh B. (1988). Internal Combustion Engine Fundamentals. McGraw-Hill. Singapura
- Guijarro, M.; C. Hernando; C. Díez; E. Martínez & J. Madrigal; C. Lampin Cabaret; L. Blanc & P.Y. Colin; P. Pérez-Gorostiaga; J.A. Vega & M.T. Fonturbel. (2002) Viegas (Ed) Forest Fire Research & Wildland Fire Safety. Millpress. Rotterdam.
- Honeycombe, R.W.K. (1982). Aços Microestrutura e propriedades. Fundação Calouste Gulbenkian. Lisboa
- Incropera, Frank P.; DeWitt, David P. (1990). Fundamentals of Heat and Mass transfer. John Wiley & Sons, Inc. New York
- Manzello, Samuel L.; Alexander Maranghides, William E. Mell, Thomas G. Cleary, and Jiann C. Yang. (2006). V International Conference on Forest Fire Research, D. X. Viegas

Menzel-Teltenborn, Helga; H.F. Neubauer; Wolker Wunsch. tradução de Das Reich der Pflanzen. (1994). Reimpresso para Lexicultural Actividades Culturais Lda. Amadora

Moita, Francisco. (1987). Energia Solar Passiva 1. INCM. Lisboa

Pérez-Gorostiaga, P.; J.A. Vega & M.T. Fonturbel; Guijarro, M.; C. Hernando; C. Díez; E. Martínez & J. Madrigal; C. Lampin Cabaret; L. Blanc & P.Y. Colin; (2002) Viegas (Ed) Forest Fire Research & Wildland Fire Safety. Millpress. Rotterdam.

SARDINHA, Augusto M., MACEDO, F. Wolfango e MACEDO, F. Vasconcelos. (2002). Combustão Lenhosa Directa e Indirecta: Sua Relevância para a Temática dos Fogos Florestais. Silva Lusitânia

SILVA, Tiago Pereira da; PEREIRA, José M. Cardoso; PAUL, José C. P. et al. (2006). Estimativa de Emissões Atmosféricas Originadas por Fogos Rurais em Portugal. Silva Lusitânia

Su, Yu-Pen; W.A. Sirignano. (1981). Eighteenth Symposium (International) on Combustion. The Combustion Institute. Edwards Brothers, Inc. Michigan. Pág 1719.

Trabaud, L. (1976). Inflammabilité et combustibilité des principales espèces des garrigues de la région méditerranéenne. Ecologia Plantarum, Montrouge, volume 11, n° 2, pág. 117-136

Vaz, Gilberto Cordeiro. (2001) Modelação da Propagação de Uma Frente de Chamas em Linha num Leito Sólido Poroso na Ausência de Declive ou Vento. Tese de Doutoramento. Departamento de Engenharia Mecânica da Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade de Coimbra

Viegas, Domingos Xavier. (1989). Actas das Jornadas Científicas Sobre Incêndios Florestais. Grupo de Mecânica dos Fluidos. Departamento de Engenharia Mecânica da Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade de Coimbra

Viegas, Domingos Xavier. (1998). III International Conference on Forest Fire Research. 14th Conference on Fire and Forest Meteorology. Associação para o Desenvolvimento da Aerodinâmica Industrial. Coimbra.

Viegas, Domingos Xavier, Silva AJ, Cruz MG (2000) Analysis of Three Fatal Accidents Involving Portuguese Firefighters. In 'Proceedings of 2000 International Wildfire Safety Summit'. 10-12 October 2000, Edmonton, Canada, pp. 190-199.

Viegas, Domingos Xavier. (2002). Forest Fire Research & Wildland Fire Safety. Millpress. Roterdão.

Viegas, Domingos Xavier. (2004). Cercados Pelo Fogo. Minerva Coimbra. Coimbra.

Viegas, Domingos Xavier. (2004). On the existence of a steady state regime for slope and wind driven fires. CSIRO Publishing - International Journal of Wildland Fire

Viegas, Domingos Xavier; REIS, Raul M.; CRUZ, Miguel G. *et al.* (2004). Calibração do Sistema Canadano de Perigo de Incêndio para Aplicação em Portugal. Silva Lusitânia

Viegas, Domingos Xavier; Pita, Luis Paulo (16/11/2004). Fire spread in canyons, Commonwealth

Web

Babrauskas, V. 2001. Ignition of Wood. A Review of the State of the Art. (2001). *In Interflam 2001*. Interscience Communications Ltd. Londres. http://www.doctorfire.com/wood_ign.pdf

Manzello, Samuel L.; John R. Shields, Thomas G. Cleary, and Jiann C. Yang (2005). On the ignition of fuel beds by firebrands. <http://www.fire.nist.gov/bfrlpubs/fire06/PDF/f06002.pdf>

Manzello, Samuel L.; John R. Shields, Thomas G. Cleary, and Jiann C. Yang (2006). Ignition of Mulch by Firebrands in Wildland/Urban Interface (WUI) Fires. <http://ams.confex.com/ams/pdfpapers/97660.pdf>

Manzello, Samuel L.; Alexander Maranghides and William E. Mell . (2007) Firebrand generation from burning vegetation. http://www2.bfrl.nist.gov/userpages/wmell/PUBLIC/TALKS_PAPERS/manzello_firebrand_generator_fsj07.pdf

Manzello, Samuel L.; John R. Shields, and Jiann C. Yang (2007). INTERFLAM. On The Use of a Firebrand Generator to Investigate The Ignition of Structures in Wildland-Urban Interface (Wui) Fires. http://www2.bfrl.nist.gov/userpages/wmell/PUBLIC/TALKS/FY07/manzello_firebrands_vents_INTERFLAM-2007.pdf

Smith, Steven G. (2005) Effects of moisture on combustion characteristics of live California chaparral and Utah foliage. Master of Science. Department of Chemical Engineering. Brigham Young University <http://contentdm.lib.byu.edu/ETD/image/etd824.pdf>

SPARK ARRESTER GUIDE. (2000), National Wildfire Department of Agriculture United States .Department of Interior. National Association of State Foresters

7- Agradecimentos

O autor deseja manifestar o seu reconhecimento a todos aqueles que, de algum modo, contribuíram para a realização deste trabalho. É no entanto, devida especial referência:

- Ao Professor Doutor Domingos Xavier Viegas, do Departamento de Engenharia Mecânica da Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade de Coimbra, orientador e supervisor deste trabalho, pela oportunidade e confiança proporcionadas.
- Ao Professor Doutor António Rui A. Figueiredo, do Departamento de Engenharia Mecânica da Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade de Coimbra, orientador e supervisor deste trabalho, pela partilha de alguns recursos, pela sua colaboração nos ensaios laboratoriais e pelas suas oportunas opiniões que muito contribuíram para o desenvolvimento deste trabalho.
- Aos membros da equipa do CEIF e ADAI que colaboraram na realização dos ensaios laboratoriais, em particular ao Sr. Nuno Luís, ao Eng.º Luís Paulo e ao Sr. António Cardoso.
- Aos que colaboraram graciosamente na realização dos ensaios laboratoriais, em particular Benjamim Pires, Telmo Oliveira e Marcianita Loureiro.

O autor deseja manifestar ainda o seu reconhecimento à Direcção Geral dos Recursos Florestais e ao Serviço Nacional de Bombeiros e à Inspecção Nacional de Bombeiros e ao Instituto Geofísico da Universidade de Coimbra pela colaboração prestada, na cedência de dados estatísticos.

8 - ANEXOS

8.1 - Tabela. Caudal de gases de escape em litros/s =dm³/s de motores a diesel de 4 ciclos

| cm ³ | rpm | | | | | | | | | | | |
|-----------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| | 800 | 1000 | 1200 | 1400 | 1600 | 1800 | 2000 | 2200 | 2400 | 2600 | 2800 | 3000 |
| 16 | | 0,47 | 0,47 | 0,47 | 0,47 | 0,47 | 0,47 | 0,47 | 0,47 | 0,47 | 0,94 | 0,94 |
| 33 | 0,47 | 0,47 | 0,47 | 0,94 | 0,94 | 0,94 | 0,94 | 0,94 | 1,42 | 1,42 | 1,42 | 1,42 |
| 49 | 0,47 | 0,94 | 0,94 | 0,94 | 1,42 | 1,42 | 1,42 | 1,89 | 1,89 | 1,89 | 2,36 | 2,36 |
| 66 | 0,94 | 0,94 | 1,42 | 1,42 | 1,89 | 1,89 | 1,89 | 2,36 | 2,36 | 2,83 | 2,83 | 3,30 |
| 82 | 0,94 | 1,42 | 1,42 | 1,89 | 1,89 | 2,36 | 2,83 | 2,83 | 3,30 | 3,30 | 3,78 | 3,78 |
| 94 | 1,42 | 1,42 | 1,89 | 2,36 | 2,36 | 2,83 | 3,30 | 3,30 | 3,78 | 4,25 | 4,25 | 4,72 |
| 115 | 1,42 | 1,89 | 2,36 | 2,36 | 2,83 | 3,30 | 3,78 | 4,25 | 4,25 | 4,72 | 5,19 | 5,66 |
| 131 | 1,89 | 1,89 | 2,36 | 2,83 | 3,30 | 3,78 | 4,25 | 4,72 | 5,19 | 5,66 | 6,13 | 6,13 |
| 148 | 1,89 | 2,36 | 2,83 | 3,30 | 3,78 | 4,25 | 4,72 | 5,19 | 5,66 | 6,13 | 6,61 | 7,08 |
| 164 | 1,89 | 2,83 | 3,30 | 3,78 | 4,25 | 4,72 | 5,19 | 5,66 | 6,13 | 7,08 | 7,55 | 8,02 |
| 328 | 4,25 | 5,19 | 6,13 | 7,55 | 8,49 | 9,44 | 10,4 | 11,8 | 12,7 | 13,7 | 14,6 | 16,0 |
| 492 | 6,13 | 8,02 | 9,44 | 11,3 | 12,7 | 14,2 | 16,0 | 17,5 | 18,9 | 20,8 | 22,2 | 24,1 |
| 656 | 8,49 | 10,4 | 12,7 | 14,6 | 17,0 | 18,9 | 21,2 | 23,1 | 25,5 | 27,4 | 29,7 | 31,6 |
| 820 | 10,4 | 13,2 | 16,0 | 18,4 | 21,2 | 24,1 | 26,4 | 29,3 | 31,6 | 34,4 | 37,3 | 39,6 |
| 984 | 12,7 | 16,0 | 18,9 | 22,2 | 25,5 | 28,8 | 31,6 | 34,9 | 38,2 | 41,5 | 44,4 | 47,7 |
| 1148 | 14,6 | 18,4 | 22,2 | 26,0 | 29,7 | 33,5 | 37,3 | 41,1 | 44,4 | 48,1 | 51,9 | 55,7 |
| 1312 | 17,0 | 21,2 | 25,5 | 29,7 | 34,0 | 38,2 | 42,5 | 46,7 | 51,0 | 55,2 | 59,5 | 63,7 |
| 1475 | 18,9 | 24,1 | 28,8 | 33,5 | 38,2 | 42,9 | 47,7 | 52,4 | 57,1 | 61,8 | 67,0 | 71,7 |
| 1639 | 21,2 | 26,4 | 31,6 | 37,3 | 42,5 | 47,7 | 52,9 | 58,5 | 63,7 | 68,9 | 74,1 | 79,8 |
| 3279 | 42,5 | 52,9 | 63,7 | 74,1 | 84,9 | 95,3 | 106 | 117 | 127 | 138 | 148 | 159 |
| 4918 | 63,7 | 79,3 | 95,3 | 111 | 127 | 143 | 159 | 175 | 191 | 207 | 223 | 239 |
| 6557 | 84,9 | 106 | 127 | 149 | 170 | 191 | 212 | 233 | 254 | 276 | 297 | 318 |
| 8197 | 106 | 133 | 159 | 185 | 212 | 238 | 265 | 292 | 318 | 345 | 371 | 398 |
| 9836 | 127 | 159 | 191 | 223 | 254 | 286 | 318 | 350 | 382 | 413 | 445 | 477 |
| 11475 | 148 | 185 | 223 | 260 | 297 | 334 | 371 | 408 | 445 | 483 | 520 | 557 |
| 13115 | 169 | 212 | 255 | 297 | 339 | 382 | 424 | 467 | 509 | 552 | 594 | 636 |
| 14754 | 191 | 239 | 286 | 334 | 382 | 429 | 477 | 525 | 572 | 621 | 668 | 716 |
| 16393 | 212 | 265 | 318 | 371 | 424 | 477 | 530 | 583 | 636 | 689 | 742 | 795 |

temperatura de saída 900F=482°C
(fonte - SPARK ARRESTER GUIDE. Maio de 2000, pág. 53)

Para motores a 2 tempos multiplicar por 2
Para motores a 2 tempos com turbo multiplicar por 3,25
Para motores a 4 tempos com turbo multiplicar por 1,25

A formação de “particulate” (fumo preto) ocorre sobretudo devido à falta de oxigénio e ao reduzido tempo de combustão do gasóleo.

Em viaturas com detetor de massa de ar se este estiver sujo isto é muito agravado

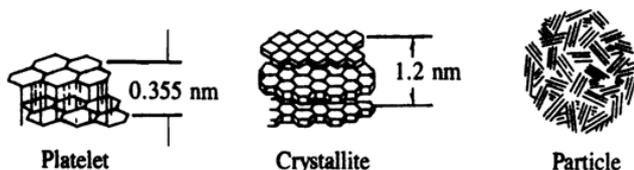
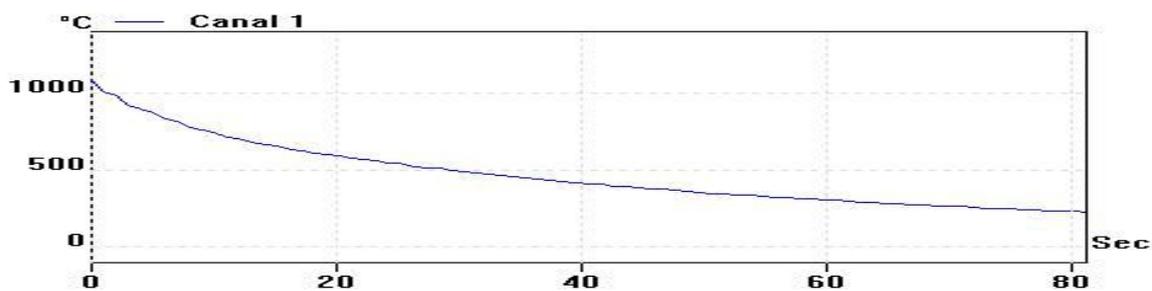
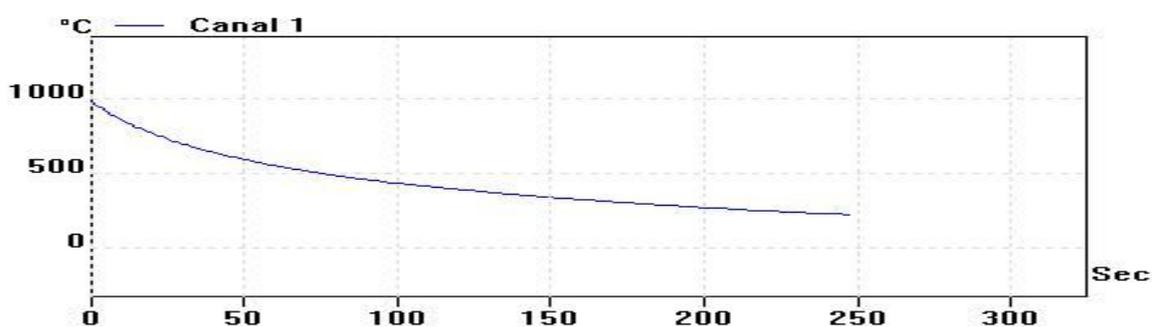


FIGURE 11-41
Substructure of carbon particle.⁷³

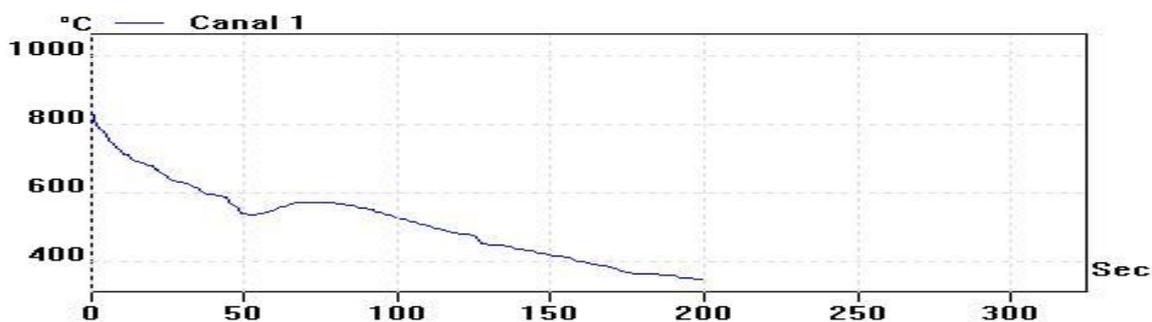
8.2 - Curvas do arrefecimento das esferas ao ar



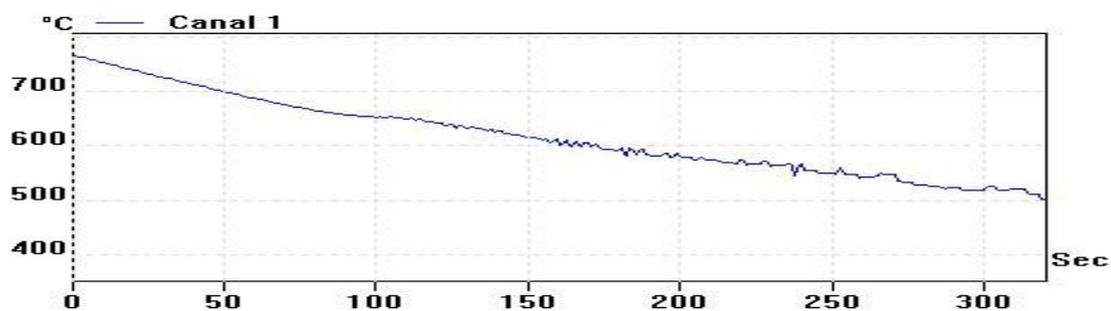
Curva de arrefecimento da esfera de 5 mm de diâmetro ao ar com 38%hr e a 30 °C, exp.nº738.



Curva de arrefecimento da esfera de 10 mm de diâmetro ao ar com 38%hr e a 30 °C, exp.nº706.



Curva de arrefecimento da esfera de 14 mm de diâmetro ao ar com 38%hr e a 30 °C, exp.nº707.

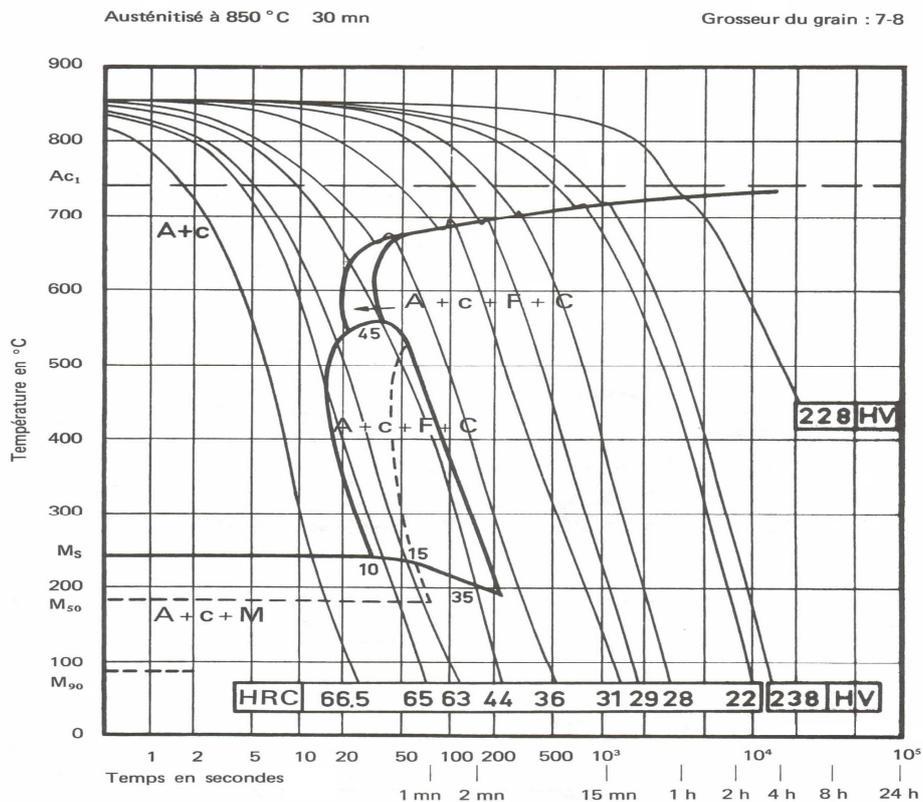


Curva de arrefecimento da esfera de 37 mm de diâmetro ao ar com 32%hr e a 33 °C, exp.nº763.

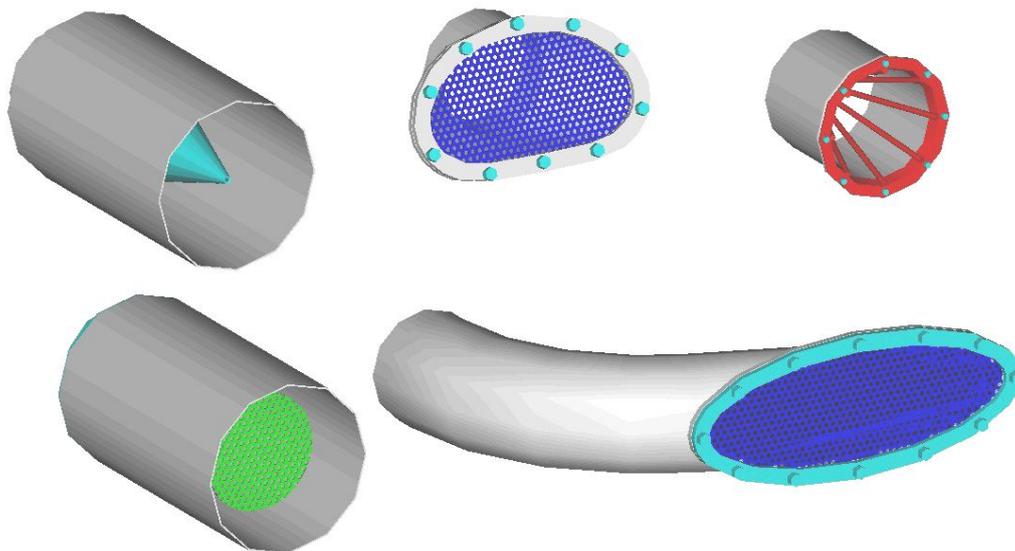
8.3 - Curvas temperatura - tempo do aço 100 C 6.

100 C 6 (nuance 2133)

| C % | Mn % | Si % | S % | P % | Ni % | Cr % | Mo % | Cu % | V % | Ti % |
|------|------|------|-------|-------|------|------|------|------|-------|------|
| 1,00 | 0,30 | 0,27 | 0,030 | 0,013 | 0,21 | 1,71 | 0,04 | 0,14 | 0,010 | 0,02 |

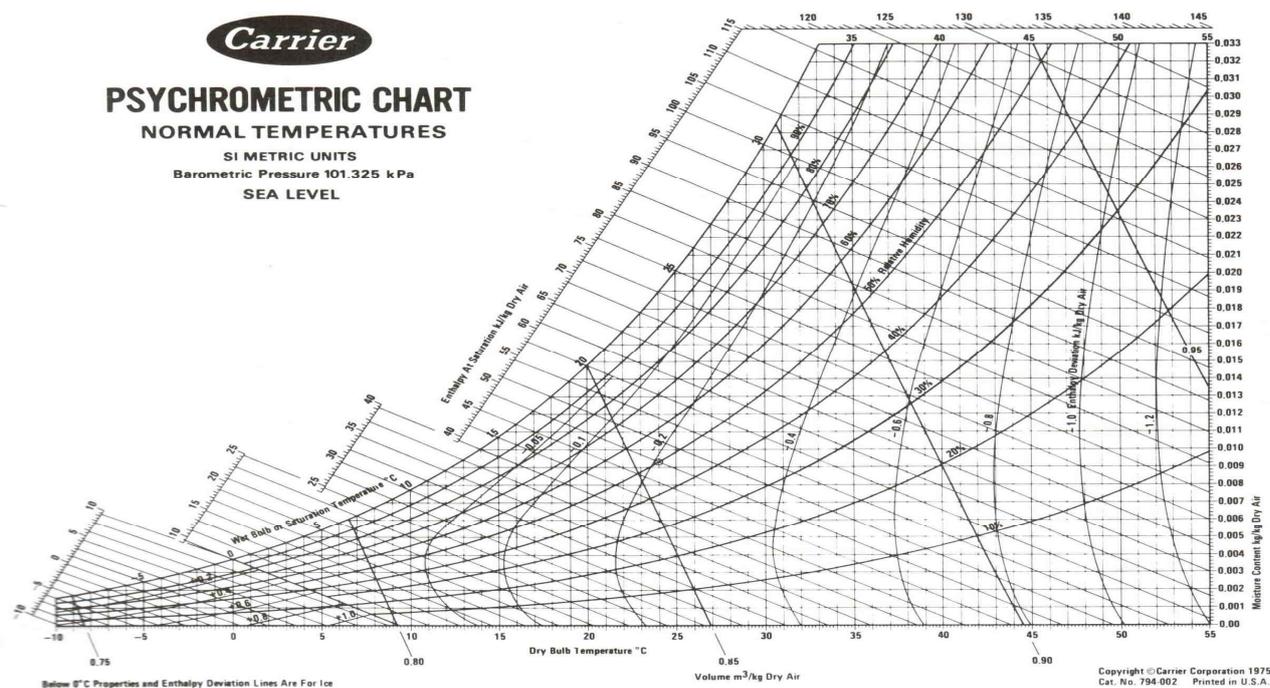


8.4 - Novos filtros de partículas para escape, criação do autor



Imagens de novas configurações de filtros para escape de motores diesel, todos os modelos pressupõem a utilização de chapa perfurada e rede inox com malha fina (0,5mm de afastamento máximo entre dois arames consecutivos).

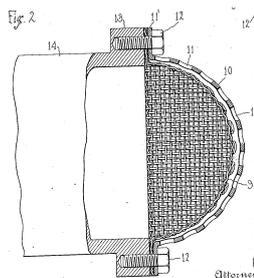
8.5 - Diagrama psicrométrico



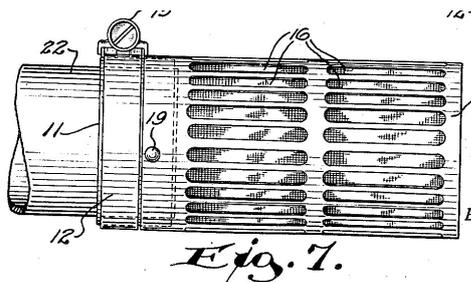
8.6 - Tipologia de causas

| origem | meio, causas, observações |
|------------------------------|---|
| Apicultura | contacto do queimador com vegetação seca |
| Borrالheiras | conterem carvão em combustão - arrastado pelo vento ou em contato com erva seca |
| Brincadeira de crianças | isqueiros, fósforos, velas, álcool, |
| Camiões e comboios | Material em combustão proveniente do escape, fuligem com óleo |
| Camiões | pneus incendiarem-se por aquecimento - válvula de travões com fuga tubo de óleo do turbo rebentar e derramar para cima do escape |
| Chaminés | partículas em combustão, não devem ser usadas em períodos críticos |
| Comboios | Material em combustão provenientes dos calços, travões bloqueados por avaria Material incandescente proveniente da travagem, aço do trilho e rodas |
| Conflitos de caça | |
| Corte de metal abrasivo | as chispas provocam a ignição de folhas secas |
| Equipamento florestal | produção de chispas, toque do escape com folhas secas |
| Equipamento portátil | produção de chispas |
| Explosão, uso de explosivos | mato ou árvores incendiarem-se |
| Fogueira | confeção de comida, queima de lixo, afastar animais selvagens das culturas agrícolas... afastar animais selvagens das culturas agrícolas |
| Foguetes | falhas no lançamento, explosão acidental no solo, recaída de material incandescente explosão posterior de cargas no solo não deflagradas c/ aquecimento solar |
| Fumadores | Beatas de cigarros ou acidentes c/fósforos e isqueiros |
| Linha eléctrica | Faíscas para as árvores e queda de material incandescente |
| Máquinas agrícolas, tratores | Material em combustão proveniente do escape ou contacto do escape com vegetação acumulação de palha junto ao escape proximidade do escape c/vegetação motor a trabalhar - radiação emitida pneus incendiarem-se por aquecimento, fricção elevada |
| Motosserra | inflamação de gasolina derramada, atmosfera explosiva na falta de vento |
| Moto-quatro/motosserra | Material incandescente proveniente do escape, falta de filtro no escape |
| Queimada | limpeza do solo florestal ou agrícola, renovação de pastagens, |
| Soldaduras c/ fusão de metal | queda de metal incandescente (os óculos UV dificultam a deteção) |
| Soldaduras c/ gás em chamas | queda de metal incandescente ou contato c/chamas (os óculos dificultam a deteção) |
| Trovoadas | em especial quando não chove |
| Veículos | incendiarem-se devido a curto circuito eléctrico e fugas de combustível |
| Vidros | concentração de radiação solar por garrafas, copos, |

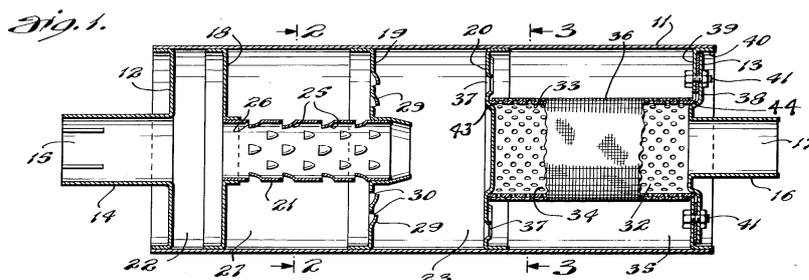
8.7 – Lista de patentes sobre “Spark arrester”, disponíveis em www.uspto.gov



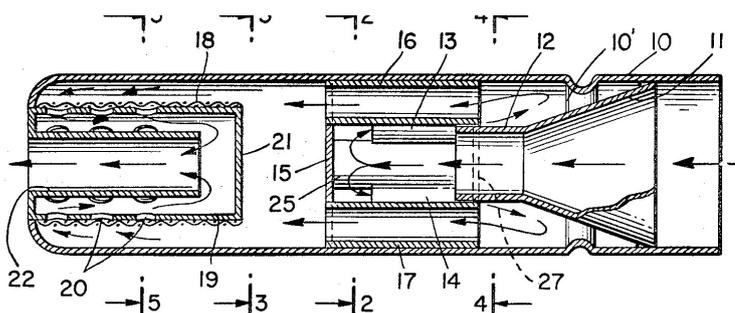
8.7.1- Patente n.º 1 532 473 de 12 de Julho de 1920- Resguardo para o escape de veículos.



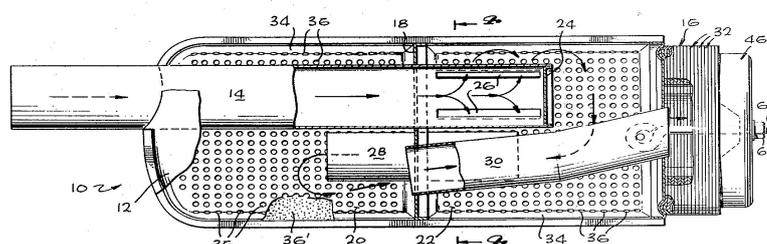
8.7.2 - Patente n.º 2,524,588 de 4 de Maio de 1949- Spark arrester em rede com chapa perfurada.



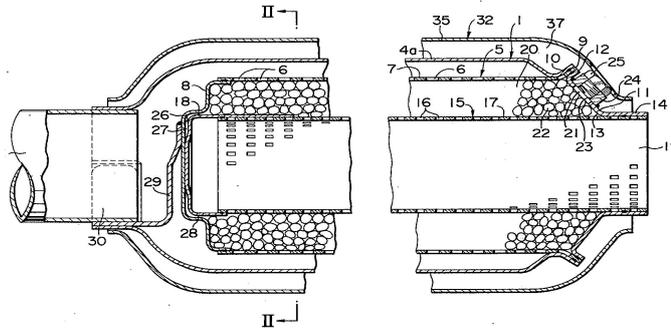
8.7.3 - Patente n.º 2,732,026 de 24 de Fevereiro de 1956- Escape com spark arrester.



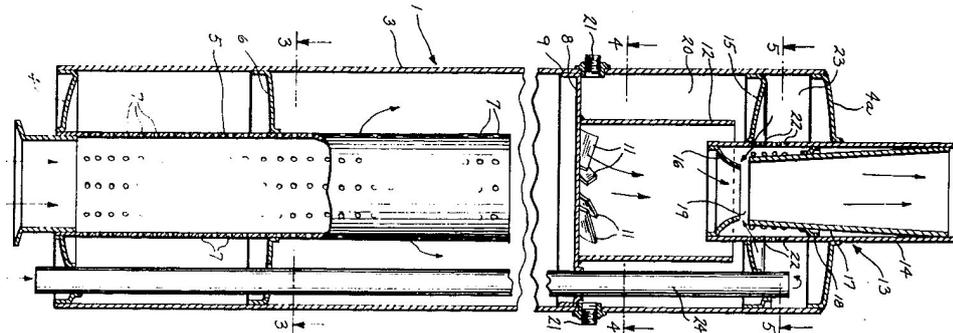
8.7.4 - Patente n.º 3,786,896 de 22 de Janeiro de 1974- Silenciador.



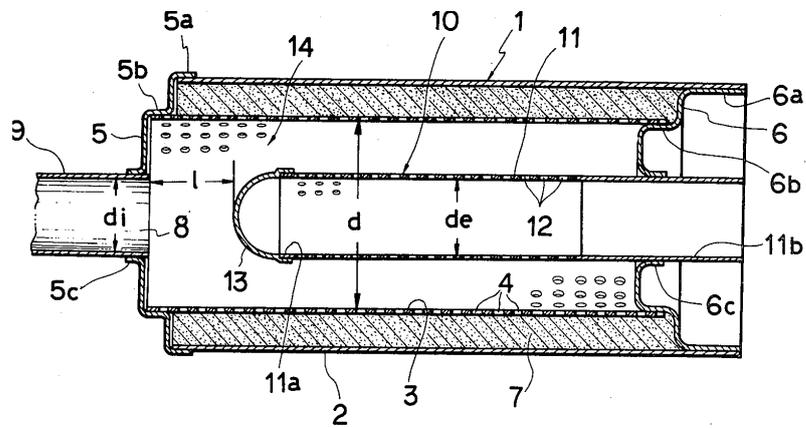
8.7.5 - Patente n.º 4,119,174 de 10 de Outubro de 1978- Silencioso de máquinas com spark arrester por anéis.



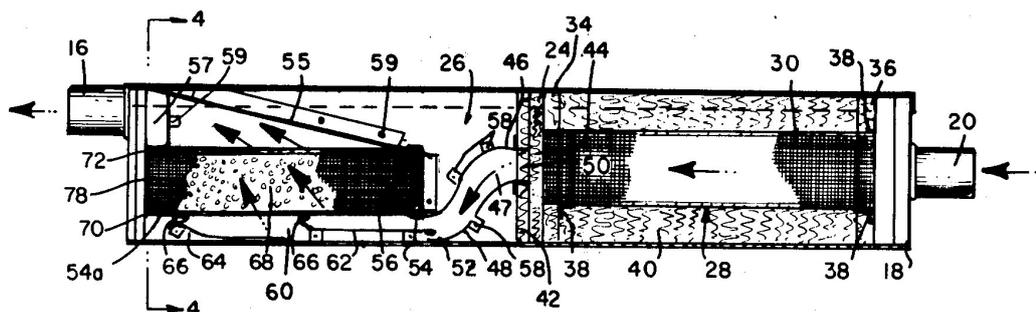
8.7.6 - Patente n.º 4,124,357 de 7 de Novembro de 1978- Conversor catalítico para moto.



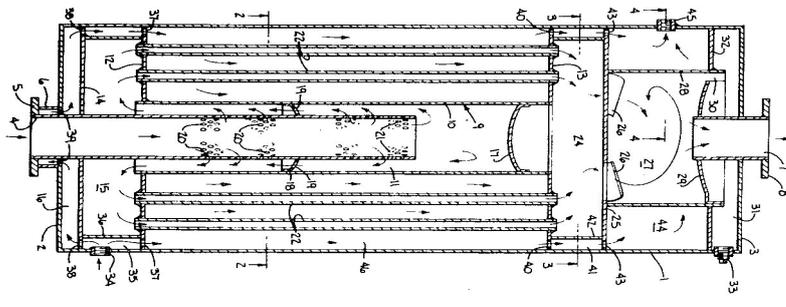
8.7.7 - Patente n.º 4,147,230 de 3 de Abril de 1979- Spark arrester com aspiração de ar por efeito de venturi



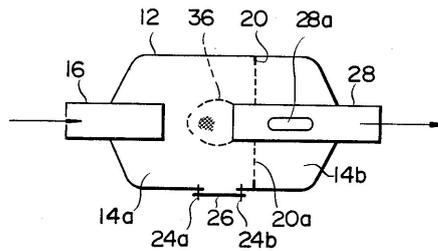
8.7.8 - Patente n.º 4,192,402 de 11 de Março de 1980- Sistema de exaustão para motos.



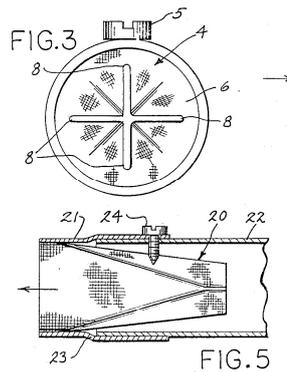
8.7.9 - Patente n.º 4,393,652 de 19 de Julho de 1983- Sistema de exaustão para motores de combustão interna.



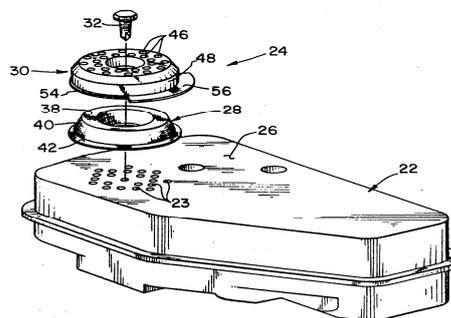
8.7.10 - Patente n.º 4,450,932 de 29/05/1984- Silencioso com recuperador de calor e spark arrester por centrifugação.



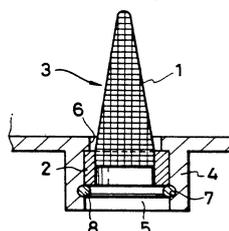
8.7.11 - Patente n.º 4,574,913 de 11 de Maio de 1986- Silencioso de automóvel com a função de spark arrester.



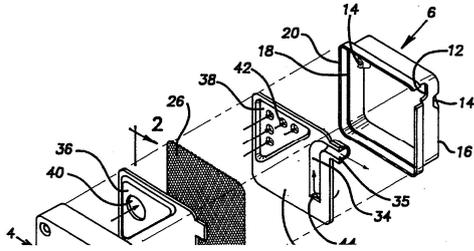
8.7.12 - Patente n.º 4,872,528 de 10 de Outubro de 1989 - escape de veiculos com spark arrester de rede em cone.



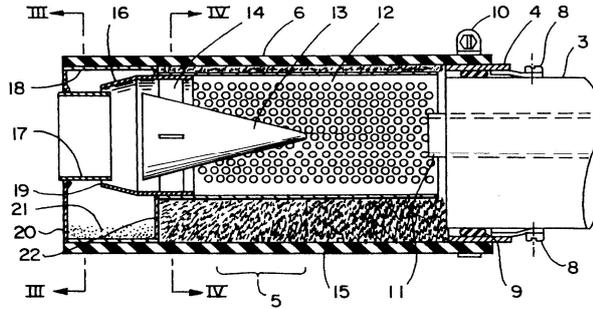
8.7.13 - Patente n.º 5,177,962 de 12 de Janeiro de 1993- Spark arrester externo em rede embutida.



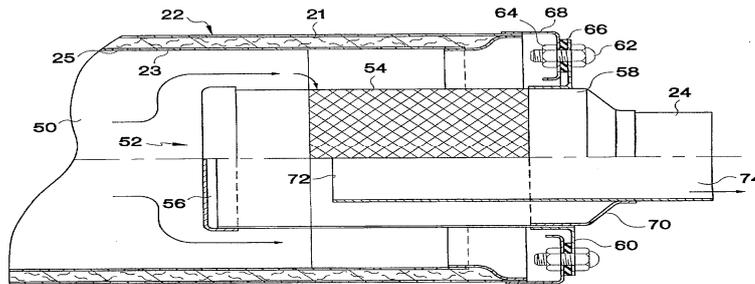
8.7.14 - Patente n.º 5,306,881 de 26 de Abril de 1994- Silenciador com spark arrester em cone de rede para moto.



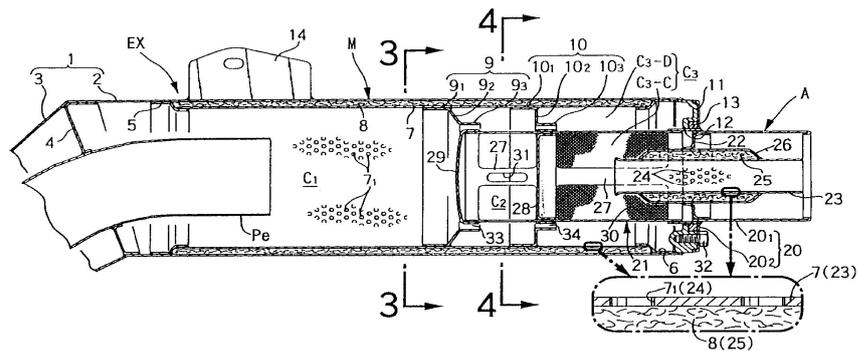
8.7.15 - Patente n.º 5,451,728 de 19/09/1995- Silenciador de motor pequeno a dois tempos com spark arrester em rede.



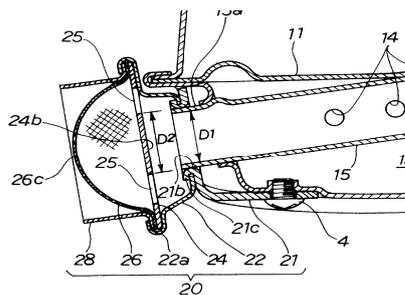
8.7.16 - Patente n.º 5,509,947 de 23 de Abril de 1996- Spark arrester em cone.



8.7.17 - Patente n.º 5,627,351 de 6 de Maio de 1997- Spark arrester para uma unidade de exaustão.



8.7.18 - Patente n.º 5,969,299 de 19 de Outubro de 1999- Sistema de exaustão para motos.



8.7.19 - Patente n.º 6,010,549 de 4/01/2000- Spark arrester de um silencioso para pequeno motor a gasolina.

8.8 - Motivos para o corte de árvores junto às estradas

O DL n.º 10/2018, clarifica os critérios aplicáveis à gestão de combustível no âmbito do Sistema Nacional de Defesa da Floresta contra Incêndios, para as medidas e ações a desenvolver no âmbito do Sistema Nacional de Defesa da Floresta contra Incêndios estabelecidas pelo DL 124/2006, alterado a última vez pelo DL 14/2019.

As árvores nas bermas das estradas aumentam o risco de incêndio e, também, originam acidentes rodoviários, como colisão de ramos e troncos com veículos de 4 m de altura, quando as árvores estão junto às estradas, ou como se viu na EN10 que andou a ser reparada em 2019, devido às raízes ao crescerem debaixo da estrada, danificaram o pavimento desta, levantando-o até 150 mm, o que implica ainda riscos de despiste, podendo até alguns serem muito graves se terminarem em colisões frontais.

“Há inúmeros acidentes rodoviários que têm a sua génese nas deformações existentes no pavimento, originadas pelas raízes das árvores. Trata-se de um problema que necessita de intervenção urgente. A elaboração de um plano que defina o abate de árvores que interferem com a segurança ou que defina outro tipo de solução como a eliminação das raízes invasivas, assim como de um projecto de regulamentação que determine as distâncias de segurança para as árvores que vierem a ser plantadas assume um papel primordial.” Texto de Alexandre Gonçalves, 22/10/2018, Fonte <https://beira.pt>.

O autor andou a solicitar ao governo português desde 3/08/2003, que as árvores estejam resguardadas de colisão automóvel, nomeadamente por rail, muro no mínimo com 0,5 m de altura, ou se as árvores se encontrarem num patamar superior, no mínimo a 1 m acima do nível da estrada, (ver proposta em <http://www.marioloureiro.net/Seguranca.htm>).

A obrigação legal aconteceu com a publicação da Lei n.º 33/2004 de 28 de Julho. Colocação de proteções nas guardas de segurança das vias de comunicação públicas, integradas ou não na rede rodoviária nacional, contemplando a perspectiva da segurança dos veículos de duas rodas.

Transcreve-se parte do texto elaborado pelo autor a 16/12/2019, na Proposta legislativa nº3/2019 da ADAPCDE ao Primeiro-Ministro sobre a Valorização de resíduos florestais/agrícolas e prevenção de incêndios.

“A vegetação ao arder junto das estradas, geralmente, provoca a interrupção da circulação

rodoviária e destrói:

Sinais de trânsito;

Linhas telefónicas;

Linhas eléctricas.

Pode ainda destruir veículos e matar os ocupantes como aconteceu em 2017.

As árvores mesmo que isoladas, em que não apresentam risco de incêndio, com vento forte têm caído para as vias, interrompido estas e até causado acidentes. Também junto às vias de comunicação há linhas de energia e de telecomunicações, assim ao crescerem ficam emaranhadas com estes cabos e que em caso de queda ou incêndio implicam prejuízos diretos pelo corte do abastecimento eléctrico e de telecomunicações e provocam vários prejuízos indiretos.

Qualquer árvore que esteja inclinada para a via, e que se ao tombar a sua copa já atingisse a via, deve ser cortada quanto antes.

Está estabelecido pelo DL 124/2006 que se deve cortar 10 m no mínimo para cada lado, mas tal é insuficiente quando a estrada é estreita, ou até para uma estrada mais larga, quando há floresta continua dos dois lados, ao mesmo nível, pois a faixa de árvores ao arder ao mesmo tempo, em especial se for alta, 10-20 m, gera muita radiação na ordem de MW, com uma frente de radiação quase plana, assim esta tem um grande alcance o que faz inflamar a tinta e pneus dos automóveis em poucos segundos mesmo que a 20 m de distância. No caso das árvores estarem num plano elevado em relação à via, a radiação emitida para a via será diminuta.”

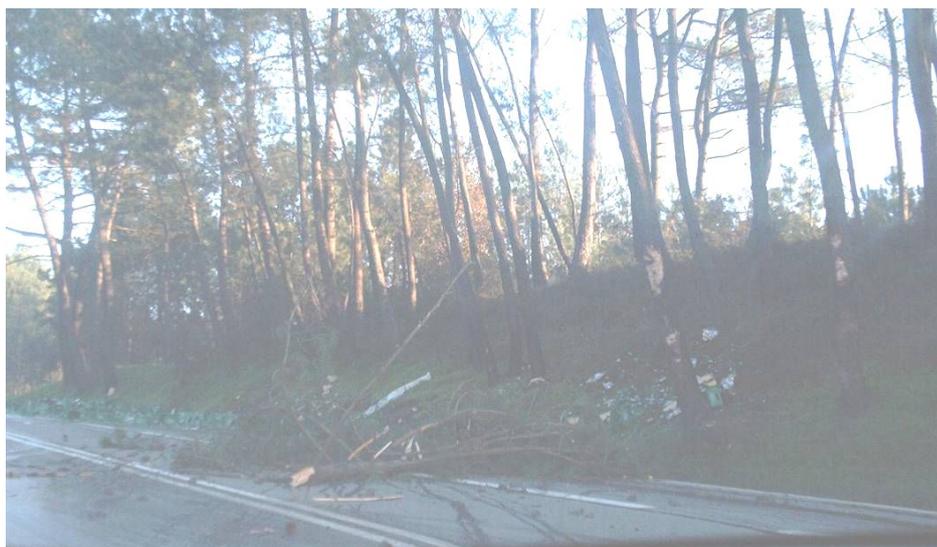


Imagem 8.8.1 - EN1 em Sargento Mor, 8/12/2003, foi cortada devido a Colisão de tejadilho de semi-reboque com ramo



Imagem 8.8.2 - St^a Luzia, a EN1 ficou cortada nos dois sentidos com queda de árvores, 22-12- 2003, devido ao vento.

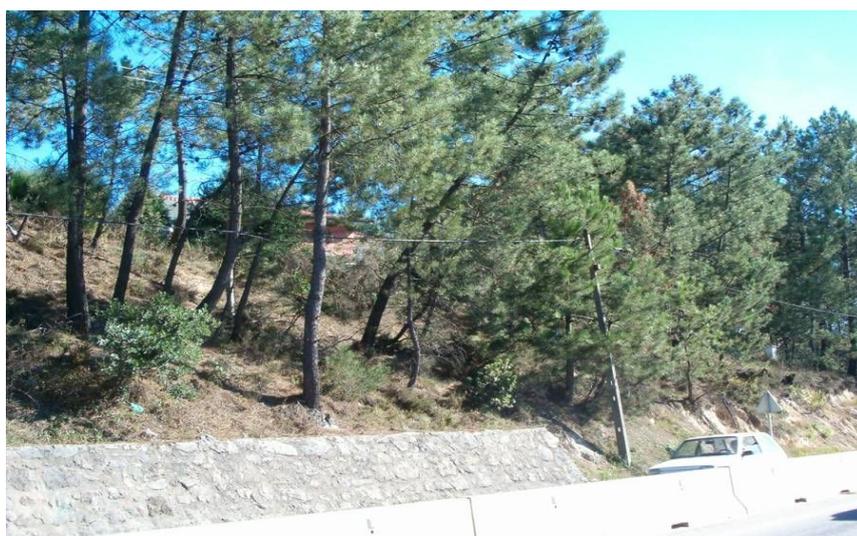


Imagem 8.8.3 – Rede eléctrica emaranhada nas árvores, EN1 sentido S-N, Cernache, a 8 km de Coimbra

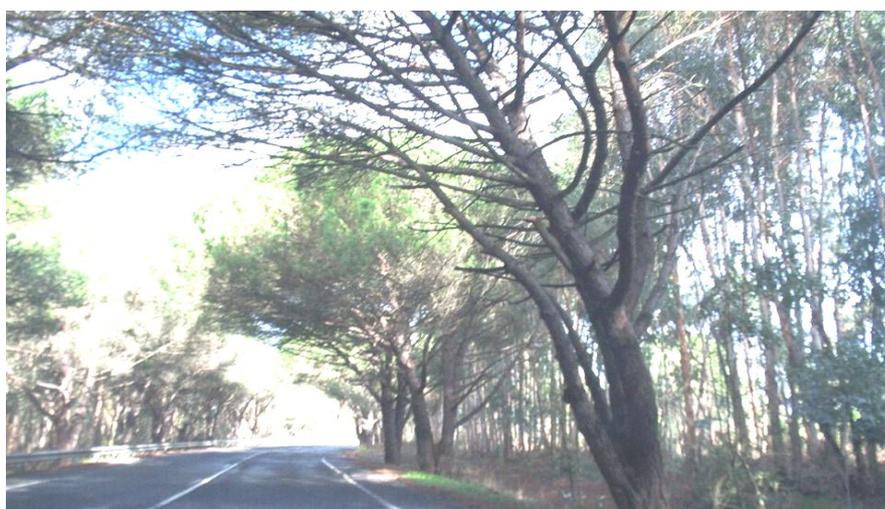


Imagem 8.8.4 – Ramos a serem partidos pelos semi-reboques, EN10,

A colisão de viaturas com o tronco das árvores em caso de despiste ou outro motivo, provoca geralmente, morte e/ou ferimentos graves.

As guardas de segurança são colocadas nos pontos negros das rodovias e nas bermas cuja localização, características, desnivelamento ou obstáculos fixos e rígidos existentes a menos de 2 m

do limite da faixa de rodagem se revelem susceptíveis de provocar danos superiores aos causados pelo embate nos mesmos, nomeadamente encontros de pontes, pilares, muros, postes e árvores de grande porte (art 3º da Lei 33 de 2004).



Imagem 8.8.5 – Ramos sobre a EN10,



Imagem 8.8.6 – Colisão com árvore, EUA, (nota - o condutor não morreu).

No mês de agosto nos dias úteis, acima dos 38 °C, há um crescimento exponencial de ocorrências (média de incêndios/dia) com a temperatura máxima diária, mas ao fim-de-semana isso não acontece devido a circularem poucos veículos pesados (cerca de 40%).

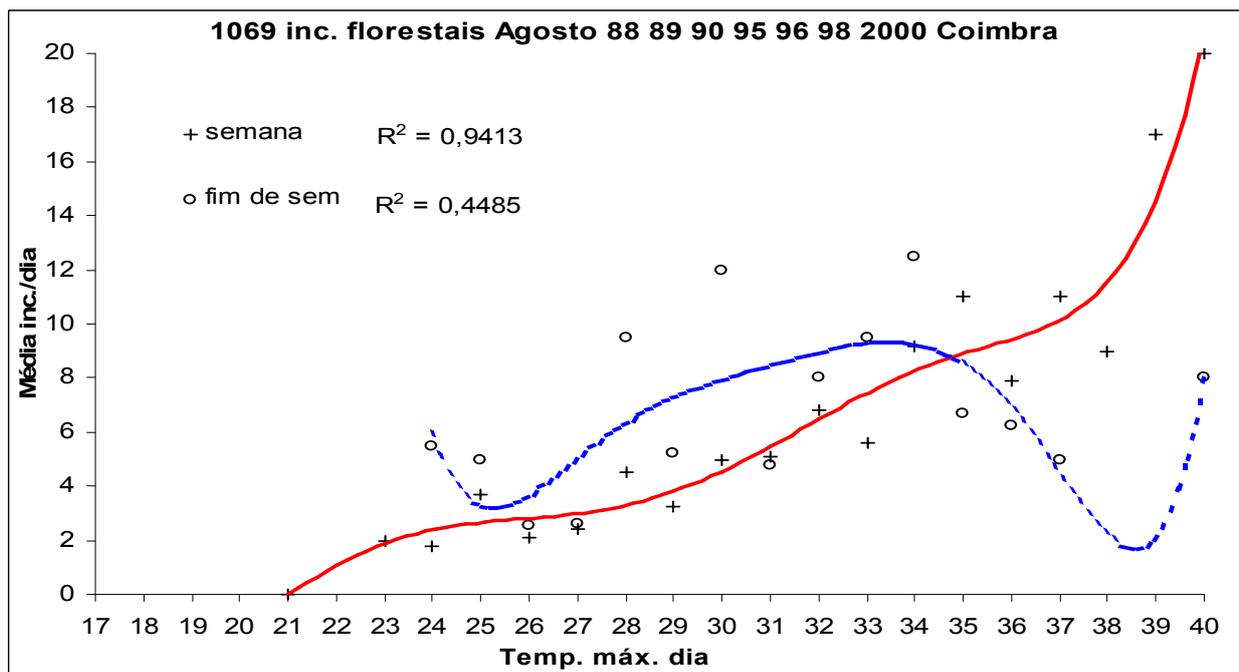


Gráfico 8.8.1 – Análise a 1069 incêndios, de 7 anos, do mês de Agosto na zona de Coimbra, média dia/temp. máx. dia

Os incêndios na A1 são na maioria junto a esta, registo do autor no verão de 2003, em 15 incêndios 12 ocorreram junto à autoestrada.

| | km | origem | fotos | descrição |
|----|---------|----------|-------------|--|
| 1 | 91 | | 20-Oct-2003 | sentido SN pinhal 100m ext por 50 larg |
| 2 | 98 | | | sentido NS lateral junto viaduto |
| 3 | 102,5 | exterior | | sentido SN 500m ext pinhal por 1 km larg |
| 4 | 130 | | | sentido SN |
| 5 | 132 | | 15-Nov-2003 | sentido NS encosta de pinheiros 150 m ext |
| 6 | 147,5 | | | sentido NS berma de pinheiros 10 m ext |
| 7 | 189,5 | | 19-Oct-2003 | sentido SN JUNTO VIA RÁPIDA EN342? |
| 8 | 196 | viatura | 20-Oct-2003 | viatura ardeu na berma e incendiou arriba |
| 9 | 200 | | 5-Oct-2003 | sentido SN existe registo da ocorrência |
| 10 | 212 | | 5-Oct-2003 | sentido SN |
| 11 | 216,5 | | | sentido SN |
| 12 | 219,6 | | 25-Sep-2003 | sentido SN ext 100m por 3 m largura |
| 13 | 244-245 | exterior | | ardeu dos dois lados 1km ext por vários Km de larg |
| 14 | 279,5 | | | sentido NS eucaliptos 100 ext por 200 largura |
| 15 | 281,7 | | | sentido NS |

Tabela 8.8.1 - 15 Incêndios na A1, verão de 2003

Exemplo da maioria de incêndios na A1, ser junto a esta (fotografia durante o verão de 2004).



Imagem 8.8.7 – Incendio junto à A1, km 149, S-N, 17/09/2004

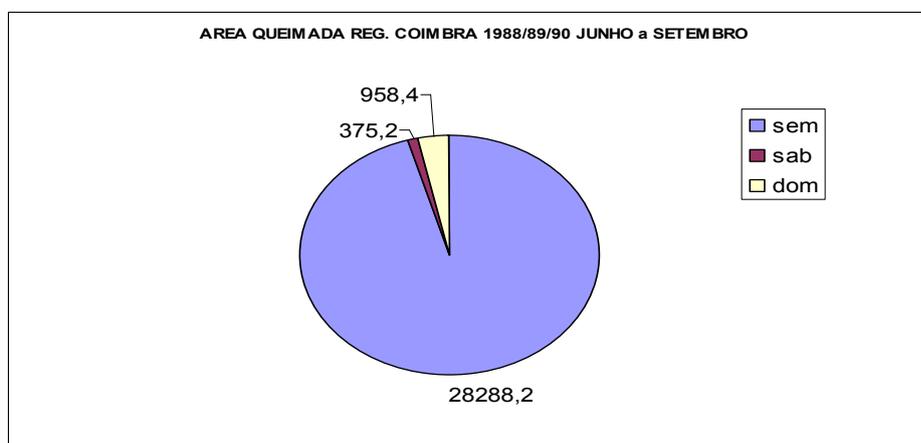


Gráfico 8.8.2 - Análise de 3 anos, de junho a setembro, zona de Coimbra, 95% da área queimada teve início à semana