



FCTUC FACULDADE DE CIÊNCIAS
E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE COIMBRA

DEPARTAMENTO DE
ENGENHARIA MECÂNICA

ANÁLISE DAS CARACTERÍSTICAS DAS PARTÍCULAS COM POTENCIAL DE PRODUÇÃO DE FOCOS SECUNDÁRIOS DE INCÊNDIOS

Dissertação apresentada para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica

Autora

Marta Fernández Miró

Orientadores

Professor Doutor Domingos Xavier Filomeno Carlos Viegas

Doutor Miguel Abrantes de Figueiredo Bernardo de Almeida

Júri

Presidente Professor Doutor António Rui de Almeida Figueiredo
Professor da Universidade de Coimbra

Vogais Professor Doutor José Manuel Baranda Moreira da Silva Ribeiro
Professor da Universidade de Coimbra

Orientador Professor Doutor Domingos Xavier Filomeno Carlos Viegas
Professor da Universidade de Coimbra

Colaboração Institucional



**Associação para o
Desenvolvimento da
Aerodinâmica
Industrial**

Coimbra, Fevereiro, 2015

Agradecimentos

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

Ao Professor Doutor Domingos Xavier Viegas, por aceitar ser o meu orientador e aconselhar-me durante as fases do processo.

Ao Doutor Miguel Abrantes de Figueiredo Bernardo de Almeida, que sempre se mostrou disponível e compartilhou comigo os seus conhecimentos, sem o qual não teria sido possível realizar este trabalho.

Aos colaboradores do CEIF –ADAI, Mestre Jorge Raposo, Nuno Luís, Mestre Ricardo Oliveira, Ana Beatriz e Mestre Cláudia Pinto, que se comportaram estupidamente comigo mostrando apoiando-me sempre que foi preciso.

A minha Família pelo apoio incondicional que me deram em todo momento.

Resumo

O presente trabalho foi desenvolvido no contexto da propagação de incêndios florestais por focos secundários, consistindo no estudo das características das partículas incandescentes libertadas durante a queima de combustíveis florestais. O trabalho aqui apresentado aborda dois temas distintos que irão ser seguidamente resumidos.

O primeiro tema consiste na análise dos momentos de resistência que atuam numa partícula em rotação durante o seu transporte aerodinâmico no processo de formação de um foco secundário. Este estudo integra-se num trabalho mais extenso, no âmbito da propagação de incêndios florestais por focos secundários, que tem vindo a ser desenvolvido no seio da Associação para o Desenvolvimento da Aerodinâmica Industrial, que pretende criar um modelo de cálculo para determinação da distância de transporte de partículas incandescentes libertadas durante incêndios florestais.

Durante o transporte, as partículas incandescentes são sujeitas a correntes de convecção e forças de atrito geradas pelo escoamento que produzem um momento que é atrasado por uma resistência a que chamámos “momento de resistência”. O objectivo deste trabalho foi calcular essa resistência por meio de ensaios laboratoriais em que diversas peças geométricas artificialmente produzidas e outras peças naturais foram testadas num dispositivo especificamente criado para estes ensaios. Embora se tenha obtido um conjunto interessante de resultados laboratoriais, o algoritmo para determinação dos momentos de resistência não foi concluído. Resultaram no entanto deste trabalho dados que poderão suportar o desenvolvimento teórico e a validação desse algoritmo.

A segunda parte deste trabalho incidiu na caracterização de partículas incandescentes libertadas durante o processo de queima de combustíveis florestais de diferentes tipos, nomeadamente cascas do tronco de eucalipto, arbustos, ramos e folhada de eucalipto. Nestes ensaios foi utilizado um equipamento de velocimetria de partículas (PIV Particle Image Velocimetry) composto por uma câmara.

As características analisadas foram a velocidade, direcção, área e número das partículas libertadas, transportadas na coluna de fumo.

Palavras-chave: focos secundários, resistência ao momento, PIV, partícula libertada, eucalipto

Índice

Índice de Figuras	ix
Índice de Tabelas	xiii
Siglas	xv
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Focos Secundários	1
1.2. Objectivos	3
1.3. Fundamentos teóricos	5
1.3.1. Características aerodinâmicas	5
1.3.2. Velocimetria de partículas	8
1.4. Estado de arte	8
2. METODOLOGIA	11
2.1. Determinação dos momentos resistentes	11
2.1.1. Procedimento experimental	11
2.1.2. Características dos ensaios	13
2.2. Análise de libertação de partículas	17
2.2.1. Procedimento experimental	17
2.2.2. Características dos ensaios	18
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	25
3.1. Momentos resistentes	25
3.2. Velocimetria de partículas	33
3.2.1. Número e área das partículas em função do tempo	33
3.2.2. Velocidade das partículas em relação ao escoamento	34
3.2.3. Número de partículas em função da velocidade	38
3.2.4. Comparação das componentes horizontais e verticais das velocidades das partículas libertadas	49
3.2.5. Área das partículas em função de suas velocidades	53
4. CONCLUSÕES	59
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	61

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 – Propagação per focos secundários	2
Figura 2 – Distribuição de tensões	5
Figura 3 – Esquema de forças.....	6
Figura 4 – Esquema do momento de resistência.	7
Figura 5 – Polia com a massa enrolada no disco	11
Figura 6 – (a) Foto do mecanismo sem a peça, (b) Foto do mecanismo com a peça em análise.	12
Figura 7 – Dispositivos usados para o estudo da resistência ao momento	13
Figura 8 – Plataforma elevatória.	14
Figura 9 – Berbequim colocado em funcionamento no contorno do disco.	14
Figura 10 – Amostras usadas na determinação dos momentos resistentes.....	15
Figura 11 – Imagem captada pelo PIV.	19
Figura 12 – (a) Câmara ótica do PIV, (b) Amostra colocada na mesa de combustão	19
Figura 13 – Fotografia do PIV1	20
Figura 14 – Fotografia do PIV2.....	21
Figura 15 – Fotografia do PIV3.....	21
Figura 16 – (a) Fotografia do PIV4, (b) Fotografia do PIV6	22
Figura 17 – Fotografia do PIV5.....	22
Figura 18 – Velocidade angular (ω) das amostras e Padrão: 10,15g.....	26
Figura 19 - Aceleração angular (α) das amostras e Padrão: 10,15g.....	26
Figura 20 – Gráfico 1 da velocidade angular (ω) das amostras e Padrão: 20,77g.....	27
Figura 21 - Gráfico 1 da aceleração angular (α) das amostras e Padrão: 20,77g.....	27
Figura 22 – Gráfico 2 da velocidade angular (ω) das amostras e Padrão: 20,77g.....	29
Figura 23 – Gráfico 2 da aceleração angular (α) das amostras e Padrão: 20,77g.....	29
Figura 24 – Gráfico 1 da velocidade angular (ω) das amostras e padrões com o segundo método.	31
Figura 25 - Gráfico 1 da aceleração angular (α) das amostras e padrões com o segundo método.	31
Figura 26 - Gráfico 2 da velocidade angular (ω) das amostras e padrões com o segundo método	32

Figura 27 - Gráfico 2 da aceleração angular (α) das amostras e padrões com o segundo método.....	32
Figura 28 – Gráfico do número acumulado adquirido de Almeida et al.,(2014)	34
Figura 29 - Gráfico da área acumulada adquirido de Almeida et al.,(2014).....	34
Figura 30 – PIV1, Velocidade das partículas ascendentes em relação ao escoamento.....	35
Figura 31 – PIV2, Velocidade das partículas ascendentes em relação ao escoamento.....	35
Figura 32 – PIV4, Velocidade das partículas ascendentes em relação ao escoamento.....	36
Figura 33 – PIV5, Velocidade das partículas ascendentes em relação ao escoamento.....	37
Figura 34 – PIV6, Velocidade das partículas ascendentes em relação ao escoamento.....	37
Figura 35 – Número de partículas em função do valor da componente vertical da velocidade (V) para o ensaio PIV1.	39
Figura 36 – Número de partículas em função do valor da componente horizontal da velocidade (U) para o ensaio PIV1.	39
Figura 37 – Número de partículas em função do valor da componente vertical da velocidade (V) para o ensaio PIV2.	40
Figura 38 – Número de partículas em função do valor da componente horizontal da velocidade (U) para o ensaio PIV2.	40
Figura 39 - Número de partículas em função do valor da componente vertical da velocidade (V) para o ensaio PIV3.	41
Figura 40 - Número de partículas em função do valor da componente horizontal da velocidade (U) para o ensaio PIV3.	41
Figura 41 - Número de partículas em função do valor da componente vertical da velocidade (V) para o ensaio PIV4.	42
Figura 42 – Número de partículas em função do valor da componente horizontal da velocidade (U) para o ensaio PIV4.	42
Figura 43 – Número de partículas em função do valor da componente vertical da velocidade (V) para o ensaio PIV5.	43
Figura 44 – Número de partículas em função do valor da componente horizontal da velocidade (U) para o ensaio PIV5.	43
Figura 45 – Número de partículas em função do valor da componente vertical da velocidade (V) para o ensaio PIV6.	44
Figura 46 – Número de partículas em função do valor da componente horizontal da velocidade (U) para o ensaio PIV6.	45
Figura 47 – Número de partículas libertadas em função do tempo.....	46
Figura 48 – Número de partículas em função do valor da componente vertical da velocidade (V) para todos os ensaios.....	47
Figura 49 - Percentagem de partículas em função do valor da componente vertical da velocidade (V) para todos os ensaios.....	47

Figura 50 – Número de partículas em função do valor da componente horizontal da velocidade (U) para todos os ensaios.	48
Figura 51 - Percentagem de partículas em função do valor da componente horizontal da velocidade (U) para todos os ensaios.	48
Figura 52 – PIV1, Número de partículas multiplicadas pela velocidade media em função do tempo.	50
Figura 53 – PIV2, Número de partículas multiplicadas pela velocidade media em função do tempo.	50
Figura 54 – PIV3, Número de partículas multiplicadas pela velocidade media em função do tempo.	51
Figura 55 – PIV4, Número de partículas multiplicadas pela velocidade media em função do tempo.	51
Figura 56 – PIV5, Número de partículas multiplicadas pela velocidade media em função do tempo.	52
Figura 57 – PIV6, Número de partículas multiplicadas pela velocidade media em função do tempo.	52
Figura 58 – Imagem captada pelo PIV no segundo 0,5 do ensaio PIV4.	53
Figura 59 – (a) PIV1, Área das partículas em função da velocidade “V” no eixo vertical , (b) PIV1, Área das partículas em função da velocidade “U” no eixo horizontal. .	53
Figura 60 - (a) PIV2, Área das partículas em função da velocidade “V” no eixo vertical , (b) PIV2, Área das partículas em função da velocidade “U” no eixo horizontal. .	54
Figura 61 - (a) PIV3, Área das partículas em função da velocidade “V” no eixo vertical , (b) PIV3, Área das partículas em função da velocidade “U” no eixo horizontal. .	54
Figura 62 - (a) PIV3, Área das partículas em função da velocidade “V” no eixo vertical , (b) PIV3, Área das partículas em função da velocidade “U” no eixo horizontal. .	55
Figura 63 - (a) PIV3, Área das partículas em função da velocidade “V” no eixo vertical , (b) PIV3, Área das partículas em função da velocidade “U” no eixo horizontal. .	55
Figura 64 - (a) PIV3, Área das partículas em função da velocidade “V” no eixo vertical , (b) PIV3, Área das partículas em função da velocidade “U” no eixo horizontal. .	56
Figura 65 - Área das partículas em função da velocidade (V) no eixo das “y” para todos os cenários.	56
Figura 66 – Percentagem da área das partículas em função da velocidade (V) no eixo das “y” para todos os cenários.	57
Figura 67 - Área das partículas em função da velocidade (U) no eixo das “x” para todos os cenários.	57
Figura 68 - Percentagem da área das partículas em função da velocidade (U) no eixo das “x” para todos os cenários.	58

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 – Características físicas das amostras	15
Tabela 2 – Características dos combustíveis	23

SIGLAS

ADAI – Associação para o Desenvolvimento da Aerodinâmica Industrial

DEM – Departamento de Engenharia Mecânica

FCTUC – Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra

LEIF – Laboratório de Estudo sobre Incêndios Florestais

1. INTRODUÇÃO

1.1. Focos Secundários

Os incêndios florestais consistem no fogo que se estende sem controlo em áreas florestais, podendo ocasionar grandes danos na floresta, assim como perdas humanas e económicas. O seu estudo é de grande relevância para que se consiga prever e actuar pronta e eficazmente no sentido da mitigação dos efeitos de um incêndio. Para além da propagação da frente de chama pelos mecanismos normais de indução, radiação e convecção, deve ter-se em consideração a possível propagação do fogo através de focos secundários.

A propagação por focos secundários, é esse novo foco de incêndio que se cria devido às partículas incandescente libertadas e transportadas, procedentes do fogo inicial, ao entrar em contacto com um leito combustível.

Algumas destas partículas podem ser transportadas a distâncias muito curtas (algumas dezenas de metros), contribuindo para o aumento da velocidade de propagação do incêndio. (Almeida 2011). Outras podem ser transportadas a médias distâncias, até um quilómetro da frente da chama. Ou a grandes distâncias, (alguns quilómetros), inclusivamente a mais de 10km, como o caso registado em Victoria - Austrália, em 1965, com um foco secundário a surgir a cerca de 29Km da sua zona de origem (McArthur, 1967).

Os elementos que influenciam o comportamento do fogo e a sua propagação são: os fatores climáticos, como a velocidade e a direção do vento; as condições topográficas, como a inclinação e relevo; as características edáficas do solo; as propriedades das partículas transportadas e as características da vegetação, assim como a humidade, tamanho e abundância do combustível com o qual a partícula ao cair vai entrar em contacto (Byram, 1959, McArthur, 1967; Cheney e Bary, 1969; Tarifa et al., 1969).

O mecanismo de formação de um foco secundário pode ser dividido em três fases segundo Pagni e Woicheese, 2000: (1) elevação da partícula incandescente, (2) transporte com maior componente horizontal e (3) deposição da partícula com início de uma nova ignição. Outros autores (*Tarifa, 1965, 1967; Albini, 1979, 1981, 1982, 1983a e 1983b*) combinaram o efeito da elevação da partícula com o seu transporte por correntes horizontais.

Almeida (2011) divide-o em quatro fases: (1) emissão de partículas, (2) elevação das partículas incandescentes, (3) transporte das partículas pelo escoamento horizontal e (4) ignição do leito onde a partícula aterra.

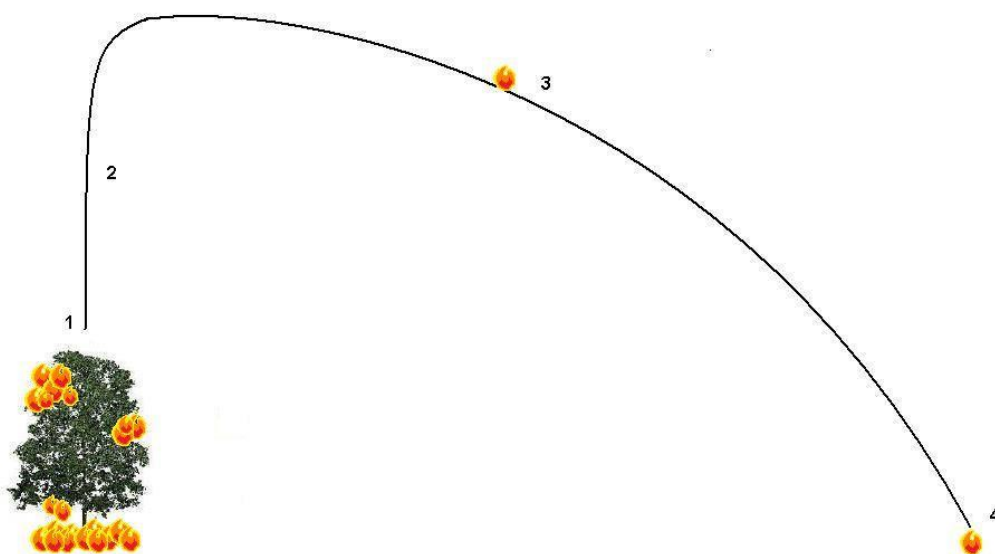


Figura 1 – Propagação per focos secundários

De acordo com Almeida (2011) (Figura 1), a primeira fase consiste na libertação das partículas incandescentes emitidas pelo fogo. Esta fase depende da intensidade do incêndio, das características das partículas e do campo de ventos. A libertação da partícula pode ser precedida da sua ignição ou pode acontecer que uma partícula seja libertada e a sua ignição se inicie durante a fase de elevação.

Cabe mencionar que as árvores de eucalipto estão entre as principais fontes de libertação de partículas com potencial de criar focos secundários (*McArthur, 1967*), sendo objeto de estudo neste trabalho.

Uma vez libertadas, as partículas são elevadas (Fase 2) pelas correntes convectivas criadas pelo escoamento ascendente do fogo.

À medida que uma partícula vai sendo elevada e a componente horizontal do escoamento vai aumentando. Atinge-se o maior valor da altura de elevação, quando a partícula abandoa a pluma térmica e inicia o seu movimento descendente com grande componente horizontal. No transporte descendente da partícula (Fase 3) além da influencia da componente horizontal da célula convectiva, também influenciam na trajetória a componente do vento e a componente vertical da velocidade terminal. O vetor resultante do escoamento respeito a sua orientação relativa à partícula e intensidade podem gerar rotação na partícula.

Durante as fases de elevação (Fase 2) e de transporte descendente (Fase 3), uma partícula pode encontrar-se em vários estados de combustão: combustão com chama, combustão sem chama e extinção.

Finalmente quando a partícula entra em contacto com o solo, as probabilidades de ignição do leito em que aterra dependem do tipo de combustão da partícula nesse momento, do teor de humidade e das características físicas do leito (*Byram 1959, Cheney e Bary, 1969; Luke e Mc Arthur, 1978*).

1.2. Objectivos

Este trabalho integra-se num estudo mais abrangente sobre a propagação de incêndios florestais por focos secundários.

Neste trabalho são estudadas determinadas características das partículas em dois pontos diferentes do processo de formação de focos secundários. A primeira parte decorre na fase de transporte de partículas (Fase 3) e a segunda na fase de libertação (Fase 1).

A primeira parte do trabalho consistiu na análise do momento de resistência de uma partícula, durante a deslocação, quando está a rodar entorno o eixo inercial que atravessa o seu centro de massas.

A partícula está sujeita a correntes de escoamento que geram uma força resultante e um momento na partícula. Devido as forças de atrito que inserem na partícula quando está a rodar com cada vez mais velocidade, cria-se uma resistência a esse momento. Sendo este o objetivo de estudo.

O estudo é por meio da determinação das velocidades e acelerações para diferentes peças geométricas construídas artificialmente e partículas naturais.

Este apartado pretende complementar o trabalho realizado por Almeida (2011) sobre os focos secundários, onde foi desenvolvido um modelo de cálculo que permite prever a trajetória de cascas tubulares de eucalipto *Eucalyptus globulus* libertadas durante um incêndio florestal. Nesse trabalho foram analisados as forças coeficientes aerodinâmicos de resistência, sustentação e de momento. Não foi no entanto considerada a resistência ao momento rotacional responsável de atrasá-lo e pelo tanto um parâmetro importante que influi no cálculo da trajetória.

A segunda parte foca-se na fase de libertação de partículas incandescentes (Fase 1), onde o objetivo do estudo consistiu na caracterização das partículas libertadas durante a queima de combustíveis florestais procedentes do árvore de eucalipto *Eucalyptus globulus* Labill., utilizando a técnica de velocimetria de partículas (PIV – *Particle Image Velocity*), que através da captação de imagens permite analisar bidimensionalmente o número e dimensões das partículas libertadas, assim como as suas velocidades de transporte.

A análise efetuada consistiu no tratamento e análise dos valores de velocidade e direção das partículas libertadas durante a queima em laboratório de seis leitos de combustíveis com diferentes propriedades.

Estes ensaios haviam sido realizados anteriormente (Almeida et al., 2014) tendo sido analisados o número de partículas e a sua área projetada, os quais foram tidos em consideração no presente trabalho.

1.3. Fundamentos teóricos

1.3.1. Características aerodinâmicas

No estudo da propagação por focos secundários é importante conhecer o comportamento aerodinâmico das partículas em questão. As características aerodinâmicas de uma partícula relacionam-se com a resistência que estas oferecem quando estão sujeitas a um escoamento traduzidas por forças de tensão normal devida à distribuição de pressão (p) e de tensão tangencial provocada pela distribuição de tensão viscosa (τ), representadas na Figura 2.

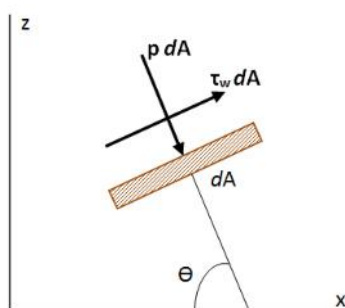


Figura 2 – Distribuição de tensões

As distribuições de pressão e tensão aplicadas ao longo da superfície do corpo criam uma força resultante (F_R) e um momento (M).

A força resultante pode ser descomposta numa força na direção do escoamento, denominada força de arrasto (F_A), e outras forças nas direções normais ao escoamento, denominadas força de sustentação (F_S), tal como representado na Figura 3. As equações (1), (2) e (3) permitem determinar estas forças de resistência descritas.

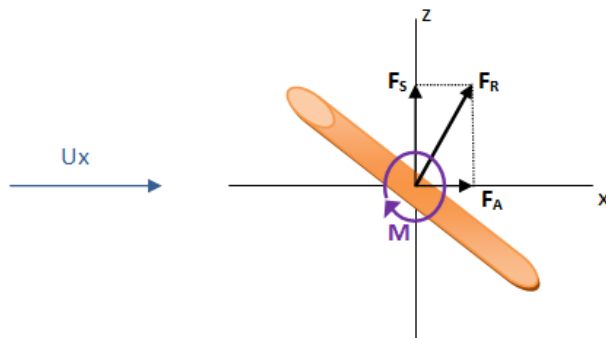


Figura 3 – Esquema de forças

Força de arrasto:

$$F_A = \int d F_x = \int p \cos \theta dA + \int \tau \sin \theta dA \quad (1)$$

Força de sustentação:

$$F_S = \int d F_z = \int p \sin \theta dA + \int \tau \cos \theta dA \quad (2)$$

Momento:

$$M_y = \int [(p \cos \theta dA + \tau \sin \theta)x - (p \sin \theta dA + \tau \cos \theta)z] dA \quad (3)$$

Onde dA representa elemento infinitamente pequeno de área, e θ é o ângulo compreendido entre o eixo das X e a aplicação da pressão, sendo esta sempre perpendicular à superfície.

As forças resultantes, as características físicas da partícula e a pressão dinâmica podem ser relacionadas definindo parâmetros adimensionais chamados coeficientes aerodinâmicos, descritos pelas equações (4), (5), e (6) tendo como variáveis independentes a superfície normal à força aplicada (A), a velocidade do escoamento nesse eixo (U) e a densidade do ar (ρ_{ar}).

$$C_A = \frac{2 \cdot F_A}{A \cdot U^2 \cdot \rho_{ar}} \quad (4)$$

$$C_S = \frac{2 \cdot F_S}{A \cdot U^2 \cdot \rho_{ar}} \quad (5)$$

$$CM_y = \frac{2 \cdot M_y}{A \cdot U^2 \cdot \rho_{ar}} \quad (6)$$

Quando a causa das correntes convectivas do escoamento (U_e) que inserem na partícula, esta é impulsada a rodar aerodinamicamente sobre o seu próprio eixo de rotação localizado no centro de massas, gera o momento e provoca nela uma velocidade rotacional crescente.

Nesse instante, além dos parâmetros previamente descritos que influenciam no seu comportamento, inserem sobre ela as forças de resistência geradas pelo atrito.

Ao aumentar a velocidade aumentam as forças de atrito, originando uma resistência cada vez maior que se opõe a aceleração. Esta resistência atrasa ao momento (M) e a denominamos “momento de resistência” (M_R). (Figura 4)

Cada vez a resistência é maior e a aceleração menor.

No instante em que se igualam as forças devidas a aceleração gravítica com as forças de resistência, a partícula atinge a máxima velocidade, denominada velocidade terminal.

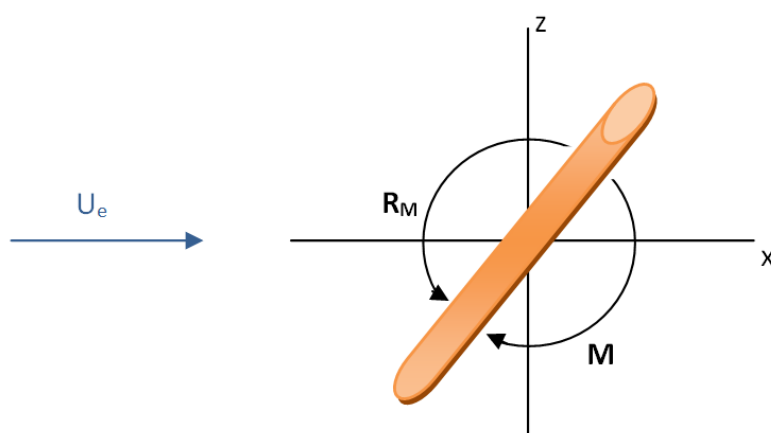


Figura 4 – Esquema do momento de resistência.

1.3.2. Velocimetria de partículas

A velocimetria de partículas (PIV – *Particle Image Velocimetry*) é um método ótico vulgarmente utilizado para determinar as propriedades de um fluido mediante a visualização com uma câmara ótica e captação de imagens das partículas que se movimentam pelo escoamento, denominadas traçadoras.

A determinação da velocidade das partículas libertadas é feita com base na distância percorrida por cada partícula entre duas imagens consecutivas captadas num curto espaço de tempo. Para além da velocidade e direção das partículas, cada imagem é analisada automaticamente com vista à determinação do número e dimensões das partículas libertadas. A determinação deste conjunto de variáveis são fundamentais para a determinação da sua trajetória após a sua libertação

1.4. Estado de arte

Os estudos no contexto dos focos secundários foram iniciados por Byram (1954) , tendo sido continuados por Tarifa (1965; 1967) que estudou os coeficientes de resistência e as velocidades terminais de partículas de madeira com formas regulares, nomeadamente: cilindros, placas e esferas. Utilizando um túnel vertical de combustão, este estudo teve como objetivo a determinação da distância máxima de transporte, os tempos de combustão e a trajetória das partículas num plano bidimensional.

Posteriormente os autores Lee e Helman (1969, 1970) usaram modelos tridimensionais no estudo do comportamento de partículas, e Muraszew (1976) postulou que as trajetórias de partículas que atingiam longas distâncias se deviam à formação de turbilhões na pluma térmica responsável pela elevação das partículas.

Clements (1977) calculou empiricamente as velocidades terminais das partículas largando as partículas de uma altura determinada e medindo o tempo de queda. Paralelamente fez uso de um túnel de combustão vertical com objetivo de determinar os coeficientes aerodinâmicos de partículas naturais como pinhas e folhas, aproximando-se mais da realidade no cálculo de coeficientes de resistência.

Albini (1979, 1981, 1983a, 1983b) estudou as trajectórias das partículas considerando os efeitos tridimensionais da ascensão na pluma térmica e considerando a variação das propriedades de uma partícula, nomeadamente da sua velocidade terminal, ao longo do processo de combustão durante o transporte. Weber e Mestre (1990) aprofundaram neste estudo.

Ellis (2000) realizou ensaios num túnel de combustão vertical, visando analisar as características aerodinâmicas das cascas de eucalipto.

Andersen et al., (2005a e 2005b); Hirata (2009), Almeida (2011) concluíram que as diferentes movimentações que uma partícula experimenta durante a sua deslocação: *tumbling*, *fluttering* ou caótico, é um aspeto que influi na determinação da trajetória de uma partícula. A movimentação em tumbling é quando a partícula roda em torno ao seu eixo rotacional, este tipo de movimentação é frequente nas partículas que atingem distâncias mais longas. Em fluttering a partícula balanceia-se para a direita e esquerda durante o transporte com a superfície plana paralela ao solo, e caótico é qualquer movimentação não repetitiva. Sendo aplicáveis para o movimento em tumbling, os parâmetros analisados na primeira parte deste trabalho.

Almeida et al, (2011) fizeram um modelo de cálculo que permite prever a trajectória de uma casca de eucalipto *Eucalyptus globulus* tubular, considerando as orientações do escoamento relativamente à partícula, e calculando os seus coeficientes aerodinâmicos em todas as orientações.

Cada vez se incluíram mais parâmetros no cálculo da trajetória das partículas, para prever sua deslocação. A primeira parte deste trabalho infere na determinação de um parâmetro mais para que o modelo de cálculo da trajetória seja mais exato.

Na fase da libertação Sardoy et al., (2007) usaram modelos computacionais e matemáticos para determinar as características, distribuição e número das partículas projectadas.

Manzello (2007, 2008) centrou-se na emissão das partículas a partir da queima de vários tipos de árvores e arbustos, medindo a perda de massa de cada arbusto e o tamanho das partículas.

A técnica PIV já se usava para a caracterização de fluidos, no entanto não foi até mais adiante que começou-se a aplicar no âmbito de incêndios florestais.

Taranto (2010), usou a metodologia PIV para determinar as características físicas e dinâmicas das partículas nos incêndios.

Morandini et al, (2012); Horváth et al., (2012) usaram o sistema PIV para determinar as características da chama e o escoamento convectivo.

A aplicação desta técnica para o estudo de focos secundários ainda não é muito usual.

Conhece-se o artigo de Almeida et al., (2014) o qual usa-se de referência neste trabalho.

2. METODOLOGIA

Neste capítulo são descritos os equipamentos, as amostras e a metodologia referentes aos ensaios realizados.

2.1. Determinação dos momentos resistentes

2.1.1. Procedimento experimental

Este procedimento tem como finalidade a aquisição de velocidades de rotação e acelerações em cada instante de tempo de diferentes peças de formas geométricas artificiais e partículas naturais, com o uso de dos métodos ligeiramente variados.

O procedimento foi o seguinte:

No primeiro método enrolou-se numa roldana um fio com 8m ligado num extremo ao disco e no outro extremo a uma massa.

Os ensaios foram feitos com duas massas de 10,15g e 20,77g. O ensaio iniciou-se com o fio enrolado no disco e a massa parada (Figura 5). Quando se largava a massa, esta descia numa altura de 7,51 metros até embater no chão, altura em que a leitura da velocidade angular parava. Um computador ligado à roldana registra a velocidade de rotação em cada instante para posterior cálculo da aceleração.

Fizeram-se ensaios com a peça a estudar e sem ela, usando os ensaios sem peça de referência. A peça fixou-se no plano exterior do disco no seu eixo de rotação (Figura 6b)



Figura 5 – Polia com a massa enrolada no disco

Nos ensaios por meio da outra metodologia, a rotação do disco foi feita com um berbequim. O berbequim ligado à corrente foi colocado em contacto ao contorno do disco para transmitir-lhe sua velocidade e gerar rotação. Quando o disco adquiria a velocidade máxima do berbequim, estas duas peças eram desencostadas e iniciava-se o registo os dados com o computador. Destes ensaios resulta a desaceleração do disco ao longo do tempo. Com este método também fizeram-se ensaios com peça e sem ela. Esta vez a peça foi colocada no outro extremo da vara rotatoria.

Os ensaios, tanto para um método como para o outro, foram repetidos 3 vezes para cada condição de ensaio. Para a análise dos dados descartaram-se os valores extremos e fez-se a média dos restantes valores.

Para a colocação das amostras na roldana, foram furadas no eixo do centro de massas do eixo de rotação em análise.

Nos ensaios feitos sem a adição da peça (Figura 6a), o momento resultante (M_{total}) é obtido dos momentos gerados pela poli e as forças de atrito que incidem nela (M_{poli}), Equação $M_{TOTAL} = M_{POLI}$ (7).

No entanto quando se coloca a peça em análise (Figura 6b), adicionam-se também os momentos e forças de atrito da peça ($M_{peça}$), Equação ($M_{TOTAL} = M_{POLI} + M_{PEÇA}$) (8).

Nesta perspetiva, a diferença entre o sistema com peça e o sistema sem peça resulta o momento que a peça proporciona.



$M_{TOTAL} = M_{POLI}$ (7)
(a)



$M_{TOTAL} = M_{POLI} + M_{PEÇA}$ (8)
(b)

Figura 6 – (a) Foto do mecanismo sem a peça, (b) Foto do mecanismo com a peça em análise.

2.1.2. Características dos ensaios

2.1.2.1. Aparato experimental

O equipamento principal (Figura 7) foi constituído por: uma poli com um disco de 15,5cm de diâmetro, um *encoder* conectado a um microcontrolador colocado numa placa *Arduino* e um computador. O *encoder* sendo um leitor ótico envia um sinal de tensão para o microcontrolador sempre que o disco na sua rotação passa por determinado ponto. O microcontrolador transforma a informação obtida, enviando-a para o computador em forma de rotações por minuto (rpm). Estes dados são registados num computador que fornece as velocidades e os tempos decorridos em cada volta.

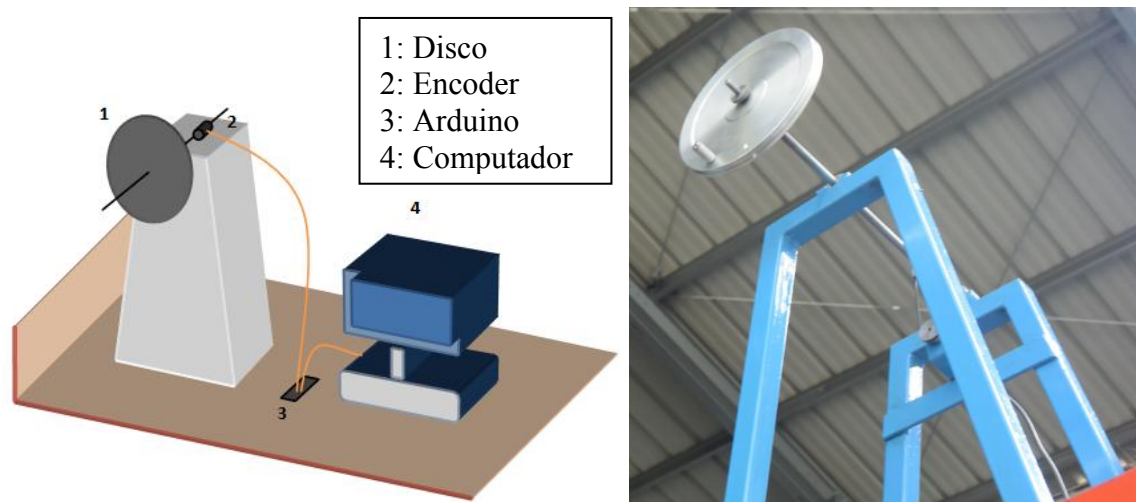


Figura 7 – Dispositivos usados para o estudo da resistência ao momento

No primeiro método usou-se um fio fino de nylon e as duas massas.

Para manter o equipo a 7,51 metros de altura, foi preciso uma plataforma elevatória representada na (Figura 8).



Figura 8 – Plataforma elevatória.

No segundo método para gerar velocidade usou-se o berbequim. a rotação do disco foi obtida através do encosto do disco a um berbequim em rotação (Figura 9).



Figura 9 – Berbequim colocado em funcionamento no contorno do disco.

2.1.2.2. Amostras

Neste subcapítulo são descritas e detalhadas as características das amostras analisadas, para o cálculo dos momentos de resistência.

As amostras usadas foram: uma casca de eucalipto plana, outra casca de eucalipto tubular, três pinhas de diferentes dimensões e 16 figuras com diferentes formas geométricas.

Todas as peças foram numeradas para facilitar a sua referência tal como representado na Figura 10.



Figura 10 – Amostras usadas na determinação dos momentos resistentes.

Suas características físicas estão sintetizadas na Tabela 1.

Tabela 1 – Características físicas das amostras

	MASSA (g)	DIMENSÕES (cm)
Nr1: CASCA TUBULAR	31,78	Comprimento: 30 Diâmetro _{equivalente} = 2,96
Nr2: CASCA PLANA	23,29	Comprimento: 12 Largura: 7 Espessura: 0,35
Nr3: PINHA	21,7	Comprimento: 5,35 Diâmetro máximo:5,47
Nr4: CILINDRO OCO	81,58	Comprimento: 30

		Diâmetro: 3,2 Espessura: 2
Nr5: CUBO	57,42	Base: 4,55
Nr 6: ESFERA	274,95	Diâmetro: 9
Nr7: PEÇA PLANA	56,66	Base: 12,5 Largura: 4 Espessura: 1,65
Nr8: CILINDRO MACIÇO	137,43	Comprimento: 9,9 Diâmetro: 5,8
Nr9: ESFERA POLIESTIRENO PEQUENHA	0,94	Diâmetro: 4,35
Nr10: ESFERA POLIESTIRENO GRANDE	4,65	Diâmetro: 6,9
Nr11: CONO HEXAGONAL	43,54	Altura: 12,2 Diâmetro <small>equivalente</small> : 4,62
Nr12: TUBO MACIÇO PEQUENHO	0,72	Comprimento: 5,96 Diâmetro: 0,95
Nr13: TUBO MACIÇO GRANDE	1,94	Comprimento: 10 Diâmetro: 9,94
Nr14: CONE	32,55	Altura: 10 Diâmetro: 4,5
Nr15: PINHA MEDIA	58,94	Comprimento: 11,15 Diâmetro: 7,92
Nr16: PINHA GRANDE	93,8	Comprimento: 13,8 Diâmetro: 9,6

A casca tubular de *Eucalyptus Globulus Lab.* Nr1 tem um extremo circular e pelo outro está enrolada. Sendo o fator de enrolamento de 0,88. Calcula-se dividendo o perímetro externo desse extremo: 8,4cm por a largura do encaracol: 9,5cm.

O ensaio foi realizado com rotação em torno do seu eixo longitudinal.

A casca plana de *Eucalyptus Globulus Lab.*, Nr2 está esburacada no centro da superfície plana, para a colocação no seu eixo de rotação.

As restantes amostras foram três pinhas de tamanhos distintos com o furo na sua base junto ao pecíolo de fixação.

Para os ensaios, além das partículas naturais, usaram-se 12 amostras de diferentes formas geométricas, destas, nove são de madeira, dois de poliestireno e uma de Policloreto de vinilo.

A amostra de Policloreto de vinilo (PVC) é o cilindro oco Nr4. Contem o furo no centro do eixo de rotação longitudinal.

Os perfis de madeira foram:

Dois cones, uno circular Nr14 e outro hexagonal Nr11. Os dois furados no centro de rotação da base.

O cubo Nr5, a esfera Nr6, dois tubos maciços de dimensões mais pequenas que o resto de amostras denominados Nr12 e Nr13, com o eixo de rotação entorno do eixo longitudinal.

Uma peça plana retangular Nr7, buracada no centro das três vistas. Chamando ao plano da cara maior “b”, ao mais pequeno “a”, e ao mediano “c”.

E um cilindro maciço Nr8. Os ensaios deste cilindro foram feitos colocando-o nos dois planos possíveis, tendo um eixo de rotação no centro da base e outro entorno o eixo longitudinal.

As peças de poliestireno foram duas esferas de diferentes tamanhos Nr9 e Nr10.

Pretendeu-se com a escolha das amostras para os ensaios aerodinâmicos obter formas diversas, com dimensões diferentes e em materiais distintos com objetivo de conhecer a influências destas características na determinação do momento de resistência. Por outro lado realizaram-se testes com cascas de *Eucalyptus Globulus* Lab. e pinhas de tamanhos diferentes, uma vez que estes são combustíveis típicos do espaço florestal com capacidade para provocarem focos secundários de incêndio.

Todas as amostras descritas foram ensaiadas pelo primeiro método. As peças Nr1, Nr4, Nr5, Nr6, Nr8, Nr9, Nr10, Nr11, Nr14, para além do primeiro método, foram ensaiados pelo segundo método.

2.2. Análise de libertação de partículas

2.2.1. Procedimento experimental

Este trabalho incide no tratamento de dados obtidos por meio da metodologia PIV resultantes dos ensaios laboratoriais apresentados em Almeida et al (2014).

Embora no âmbito deste trabalho não se tenha efetuado a parte laboratorial irá fazer-se de seguida uma resenha do procedimento experimental. Uma informação mais detalhada poderá ser encontrada em Almeida et al. (2014).

Os combustíveis a analisar foram maiormente partículas procedentes da árvore de eucalipto (*Eucalyptus globulus* Labill.). Estes colocaram-se no leito combustível e iniciara-se sua queima. As partículas libertadas foram captadas em imagens pelo Velocímetro de Partículas (PIV) sincronizado a um computador que processou a informação através do *Software Dynamic Studio*.

Também foi igualmente medida a massa do leito de combustível ao longo da queima. A captação de imagens PIV teve início quando a massa do leito de combustível atingiu 88% da sua massa inicial, prolongando-se durante 15 ou 25 segundos, dependendo do ensaio.

Os diversos parâmetros relativos às partículas libertadas registrados pelo PIV foram, nomeadamente: número, área, perímetro, diâmetro equivalente e centroide, a velocidade e direção do vetor velocidade segundo as suas componentes horizontal e vertical. Enquanto em Almeida et al. (2014) foram analisadas os parâmetros relacionados com o número e dimensões das partículas, neste trabalho foram analisadas as variáveis da velocidade e direção do movimento da partícula. A análise foi feita a cada 0,5 segundos de ensaios.

2.2.2. Características dos ensaios

2.2.2.1. Aparato experimental

O dispositivo experimental usado na análise da libertação de partículas foi o sistema PIV. Este sistema consta de uma câmara ótica, que capta as imagens (Figura 11).

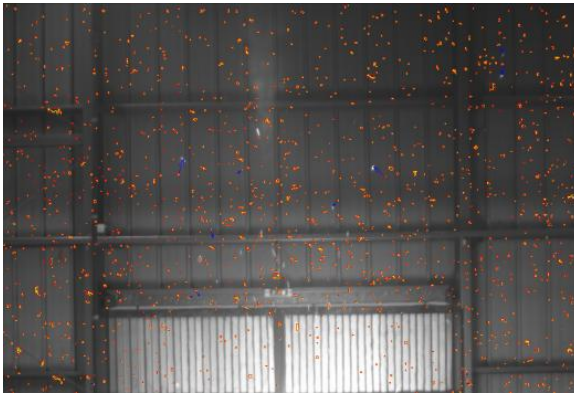


Figura 11 – Imagem captada pelo PIV.

A câmara (Figura 12a) foi colocada numa posição elevada, a fim de ter um eixo horizontal de vídeo de captura de imagem. Esta é sincronizada ao computador responsável de registrar os dados.



(a)



(b)

Figura 12 – (a) Câmara ótica do PIV, (b) Amostra colocada na mesa de combustão

Uma vez está todo conectado, é preciso introduzir os parâmetros de ensaio no programa: o número de imagens que se querem captar, e o sistema *doubleframe* para conseguir as velocidades.

As amostras a analisar foram colocadas numa mesa de combustível de uma área útil de 0.81m². (Figura 12b)

A mesa de combustível foi colocada numa balança (precisão: 0,01 kg), que permite a medição da decadência da perda de massa durante a queima usando um sistema de células de carga. Este sistema também faz uso de um *software*, responsável de anotar a perda de massa cada segundo.

A temperatura e a velocidade de fluxo vertical no 2m alto no eixo central da pluma de fumo foram bem controlados ao longo da experiência usando um termopar e um tubo de Pitot, respectivamente.

2.2.2.2. Amostras

Os árvores de eucalipto tem grande capacidade de libertação de partículas durante um incêndio tendo assim mais probabilidade de criar focos secundários (Almeida 2014). As folhas, ramos e cascas são as partículas com mais potencial de ser libertadas do árvore de eucalipto, (*Eucalyptus globulus Labill.*). Às vezes, esses combustíveis são nas copas dos árvores, outras vezes eles estão no nível do tronco ou mesmo deitou-se no chão. Neste estudo analisaram-se estas diferentes situações nas que aparecem os combustíveis.

Os ensaios se distribuíram em seis cenários com leitos de combustíveis diferentes.

O leito de combustíveis do primeiro ensaio, chamado PIV1, foi constituído por árvores secas e arbustos (Figura 13). Os arbustos foram usados sobretudo para manter a combustão estável uma vez que a árvore só por si não mantinha a combustão. As árvores com folhas secas foram recentemente coletados de árvores que tinham sido cortado um mês antes.



Figura 13 – Fotografia do PIV1

O ensaio seguinte, com nome de ensaio: PIV2 (Figura 14), colocado no leito combustível foi de ramos secos. Cortadas de árvores mortas.



Figura 14 – Fotografia do PIV2

O análise das cascas de eucalipto foi para três situações diferentes já que os combustíveis no terreno não apresentam o mesmo potencial de libertação enquanto os que estão suspensos em troncos ou copas. As cascas foram cilíndricas ocas e conseguiram-se arrancando-as do tronco da árvore.

O ensaio PIV3, foi de cascas e arbustos (Figura 15) deitados no leito combustível, usando os arbustos de suplemento à queima.



Figura 15 – Fotografia do PIV3

A queima das cascas analisaram-se também orientadas verticalmente, PIV4 (Figura 16a), e horizontalmente PIV6, (Figura 16b). Esperando-se uma combustão mais rápida e intensa

para as depositadas em posição vertical, tendo estas menor área perpendicular ao escoamento que as depositadas em posição horizontal.



(a) (b)
Figura 16 – (a) Fotografia do PIV4, (b) Fotografia do PIV6

No ensaio PIV5 usaram-se só arbustos. Adquiridos dum mix de combustíveis mortos na sua maioria composta de urze (*Calunna Vulgaris*) e carquesia (*Pterospartium tridentatum*). Coletados em campo com uma roçadora.

A intenção de este ensaio foi saber o comportamento do arbusto para conhecer a influência que teve sobre os outros ensaios.



Figura 17 – Fotografia do PIV5

As condições ambientais e as características sujeitas a cada ensaio foram descritas na Tabela 2, as demais características específicas podem encontrar-se no artigo de Almeida et al (2014).

Tabela 2 – Características dos combustíveis

NOME DO ENSAIO E TIPO DE COMBUSTÍVEL	CARACTERÍSTICAS DO COMBUSTÍVEL	CARACTERÍSTICAS AMBIENTAIS	TEMPOS DE ENSAIO
PIV1, Árvores mortas e arbustos	m_0 árvore (kg): 2.81 m_f árvore (kg): 1.2 m_0 arbusto (kg): 3.7 H árvore (m): 2.75	Temperatura (°C): 33.2 Humidade relativa (%): 33	Tempo inicial: 31,7s Tempo final: 48,1s
PIV2, Ramos mortos deitados no leito combustível	m_0 ramos (kg): 7.48 m_f ramos (kg): 2.18	Temperatura (°C): 31.3 Humidade relativa (%): 39	Tempo inicial: 45,7s Tempo final: 62,1s
PIV3, Cascas e arbustos deitados no leito combustível	m_0 casca (kg): 1.94 m_0 arbusto (kg): 2.8	Temperatura (°C): 25.5 Humidade relativa (%): 31	Tempo inicial: 31,7s Tempo final: 59,1s
PIV4, Cascas verticalmente orientadas	m_0 casca (kg): 1.99 m_0 arbusto (kg): 2.8 H árvore (m): 2.60	Temperatura (°C): 26.7 Humidade relativa (%): 60	Tempo inicial: 19,4s Tempo final: 46,4s
PIV5, Arbustos	m_0 arbusto (kg): 2.7	Temperatura (°C): 29.8 Humidade relativa (%): 48	Tempo inicial: 10,6s Tempo final: 31,4s
PIV6, Cascas orientadas horizontalmente	m_0 casca (kg): 1.99 m_0 arbusto (kg): 2.8 H árvore (m): 2.10	Temperatura (°C): 30.1 Humidade relativa (%): 47	Tempo inicial: 13,7s Tempo final: 41,1s

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Momentos resistentes

Os dados analisados neste capítulo foram obtidos, na utilização da primeira metodologia, velocidade crescente de rotação do disco devido a aceleração promovida pela queda da partícula em análise, e nos ensaios com o berbequim que se caracterizam por uma desaceleração da rotação da partícula.

Os ensaios de referência sem qualquer partícula fixada são os chamados padrões.

Para a primeira metodologia estes apresentam variações dependendo do dia que foram recolhidos, o Padrão A foi ensaiado o dia 1/12/2014 com uma temperatura no laboratório de 13,7°C e o Padrão B o dia 3/12/2014 com uma temperatura de 10,5°C. Estes ensaios foram realizados com o auxílio de duas massas: Padrão:10,15g e Padrão:20,77g.

Os resultados obtidos para cada peça foram comparados com os respectivos ensaios de referência (Padrões).

As peças Nr1, Nr 4, Nr 8, Nr 5, Nr 6 e Nr 7b, ensaiaram-se no dia 1/12/2014 usando as massas de Padrão:10,15g e Padrão:20,77g. O ensaio do Padrão foi o primeiro, antes de qualquer peça.

Seguidamente apresentam-se as velocidades angulares (ω) e acelerações angulares (α) dos ensaios.

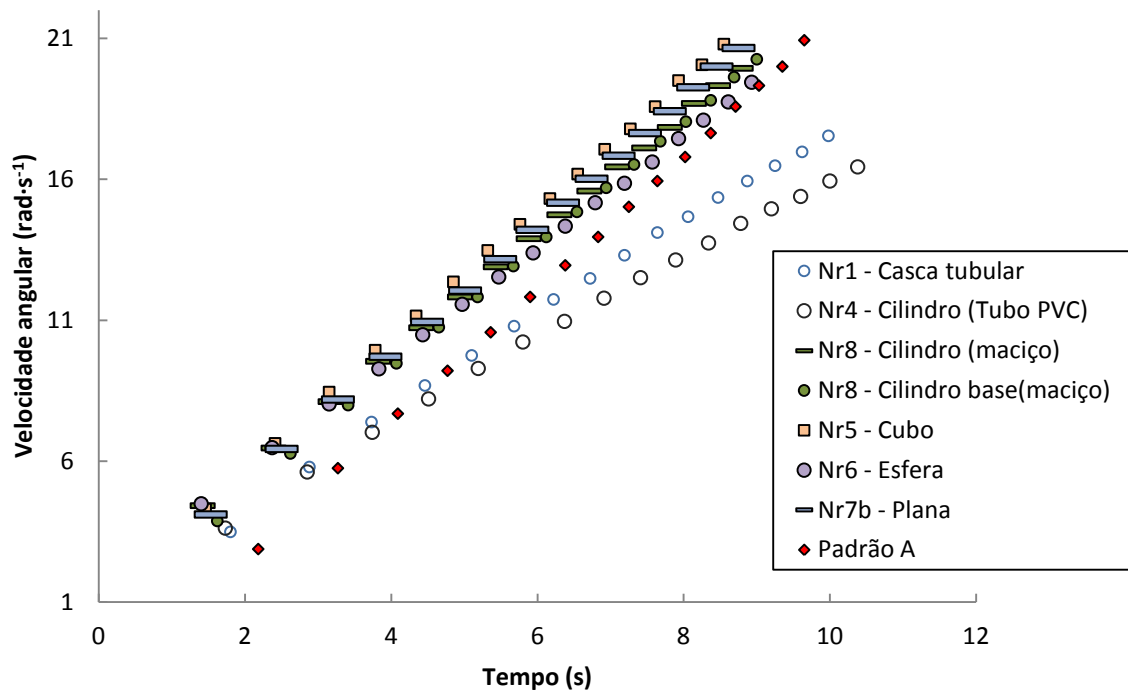


Figura 18 – Velocidade angular (ω) das amostras e Padrão: 10,15g.

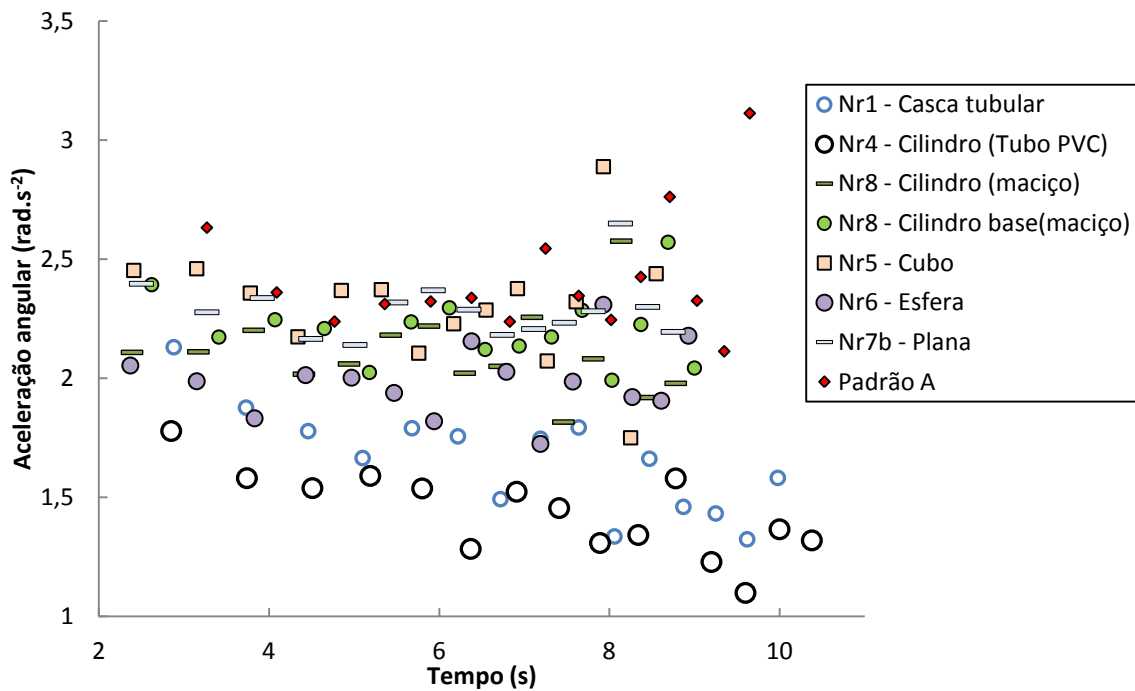


Figura 19 - Aceleração angular (α) das amostras e Padrão: 10,15g.

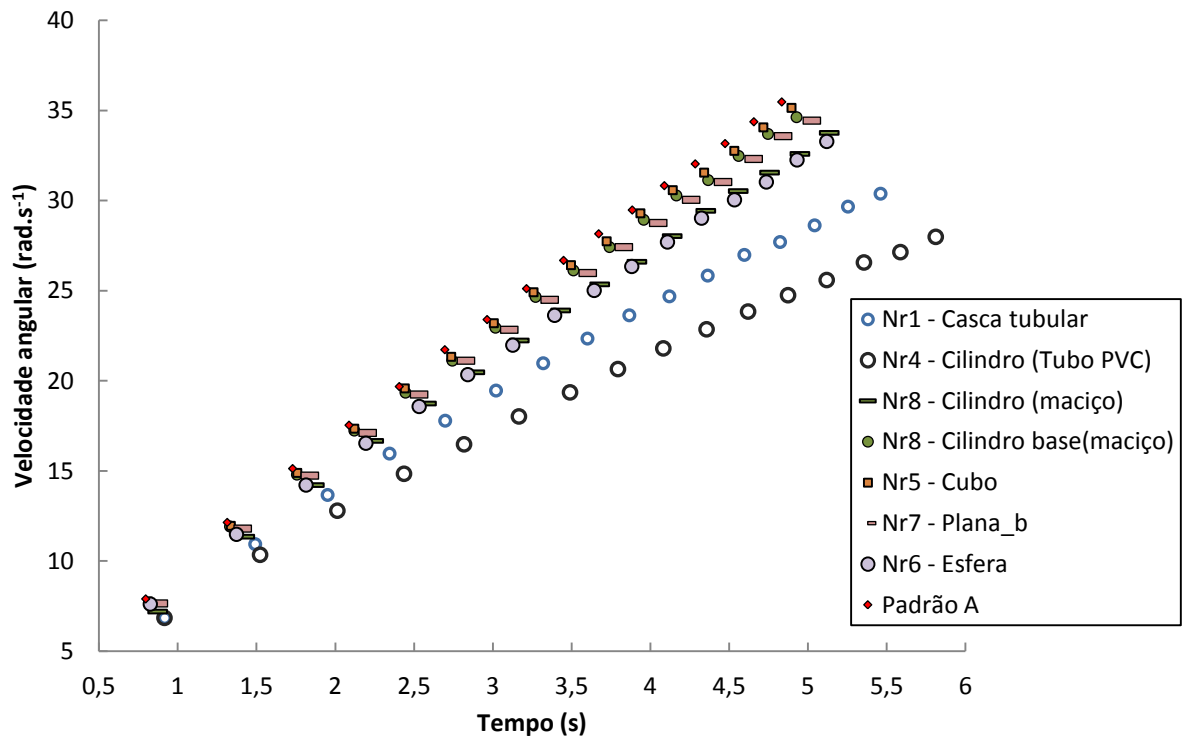


Figura 20 – Gráfico 1 da velocidade angular (ω) das amostras e Padrão: 20,77g.

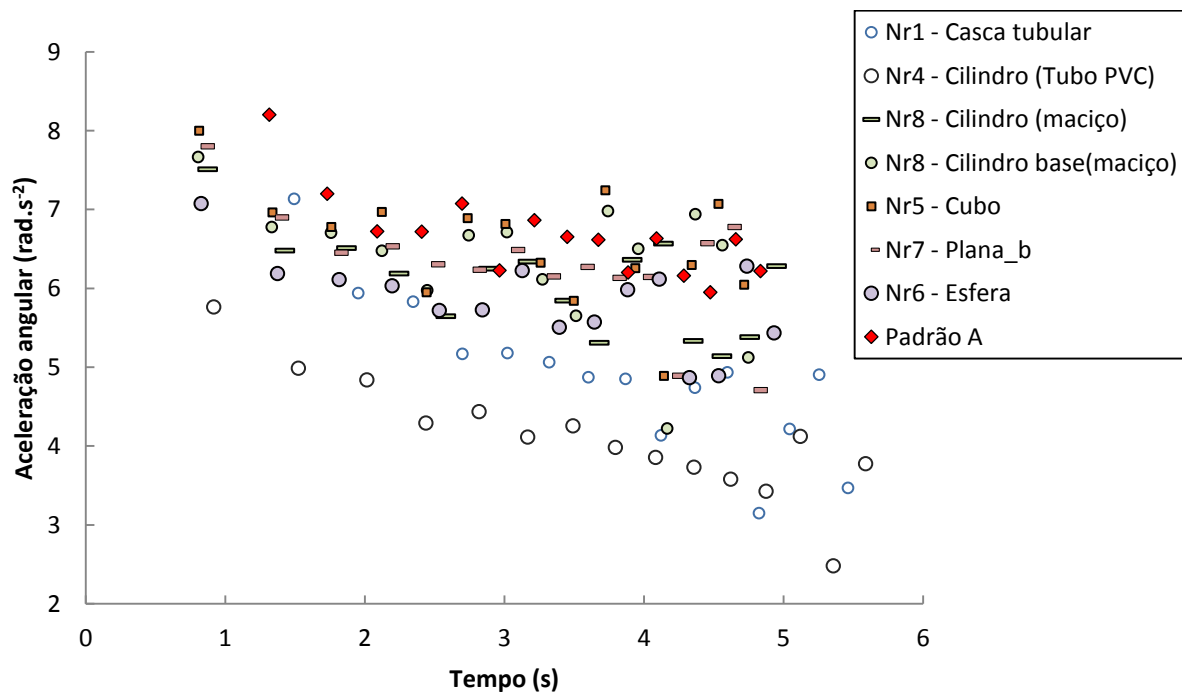


Figura 21 - Gráfico 1 da aceleração angular (α) das amostras e Padrão: 20,77g.

Em qualquer dos ensaios constata-se uma diminuição da aceleração angular. (Figura 19) e (Figura 21) sendo o Padrão o que apresenta uma desaceleração menos pronunciada.

Todas as peças tem uma velocidade crescente, verifica-se que o cilindro de PVC (Nr4) apresenta mais curvatura na grafica da velocidade angular (Figura 18) e (Figura 20), ao mesmo tempo que é a peça que contem uma desaceleração mais pronunciada (Figura 19) e (Figura 21). Este fato é devido a influência da sua massa e área maior de incidência das forças de atrito, apresentando, pelo tanto, uma resistência maior.

A este, segue-lhe a Casca tubular Nr1 por o mesmo motivo. A esfera Nr6 e o Cilindro Nr8 depois. Vê-se que as peças com a aceleração mais decrescente apresentam menor velocidade.

Observa-se que o cubo Nr5 contem uma aceleração mais constante e próxima ao Padrão, devido a que apresenta menor momento de inercia e pelo tanto menor resistência.

Para as peças Nr2, Nr3, Nr9, Nr10, Nr11, Nr12, Nr13, Nr14, Nr15, Nr16, Nr7a, Nr7c, apenas se experimentou com o Padrão:20,77g, porque o Padrão:10,15g não deu resultado, devido a que aquele dia no laboratório a temperatura foi muito baixa aumentando a viscosidade do fluido de lubrificação do mecanismo de rotação, e impedindo que a aceleração gravítica exercida na massa de 10,15g fosse suficiente para promover a rotação do disco.

O Padrão esse dia foi ensaiado antes das peças e depois. Chamados PadrãoB1 e Padrão B2 respeitivamente.

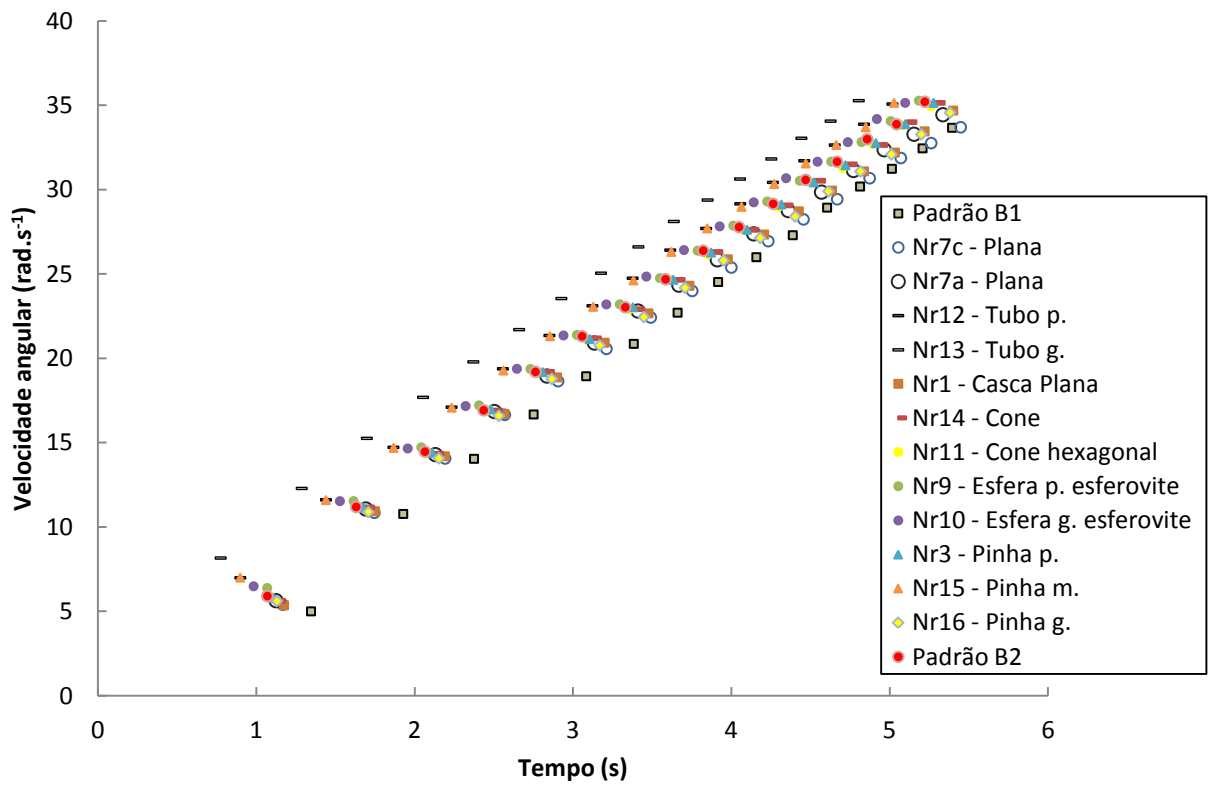


Figura 22 – Gráfico 2 da velocidade angular (ω) das amostras e Padrão: 20,77g

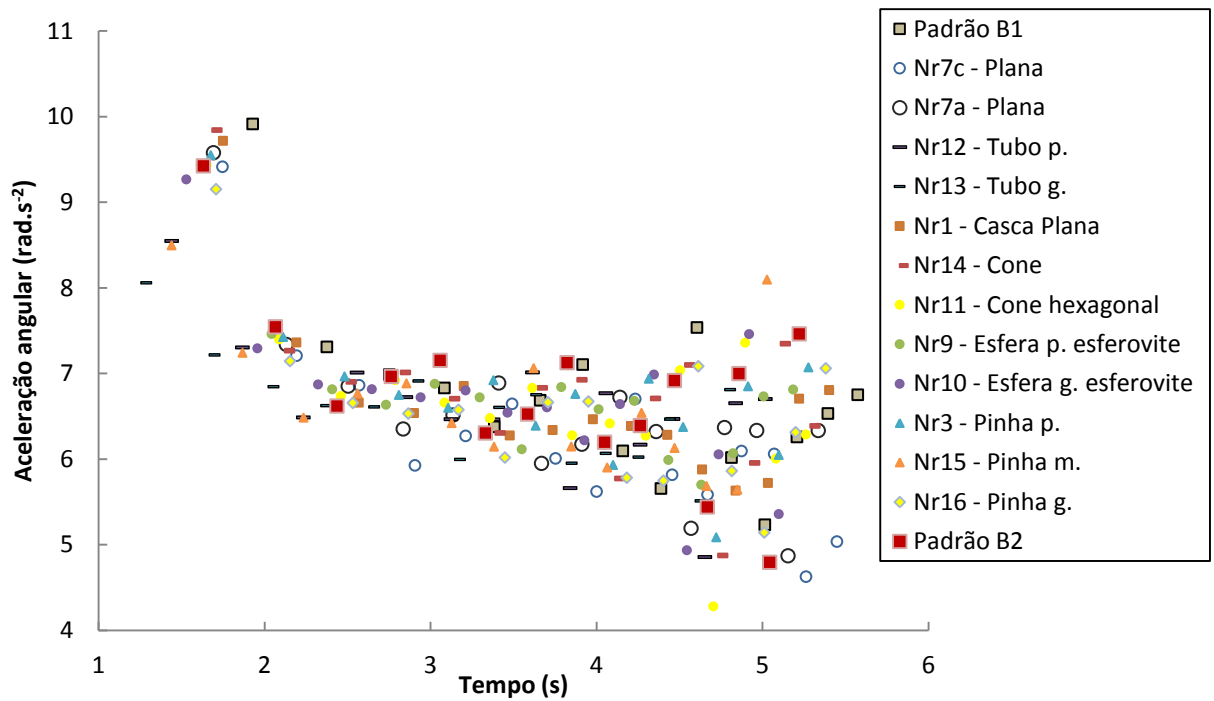


Figura 23 – Gráfico 2 da aceleração angular (α) das amostras e Padrão: 20,77g.

No gráfico da Figura 22 percebem-se as acelerações decrescentes, no entanto vê-se claramente que tampouco atingiu-se uma velocidade de rotação constante.

No Gráfico da Figura 22 percebe-se que a peça Nr7c é a que tem uma pendente dos dados da velocidade mais curvada, como também observa-se no Gráfico da Figura 23 uma desaceleração mais pronunciada. Esta resistência causante de ter a desaceleração mais pronunciada também é devida ao fato que foi a primeira em ensaio, provocando uma maior dificuldade de aceleração gravítica exercida pela massa já que o fluido do mecanismo de rotação ainda não ficava aquecido.

O segundo método baseia-se na desaceleração da rotação do disco até atingir uma velocidade zero. Os ensaios foram para as peças Nr1, Nr4, Nr5, Nr6, Nr7, Nr8, Nr9, Nr10, Nr11, Nr12, Nr14. Cujas velocidades angulares e acelerações angulares estão representadas na Figura24, Figura 25, Figura 26 e Figura 27.

Esta vez os ensaios Padrão realizam-se antes de cada peça, no enquanto no gráfico comparativo das peças colocou-se só o inicial e o final, para melhor visualização.

As peças que apresentam mais resistência são a Casca tubular 1, junto com o Cilindro 4, já que sua desaceleração é mais rápida (Figura 25) e suas velocidades são as mais distantes do Padrão e Padrão 2 (Figura 24).

O Cubo Nr5 e esfera esferovite Nr9 apresentam pouca resistência rotacional, verifica-se no gráfico da Figura 26 que são os que mais se aproximam ao valor do Padrão .

Observa-se na Figura 24 e Figura 26 que os valores dos padrões registados no início(Padrão) e o no fim(Padrão2) são muito semelhantes sendo os dois válidos para a comparativa com as peças.

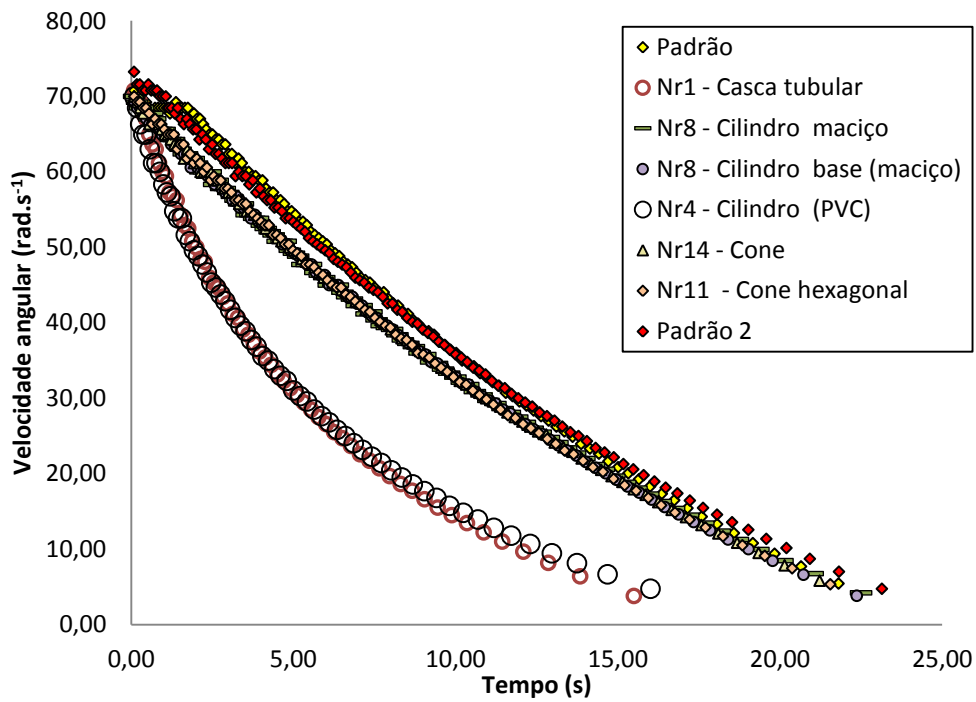


Figura 24 – Gráfico 1 da velocidade angular (ω) das amostras e padrões com o segundo método.

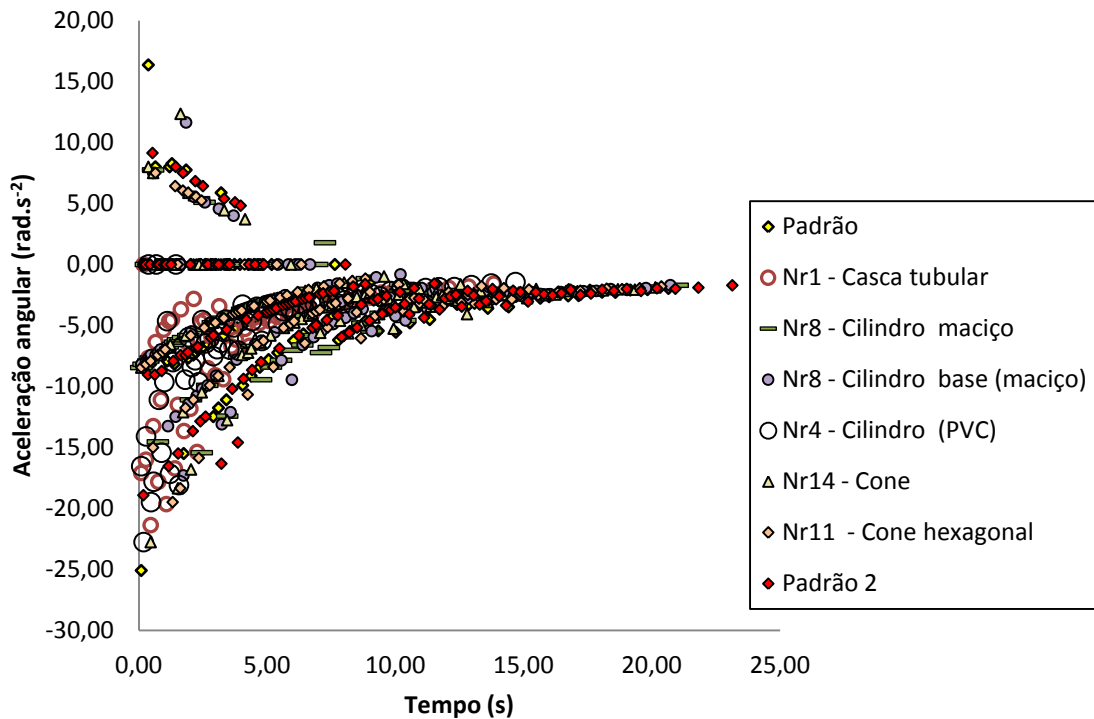


Figura 25 - Gráfico 1 da aceleração angular (α) das amostras e padrões com o segundo método.

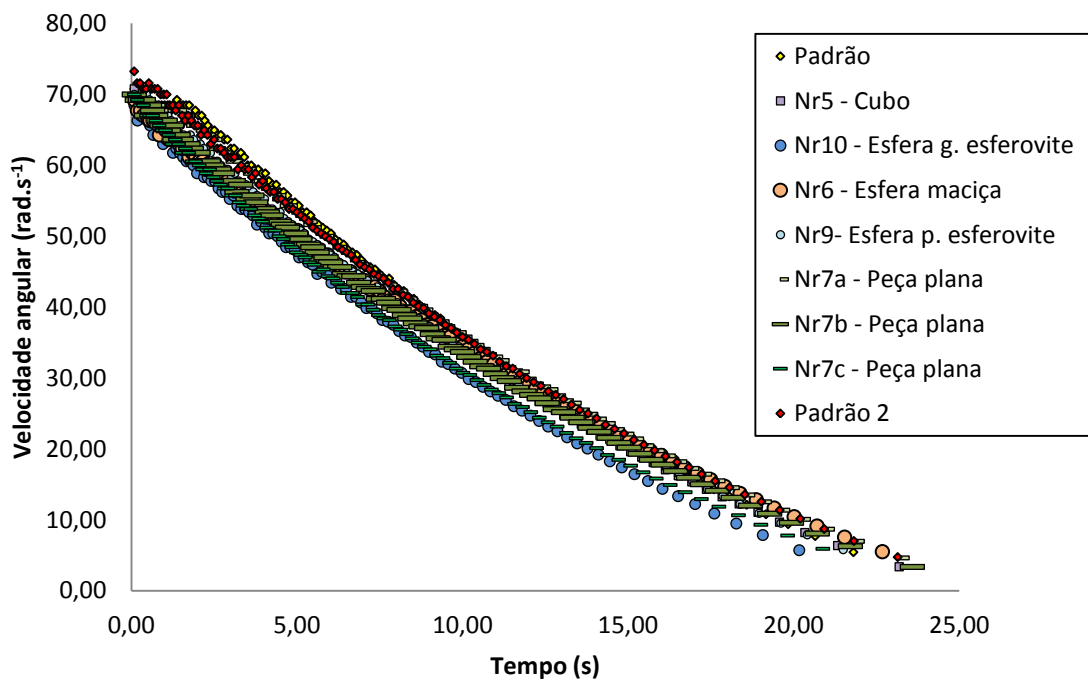


Figura 26 - Gráfico 2 da velocidade angular (ω) das amostras e padrões com o segundo método

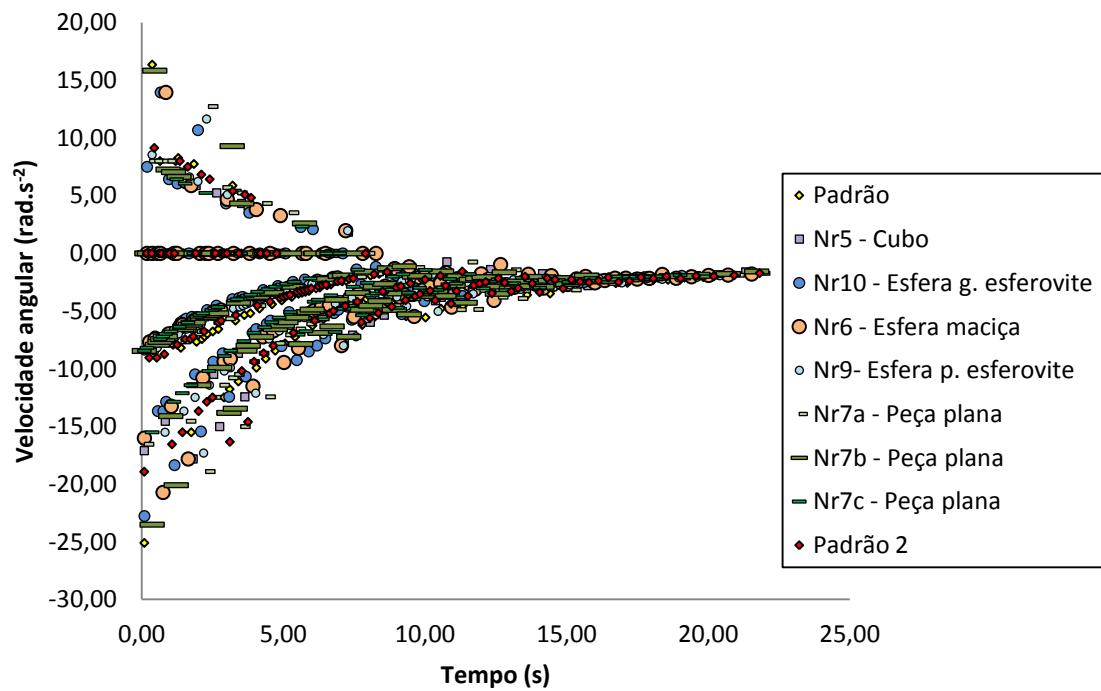


Figura 27 - Gráfico 2 da aceleração angular (α) das amostras e padrões com o segundo método.

Os dois procedimentos dão a conhecer a tendência de cada perfil.

Vê-se no gráficos do primeiro método que a falta de algumas rotações mais poderia reduzir-se a aceleração e atingir a velocidade constante.

Nos dois métodos o comportamento das peças apresentam uma tendência semelhante. As pequenas variações são porque no uso destes métodos influenciam a precisão da pessoa quando está a aplicar o contacto do berbequim ou ao largar a massa, como também a temperatura ambiente, estes fatores provocam variações nos resultados.

3.2. Velocimetria de partículas

3.2.1. Número e área das partículas em função do tempo

Almeida et al. (2014) constatou que os combustíveis deitados no leito combustível não apresentava um potencial de libertação de partículas tão elevado como se o combustível estivesse suspenso em troncos ou copas dos árvores.

Também comprovou que segundo a orientação da colocação da casca suspensa, se vertical ou horizontal, esta orientação influencia na libertação das partículas libertadas.

Apresentam-se os gráficos Figura 28 e Figura 29 do número de partículas e áreas em função do tempo. Os nomes usados nestes gráficos são PIV19, PIV21, PIV22, PIV24, PIV25 e PIV26, estes são os equivalentes neste trabalho ao PIV1, PIV2, PIV3, PIV4, PIV5, PIV6 respetivamente.

Observa-se nestes gráficos que os ensaios com eucalipto libertam mais quantidade de partículas que os arbustos.

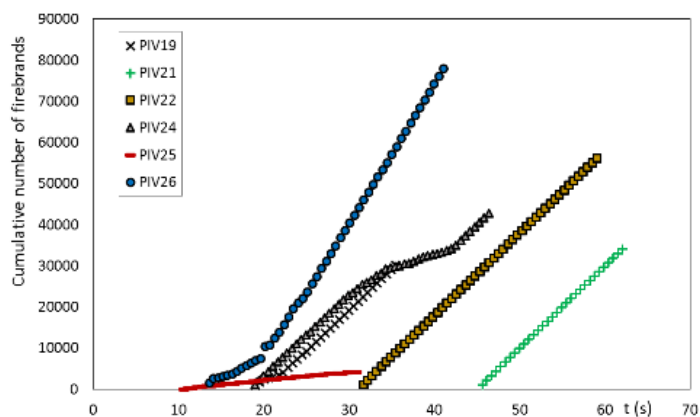


Figura 28 – Gráfico do número acumulado adquirido de Almeida et al.,(2014)

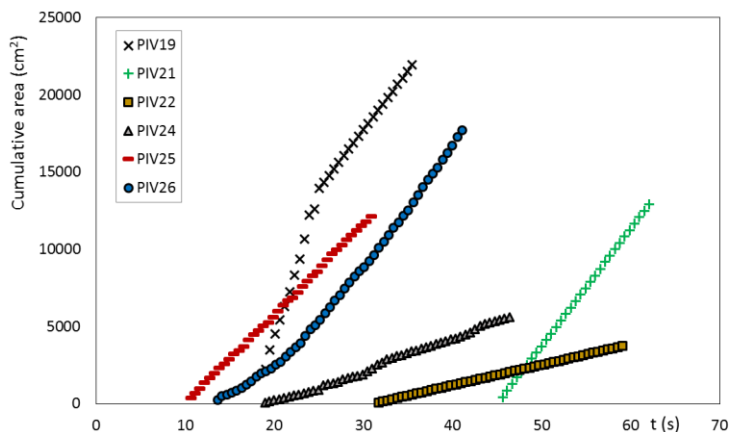


Figura 29 - Gráfico da área acumulada adquirido de Almeida et al.,(2014)

3.2.2. Velocidade das partículas em relação ao escoamento

Neste subcapítulo pretende-se comparar a velocidade do escoamento da coluna de fumo ao longo do ensaio com a velocidade média de todas as partículas ascendentes em cada segundo.

O cálculo do escoamento foi desenvolvido em Almeida et al. (2014).

Mostra-se de seguida os resultados obtidos para os ensaios PIV1, PIV2, PIV4, PIV5, PIV6. Não foi possível a comparação para o ensaio PIV3 porque surgiram complicações com os dados do escoamento.

PIV1

Na Figura 30 apresenta-se os valores das velocidades das partículas ascendentes e a velocidade de escoamento para o ensaio PIV1.

Observa-se que para este ensaio apresenta-se um escoamento decrescente com a velocidade das partículas libertadas equidistantes aos valores do escoamento.

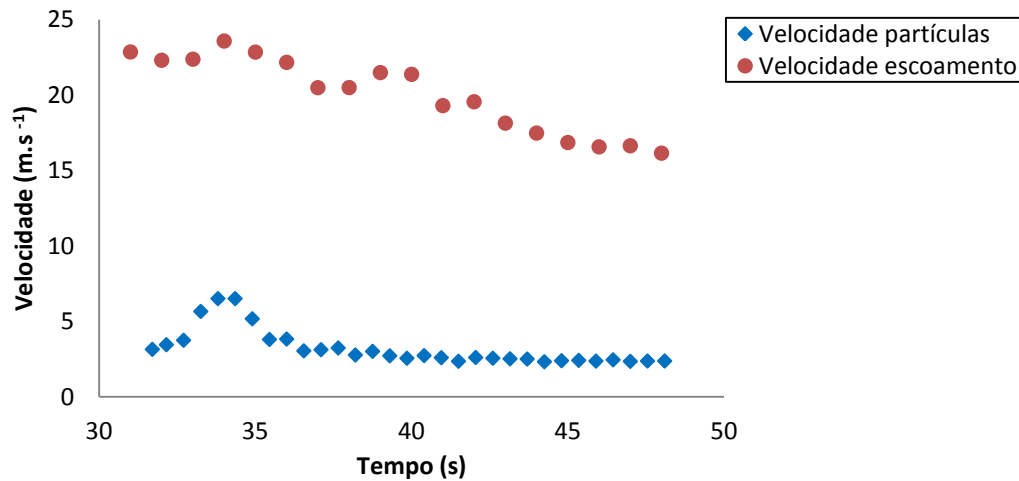


Figura 30 – PIV1, Velocidade das partículas ascendentes em relação ao escoamento.

PIV2

Na Figura 31 apresenta-se os valores das velocidades das partículas ascendentes e a velocidade de escoamento para o ensaio PIV2.

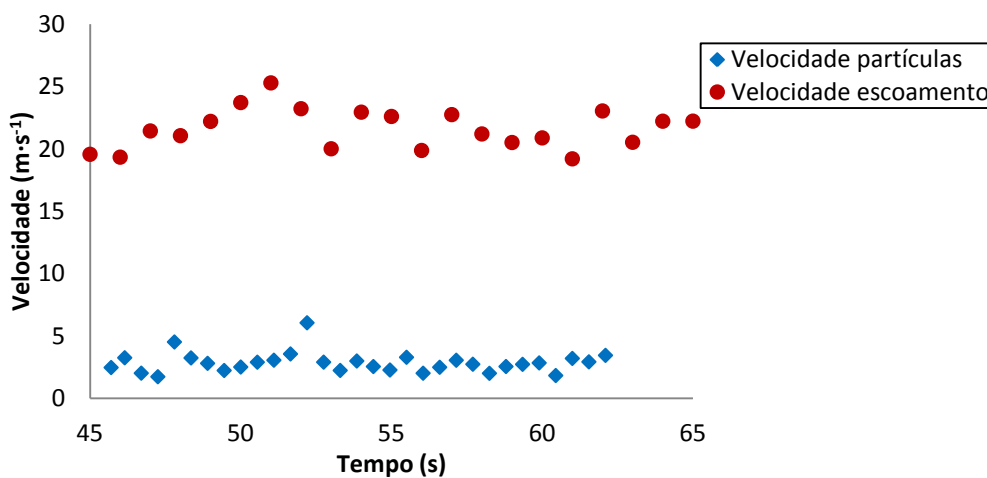


Figura 31 – PIV2, Velocidade das partículas ascendentes em relação ao escoamento.

O termopar e o tubo de pitot que controlavam o escoamento estavam colocados na mesma altura em todos os ensaios. No ensaio PIV1 focavam a copa da árvore, e no ensaio PIV2 os ramos secos estavam deitados no leito combustível com o qual media-se as características do escoamento a mais de 2 metros por encima da queima. Observa-se nos gráficos Figura 30 e Figura 31 que a velocidade de escoamento para o PIV1 e PIV2 é quase a mesma (20m/s), este fato é devido a que a intensidade do fogo é a mesma durante essa distância vertical e as partículas ascendentes conservam uma velocidade promedio de 4m/s.

PIV4

Na Figura 32 apresenta-se os valores das velocidades das partículas ascendentes e a velocidade de escoamento para o ensaio PIV4.

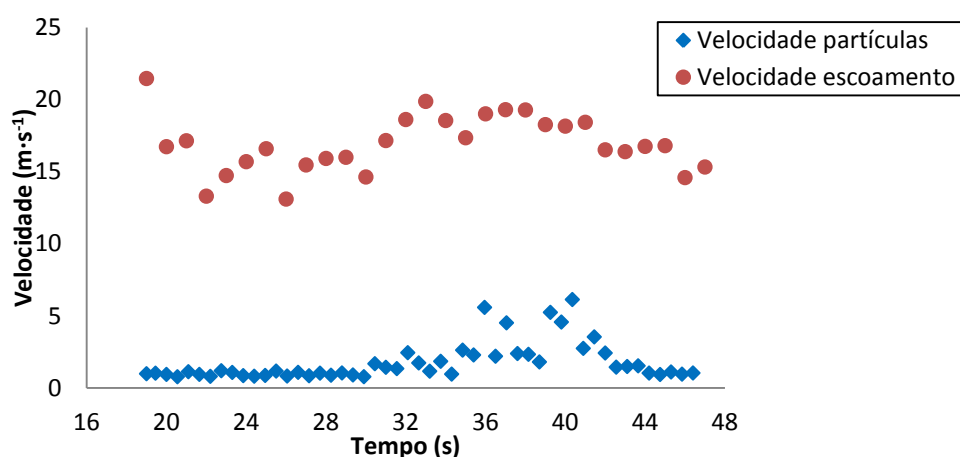


Figura 32 – PIV4, Velocidade das partículas ascendentes em relação ao escoamento.

PIV5

Na Figura 33 apresenta-se os valores das velocidades das partículas ascendentes e a velocidade de escoamento para o ensaio PIV5.

As partículas ascendentes libertadas no ensaio da queima de arbustos (PIV5) apresentam valores da velocidade muito variados, Figura 33. A velocidade do escoamento é de 15m/s, comparando com os eucaliptos vê-se que com menor intensidade de fogo liberta partículas a maiores velocidades.

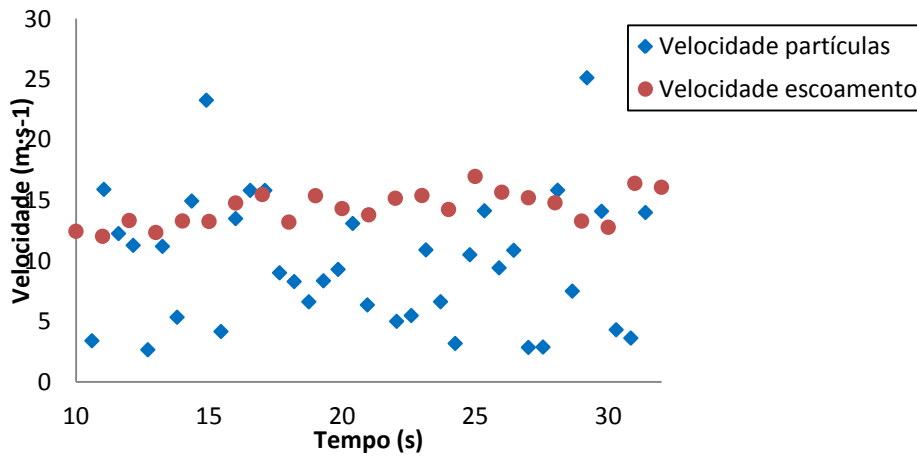


Figura 33 – PIV5, Velocidade das partículas ascendentes em relação ao escoamento.

PIV6

Na Figura 34 apresenta-se os valores das velocidades das partículas ascendentes e a velocidade do escoamento para o ensaio PIV6.

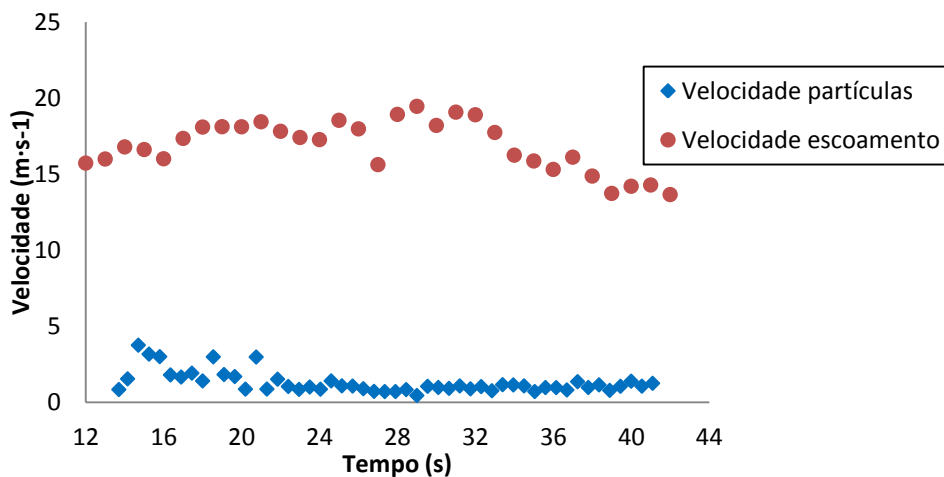


Figura 34 – PIV6, Velocidade das partículas ascendentes em relação ao escoamento.

As cascas de eucalipto depositadas em orientação vertical (PIV4) acrescentam sua velocidade quando a velocidade do escoamento aumenta, a diferença das cascas depositadas em orientação horizontal (PIV6).

Os arbustos que foram colocados para manter a combustão dos eucaliptos, libertam partículas a maior velocidade, no entanto observa-se nos gráficos da Figura 30, Figura 32

Figura 34 que as partículas libertadas por os arbustos nos ensaios PIV1, PIV4 e PIV6 não conseguem altas velocidades. Este fato é devido a que as partículas dos arbustos frenam suas velocidades quando topam com as cascas de eucalipto suspesas nos troncos ou com a copa da árvore.

3.2.3. Número de partículas em função da velocidade.

Neste capítulo pretende-se analisar o número de partículas libertadas agrupadas em intervalos de velocidades no total de tempo que foi realizado cada ensaio.

Cabe recordar que uma vez libertadas, as partículas são elevadas pelas correntes convectivas criadas pelo escoamento ascendente do fogo.

PIV1

O primeiro ensaio (PIV1) demorou 14,95s.

Na Figura 35 apresenta um 54,99% da totalidade das partículas com velocidade vertical positiva, ou seja, com um movimento vertical ascendente. A maior parte das partículas apresenta uma velocidade entre -3m/s a 4m/s.

Na Figura 36 pode verificar-se que as velocidades no eixo horizontal apresentam aproximadamente o mesmo número de partículas no sentido positivo (da esquerda para a direita) e negativo (da direita para a esquerda) com maior número de partículas concentradas no intervalo de velocidades de -4m/s a 4m/s.

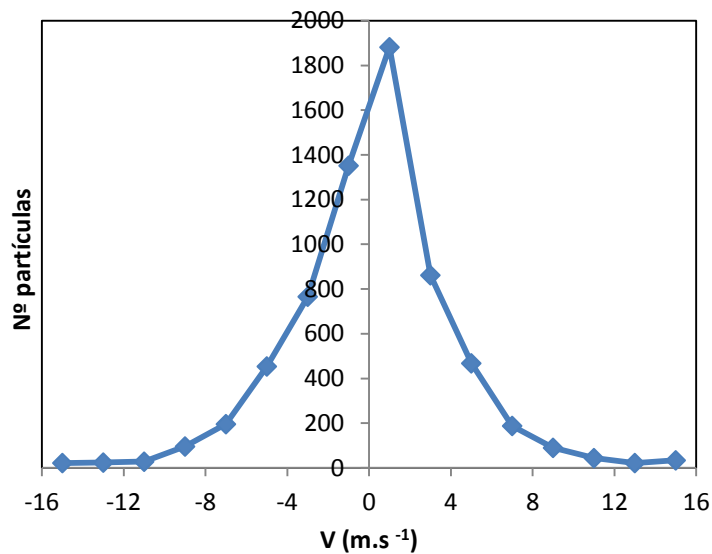


Figura 35 – Número de partículas em função do valor da componente vertical da velocidade (V) para o ensaio PIV1.

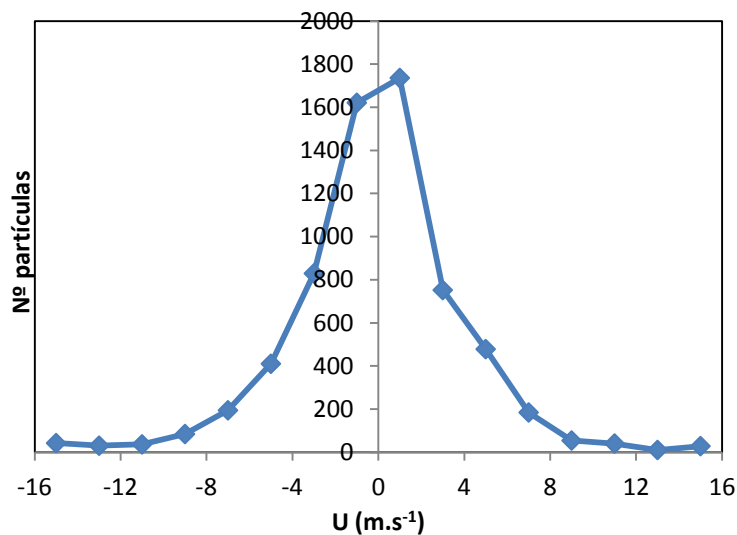


Figura 36 – Número de partículas em função do valor da componente horizontal da velocidade (U) para o ensaio PIV1.

PIV2

Do ensaio PIV2 resultou um gráfico de velocidades referentes às componentes vertical e horizontal das velocidades das partículas (Figura 37 e Figura 38). Registradas durante 14,95s.

A proporção de partículas com velocidade vertical ascendente é de 52,01% relativamente ao número total de partículas libertadas.

O maior número de partículas concentra-se no intervalo de velocidades mais baixas, tanto para o eixo “x” como o “y”.

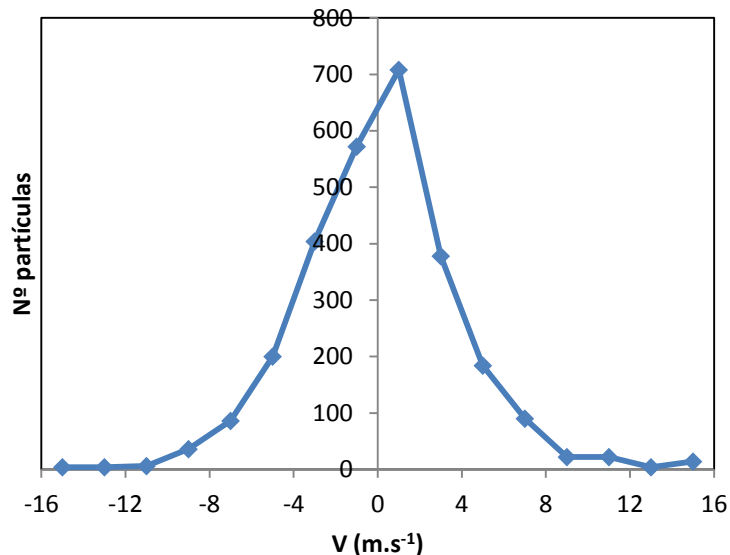


Figura 37 – Número de partículas em função do valor da componente vertical da velocidade (V) para o ensaio PIV2.

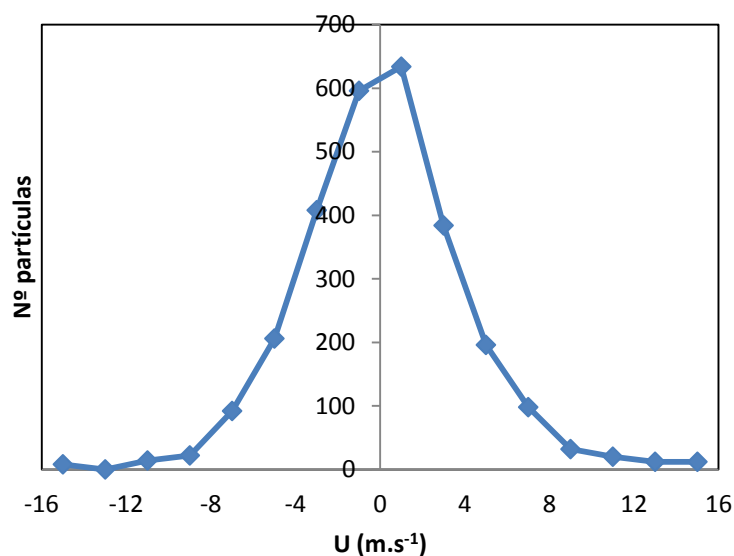


Figura 38 – Número de partículas em função do valor da componente horizontal da velocidade (U) para o ensaio PIV2.

PIV3

No ensaio PIV3 a captação de imagens teve uma duração de 24,95 segundos.

As partículas com movimento vertical ascendente é de 56,96% superando as partículas com movimento descendente. (Figura 39).

Enquanto as componentes horizontais de velocidades apresentam uma simetria quase perfeita relativamente ao seu sentido. (Figura 40).

A maioria das partículas apresentou velocidades entre $[-4\text{m/s}, 4\text{m/s}]$, tanto para a componente vertical como horizontal de velocidade.

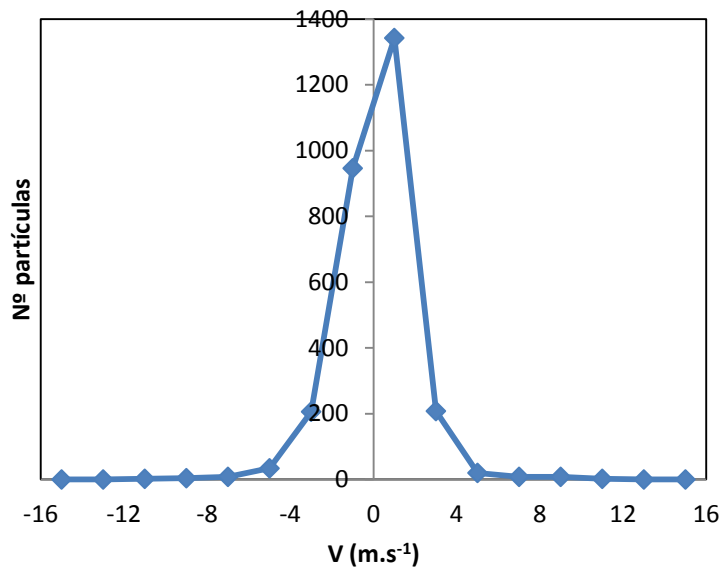


Figura 39 - Número de partículas em função do valor da componente vertical da velocidade (V) para o ensaio PIV3.

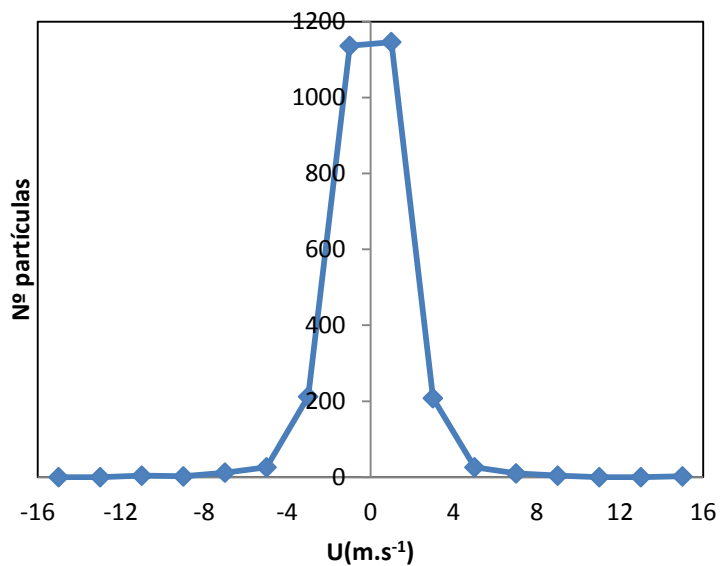


Figura 40 - Número de partículas em função do valor da componente horizontal da velocidade (U) para o ensaio PIV3.

PIV4

No PIV4 a distribuição de partículas em função da velocidade fez-se para uma duração de 24,95 segundos.

As velocidades ascendentes superam em 58,40% a quantidade das descendentes. (Figura 41).

Enquanto as velocidades no eixo das abcissas apresentam uma quase simetria da quantidade de partículas com sentido direito que esquerdo. Figura 42.

Tanto a componente horizontal como a vertical reúne a maioria de partículas no intervalo de -4m/s a 4m/s.

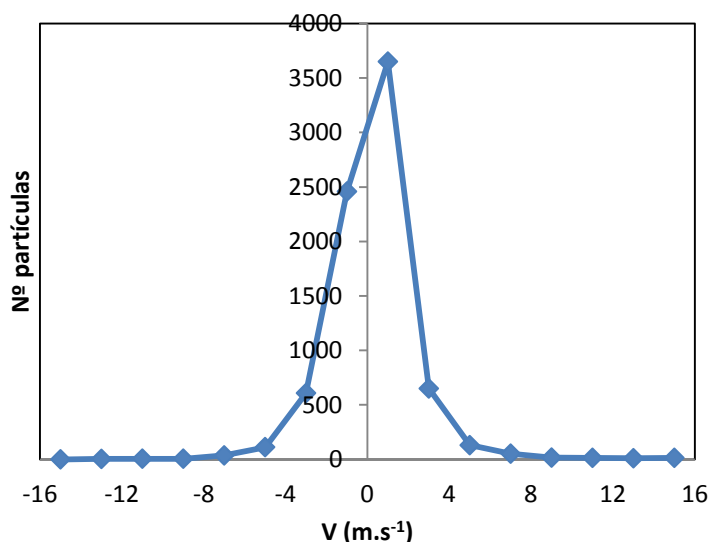


Figura 41 - Número de partículas em função do valor da componente vertical da velocidade (V) para o ensaio PIV4.

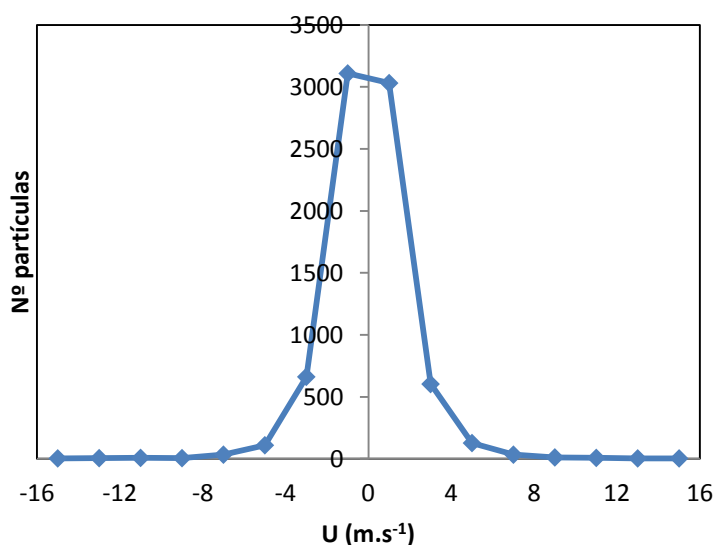


Figura 42 – Número de partículas em função do valor da componente horizontal da velocidade (U) para o ensaio PIV4.

PIV5

No PIV5 a captação de imagens teve uma duração de 18,95 segundos.

Este ensaio é o que apresenta uma distribuição mais irregular das componentes horizontais das velocidades das partículas libertadas com maiores valores entre [0 a 2m/s] ou maiores que 14m/s. 72,17% das partículas apresenta um movimento ascendente superando a quantidade de partículas com sentido negativo, representado na Figura 43.

Da análise da Figura 44 pode verificar-se que as componentes horizontais das velocidades das partículas libertadas apresentam um comportamento semelhante com valores maioritariamente compreendidos entre 0 e 2m/s.

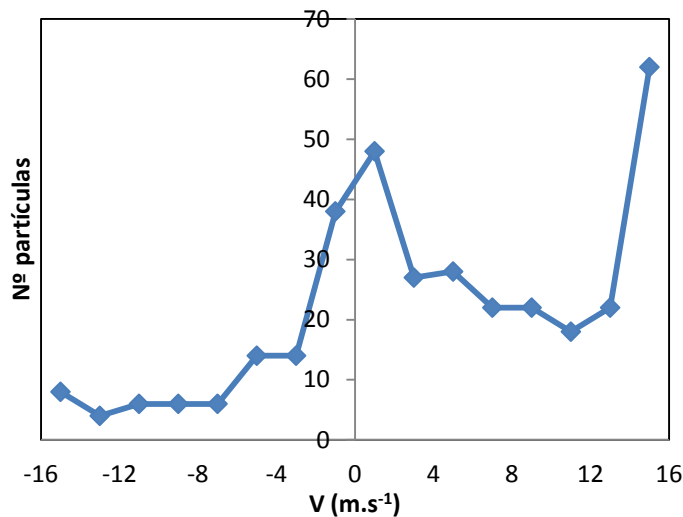


Figura 43 – Número de partículas em função do valor da componente vertical da velocidade (V) para o ensaio PIV5.

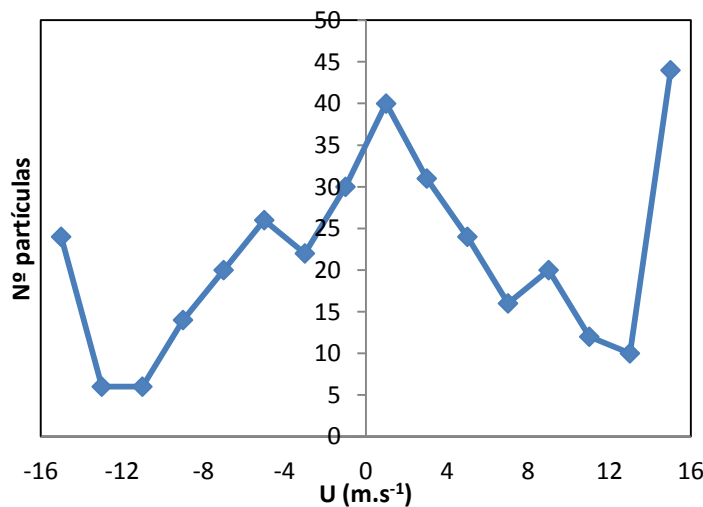


Figura 44 – Número de partículas em função do valor da componente horizontal da velocidade (U) para o ensaio PIV5.

PIV6

No PIV6 a distribuição de partículas em função da velocidade fez-se para uma duração de 24,95 segundos.

As velocidades ascendentes superam em 56,35% a quantidade das descendentes. (Figura 45).

Enquanto as velocidades no eixo das abcissas apresentam uma quase simetria da quantidade de partículas com sentido direito que esquerdo. (Figura 46).

Observa-se uma grande semelhança entre os valores para a componente horizontal com a componente vertical, tendo os dois a máxima concentração de partículas entre o intervalo de velocidades [-4m/s e 4m/s].

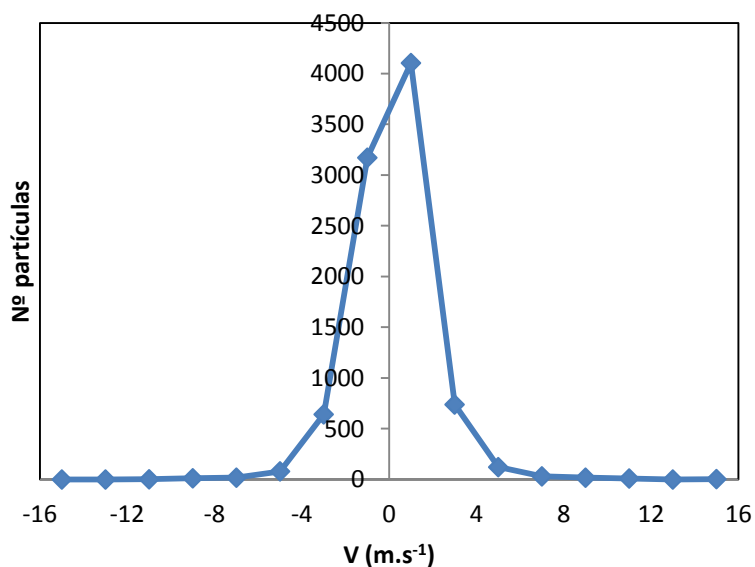


Figura 45 – Número de partículas em função do valor da componente vertical da velocidade (V) para o ensaio PIV6.

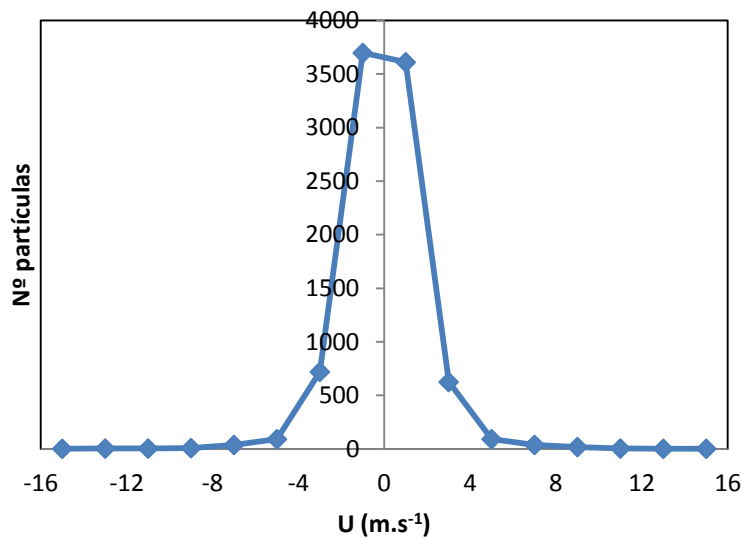


Figura 46 – Número de partículas em função do valor da componente horizontal da velocidade (U) para o ensaio PIV6.

Comparação dos cenários.

Apresenta-se a continuação o número de partículas libertadas, que o PIV conseguiu registrar suas velocidades, em função do tempo de ensaio de cada um. (Figura 47)

Observa-se que para o cenário da árvore de eucalipto (PIV1) e as cascas verticais (PIV4) e horizontais (PIV6) o PIV conseguiu registrar as velocidades de um número maior de partículas, coincidindo com os dados de Almeida (Figura 28).

Vê-se que no ensaio das cascas deitadas no leito combustível (PIV3) a proporção de partículas não se corresponde aos dados de Almeida da Figura 28, este fenómeno é a causa do que o PIV não consegue registrar as velocidades de todas as partículas.

Constata-se que o ensaio que contém só arbustos (PIV5) liberta menos quantidade, em comparação ao eucalipto. (McArthur, 1967).

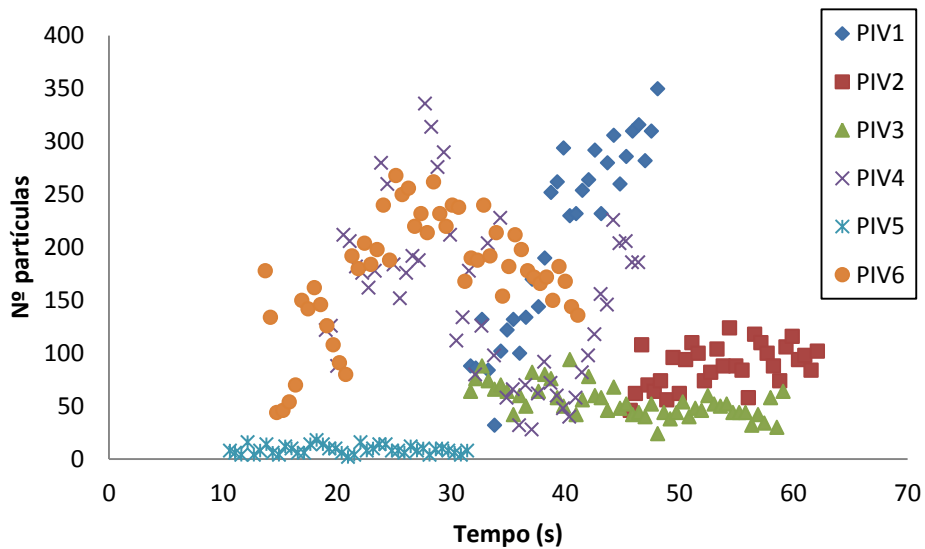


Figura 47 – Número de partículas libertadas em função do tempo.

De seguida se comparam o número de partículas em relação à velocidade de todos os cenários. As comparações foram feitas para os valores correspondentes aos primeiros 14,95 segundos de captação de imagens.

Nos gráficos das Figura 48 e Figura 50 constata-se que o PIV4 apresenta mais partículas libertadas que o PIV6, sendo um resultado expectável já que as cascas depositadas em orientação vertical (PIV4) estão em direção ao escoamento. Para os dois suas velocidades concentram-se no intervalo de $[-3$ e $3\text{m/s}]$.

Os árvores secos com arbustos apresentam uma libertação de partículas com suas velocidades mais repartidas entre o intervalo $[-6$ e $6\text{m/s}]$

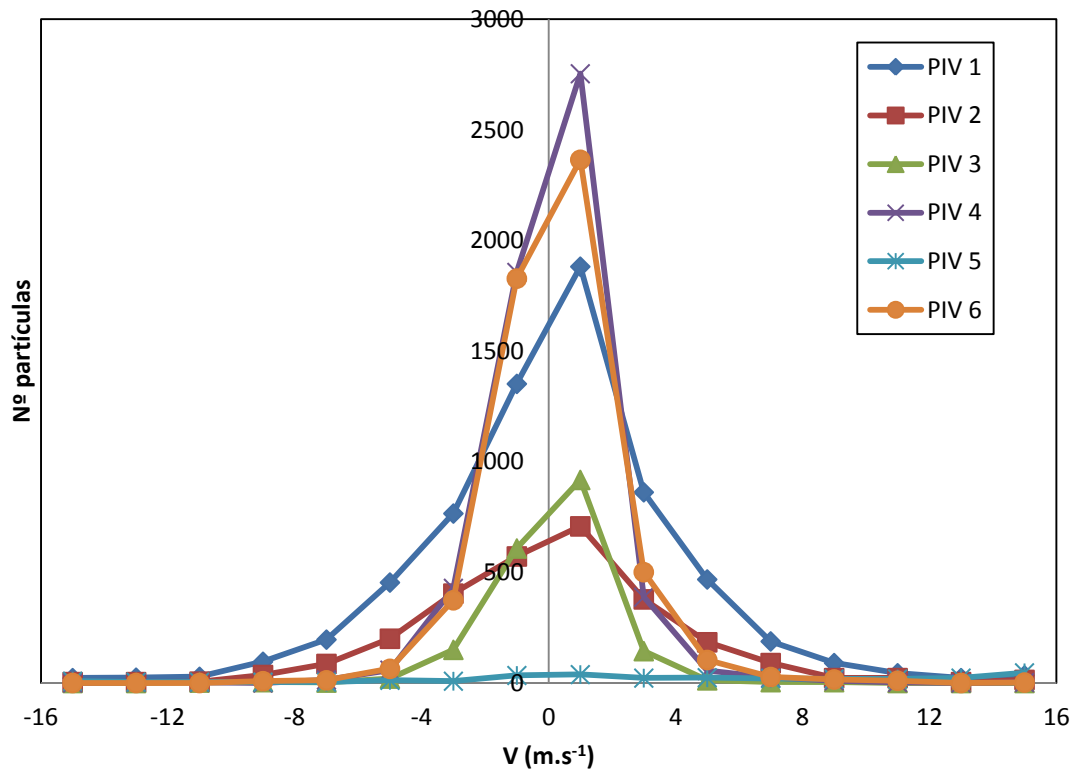


Figura 48 – Número de partículas em função do valor da componente vertical da velocidade (V) para todos os ensaios.

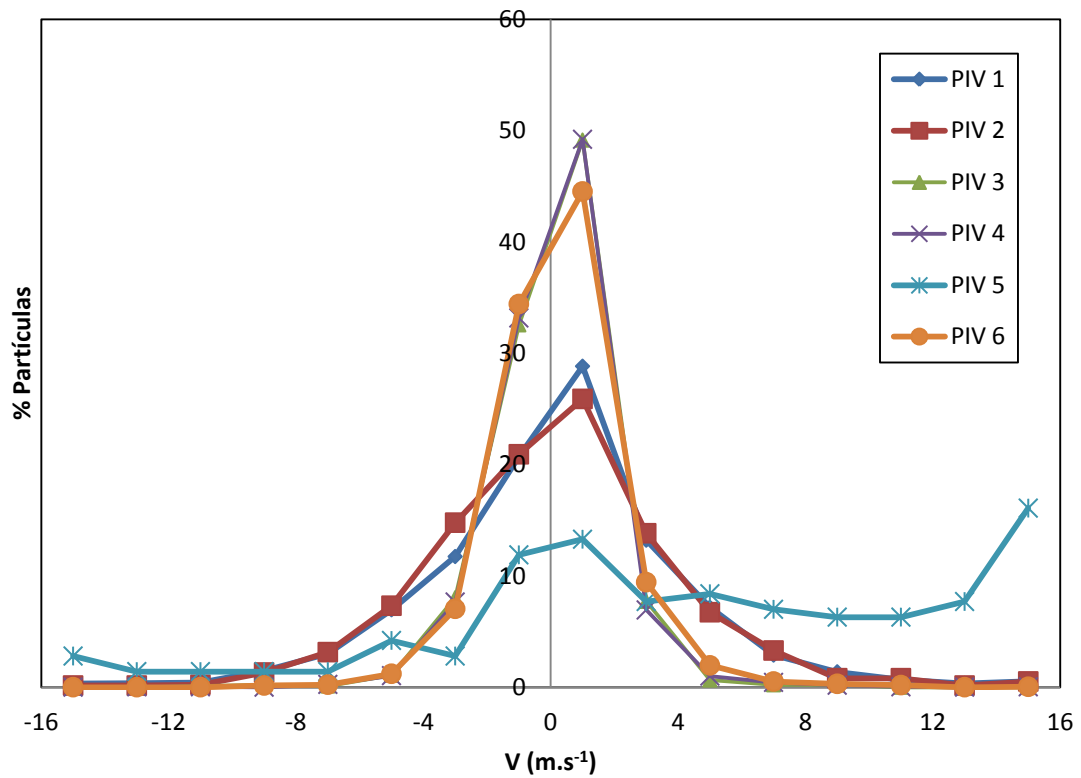


Figura 49 - Percentagem de partículas em função do valor da componente vertical da velocidade (V) para todos os ensaios.

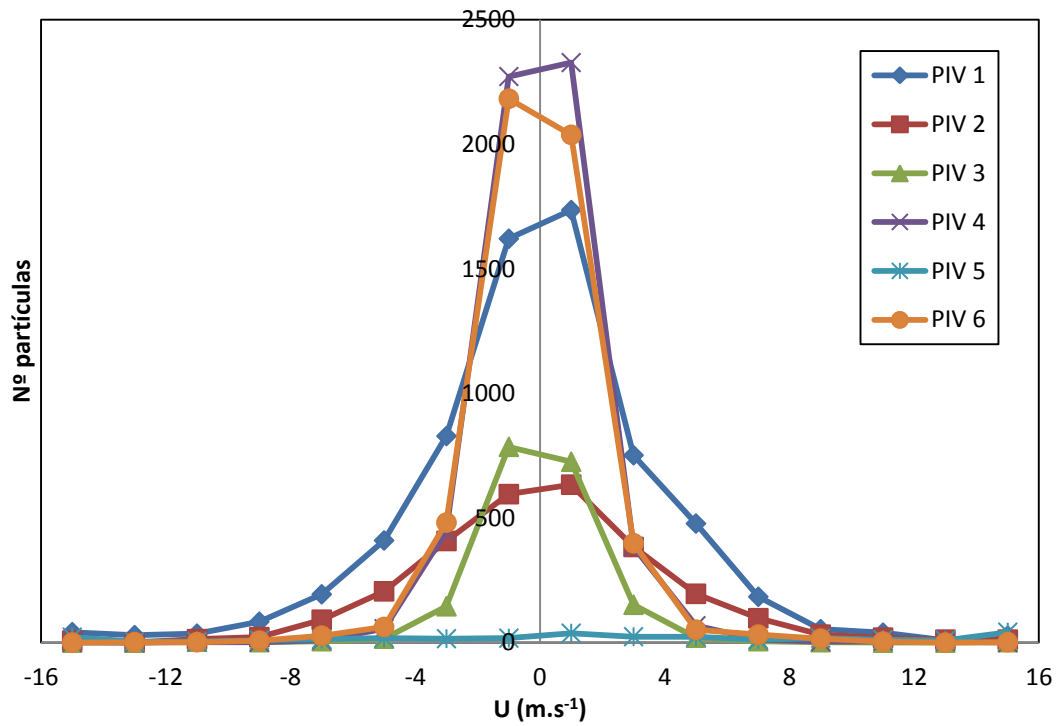


Figura 50 – Número de partículas em função do valor da componente horizontal da velocidade (U) para todos os ensaios.

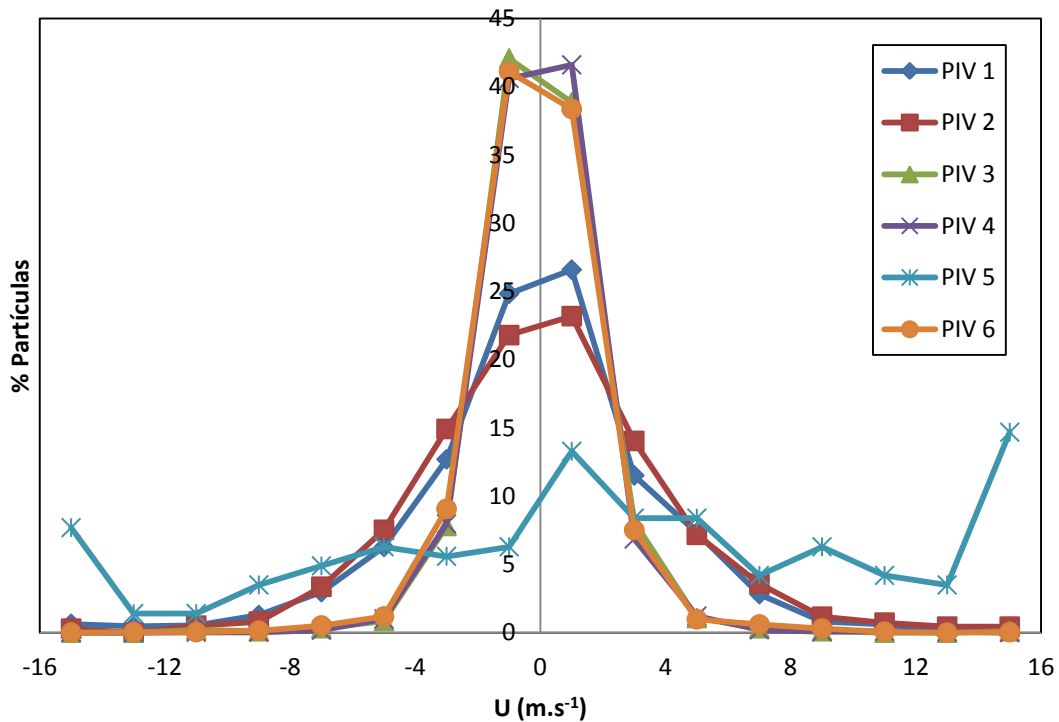


Figura 51 - Percentagem de partículas em função do valor da componente horizontal da velocidade (U) para todos os ensaios.

No entanto na Figura 49 e Figura 51, todos os ensaios com cascas (PIV3, PIV4 e PIV6) tem quase o mesmo porcentagem de velocidades atingidas pelas partículas, já que os três contem as cascas de eucalipto, sendo estes ensaios os que apresentam maior porcentagem de velocidades entre [-3 e 3m/s].

Os ensaios PIV1 e PIV2 originaram partículas com velocidades concentras entre [-5 e 5m/s] enquanto para o Ensaio PIV5 o número de partículas em função da velocidade é mais uniforme, tendo significativamente mais partículas que ascendem com o escoamento de as que descem.

A simetria dos gráficos da Figura 48, mostra um número de partículas ascendente quase igual à quantidade descendente.

Estes valores são contrários ao resultado expectável, que seria que seguiram a direção do escoamento.

3.2.4. Comparação das componetes horizontais e verticais das velocidades das partículas libertadas.

Os dados apresentados nas figuras seguintes, referentes à componente da velocidade vertical e horizontal das partículas, obtiveram-se multiplicando o número de partículas ascendentes em cada 0,5 segundos, pela sua correspondente velocidade média em cada segundo.

Para a Figura 52, PIV1, o somatório total do produto de partículas por suas velocidades em cada instante de tempo registrado, no eixo vertical é 10064,18, e para o eixo horizontal: 9859,53. Sendo estes valores muito semelhantes.

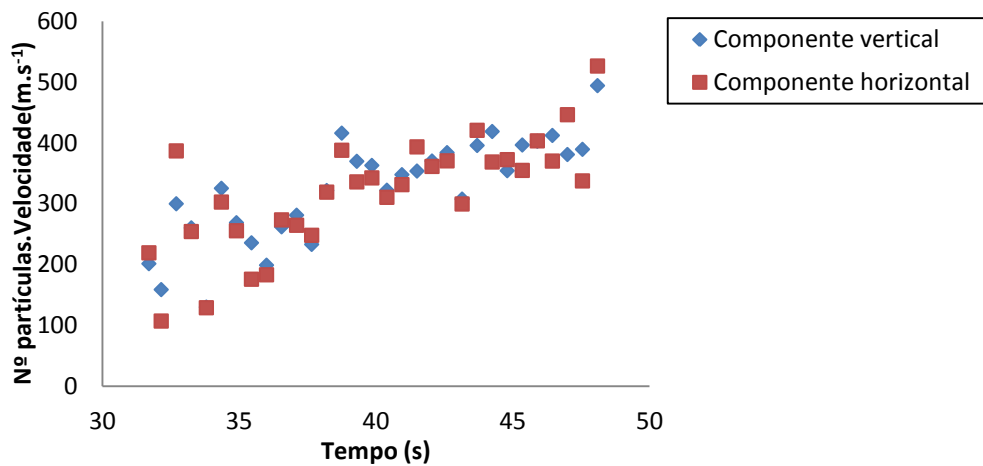


Figura 52 – PIV1, Número de partículas multiplicadas pela velocidade média em função do tempo.

Para a Figura 53, PIV2, o somatório total do produto de partículas por suas velocidades em cada instante de tempo registrado no eixo vertical é 4044,073, e no eixo horizontal 4300,978.

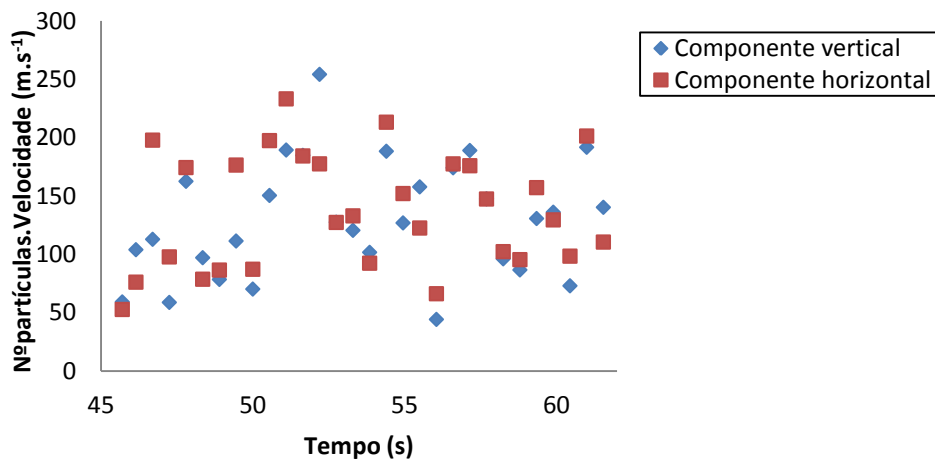


Figura 53 – PIV2, Número de partículas multiplicadas pela velocidade média em função do tempo.

Para a Figura 54, PIV3, o somatório total do produto de partículas por suas velocidades em cada instante de tempo no eixo vertical é 1876,83, e no eixo horizontal 1837,47.

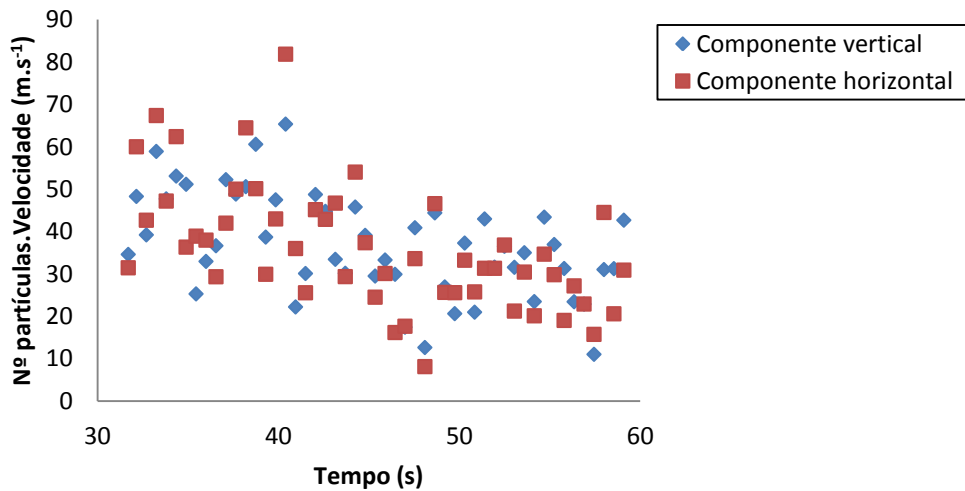


Figura 54 – PIV3, Número de partículas multiplicadas pela velocidade media em função do tempo.

Para a Figura 55, PIV4, o somatório total do produto de partículas por suas velocidades em cada instante de tempo no eixo vertical é 5921,76, e no eixo horizontal 5822,25.

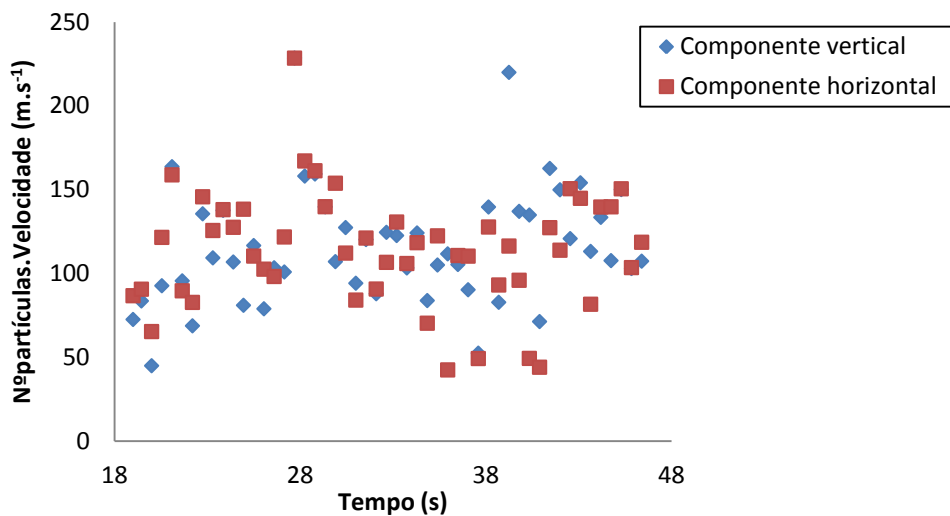


Figura 55 – PIV4, Número de partículas multiplicadas pela velocidade media em função do tempo.

Para a Figura 56, PIV5, o somatório total do produto de partículas por suas velocidades em cada instante de tempo no eixo vertical é 2308,8, e no eixo horizontal 2101,9.

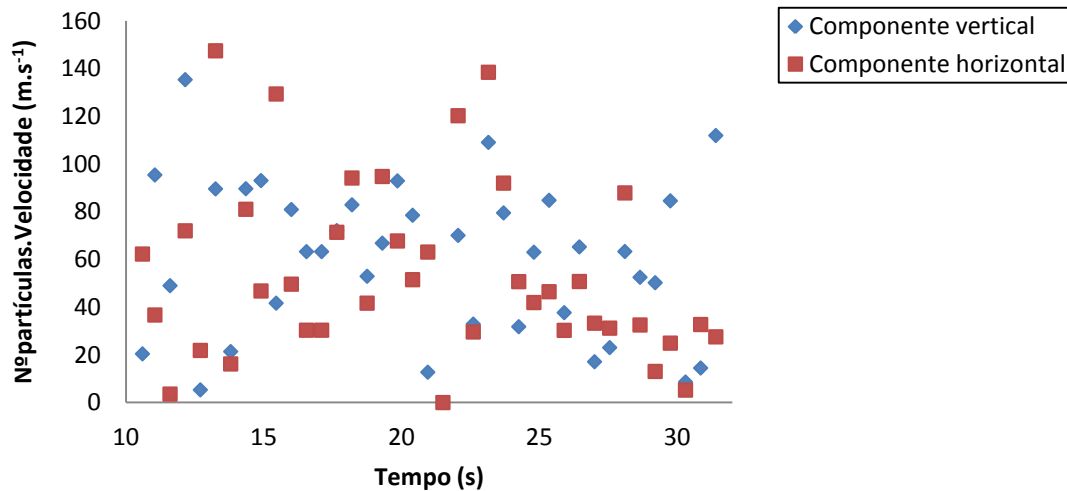


Figura 56 – PIV5, Número de partículas multiplicadas pela velocidade media em função do tempo.

Para o somatório total do produto de partículas por suas velocidades em cada instante de tempo registrado do PIV6 (Figura 57) no eixo vertical é 5748,6, e no eixo horizontal 5738,48.

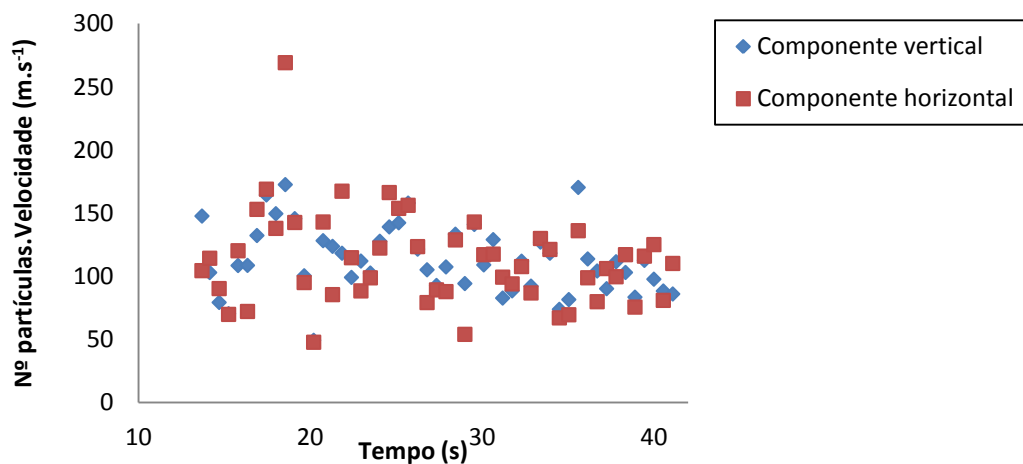


Figura 57 – PIV6, Número de partículas multiplicadas pela velocidade media em função do tempo.

Verifica-se o fato de que para todos os ensaios os valores das velocidades no eixo horizontal e vertical são muito semelhantes, sendo a componente da velocidade media horizontal muito próxima da componente da velocidade media vertical para cada instante de tempo. com a exceção do PIV5 que apresenta valores mais dispersos.

Observa-se este acontecimento na Figura 58 relativa ao ensaio PIV4 no segundo 0,5. As velocidades se movimentam para direções muito dispersas.

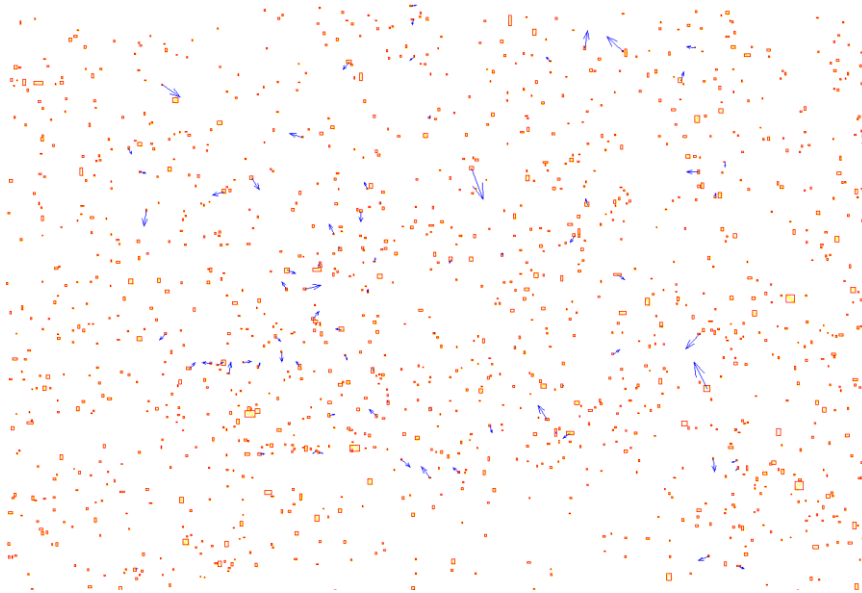


Figura 58 – Imagem captada pelo PIV no segundo 0,5 do ensaio PIV4

3.2.5. Área das partículas em função de suas velocidades

Neste subcapítulo apresentam-se a área das partículas em função da sua velocidade. Calculou-se a área média das partículas para cada intervalo de velocidade em cada segundo.

PIV1

Na Figura 59 do primeiro ensaio (PIV1) observa-se que as partículas com maior área são as que possuem maior velocidade.

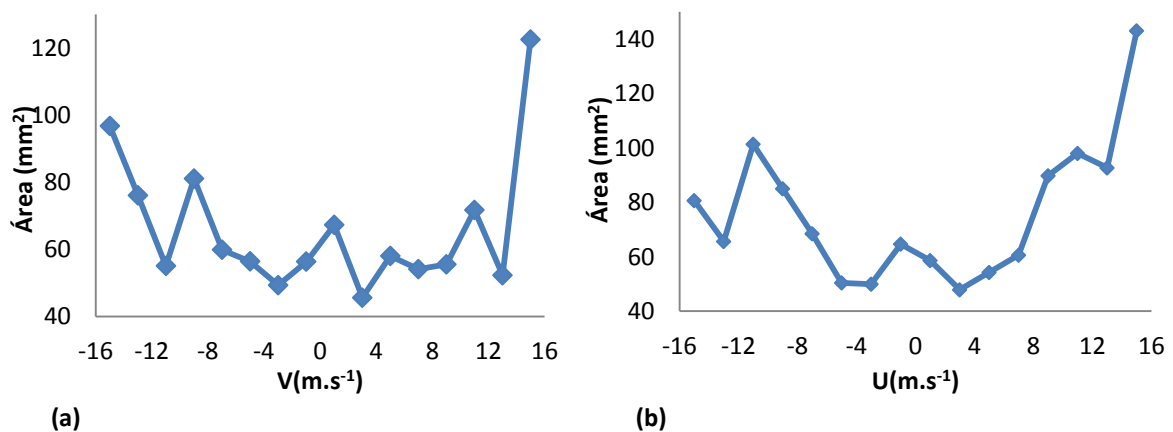


Figura 59 – (a) PIV1, Área das partículas em função da velocidade "V" no eixo vertical , (b) PIV1, Área das partículas em função da velocidade "U" no eixo horizontal.

PIV2

O ensaio PIV2 mostra uma clara tendência de que as partículas com maior área adquirem a máxima velocidade, tanto na sua componente vertical como horizontal. Tanto para as velocidades negativas como positivas, (Figura 60)

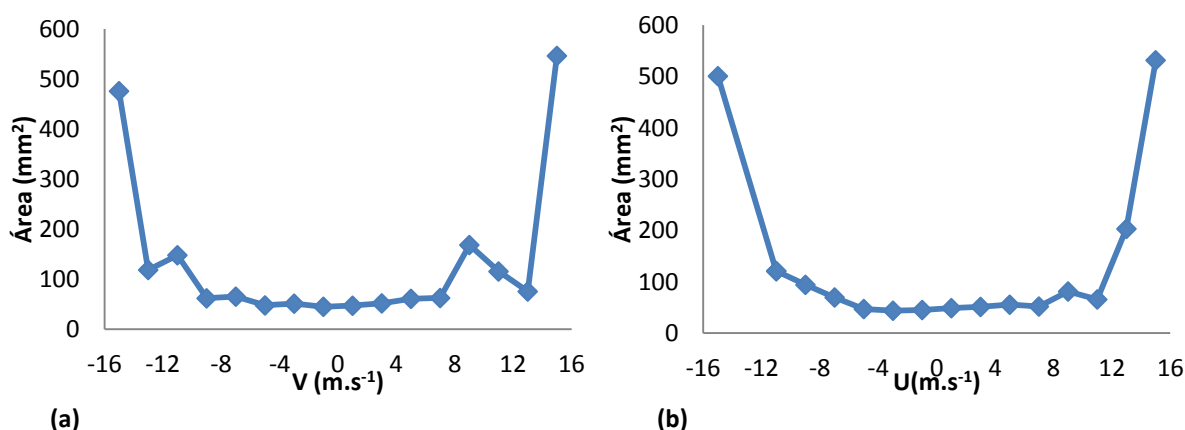


Figura 60 - (a) PIV2, Área das partículas em função da velocidade “V” no eixo vertical , (b) PIV2, Área das partículas em função da velocidade “U” no eixo horizontal.

PIV3

Os gráficos da área em função da componente da velocidade horizontal e vertical do ensaio PIV3 (Figura 61) apresentam uma quase simetria com as maiores áreas tendendo a ter maior velocidade, excetuando duas partículas em direção ascendente e com velocidade maior de 14m/s que contem uma área média de 40mm².

Observa-se que nenhuma partícula atingiu uma velocidade descendente maior de 12m/s durante o tempo de ensaio.

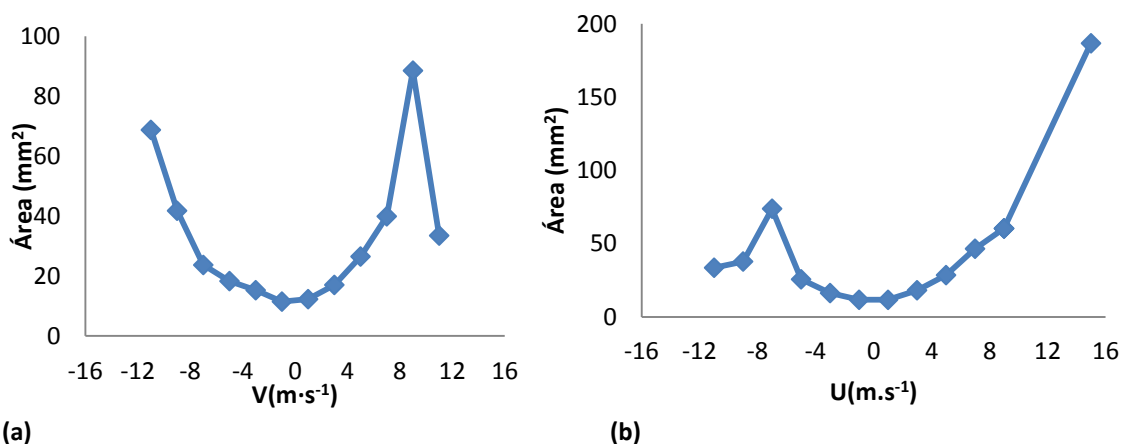


Figura 61 - (a) PIV3, Área das partículas em função da velocidade “V” no eixo vertical , (b) PIV3, Área das partículas em função da velocidade “U” no eixo horizontal.

PIV4

No ensaio PIV4 as partículas com áreas menores são as que assumem velocidades maiores. Observa-se nos gráficos que a velocidade não é proporcional à área (Figura 62).

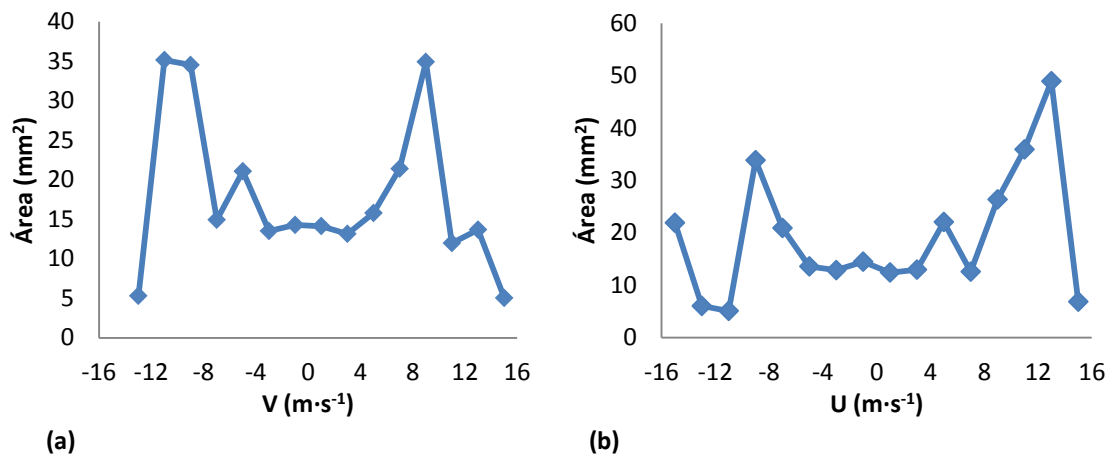


Figura 62 - (a) PIV3, Área das partículas em função da velocidade “V” no eixo vertical , (b) PIV3, Área das partículas em função da velocidade “U” no eixo horizontal.

PIV5

Do ensaio PIV5 resultam tendências muito irregulares. Observa-se que as partículas não apresentam nenhuma tendência de comportamento. (Figura 63)

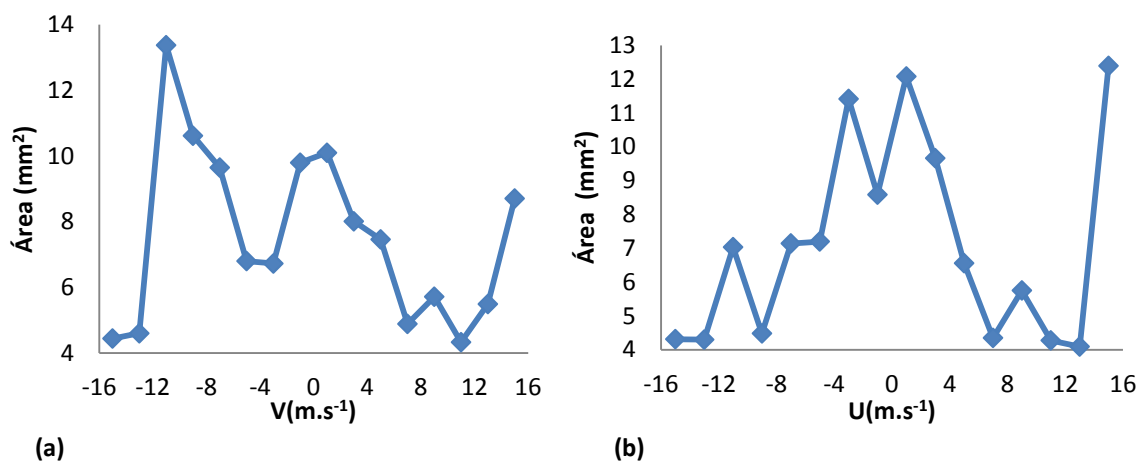


Figura 63 - (a) PIV3, Área das partículas em função da velocidade “V” no eixo vertical , (b) PIV3, Área das partículas em função da velocidade “U” no eixo horizontal.

PIV6

No ensaio PIV6 as partículas com menor área tendem a ter menor velocidade, ainda assim não é aplicável para todas as partículas (Figura 64).

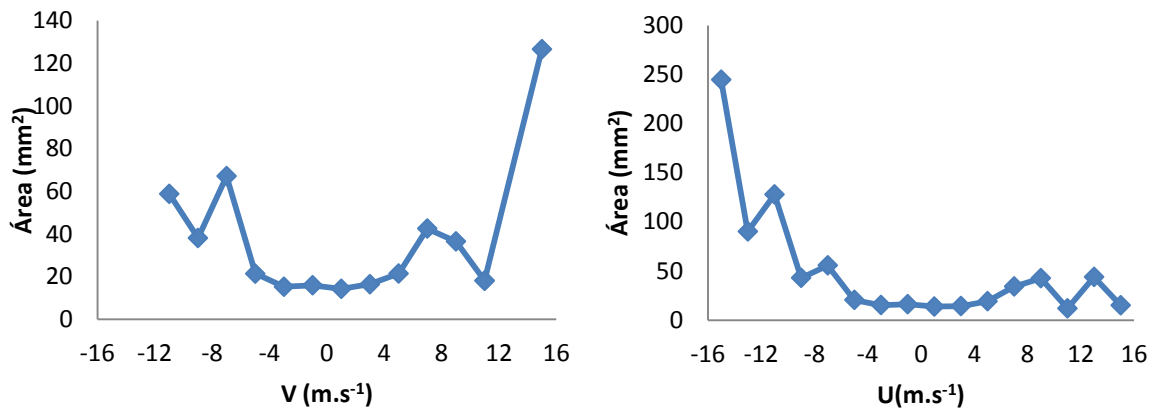


Figura 64 - (a) PIV3, Área das partículas em função da velocidade "V" no eixo vertical , (b) PIV3, Área das partículas em função da velocidade "U" no eixo horizontal.

Comparação dos cenários

Comparam-se as velocidades em relação as áreas das partículas para todos os cenários através dos gráficos seguintes.

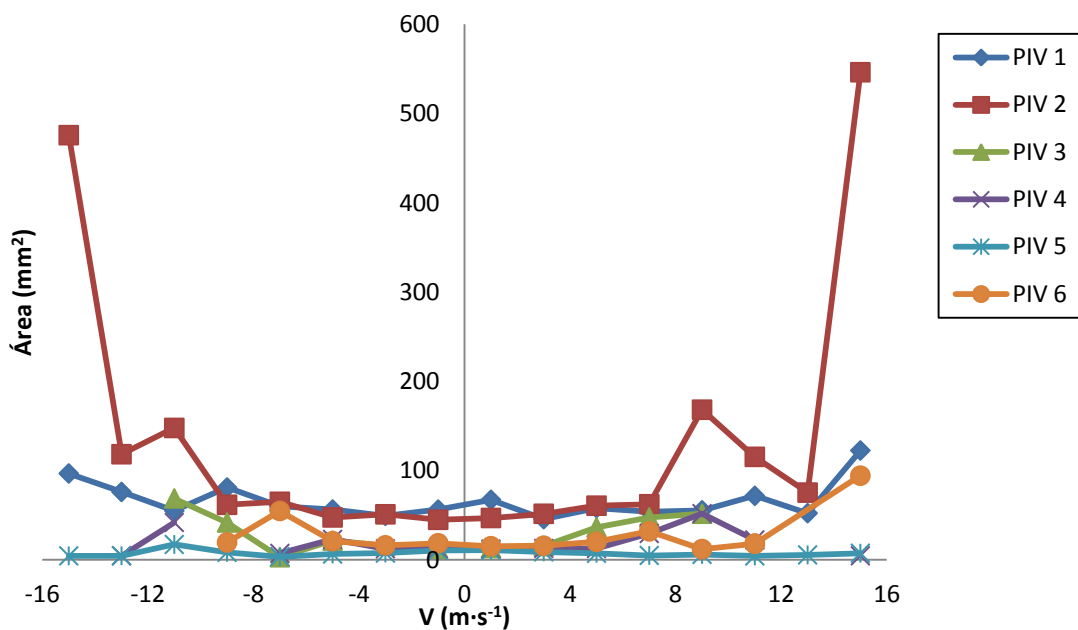


Figura 65 - Área das partículas em função da velocidade (V) no eixo das "y" para todos os cenários.

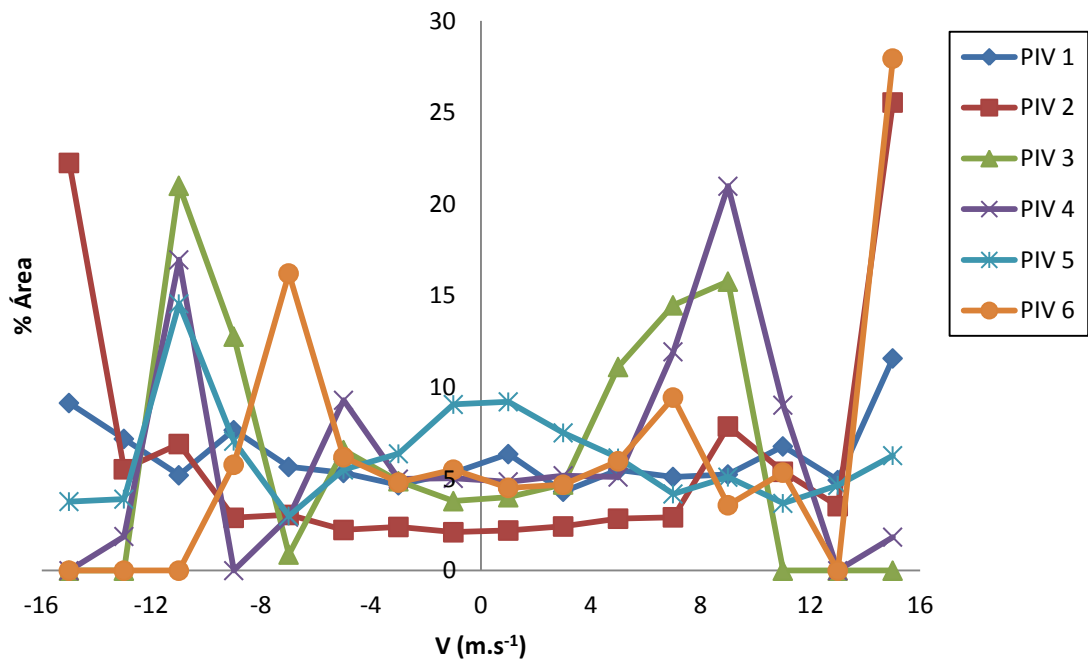


Figura 66 – Percentagem da área das partículas em função da velocidade (V) no eixo das “y” para todos os cenários.

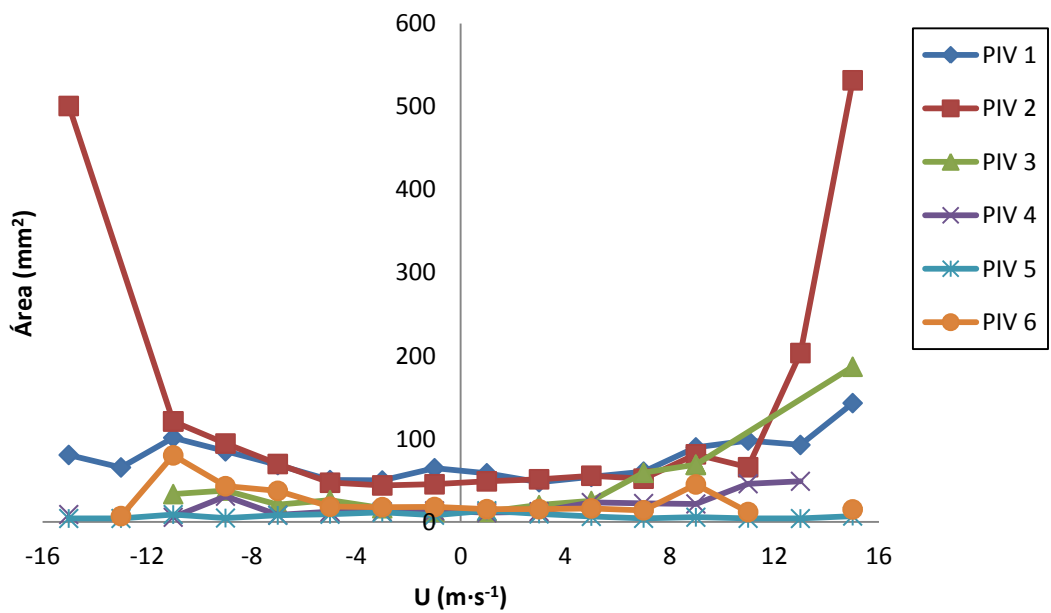


Figura 67 - Área das partículas em função da velocidade (U) no eixo das “x” para todos os cenários.

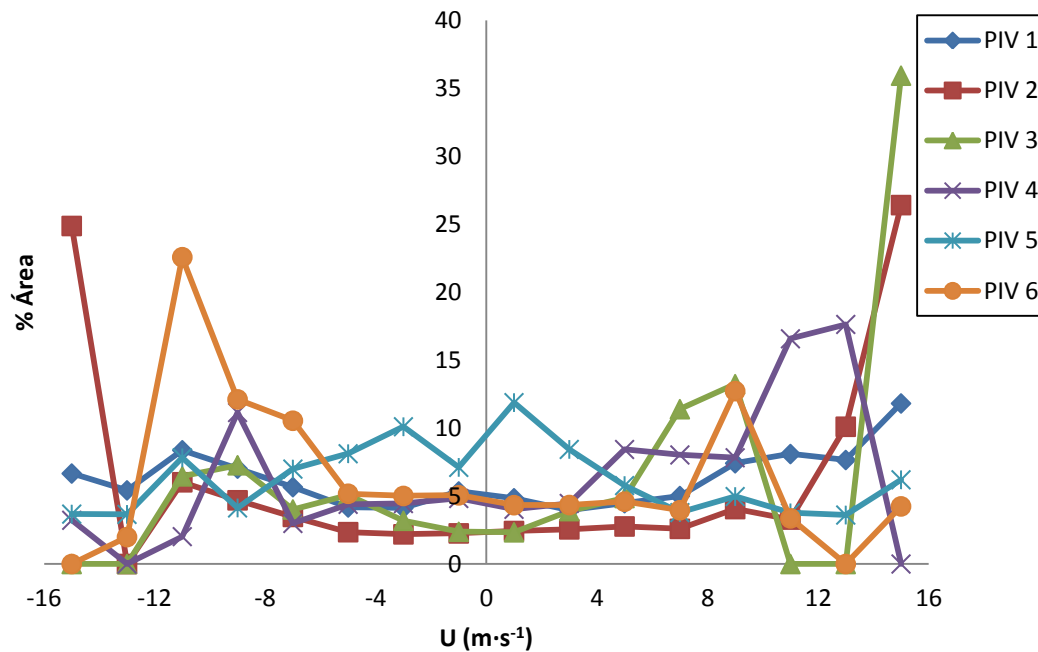


Figura 68 - Percentagem da área das partículas em função da velocidade (U) no eixo das “x” para todos os cenários.

Em termos percentuais, observa-se no geral que as partículas com maior área são as que contêm uma velocidade mais elevada. (Figura 66, Figura 68)

Este fenómeno é devido a que quando as partículas estão sujeitas ao escoamento recebem um impulso (I) igual ao peso do volumen do fluido deslocado (m·g). O volumen do fluido (V) deslocado equivale ao volumen da partícula. Este impulso será o que gere a velocidade. Equação (9)

$$I = m \cdot g = \rho_{fluido} \cdot V \cdot g \quad (9)$$

Nestes ensaios com as captações bidimensionais só pode perceber-se a área não podendo conhecer o volumen, no enquanto pode aplicar-se esta teoria se supoe-se que gran parte das partículas com maior área terão maior volumen.

Vê-se que o ensaio que apresenta partículas libertadas com maior área é o de ramos secos (PIV2), sendo que as partículas de maiores dimensões assumem maiores velocidades. (Figura 65, Figura 67).

4. CONCLUSÕES

Os resultados na determinação dos momentos resistentes foram os seguintes:

- Com o uso da primeira metodologia descrita não se conseguiu que as peças atingiram uma velocidade de rotação constante, podendo repetir os ensaios desde uma altura mais elevada.
- Com diferença dos valores do Padrão registrados ao início com os registrados no fim usando a primeira metodologia, concluiu-se que seria ótimo fazer um ensaio padrão antes de cada peça.
- Não foi encontrado um algoritmo de cálculo para determinação do momento de resistência no entanto, os resultados atingidos poderão servir de base para a continuidade deste trabalho.

Relativamente aos resultados obtidos com o PIV concluiu-se o seguinte:

- O cálculo dos vetores velocidade das partículas libertadas resultou em valores pouco consentâneos com o que seria espectável com praticamente o mesmo número de partículas com trajetórias descendentes e ascendentes. O expectável seria que as partículas seguissem o sentido do escoamento. Podendo estudar este aspecto mais a fundo.
- O sistema bidimensional usado soamente permitiu conhecer a área das partículas, deixando a sugestão suas dimensões, sendo mais exato um sistema 3D .

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Albini F. A. (1979), Spot Fire Distance from Burning Trees - A Predictive Model. USDA Forest Service, Research Paper INT-56, Intermountain Forest and Range Experiment Station.
- Albini F. A. (1981), Spot Fire Distance from Isolated Sources - Extensions of a Predictive Model. USDA Forest Service, Research Note INT-309, Intermountain Forest and Range Experiment Station.
- Albini F. A. (1982), Transport of Firebrands by Line Thermals. *Combustion Science and Technology*, 32, 277-288.
- Albini F. A. (1983a), Potential Spotting Distance from Wind - Driven Surface Fires. USDA Forest Service, Research Paper INT-309, Intermountain Forest and Range Experiment Station.
- Albini F. A. (1983b), Transport of Firebrands by Line Thermals. *Combustion Science and Technology*, Vol. 32, Pp. 277-288.
- Alexander M. E., Tymstra C., Frederick K. W. (2004) Incorporating breaching and spotting considerations into Prometheus – the Canadian wildland fire growth model. *Foothills Model Forest*; QN 6.
- Almeida M. (2011), *Propagação de Incêndios Florestais por Focos Secundários*- Tese para a obtenção do grau de Doutor em Engenharia Mecânica na Especialidade de Riscos Naturais e Tecnológicos, FCTUC.
- Almeida M., Viegas, D. X. et. al. (2009), Combustibility of Potential Firebrands, 18th IMACS – World Congress MODSIM09 – International Congress on Modelling and Simulations, Cairns – Australia, 13-17 July.
- Almeida M, Viegas D, Raposo J. (2014), Analysis of firebrand release on the spot fire mechanism
- Andersen A., Pesavento, U., Wang, J. Z. (2005a) Unsteady aerodynamics of fluttering and tumbling plates. *J. Fluid Mech.*, vol. 541
- Andersen A., Pesavento, U., Wang, J. Z. (2005b) Analysis of transitions between fluttering, tumbling and steady descent of falling cards. *J. Fluid Mech.*, vol. 541
- Byram G. M. (1954), Atmospheric Conditions Related to Blowup Fires. USDA Forest Service (SE) Station Paper 35.
- Byram G. M. (1959), Combustion of Forest Fuels. In K. P. Davis, ed., *Forest Fire: Control and Use*. McGraw-Hill.
- Cheney, N. P. and G.A.V. Bary. (1969). The Propagation of Mass Conflagrations in a Standing Eucalypt Forest by the Spotting Process. Paper A6, Mass Fire Symposium, Canberra, February 1969, C of A.
- Clements H. B. (1977), Lift-Off of Forest Firebrands. USDA Forest Service Research Paper SE-159. March 1977. Southeastern Forest Experiment Station. Asheville. North Carolina.
- David L. Finn D. L. (2007), Falling Paper and Flying Business Cards, *SIAM News*, Vol. 40, Number 4.
- Ellis P. F. (2000), The Aerodynamic and Combustion Characteristics of Eucalypt

- Bark - A Firebrand Study. Ph.D. Dissertation. Australian National University. Canberra.
- Hirata K., Shimizu K., Fuluhara K., Yamauchi K., Kawaguchi D., Funaki J (2009) Aerodynamic Characteristics of a Tumbling Plate under Free Flight. *Trans. Jpn. Soc. Mech. Eng.*, Vol 75, No. 749,B.
- Lee S. L., Helman J.M. (1969), Study of firebrand trajectories in a turbulent swirling natural convection plume. *Combustion and Flame*,13.
- Lee S. L., Helman J.M. (1970), Firebrand trajectory study using an empirical velocity-dependant burning law. *Comb. and Flame* 15:265-74.
- Luke R. H., McArthur A. G. (1978) Bushfires in Australia . CSIRO Div. Forest Res. AGPS Canberra.
- Manzello S. Maranghides A., Shields J. R., Mell E. M., Yoshihiko H., Daiasaku N. (2008); Mass and size distribution of firebrands generated from burning Korean pine (*Pinus koraiensis*) trees. *Fire Mater* 2009; 33
- McArthur A. G. (1967), Fire behaviour in eucalypt forests. *Comm. of Australia For. & Timber Bur. Leaflet No. 107.*
- Muraszew A.; J. B. Fedele, W. C. Kuby (1976) Investigation of fire whirls and firebrands. *Aerospace Rep. ATR-76(7509)-1*, The Aerospace Corp., El Segundo, Calif.
- Pagni P. J., Woicheese J. P. (2000), Fire Spread by Brand Spotting; Fifteenth Meeting of the UJNR Pane on Fire Research an Safety – March 1-7, 2000 – Volume 2.
- Sardoy N., Consalvi J., Porterie B., Fernandez-Pello A. (2007) Modelling transport and combustion of firebrands from burning trees. *Combustion and Flame* 150, 151-169.
- Taranto F. (2010), *Study on characteristics of fire-brands generation in spotting fires with PIV technology*, Politecnico de Milano, Tese do Corso di Laureai m Ingegneria per l'Ambiene e ilTerritorio
- Tarifa, C. S. et. al. (1965), On the Paths and Lifetimes of Burning Particles of Wood, Tenth Symposium (International) on Combustion, pp. 1021-1037, The Combustion Institute
- Tarifa, C. S. et. al. (1967) Transport and Combustion of Firebrands. USDA Forest Service, Reports of Grants FG-SP-114 and FG-SP-146.
- Viegas D. X., Ribeiro L. M., Viegas M. T., Pita L. P., Rossa C. (2009) Impacts of Fire on Society: Extreme Fire Propagation Issues. In 'Earth Observation of Wildland Fires in Mediterranean Ecosystems'. (Ed. E Chuvieco) Springer Verlag Geosciences.
- Weber R. O. e Mestre N. J. (1990), Flame Spread Measurements on Single Ponderosa Pine Needles: Effect of Sample Orientation and Concurrent External Flow, *Combust. Sci. and Tech.*, 1990, Vol. 70, pp 17-32