



FCTUC FACULDADE DE CIÊNCIAS
E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE COIMBRA

DEPARTAMENTO DE
ENGENHARIA MECÂNICA

Estudo Aerodinâmico do Transporte de Pinhas (*Pinus halepensis*)

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

Autor

Paulo Alexandre Malva Oliveira

Orientadores

**Professor Domingos Xavier Filomeno Carlos Viegas
Mestre Miguel Abrantes de Figueiredo Bernardo de
Almeida**

Júri:

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

**Vogais Professor Catedrático Domingos Xavier Filomeno Carlos
Viegas da Universidade de Coimbra
Professor Doutor António Gameiro Lopes da Universidade de
Coimbra**

Com a colaboração da Associação para o desenvolvimento da Aerodinâmica Industrial (ADAI) e Centro de Estudos sobre Incêndios Florestais (CEIF)



**Associação para o
desenvolvimento
da Aerodinâmica
Industrial**



**Centro de
Estudos sobre
Incêndios
Florestais**

Coimbra, Setembro, 2011

“Aprender é a única coisa de que a mente nunca se cansa, nunca tem medo e nunca se arrepende.”

Leonardo da Vinci (1452 – 1519)

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao meu prezado orientador Professor Domingos Xavier Viegas pela transmissão de conhecimentos, paciência e disponibilidade no esclarecimento de dúvidas.

O meu muito obrigado ao meu Co-orientador Mestre Miguel Almeida pela disponibilidade e naturalidade com que me esclareceu as dúvidas e me indicou alternativas de modo a solucionar os problemas.

A todos os amigos, André Gourgel, Alexander Mayer e Dane Detelic companheiros de casa, à *maltinha* do DEM pela companhia e bons momentos que passamos, ao Sr Cardoso pela simplicidade com que nos ajudava nos momentos de maior azafama e ao Tiago Loureiro pelo trabalho de equipa.

Dedico à minha, Mãe, Pai, irmãos, avós, tios e à minha mais que tudo Patrícia por todo o carinho e motivação que me transmitiram nos bons e maus momentos.

Ao CEIF – Centro de Estudos sobre Incêndios Florestais por ter permitido o acesso ao TCO (Túnel de Combustão Oblíquo) para a realização dos ensaios e à ADAI – Associação para o Desenvolvimento da Aerodinâmica Industrial, por disponibilizar o material experimental necessário à preparação dos ensaios.

RESUMO

Os incêndios florestais são uma das principais causas de devastação de grande área florestal que ocorre todos os anos. O estudo do comportamento do fogo e das suas formas de propagação, nomeadamente a ocorrência de focos secundários (*spotfires*), constitui-se como uma tarefa de auxílio nas estratégias de combate aos incêndios, que poderá amenizar os efeitos deste flagelo.

O objectivo geral desta dissertação consiste no estudo das características aerodinâmicas das pinhas da espécie *Pinus halepensis* para diferentes estados de combustão desta, durante o incêndio. O estudo do modelo definido durante a dissertação, tem por base a queda da pinha, ou seja, a sua fase descendente durante o incêndio, não se tendo em conta a ascensão na pluma térmica, por se tratar de um estudo bidimensional, (trajectória da pinha num plano de duas dimensões).

Numa fase inicial do trabalho, o estudo incidiu sobre as características físicas das pinhas *Pinus halepensis*, desenvolvendo-se um modelo para o cálculo do ângulo de abertura de qualquer pinha desta espécie; calculou-se a distância média do centro de gravidade ao pecíolo e obteve-se a densidade do combustível, recorrendo a uma amostra de dez pinhas. Na fase seguinte, determinaram-se experimentalmente os coeficientes aerodinâmicos (coeficiente de resistência, coeficiente de sustentação e coeficiente de momento) característicos de pinhas no seu estado natural (pinhas inteiras/intactas) e de pinhas parcialmente queimadas.

Definiu-se um modelo empírico para determinação dos coeficientes aerodinâmicos, das pinhas intactas, em função da orientação do escoamento em relação ao posicionamento da pinha. Finalmente utilizou-se um programa que permitiu analisar as trajetórias seguidas por pinhas com base nas determinações anteriormente descritas.

Palavras-chave: fogos florestais, focos secundários, propagação de incêndios, coeficientes aerodinâmicos, velocidades terminais, *Pinus halepensis*,

ABSTRACT

Every single year, bushfires signify one of the main causes for the destruction of large areas of forest. The study of fire behavior and its forms of proliferation, namely secondary fires, (spot fires), not only presents itself as complementary task regarding fire fighting strategies, as it may also work as a way to diminish the effects of this ordeal.

The broad-spectrum objective for this dissertation is the study of aerodynamic characteristics of the pine cone (*Pinus halepensis*), its various stages of combustion, which take place throughout a fire. The selected study model for this dissertation is based on the pine fall, this is to say, his downward phase during the fire. Being a two-dimensional study, this study model will not take under consideration the plume's thermal ascension, (the pine trajectory within a two-dimension plan).

The initial phase of the work, this study focused on the physical characteristics of the pine cones (*Pinus halepensis*). Through the development of a model in order to evaluate the open angle of any cone of this specie, we calculated the average distance from the center of gravity to the petiole and obtained the specific gravity particle, using a sample of ten cones.

In the following phase, we move towards the study of the aerodynamic coefficients obtained during tests (coefficients of resistance, coefficients of sustainability and coefficients of moment), which are characteristic of pine cones in their natural form (intact pine cones), and of partially burned pine cones.

We established a empirical model to ascertain the aerodynamic coefficients of the intact pine cones, in regard to the orientation of the flow in relation to the cone position. Finally we used a program that allowed us to analyze the trajectories followed by cones based on the determinations described above.

Keywords forest fires, spot fires, spread fire, aerodynamics coefficients, terminal velocity, *Pinus halepensis*.

Índice

Agradecimentos	i
Resumo	ii
Abstract	iii
Índice de Gráficos	v
Índice de Figuras	vi
Índice de Tabelas	vii
Simbologia e Siglas	viii
Simbologia	viii
Siglas	x
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Caracterização e Localização Geográfica de <i>Pinus halepensis</i>	2
1.2. Focos Secundários	4
1.3. Aerodinâmica	6
1.4. Motivação e Objectivos do Estudo	10
1.5. Estado da Arte	11
1.6. Organização da Dissertação	13
2. METODOLOGIA	15
2.1. Equipamento	15
2.1.1. Túnel de Combustão Oblíquo	15
2.1.2. Calibração da célula de carga	17
2.2. Ensaios com pinhas inteiras	21
2.3. Ensaios com pinhas parcialmente queimadas	23
2.4. Procedimentos	24
2.4.1. Características físicas	24
2.4.2. Tratamento de dados	28
2.5. Familiarização com os ensaios aerodinâmicos (Placas Planas)	33
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	36
3.1. Pinhas Inteiras	36
3.2. Pinhas Parcialmente Queimadas	41
4. MODELO EMPÍRICO	45
4.1. Breve aplicação do programa de transporte aerodinâmico de uma partícula	49
5. CONCLUSÕES	51
5.1. Perspectivas e Estudos Futuros	52
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	54
APÊNDICE A	58
Análise da correcção do Branco (haste em U)	58
Cálculo das forças e momento aplicados na haste lateral	59
Efeito da haste em U	65
Ensaios corrigidos das amostras	68
ANEXOS	73

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Relação das massas reais com os sinais da célula de carga.....	18
Gráfico 2 - Relação dos momentos reais com os sinais da célula de carga.	20
Gráfico 3- Valores de C_x das diferentes placas em função do escoamento β	34
Gráfico 4- Valores de C_z das diferentes placas em função do escoamento β	34
Gráfico 5 - Valores de CM_y das diferentes placas em função do escoamento β	35
Gráfico 6 – Valores do C_x médio, mínimo e máximo (média de 8 amostras intactas).	37
Gráfico 7 - Valores do C_z médio, mínimo e máximo (média de 8 amostras intactas)	38
Gráfico 8 - Valores do CM_y médio, mínimo e máximo (média de 8 amostras intactas).....	39
Gráfico 9 - Relação de U_T em função de $\sqrt{(m/A)}$	40
Gráfico 10 - Variação do C_z em função do G_A	41
Gráfico 11 - Variação do CM_y em função do G_A	41
Gráfico 12 - Variação de U_T em função da perda de massa.	44
Gráfico 13 - Definição do modelo empírico de C_x (180 a 360°).....	46
Gráfico 14 - Definição do modelo empírico de C_z (180 a 360°).....	47
Gráfico 15 - Valores de CM_y em função do escoamento para os 4 tipos de pinhas.	47
Gráfico 16 - Definição do modelo empírico de CM_y para dois grupos de pinhas (180 a 360°).....	48
Gráfico 17 - Definição do modelo empírico de CM_y , de valores médios (180 a 360°).	49
Gráfico 18 - Simulação do transporte da pinha para uma queda de 100 m.	50
Gráfico 19 – Média de F_x da haste lateral em função da direcção do escoamento β	59
Gráfico 20 - Média da F_z da haste lateral em função da direcção do escoamento β	60
Gráfico 21 - Média do M_y da haste lateral em função da direcção do escoamento β	61
Gráfico 22 – Aproximação de F_x da pinha artificial ((2) – (1))	62
Gráfico 23 - Aproximação de F_z da pinha artificial (não considerando a haste lateral)	62
Gráfico 24 - Aproximação de M_y da pinha artificial (não considerando a haste lateral)....	63
Gráfico 25 - Aproximação dos valores F_x da pinha artificial com haste em U (3).	64
Gráfico 26 - Aproximação dos valores F_z da pinha artificial com haste em U (3).	64
Gráfico 27 - Aproximação dos valores M_y da pinha artificial com haste em U (3).....	65
Gráfico 28 – Subtracção da pinha artificial a (3), resultando a haste em U para F_x	66
Gráfico 29 – Subtracção da pinha artificial a (3), resultando a haste em U para F_z	67
Gráfico 30 - Subtracção da pinha artificial a (3), resultando a Interferência da haste U para M_y	67
Gráfico 31 - Comparação de F_x não corrigido, corrigido e a interferência da haste U.	68
Gráfico 32 - Comparação de F_y não corrigido, corrigido e a interferência da haste U.	69
Gráfico 33 - Comparação de M_y não corrigido, corrigido e a interferência da haste U.....	69
Gráfico 34 - Resultados de C_x das pinhas intactas corrigidas.	70
Gráfico 35 - Resultados de C_z das pinhas intactas corrigidas.	71
Gráfico 36 - Resultados de CM_y das pinhas intactas corrigidas.	71
Gráfico 37 - Modelo Completo (0° - 360°) de C_x	74
Gráfico 38 - Modelo Completo (0° - 360°) de C_z	74
Gráfico 39 - Modelo Completo (0° - 360°) de CM_y	75

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Distribuição da espécie <i>Pinus halepensis</i> na Europa (Fonte: DGRF, 2008)	2
Figura 2- Distribuição da espécie <i>Pinus halepensis</i> em Portugal Continental (Fonte: DGRF, 2008)	3
Figura 3 – Desenvolvimento de um foco secundário.	5
Figura 4 - Distribuição da pressão e tensão num elemento de área. (Fonte: Anderson 1991)	7
Figura 5 - Representação da força resultante F_r e suas componentes.....	9
Figura 6 - Representação das forças num corpo em queda livre.	9
Figura 7 - <i>Focos secundários observados</i> na Floresta Carmel, em Israel a 02 de Dezembro de 2010 (Fonte: Boston News – Wildfire in Israel 2010).....	11
Figura 8 – Diferentes inclinações do túnel, da esquerda para a direita observa-se 270° , 235° , 180° , 125° e 90°	16
Figura 9 – O TCO com uma inclinação de 270°	16
Figura 10 - Haste de fixação da partícula e célula de carga.....	17
Figura 11 - Esquema dos eixos de escoamento e de referência.	19
Figura 12 - Esquema da calibração dos momentos.....	20
Figura 13 - Amostras das pinhas inteiras, pinha pequena (P), pinha média (M), pinha longa (L) e pinha (G)	21
Figura 14 - Dimensões características da pinha (l , b_0 e A_r).....	22
Figura 15 - Ensaio de combustão parcial das pinhas.....	23
Figura 16 - Esquema do eixo longitudinal e transversal.....	25
Figura 17 - Esquema de medição do centro de gravidade.	25
Figura 18 - Imagem da pinha inteira, área aparente da pinha e área efectiva da pinha.	26
Figura 19 - Esquema do tratamento de dados.....	29
Figura 20 - Esquema da relação do eixo de referência com o eixo do escoamento.	31
Figura 21 - Direcção do escoamento com a rotação do túnel.	32
Figura 22 - Referencial utilizado dependente da orientação do escoamento	32
Figura 23 - Sequência fotográfica das perdas de massa, 50, 70 e 80%, respectivamente ...	42
Figura 24 - União da célula de carga à pinha.	58
Figura 25 – Haste de fixação de perfil em “U”	58
Figura 26 - Gráfico da função de aproximação de C_x obtido no <i>LABFit</i>	75
Figura 27 - Gráfico da função de aproximação de C_z obtido no <i>LABFit</i>	76
Figura 28 - Gráfico da função de aproximação de CM_y (P - M) obtido no <i>LABFit</i>	76
Figura 29 - Gráfico da função de aproximação de CM_y (G - L) obtido no <i>LABFit</i>	77

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Relação das massas reais dos objectos com os sinais da celula de carga.	18
Tabela 2 - Características físicas das pinhas inteiras.	22
Tabela 3 - Valores do volume efectivo e massa de base seca das amostras.	27
Tabela 4 - Dados característicos obtidos nos ensaios realizados, a verde os valores incorrectos, e a negrito os máximos e mínimos (12 amostras de pinhas inteiras).....	39
Tabela 5 - Descrição visual das pinhas para diferentes % de perda de massa.....	42
Tabela 6 - Variações da U_T e C_x com a % perda de massa.	43
Tabela 7 - Modelos Completos (0° - 360°) de C_x , C_z e CM_y	73
Tabela 8 - Características das pinhas parcialmente queimadas.	77

SIMBOLOGIA E SIGLAS

Simbologia

$A_r [m^2]$ – Área da amostra

$A [N]$ – Força Axial ao plano da amostra

a_1, a_2, a_3, a_4 – Coeficientes dos modelos

$b_0 [cm]$ – Largura das amostras

C – Coeficientes aerodinâmicos

CG – Centro de gravidade

CM – Centro de massa

CM_y – Coeficiente de momento

C_x – Coeficiente de resistência

C_z – Coeficiente de sustentação

$F [N]$ – Força

$F_D [N]$ – Força definida segundo o eixo do escoamento

f_f – Conversor de sinal da forças da célula de carga em forças efectivas

$F_L [N]$ – Força aplicada segundo o eixo perpendicular a F_x , no plano xOz

f_m – Conversor de sinal do momento da célula de carga em momento efectivo

$F_r [N]$ – Força resultante

$F_x [N]$ – Força definida segundo o eixo do escoamento

$F_{x0} [N]$ – Força segundo o eixo horizontal de referência

$F_z [N]$ – Força aplicada segundo o eixo perpendicular a F_x , no plano xOz

$F_{z0} [N]$ – Força segundo o eixo vertical de referência

$g [m.s^{-2}]$ – Aceleração gravítica

G – Referente à pinha grande

$l [cm]$ – Comprimento das amostras

L – Referente à pinha longa

$m [g]$ – Massa da amostra

$m_{BS} [g]$ – Massa seca da amostra

-
- m_{real} [kg] – Massa real dos pesos
- M – Referente à pinha média
- M [N.m] – Momento
- Mod.* – Relativo a um modelo matemático (função de aproximação)
- Mód* – Módulo do sinal da força aplicada
- M_{real} [N.m] – Momento real
- M_y [N.m] – Momento em torno do eixo y
- N [N] – Força normal ao plano da amostra
- p [Pa] – Pressão na superfície do corpo
- P – Referente à pinha pequena
- PA – Ponto de aplicação, coincide com o ponto de fixação
- PC – *Pine cone*
- PL – Placa plana
- R – Coeficiente de correlação
- S – Sinal da célula de carga sem efeito residual
- S' – Sinal com o efeito residual
- Seq – Sequência de leitura dos dados do TCO
- SM_y – Sinal do momento enviado pela célula de carga em torno do eixo do y
- S_x – Sinal da força segundo x enviado pela célula de carga
- S_z – Sinal da força segundo z enviado pela célula de carga
- U [$m.s^{-1}$] – Velocidade do escoamento
- U_t [$m.s^{-1}$] – Velocidade terminal da amostra
- U_{t0} [$m.s^{-1}$] – Velocidade terminal para uma perda de massa nula
- U_x [$m.s^{-1}$] – Velocidade do vento segundo x
- U_{xp} [$m.s^{-1}$] – Velocidade horizontal dentro da coluna térmica
- U_{yp} [$m.s^{-1}$] – Velocidade vertical dentro da coluna térmica
- V_{apar} [$m.s^{-1}$] – Volume aparente da amostra
- $V_{efectivo}$ [$m.s^{-1}$] – Volume efectivo da amostra
- X_0 [m] – Distância de alcance de uma partícula
- α [°] – Ângulo do módulo do sinal com o eixo horizontal de referência
- β [°] – Ângulo de orientação do escoamento com a amostra
-

θ [$^{\circ}$] – Ângulo de desfasamento da célula de carga

ρ [kg.m^{-3}] – Densidade de cada amostra

ρ_{apar} [kg.m^{-3}] – Densidade aparente da amostra

ρ_{ar} [kg.m^{-3}] – Densidade do ar atmosférico

$\rho_{efectiva}$ [kg.m^{-3}] – Densidade efectiva da amostra

τ_w [N.m^{-2}] – Tensão viscosa na superfície do corpo

Siglas

ADAI – Associação para o desenvolvimento da Aerodinâmica Industrial

CEIF – Centro de Estudos sobre Incêndios Florestais

CFD – Computacional Fluid Dynamics

DEM – Departamento de Engenharia Mecânica

DGRF – Direcção-Geral dos Recursos Florestais

EUFORGEN - European Forest Genetic

FCTUC – Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra

LEIF – Laboratório de Estudos sobre Incêndios Florestais

USDA - United States Department of Agriculture

1. INTRODUÇÃO

Os fogos florestais têm grande impacto ambiental e social devido ao seu efeito devastador que destrói grandes áreas florestais atingindo por vezes, áreas urbanas, causando vítimas e a perda de bens materiais. Este cenário levou ao crescimento do interesse no estudo do comportamento do fogo, melhorando a capacidade na gestão dos recursos florestais, na prevenção e na definição de táticas de combate aos incêndios.

O estudo da modelação do comportamento do fogo é fundamental na compreensão da propagação dos incêndios, podendo contribuir para a diminuição dos seus efeitos, causados pela falta de informação. A propagação de um fogo pode desenrolar-se por meio terrestre, denominando-se frente de fogo ou por via aérea, isto é, partículas em chama ou incandescentes com origem no foco primitivo que vão originar focos secundários de incêndio. Compreendendo o comportamento e trajectórias do fogo pode prever-se a sua evolução e assim combatê-lo antecipadamente.

De acordo com Ellis (2000), os focos secundários, tema de relevo neste estudo, dependem de vários factores, nomeadamente a topografia do local de incêndio, o tipo de combustível (partícula que alimenta o incêndio), características atmosféricas e intensidade do fogo. No que diz respeito ao transporte das partículas que originam o foco secundário, este depende apenas das características intrínsecas das mesmas e do escoamento condicionado pelo clima atmosférico. Existem diversos combustíveis capazes de iniciar novos focos de incêndio, tais como cascas de eucalipto, agulhas, ramos, escamas de pinhas e pinhas, sendo este último o combustível a estudar. A selecção da espécie de pinhas *Pinus halepensis* surgiu devido ao incêndio ocorrido em Israel no ano de 2010, onde os focos secundários ocorreram em grande escala.

O estudo realizado está inserido no projecto de integração de *spotfires*, dirigido pela ADAI com o apoio da FCTUC, que tem como objectivo o desenvolvimento de um modelo computacional que ajude a prever as áreas onde há maior risco de ocorrerem focos secundários, tendo em conta as características do local e as condições meteorológicas. A caracterização dos combustíveis assume-se como essencial na obtenção das velocidades terminais e trajectórias iniciais de ascensão e de queda fundamentais na aplicação do programa.

1.1. Caracterização e Localização Geográfica de *Pinus halepensis*

A espécie *Pinus halepensis*, também conhecida como *Pinheiro-de-alepo*, pertence à família *Pinaceae*, é proveniente da zona do Mediterrâneo, distribuindo-se de acordo com a *Figura 1*.

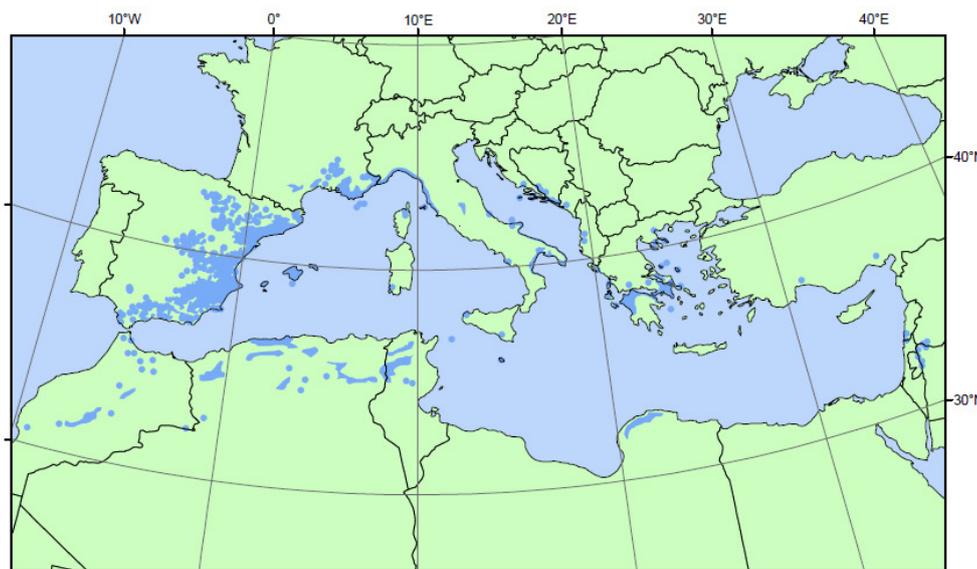


Figura 1 - Distribuição da espécie *Pinus halepensis* na Europa (Fonte: DGRF, 2008)

Ao analisar o mapa anterior, verifica-se que a distribuição destas pinhas é mais frequente na costa Mediterrânica Nordeste, desde a costa Este de Espanha até a Grécia, Norte de África e margens do Mar Negro. Distribuição da espécie *Pinus halepensis* no mediterrâneo (Fonte: EUFORGEN, 2008)

O *Pinheiro-de-alepo* tem capacidade de adaptação e crescimento em zonas de baixas altitudes, com exceções, podendo chegar ao *1000 m* em Espanha e aos *1700 m* em Marrocos, pois são zonas costeiras, e esta espécie está presente em abundância na costa marítima. Embora de fácil adaptação ao meio ambiente, não tolera climas de frio intenso e solos húmidos (Quezel, 1986).

Em Portugal Continental o pinheiro da espécie *Pinus pinasters*, conhecido por Pinheiro Bravo, é mais abundante relativamente à espécie *Pinus halepensis*, ao contrário do que acontece no resto da Europa (EUFORGEN, 2008). Contudo a presença da espécie em estudo não é tão relevante no nosso país, estando presente principalmente na costa, como se pode verificar na *Figura 2*.



Figura 2- Distribuição da espécie *Pinus halepensis* em Portugal Continental (Fonte: DGRF, 2008)

De acordo com a figura anterior, esta espécie está presente ao longo da costa desde o distrito de Aveiro até ao distrito de Faro, ocupando uma área de 20% (22450 km²) do território nacional (DGRF, 2008).

Caracterizando a estrutura deste pinheiro, é uma árvore de médio porte, podendo atingir os 25 m de altura. Distingue-se de outras espécies por apresentar uma copa irregular, conter maior número de pinhas por ramo e pelas suas pinhas e agulhas serem pequenas. Para além das suas dimensões, as agulhas e as pinhas desta espécie apresentam-se como altamente inflamáveis, em particular para árvores com idade igual ou superior a dois anos (Trabaud, L et al, 1985). O pinheiro apresenta casca grossa, alaranjada ou avermelhada, as agulhas são aos pares e podem chegar aos 10 cm de comprimento.

A espécie em estudo tem uma elevada taxa de sobrevivência e germinação de sementes depois dos incêndios, por possuírem a capacidade de reter as sementes dentro das pinhas, o que as protege da passagem do fogo. Esta característica contribui para a sua elevada germinação (Vallejo, 2008).

Relativamente às pinhas, quando fechadas têm um perfil cónico, um comprimento que pode variar entre os 5 a 12 cm, no início têm uma cor verde passando para um castanho avermelhado, com o passar do tempo abrem lentamente, um processo que pode ser acelerado se forem expostas ao calor, como sucede em incêndios florestais, podendo atingir 5 a 8 cm de largura na sua abertura máxima (Melle, 2010).

1.2. Focos Secundários

A deflagração de um incêndio em meios florestais é designada por incêndio florestal, o qual depende de dois factores que se encadeiam: o primeiro consiste na ignição, a qual se dá após a absorção da energia mínima de activação necessária para que o combustível se estimule; o segundo factor fundamenta-se na passagem de energia às partículas vizinhas.

A combustão, reacção presente no decorrer de um incêndio, é uma reacção química exotérmica (liberta calor para o meio) entre uma substância combustível e um comburente, propagando-se por condução, convecção e/ou irradiação (Turns, 1996).

Na evolução de um incêndio florestal temos de ter presente dois tipos de propagação: a propagação por meio terrestre, onde a difusão da combustão é feita pelos materiais combustíveis adjacentes (provocada pela convecção e radiação proveniente do foco) na periferia do foco inicial, havendo continuidade na trajectória do incêndio; e por meio aéreo, em que o contacto entre partículas não existe, como acontece no aparecimento de focos secundários em que partículas incandescentes provenientes de um foco principal de incêndio são projectadas para um outro local.

Os focos secundários podem agravar os perigos de um incêndio, aumentando a sua velocidade de propagação e colocando em risco a vida de pessoas e bens (Viegas, 2010).

Os focos secundários tem a capacidade de poderem atingir o meio urbano de forma inesperada e, por outro lado, podem encurralar as pessoas que estão a combater a frente de fogo num incêndio florestal.

Segundo Albini (1983), o controlo de um incêndio florestal é difícil devido ao aparecimento de focos secundários. As projecções provenientes de incêndios, são considerados focos secundários quando uma partícula é elevada e conduzida pelo vento dando início a novas ignições para além da zona de ignição do fogo principal (USDA Forest Service, 1986).

Segundo Viegas (2004), um dos factores que introduz maior dificuldade na modelação do comportamento do fogo é o seu dinamismo (relativo ao movimento), ou seja, a alteração das propriedades de propagação, pois estas variam consoante o combustível.

O processo que dá origem aos focos secundários está dividido em quatro fases distintas: 1 - Geração e emissão de partículas pela combustão, 2 – Elevação das partículas na pluma térmica e seu transporte pelo campo de ventos, 3 – Combustão das partículas durante o transporte e 4 – Potencial ignição de um foco secundário no contacto da partícula com o solo, (Viegas, 2009) Na *Figura 3* observam-se as diferentes fases de formação de um foco secundário.

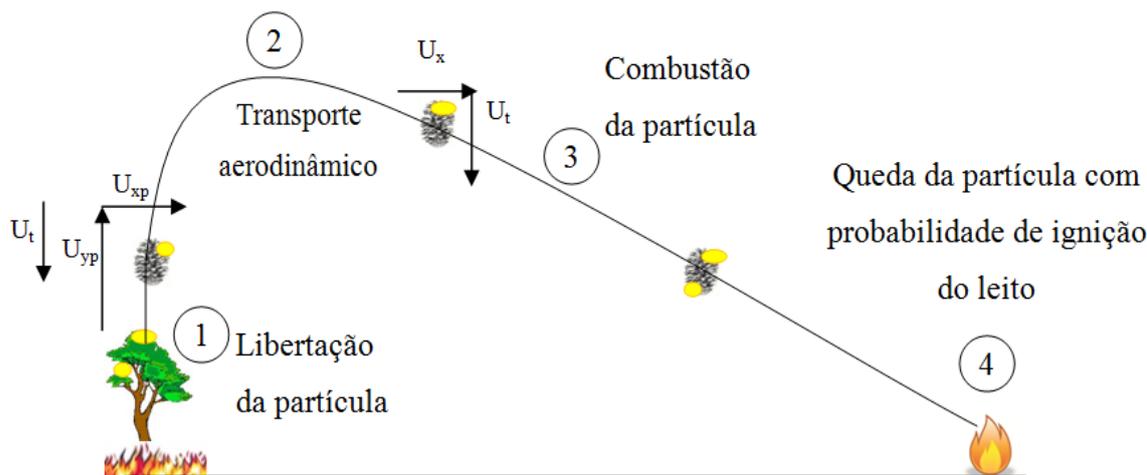


Figura 3 – Desenvolvimento de um foco secundário.

A primeira fase consiste na liberação da partícula e da sua elevação devido à pluma térmica, descrevendo-se por uma onda de calor ascendente produzida no incêndio, denominando-se fase de ascensão. A fase seguinte consiste no transporte da partícula desde a sua liberação até ao contacto com solo; a terceira etapa restringe-se à combustão parcial ou total da partícula, variando a sua massa, volume e forma ao longo do transporte; a segunda e terceira fases ocorrem em simultâneo, caso se dê combustão da partícula. No último passo poderá ocorrer uma nova ignição dependendo das características do leito de combustível onde a partícula aterra. De referir que a segunda, terceira e quarta fases se remetem à fase descendente.

Na primeira fase, considera-se a velocidade do vento externo no interior da pluma térmica, na horizontal, U_{xp} , e a velocidade da corrente de convecção ascendente, na vertical, (U_{yp}). Nas restantes fases, (2,3 e 4), temos a velocidade horizontal do vento (U_x) e a velocidade terminal da pinha (U_t), influenciada pela gravidade, segundo Ellis (2000), baseando-se o meu trabalho apenas nas forças aplicadas na fase 2.

É importante referir, que segundo Pitts (1991) e Trelles e Pagni (1997), os fogos de grandes dimensões poderão produzir uma forte e larga pluma térmica, com

enormes velocidades de ventos verticais internos, causados pelo fogo, aumentando desta forma a possibilidade de ocorrerem focos secundários.

Relativamente à distância que a partícula transportada pode alcançar, originando um novo foco, depende da força de convecção da pluma térmica, das condições atmosféricas, da topografia e das características da partícula., (Koo, 2010). Segundo Tarifa (1967) e Lee (1969), da mesma opinião, referem que a forma da partícula e as características de combustão da mesma, vão influenciar a sua velocidade terminal, sendo que segundo Ellis (2010), a velocidade terminal da partícula vai influenciar a altura a que esta poderá ascender e a sua velocidade de queda. Como conclusão, este autor refere que as partículas que possuem menor velocidade terminal atingem maiores distâncias, por terem maior tempo de queda e assim mais tempo sobe o transporte do escoamento (vento).

É importante referir, apesar de não estar directamente relacionado com este estudo, que na fase final do desenvolvimento de um foco secundário, segundo Ganteaume, (2009), a espécie da pinha em estudo apresenta uma capacidade de ignição em leitos significativa.

1.3. Aerodinâmica

Neste trabalho pretende-se estudar a aerodinâmica de uma pinha. Generalizando, a aerodinâmica de um objecto consiste no estudo do comportamento do fluido na passagem por um corpo provocando maior ou menor resistência sobre ele, dependendo do perfil do objecto.

O estudo do comportamento de um fluido pode ser feito recorrendo a modelos computacionais, os quais se baseiam na disciplina de CFD (Computational Fluid Dynamics), onde se pode visualizar graficamente o comportamento do fluido de acordo com as formas que o objecto possui.

Na aerodinâmica de um corpo livre estão presentes três forças: o peso, que é característica física da partícula, e mais duas forças provenientes da interacção fluido – corpo que é descrita em função da tensão tangencial provocada pelos efeitos viscosos(τ_w) e pela tensão normal provocada pela distribuição de pressão(p). Associando estas duas tensões obtemos a força resultante que actua na direcção do escoamento F_D denominada força de arrasto (em inglês- *drag force*) e a força resultante que actua na direcção normal do escoamento F_L , denominada por força de sustentação (em inglês- *lift force*). Integrando

as tensões normais ao corpo e as tangenciais para um pequeno elemento de área obtém-se as seguintes equações [1] e [2]:

Força de arrasto:

$$F_D = \int dF_x = \int p \cos \theta dA + \int \tau_w \sin \theta dA \quad [1]$$

Força de sustentação:

$$F_L = \int dF_z = - \int p \sin \theta dA + \int \tau_w \cos \theta dA \quad [2]$$

A sigla θ representa o ângulo descrito pelo eixo de aplicação da tensão de pressões e a horizontal, e dA caracteriza um pequeno elemento de área.

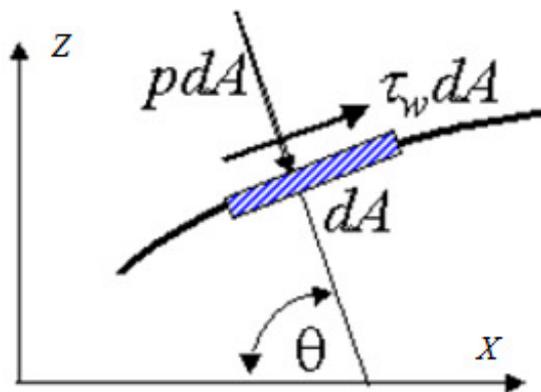


Figura 4 - Distribuição da pressão e tensão num elemento de área. (Fonte: Anderson 1991)

Na *Figura 4*, a análise infinitesimal da superfície do corpo, sendo a aplicação da pressão sempre perpendicular à superfície da partícula, acompanha sempre a sua superfície qual seja o seu perfil.

Das equações [1] e [2] conclui-se que no cálculo das forças aerodinâmicas, a forma do corpo, as tensões e pressões aplicadas ao longo da sua superfície são os factores influentes. Adimensionalmente as forças aerodinâmicas são definidas por coeficientes aerodinâmicos, em que o cálculo nos dois casos (arrasto e sustentação) é efectuado da mesma forma [3], diferenciando-se apenas na força aplicada F ;

$$C = \frac{2F}{\rho_a U^2 A_r} \quad [3]$$

em que A_r a área do corpo, ρ a densidade do fluido, U a velocidade relativa do escoamento e F representa as forças aerodinâmicas.

O coeficiente de arrasto (C_D) quantifica a resistência que um objecto tem perante um escoamento, transmitindo a dificuldade que este apresenta ao deslocamento através de um gás ou fluido, dependendo consideravelmente da área e forma do corpo.

O coeficiente de sustentação (C_L) determina a quantidade de pressão dinâmica que o corpo pode adquirir com o seu perfil e a capacidade que este tem para produzir sustentação.

No cálculo matemático dos momentos considera-se o momento positivo e o negativo fazendo-se a subtracção entre ambos, considerando-se agora o braço x e o braço z , segundo Anderson (1991), a equação descrita [4]

$$My = \int [(p \cos \theta + \tau \sin \theta)x - (p \sin \theta - \tau \cos \theta)z] dA \quad [4]$$

O coeficiente CM_y é calculado considerando o My , de acordo com a seguinte expressão [5],

$$CM_y = \frac{2 My}{\rho_a U^2 A_r l} \quad [5]$$

em que l consiste no comprimento longitudinal da partícula.

Após esta breve introdução teórica, a orientação dos eixos relativamente ao escoamento, coincide com a representação na *Figura 5*, representando-se segundo as forças resultantes aplicadas no centro de massa da pinha relativamente ao referencial fixo da pinha e ao referencial do escoamento, de acordo também com a *Figura 5*.

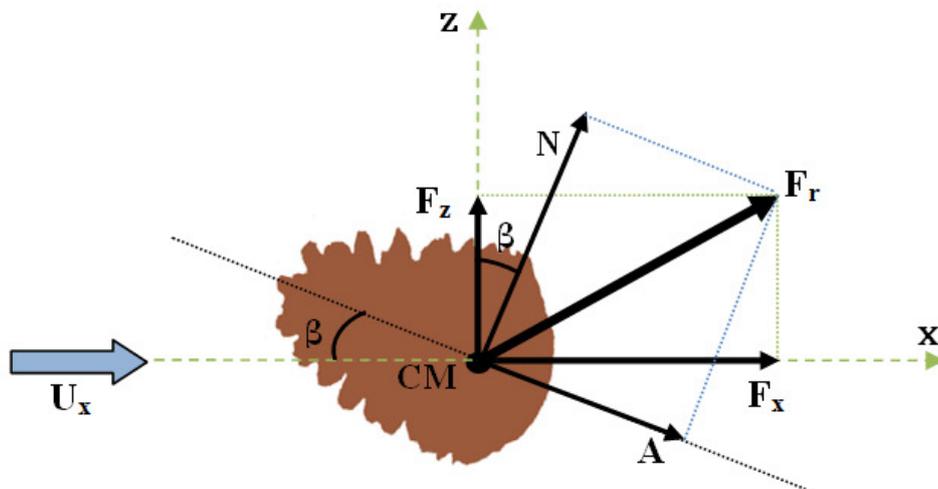


Figura 5 - Representação da força resultante F_r e suas componentes.

Na *Figura 5* tem-se a força resultante (F_r) aplicada no centro de massa, as suas componentes em x e em z , F_x e F_z respectivamente, a força normal (N) e axial (A) pertencentes ao referencial da pinha, e a inclinação da pinha relativamente à horizontal que se designa com de β .

Velocidade terminal (U_T)

A velocidade terminal verifica-se quando a força de resistência juntamente com a força de impulso atingem o equilíbrio com a força do peso, como se verifica na figura

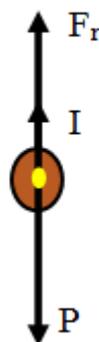


Figura 6 - Representação das forças num corpo em queda livre.

Na *Figura 6* temos as forças aplicadas em queda livre e igualando as forças ascendentes às descendentes vai se obter o equilíbrio, verificando-se a seguinte igualdade, da qual se deduz a fórmula [6] do cálculo da velocidade terminal do objecto:

$$\begin{aligned}
 P = I + F_r &\Leftrightarrow (V \rho g) = (V \rho_a g) + \left(C_D \frac{1}{2} \rho_a U_T^2 A_r \right) \Leftrightarrow \\
 (V \rho g) - (V \rho_a g) &= \left(C_D \frac{1}{2} \rho_a U_T^2 A_r \right) \Leftrightarrow \\
 V g (\rho - \rho_a) &= \left(C_D \frac{1}{2} \rho_a U_T^2 A_r \right) \Leftrightarrow \\
 U_T &= \sqrt{\frac{2 g V (\rho - \rho_a)}{\rho_a A_r C_D}} \quad [m/s] \quad [6]
 \end{aligned}$$

Na análise da velocidade terminal deverá ter-se em conta o peso do objecto ($g \cdot m$) e a influência da impulsão no sentido contrário ao do peso, subtraindo a densidade do ar à densidade do objecto, $(\rho - \rho_a)$, considerando uma partícula mais leve. Nos cálculos efectuados neste estudo não se considerou a força de flutuação, desprezando-se a densidade da partícula.

1.4. Motivação e Objectivos do Estudo

Um grande incentivo à realização deste estudo foi o incêndio que deflagrou em Israel entre o dia 2 e 5 de Dezembro de 2010, devastando uma área de 3500 hectares (35 km²), com velocidades elevadas de propagação devido aos ventos fortes, destruindo florestas e algumas localidades. Foi necessária ajuda internacional com meios aéreos e terrestres de 16 países para combater o incêndio (Jornal Expresso, 2010). Este fogo tirou a vida a 43 pessoas, apanhadas de surpresa e cercadas pelo fogo enquanto se deslocavam de autocarro.

A área onde decorreu o incêndio é constituída por pinheiro de *Pinus halepensis*, conhecido em Israel como o *pinheiro-de-jerusalem*, havendo relatos de pessoas, destacando-se o relato do israelita Shalom Tsaroom, que observou pinhas em chamas a ser transportadas pelo vento a centenas de metros que provocaram novas ignições, conduzindo a um cenário como aquele apresentado na *Figura 7*.



Figura 7 - Focos secundários observados na Floresta Carmel, em Israel a 02 de Dezembro de 2010 (Fonte: Boston News – Wildfire in Israel 2010).

As razões do estudo incidem na compreensão do potencial de uma pinha de *Pinus halepensis* para provocar focos secundários, analisando as distâncias típicas a que estas partículas podem ser projectadas.

Os objectivos essenciais deste estudo são calcular os coeficientes aerodinâmicos da pinha, para assim conseguir determinar as distâncias máximas que estas pinhas podem alcançar causando um foco secundário, compreendendo a grande propagação de focos secundários no incêndio de Israel e desenvolver os modelos aerodinâmicos característicos da pinha *Pinus halepensis*.

1.5. Estado da Arte

Ao longo dos últimos séculos os incêndios florestais e as suas formas de propagação têm sido alvo de investigação de vários autores, destacando-se para este estudo a contribuição dos autores que dedicaram os seus esforços na investigação dos focos secundários.

A intensidade do fogo e os princípios de combustão foram primeiramente estudados por Byran (1957 e 1959). O estudo do transporte de partículas num incêndio foi iniciado por Tarifa (1962), que realizou um trabalho experimental, onde estudou a influência do peso e da força de arrasto em partículas parcialmente queimadas. O mesmo autor, Tarifa et al (1967), investigou a influência da densidade das partículas, da sua forma

e da velocidade do vento no transporte e combustão das mesmas, recorrendo a um túnel construído pelo próprio.

Na investigação das características de pinhas, Clements (1977) fez um estudo intensivo do comportamento e velocidades terminais de diversas espécies de pinhas, calculando os tempos de queima de pinhas em chama e incandescentes.

Albini (1979, 1982 e 1983), foi dos autores que mais contribuiu para o estudo dos focos secundários. Criou modelos teóricos para o cálculo das distâncias dos focos secundários para diferentes tipos de partículas, definindo quais as partículas que podem causar focos secundários, nomeadamente pinhas abertas e escamas de pinhas, entre outros. Este autor aplicou também no seu modelo as variações da velocidade terminal da partícula em função da perda de massa durante a combustão.

Um estudo extenso feito por Ellis (2000) sobre as características aerodinâmicas e de combustão de diversas formas e espécies de cascas de eucalipto, levou a resultados de tempos de queima em chama e em regime incandescente das cascas e, as suas velocidades terminais, recorrendo a um túnel aerodinâmico vertical. Na mesma obra, Ellis apresentou um modelo teórico de previsão da distância máxima alcançada por uma partícula de determinadas características para determinadas condições de fogo e vento.

O início de um foco secundário e a combustão da partícula foi estudado experimentalmente por Manzello (2006a, 2006b), que considerou a ignição por calor latente devido à presença de combustíveis incandescentes. Manzello (2007a, 2007b, e 2008) forneceu referências do estudo particular de emissões de partículas existentes em diversos tipos de árvores e arbustos contribuindo para uma melhor percepção da quantidade e tipo de partículas que originam focos secundários.

No estudo de modelos numéricos do transporte e combustão de partículas nas plumas térmicas, utilizaram-se amostras de cascas de *Pinus ponderosa*, obtendo as trajetórias e tempos de queima durante e após a sua elevação na pluma térmica (Sardoy, 2006). No ano seguinte, o mesmo autor, estudou numericamente a queima e libertação de partículas provenientes de árvores.

Mais recentemente foi estudado por Almeida et al. (2009) a combustibilidade de pinhas *Pinus pinaster* e de cascas de *Eucalyptus globulus* em função da sua orientação relativamente ao escoamento incidente, obtendo modelos de perda de massa durante o transporte de partículas.

Num trabalho análogo ao estudo feito na presente dissertação, Almeida, et al. (2010) determinaram experimentalmente os coeficientes aerodinâmicos de cascas de eucalipto cilíndricas.

No mesmo ano Ellis (2010) obteve a velocidade terminal e a velocidade de equilíbrio em queda, estudando também a altura máxima que uma partícula sobe numa coluna de convecção e o seu alcance de acordo com essa altura e condições de vento. O estudo de combustíveis e ignição de focos secundários em fogos de grandes dimensões em Koo (2010) contribuiu para uma melhor compreensão da acção da pluma térmica nas distâncias alcançadas pelas partículas.

No presente estudo, considerando todos os estudos anteriormente mencionados, pretende-se obter as velocidades terminais da espécie de pinhas *Pinus halepensis*, e, definir modelos dos seus coeficientes aerodinâmicos, a partir de ensaios realizados no Túnel aerodinâmico. O objectivo final deste estudo é conseguir calcular as velocidades terminais e as distâncias máximas que estas pinhas podem alcançar, relativamente a outras espécies, causando um foco secundário.

1.6. Organização da Dissertação

Tendo em conta os objectivos anteriormente mencionados, o presente trabalho incidiu essencialmente no estudo de focos secundários provocados pela pinha *Pinus halepensis*, tendo em conta as suas características físicas e os seus coeficientes aerodinâmicos. Para tal, realizaram-se ensaios laboratoriais para obter resultados, atingindo assim os objectivos propostos.

Este trabalho está organizado para que cada capítulo seja sequencial, de forma a permitir ao leitor uma fácil consulta. De seguida está especificado o conteúdo de cada capítulo.

No **Capítulo 1** é feita uma breve introdução dos diversos temas abordados, caracterizando as pinhas, localizando-as no espaço europeu e especificamente Portugal Continental, mencionando as várias etapas da origem de um foco secundário, referindo os fundamentos teóricos associados à aerodinâmica de uma partícula e às características de um escoamento e, finalmente, a motivação e objectivos deste estudo.

A descrição das diferentes metodologias experimentais adoptadas ao longo dos procedimentos experimentais é detalhada no **Capítulo 2**.

Os resultados obtidos durante os ensaios e a correspondente discussão, cujo objectivo é a confrontação dos resultados obtidos com estudos já realizados, encontram-se no **Capítulo 3**.

O **Capítulo 4** apresenta a adaptação de um modelo empírico aplicado à pinha de *Pinus halepensis*, permitindo a sua aplicação a modelos matemáticos de prevenção e previsão do comportamento de fogos florestais.

As conclusões do estudo são apresentadas no **Capítulo 5** que contempla igualmente a análise de resultados e perspectiva estudos futuros.

2. METODOLOGIA

Neste capítulo é descrito o equipamento utilizado e os procedimentos experimentais e laboratoriais seguidos, com vista à caracterização física das amostras, na preparação das mesmas e no tratamento de dados e ensaios.

Os ensaios efectuados, de uma forma geral, tiveram como objectivo a obtenção do volume efectivo da pinha *Pinus halepensis*, a sua queima parcial, com a ilustração da combustão e ensaios aerodinâmicos realizados no TCO para pinhas inteiras e parcialmente queimadas.

2.1. Equipamento

Os equipamentos utilizados nos procedimentos experimentais e ensaios efectuados foram o Túnel de Combustão Oblíquo (TCO), uma estufa de secagem (Memmert - modelo 600) tem capacidade volumétrica de 205 l, e pode trabalhar até aos 200°C, uma balança digital (AND HF-2000G com uma precisão de 0,01 g, uma máquina fotográfica e por fim um medidor de humidade e temperatura.

2.1.1. Túnel de Combustão Oblíquo

Na realização dos ensaios aerodinâmicos recorreu-se ao TCO, construído e dimensionado para estudos aerodinâmicos e de combustão de pinhas intactas e parcialmente queimadas. Este túnel está instalado no LEIF (Laboratório de Estudos sobre Incêndios Florestais) na Lousã, uma infra-estrutura pertencente à Associação para o desenvolvimento da Aerodinâmica Industrial (ADAI).

Uma característica particular deste túnel é a possibilidade de incidir o escoamento sobre a partícula para diferentes ângulos de inclinação, fixando o corpo à célula de carga na câmara do túnel e rodando o túnel 360°, com se vê na *Figura 8*.



Figura 8 – Diferentes inclinações do túnel, da esquerda para a direita observa-se 270, 235, 180, 125 e 90°.

Este dispositivo tem 3,3 m de altura e uma área de secção de $0,4 \times 0,4 \text{ m}^2$, um ventilador de sucção está localizado na extremidade cilíndrica enquanto, na outra extremidade existe um abertura protegida com rede que permite a entrada do ar. O túnel possui três janelas em volta da zona de fixação da partícula, para facilitar o manejo e disposição desta, permitindo igualmente a visualização do ensaio. A *Figura 9* mostra a posição inicial de ensaio, com a inclinação de 270° e um escoamento ascendente.



Figura 9 – O TCO com uma inclinação de 270° .

A velocidade do escoamento é regulada electronicamente pela frequência do ventilador, atingindo velocidade máxima de $40 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. A rotação do túnel é feita com o auxílio de um motor.



Figura 10 - Haste de fixação da partícula e célula de carga.

A partícula em análise é fixa numa haste de fixação que permite, numa fase preparatória orientar a partícula de acordo com os objectivos do ensaio. Desta forma, para além da variação da direcção do escoamento durante o ensaio, também a orientação da partícula pode ser modificada. A haste de fixação encontra-se ligada a uma célula de carga (*Figura 10*) que mede as componentes das forças e momentos aplicados ao objecto em análise. Os sinais fornecidos pela célula de carga durante a rotação do túnel são armazenados informaticamente. Os sinais fornecidos vão permitir o cálculo inicial das forças que actuam na partícula durante o escoamento e posteriormente os coeficientes aerodinâmicos.

A célula de carga (*Figura 10*) tem seis graus de liberdade de sensibilidade, três aplicadas às forças e outros três aplicados aos momentos. No presente estudo apenas se analisaram duas forças, uma com componente horizontal segundo o eixo x e outra com componente vertical segundo o eixo z e um momento em torno do eixo y , perpendicular ao plano xz . Os dados debitados pela célula de carga são adquiridos por um programa designado por *JR3 PCI Software*, desenvolvido por Pires, 2003.

2.1.2. Calibração da célula de carga

A calibração é realizada com o objectivo de calcular o grau de desfasamento que o eixo da célula apresenta relativamente ao eixo de referência (do túnel), devido à não coincidência entre ambos. A conversão do sinal em força é determinada multiplicando o sinal pelos factores de conversão.

No final de cada dia de ensaios, foi realizada uma calibração da célula de carga recorrendo-se a um conjunto de quatro objectos com massas conhecidas, relacionando as

suas massas reais com os módulos dos sinais de frequência fornecidos pela célula de carga (*Tabela 1*). A referência “Massa 4321” consiste no somatório das massas dos 4 objectos e os sinais “ S_x ” e “ S_z ” representam os supostos sinais obtidos na medição dos objectos.

Tabela 1 - Relação das massas reais dos objectos com os sinais da célula de carga.

Ref. Massas	Massa real [g]	S_x'	S_z'
Objecto 1	20,77	$S_x'1$	$S_z'1$
Objecto 2	52,34	$S_x'2$	$S_z'2$
Objecto 3	102,22	$S_x'3$	$S_z'3$
Objecto 4	202,22	$S_x'4$	$S_z'4$
Objecto 4321	378,26	$S_x'total$	$S_z'total$

O factor de conversão das forças, f_f converte o sinal em *grama - força*, sendo obtido pelo declive da recta de aproximação dos valores reais das massas em função do módulo dos sinais S_x' e S_z' da medição de cada massa (*Gráfico 1*).

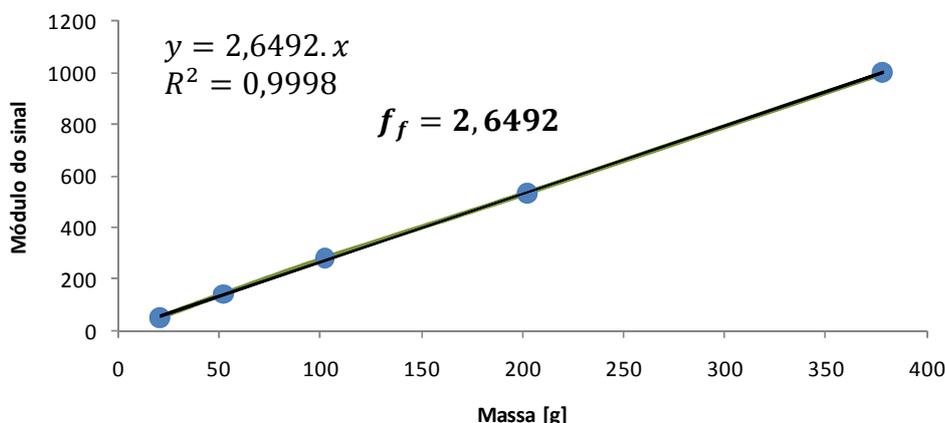


Gráfico 1 - Relação das massas reais com os sinais da célula de carga.

O valor de f_f , permitiu a conversão dos sinais S_x e S_z obtidos durante os ensaios em forças F_x e F_z , respectivamente.

Na calibração, por não haver coincidência entre o eixo da célula de carga e o eixo de referência, adquiriu-se o valor do ângulo de desfasamento entre o eixo de referência dos valores obtidos e o eixo do escoamento, definido como θ . Este valor foi conseguido pela média dos ângulos entre os sinais S_x' e S_z' para as cinco massas medidas, de acordo com a fórmula [7].

$$\theta = \sum \bar{x} \left[\tan^{-1} \left(\frac{Sz'}{Sx'} \right) \right] \quad [7]$$

Para uma melhor compreensão dos ângulos, orientação dos sinais e efeito do desfasamento, representou-se um esquema dos eixos correspondentes a cada sinal, eixos de referência fixo x' e z' e a rotação desses eixos θ graus originam os eixos de referência x_0 e z_0 (Figura 11).

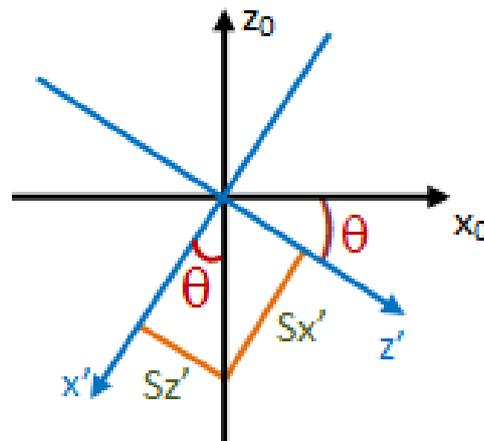


Figura 11 - Esquema dos eixos de escoamento e de referência.

Assim obteve-se o ângulo de desfasamento entre os dados adquiridos pela célula de carga (Sx' e Sz') e o eixo de referência.

A calibração dos momentos assemelhou-se à adoptada para calibração das forças, utilizando-se os momentos produzidos pela suspensão dos objectos utilizados na calibração das forças (anteriormente definida). Isto é, suspendendo-se os objectos (amarelo) numa haste em “L” (a castanho), a uma distância pré-definida de 6 cm para estes ensaios (Figura 12).

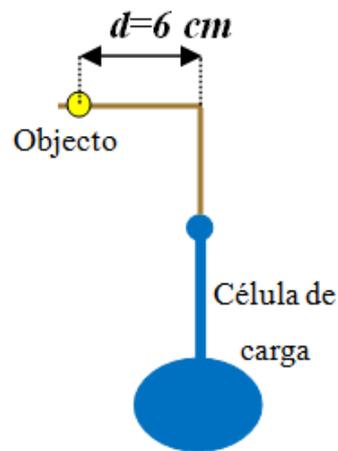


Figura 12 - Esquema da calibração dos momentos.

O sinal produzido pelo momento da massa é sempre calculado para um braço de 6 cm segundo o eixo dos x , obtendo-se o momento real provocado pela massa com a seguinte expressão dos momentos [8].

$$M_{real} = m_{real} \times 6 \times 9,81 \times 10^{-5} \text{ [N.m]} \quad [8]$$

Analogamente à calibração das forças, o factor de conversão dos momentos, f_m , foi obtido através do declive da função de tendência do gráfico do momento real em função do sinal da célula de carga SM_y , segundo o Gráfico 2.

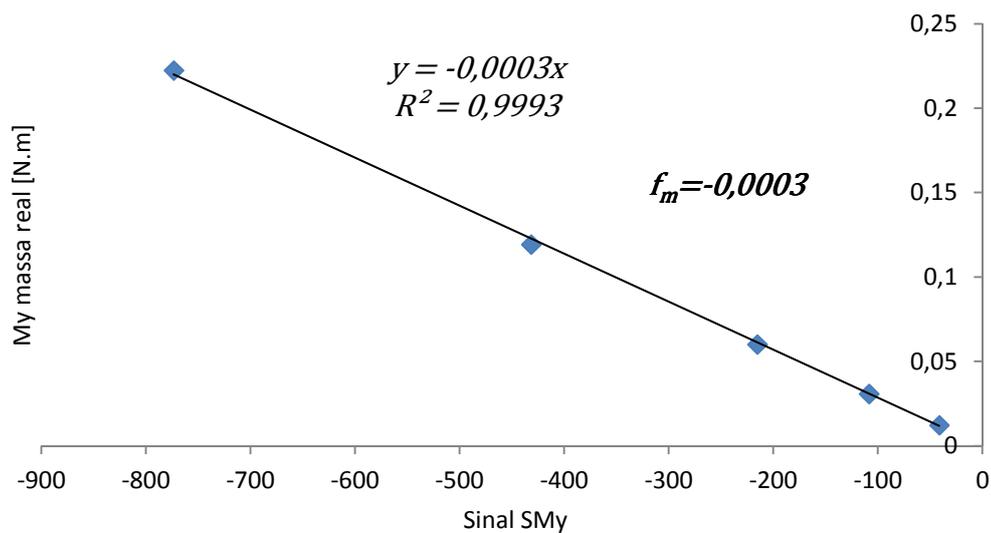


Gráfico 2 - Relação dos momentos reais com os sinais da célula de carga.

O valor de f_m , permitiu a conversão dos sinais SM_y obtidos durante os ensaios em momentos M_y , momento perpendicular ao plano xz , de acordo com a equação seguinte [9].

$$M_y = f_m \times SM_y \quad [9]$$

A calibração permitiu o cálculo do desfasamento (θ) e dos factores de conversão de sinal f_f e f_m , essenciais no tratamento de resultados.

2.2. Ensaio com pinhas inteiras

As amostras ensaiadas na análise das características físicas e aerodinâmicas foram pinhas de *Pinus halepensis* de diversos tamanhos (*Figura 13*).



Figura 13 - Amostras das pinhas inteiras, pinha pequena (P), pinha média (M), pinha longa (L) e pinha (G)

As pinhas foram escolhidas cuidadosamente seleccionando as que apresentavam um aspecto mais regular e sem qualquer defeito aparente. Não se teve em consideração a cor e a idade de cada uma, diferenciando-se apenas no seu tamanho e forma. As pinhas foram recolhidas em dias secos, sendo armazenadas em laboratório à temperatura ambiente.

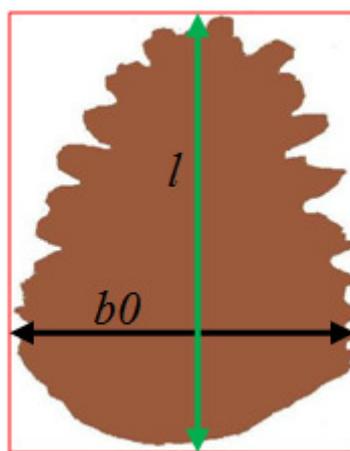
Na observação das amostras, verificou-se que existiam diversas dimensões de pinhas, dividindo-se esta espécie em quatro tipos. Os quatro tipos de pinhas estudados são designados por pinha pequena (P), pinha média (M), pinha grande (G) e pinha longa (L), para haver distinção entre elas e melhor compreensão das suas características na obtenção dos resultados.

As características das pinhas inteiras utilizadas no presente estudo são apresentadas na *Tabela 2*.

Tabela 2 - Características físicas das pinhas inteiras.

	Referência	Massa [g]	Diâmetro [cm]	Altura [cm]	Área [cm ²]
Pequenas	PC1	29,16	7,7	7,6	58,52
	PC5	30,92	6,6	8,2	54,12
	PC9	28,5	7,3	7,6	55,48
Médias	PC4	46,42	7,6	9,3	70,68
	PC7	49,63	7,3	9,8	71,54
	PC11	47,1	8,2	9,1	74,62
Grandes	PC3	76,5	9,1	11,8	107,38
	PC6	72,6	8,6	11,1	95,46
	PC12	65,48	8,5	11,5	97,75
Longas	PC2	56,28	6,1	10,8	65,88
	PC8	56,16	6,7	10,5	70,35
	PC10	48,03	7	10,5	73,5

Na tabela apresentam-se os quatro tipos de pinhas com três amostras para cada um, não tendo qualquer relação com as pinhas utilizadas na obtenção das características físicas, especificando a sua massa, o diâmetro (b_0), comprimento (l) e a área (A_r), observando-se uma diferença significativa entre todas elas, como se verifica na *Figura 14*.

Figura 14 - Dimensões características da pinha (l , b_0 e A_r)

O retângulo a vermelho caracteriza a área característica da pinha, obtido pela multiplicação de l por b_0 .

Analisando visualmente uma pinha no seu todo, observa-se dissemelhanças na posição das escamas à sua volta e uma curvatura do coração da pinha acompanhada por uma curvatura do pecíolo.

2.3. Ensaios com pinhas parcialmente queimadas

Considerando que durante o transporte, a pinha se apresenta em combustão, neste procedimento experimental analisaram-se as diferentes perdas de massa que uma pinha vai sofrendo durante a sua queima e conseqüentemente, o estudo aerodinâmico destas.

Sujeitaram-se as diversas pinhas a percentagens de perda de massa de 25, 50, 75, e 85 % aproximadamente. No total, 20 pinhas foram ensaiadas no *TCO*, podendo consultar-se as características de cada uma em *Anexo*.

As amostras utilizadas foram as pinhas intactas já ensaiadas no túnel, mantendo as características individuais de cada uma ao longo do estudo, comparando entre si a os diferentes valores da perda de massa e dos coeficientes aerodinâmicos obtidos no túnel aerodinâmico.

O procedimento foi simples, fixou-se um parafuso à pinha pelo pecíolo e prendeu-se um arame à cabeça do parafuso, utilizando-se folha de alumínio para revestir o arame devido ao contacto da chama, como se vê na *Figura 15*.



Figura 15 - Ensaios de combustão parcial das pinhas.

Na posição acima indicada iniciou-se a queima da pinha aplicando a chama de baixo até que ela iniciasse uma combustão voluntária, deixando-a arder livremente sem

que houvesse qualquer influência exterior. Quando se observou que a pinha tinha perdido a massa próxima da pretendida, submergimos a pinha numa bacia com água. No final do procedimento experimental inseriu-se as amostras na estufa, para se retirar a água por elas absorvida durante o procedimento experimental. Posteriormente as pinhas foram colocadas ao ar livre para que houvesse nova hidratação do combustível, aproximando-se das características ambientais das pinhas inteiras anteriormente ensaiadas.

2.4. Procedimentos

2.4.1. Características físicas

As especificidades físicas das pinhas foram determinadas tendo como base uma amostra de dez exemplares aleatórios (sem correspondência com as pinhas utilizadas nos ensaios aerodinâmicos), distribuídas pelos tipos anteriormente referidos (P-M-G-L).

No geral, esta pinha é constituída por escamas alongadas, as quais podem ter determinada abertura consoante o seu desenvolvimento; possuem uma parte central a qual designamos de coração da pinha, onde se congregam as escamas, e por fim temos o pecíolo que faz a ligação da pinha ao ramo.

Para o estudo físico da pinha, mediu-se o comprimento e a largura da mesma, determinou-se o volume aparente e o centro de gravidade, recorrendo a suporte fotográfico, e calculou-se a densidade efectiva através da variação de volume de um líquido após imersão da pinha.

Na sua estrutura interna, o coração da pinha, considerou-se como tendo um perfil regular e constante, para todas as pinhas estudadas, ao longo do seu eixo longitudinal, apesar de haver alguma heterogeneidade orgânica.

2.4.1.1. Dimensões características da pinha

O comprimento foi obtido recorrendo a um paquímetro, medindo o comprimento l , desde o pecíolo da pinha até à escama mais no topo (linha a verde), a largura máxima b_0 , foi obtida na zona das escamas mais salientes numa linha transversal à pinha (linha a preto), de acordo com a *Figura 14*.

A massa seca (m_{BS}) de um combustível é medida quando a humidade deste atinge valores nulos. No caso das pinhas, estas foram preparadas e legendadas. A estufa foi

colocada entre os 103°C e os 105°C durante 24 horas, obtendo-se o grau de humidade desejado, 0%

2.4.1.2. Centro de gravidade

A distribuição da massa num objecto é variável, estando dependente do seu perfil e das diferentes características dos seus constituintes. No caso das pinhas, existe simetria radial em torno do eixo longitudinal, variando a posição do centro de gravidade (CG) ao longo do comprimento, como se verifica na *Figura 16*.

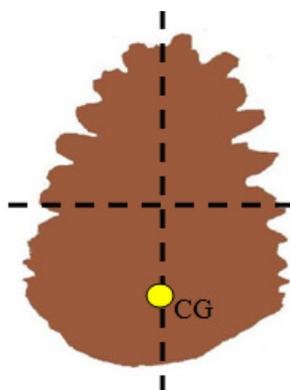


Figura 16 - Esquema do eixo longitudinal e transversal.

A estimativa do centro de massa das pinhas foi obtida para a amostra de 10 pinhas *Pinus halepensis*. O processo de obtenção do centro de massa consistiu na suspensão da pinha num fio flexível atado a uma agulha que se cravou nas escamas da pinha (*Figura 17*). Este método foi repetido três ou quatro vezes para cada pinha, fazendo-se o registo fotográfico em cada uma. De realçar que a fixação foi feita de uma ponta da pinha à outra, sempre com a pinha no mesmo plano.

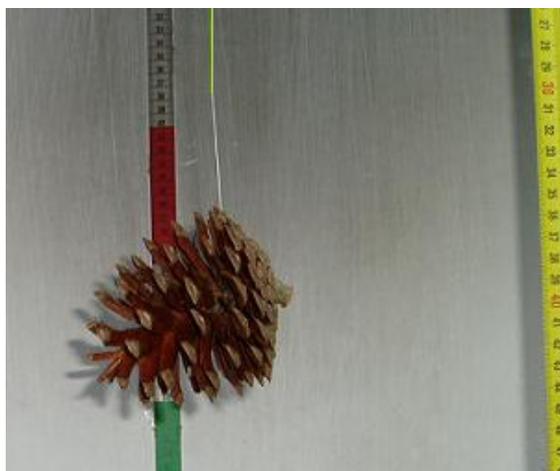


Figura 17 - Esquema de medição do centro de gravidade.

Recorrendo a um programa informático de desenho (*Autocad 2010*), desenhou-se uma recta vertical coincidindo com o fio em tensão e passando pela pinha. A sobreposição das fotografias permitiu obter o ponto de intersecção das rectas com o eixo longitudinal da pinha, a que corresponde ao centro de gravidade, determinando-se pela média dos valores medidos. No geral o centro de gravidade encontra-se a 36% do pecíolo com um desvio-padrão de 2%.

2.4.1.3. Volume Aparente

Numa pinha, o volume aparente (V_{apar}) é definido pelo seu volume total, considerando o volume do coração, as escamas e o volume ocupado pelo espaço vazio entre as escamas. O objectivo da avaliação deste parâmetro consiste em determinar uma fórmula geral para as pinhas desta espécie que permitirá determinar o seu volume aparente em função do seu comprimento (l) e largura (b_0). O volume aparente foi determinado através da área aparente da pinha (imagem central da *Figura 18* - Imagem da pinha inteira, área aparente da pinha e área efectiva da pinha.

, obtida pela média das áreas (determinadas através do contorno de duas fotografias da mesma pinha, em dois perfis). Após obter a área média da pinha, o cálculo do volume aparente é feito através da revolução de 180° da área determinada.

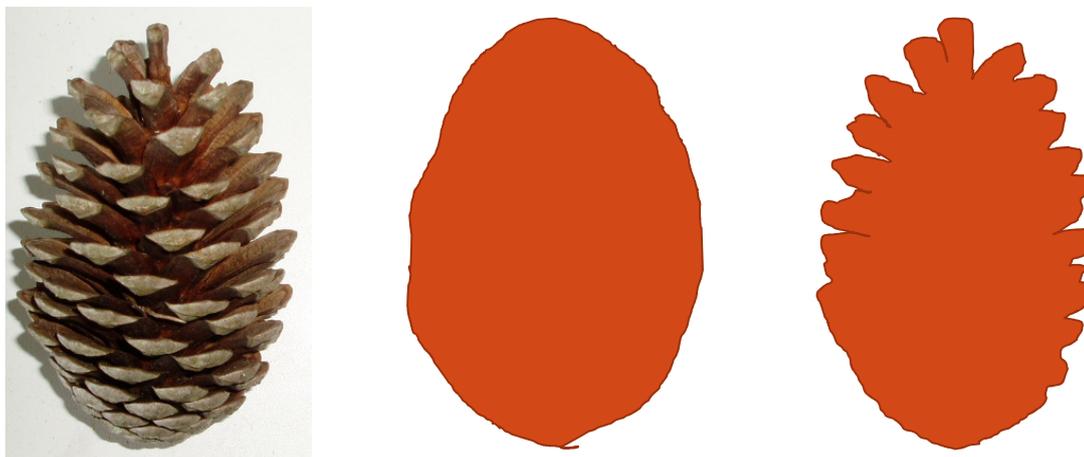


Figura 18 - Imagem da pinha inteira, área aparente da pinha e área efectiva da pinha.

Recorrendo ao programa *LabFit*, (Silva e Silva, 2009), relacionou-se o comprimento e altura da pinha em função do volume aparente calculado, obtendo a seguinte função [10].

$$V_{apar}(b_0, l) = 10,31 \times b_0 + 1,175 \times l^2 \quad [10]$$

A determinação deste parâmetro (V_{apar}) é igualmente importante, uma vez que é o volume considerado durante o transporte aerodinâmico da partícula, perturbando o escoamento.

2.4.1.4. Volume efectivo

O volume efectivo consiste no volume ocupado pela parte sólida da pinha, diferindo do volume aparente uma vez que não considera o volume ocupado pelo ar entre as escamas. A metodologia adoptada no cálculo deste parâmetro foi a técnica de deslocamento do volume de líquido (água) por imersão da pinha.

Neste processo, teve-se em conta a água absorvida pela pinha, medindo-se o seu peso antes e depois da submersão e adicionando essa diferença de massas ao volume total do recipiente mais a pinha.

2.4.1.5. Densidade efectiva e densidade aparente

O cálculo da densidade efectiva foi realizado através da equação [11], partindo dos valores de massa seca e volume efectivo calculados anteriormente. Na *Tabela 3*, relaciona-se o volume efectivo obtido por imersão da partícula com a massa de base seca obtida na estufa, calculando a densidade efectiva da pinha pela média das 10 amostras.

Tabela 3 - Valores do volume efectivo e massa de base seca das amostras.

Amostra	V. Efectivo [cm ²]	m _{BS} [g]
1	189,6	49,6
2	175,4	43,5
3	211,1	55,1
4	221,9	57,0
5	153,8	42,3
6	194,2	54,9
7	165,6	43,2
8	154,4	41,1
9	152,0	42,4
10	141,5	28,8

Aplicando a equação [11] descrita, obtém-se a densidade média efectiva da espécie de pinha em estudo.

$$\rho_{efectiva} = \frac{m_{BS}}{V_{efectivo}} \quad [11]$$

Obteve-se uma média da densidade efectiva para massa seca de $0,65 \text{ g.cm}^{-3}$ ($\sigma : 0,04 \text{ g.cm}^{-3}$). Este valor é substancialmente mais baixo do que o valor de $0,73 \text{ g.cm}^{-3}$ ($\sigma : 0,03 \text{ g.cm}^{-3}$), obtido por Almeida et al. (2009) para as pinhas de *Pinus pinaster*. Analisando estes dois resultados, pode-se concluir que consoante a espécie, o nível de resina, porosidade e o tamanho das escamas poderão influenciar a densidade efectiva das pinhas.

O cálculo da densidade aparente da pinha é semelhante ao da efectiva, tendo apenas a fórmula para o cálculo do volume aparente (obtida anteriormente), determinando-se a densidade aparente de acordo com [12].

$$\rho_{apar} = \frac{m_{BS}}{10,31 \times b_0 + 1,175 \times l^2} \quad [12]$$

2.4.1.6. Grau de Abertura

Na análise directa de uma pinha a olho nu verifica-se que o espaçamento entre escamas difere de amostra para amostra. Esta característica influencia tanto a sua combustibilidade, devido à disponibilidade de oxigénio, como as suas características aerodinâmicas, pela alteração do seu volume e da sua área transversal ao escoamento.

O quociente entre a densidade efectiva e a densidade aparente equação [13] designa o grau de abertura (G_A)

$$G_A = \frac{\rho_{efectiva}}{\rho_{apar}} = \frac{0,65 \times V_{apar}}{m_{BS}} = \frac{6,70 \times b_0 + 0,76 \times l^2}{m_{BS}} \quad [13]$$

O valor mínimo deste factor é a unidade, que é representado por uma pinha totalmente fechada, dificultando a sua combustibilidade e melhorando a sua aerodinâmica. O aumento do grau de abertura indica a existência de mais espaço entre as escamas, o que aumenta a facilidade de ignição e combustão (Almeida et al., 2009) e aumenta a resistência da pinha ao escoamento.

2.4.2. Tratamento de dados

O armazenamento dos sinais obtidos é feito em ficheiros de texto pelo programa de aquisição de dados *JR3 PCI Software* (Pires, 2003), na medição de cada

ângulo foram adquiridos 40 a 50 dados, fez-se a média desses dados, determinando-se o valor total da medição para um ângulo de incidência. As medições são feitas em intervalos de 5° para uma rotação de 360° , dando um total de 73 dados, contando já com o valor adicional para o cálculo do efeito residual (erro acumulado durante o ensaio). No início de cada ensaio, com a pinha fixa ao túnel, é feito um “reset” ao programa antes de ligar a ventilação, com o objectivo de retirar a influência do peso no cálculo da forças e momentos aplicados.

A sequência do tratamento de dados é explicada no esquema abaixo representado, *Figura 19*.

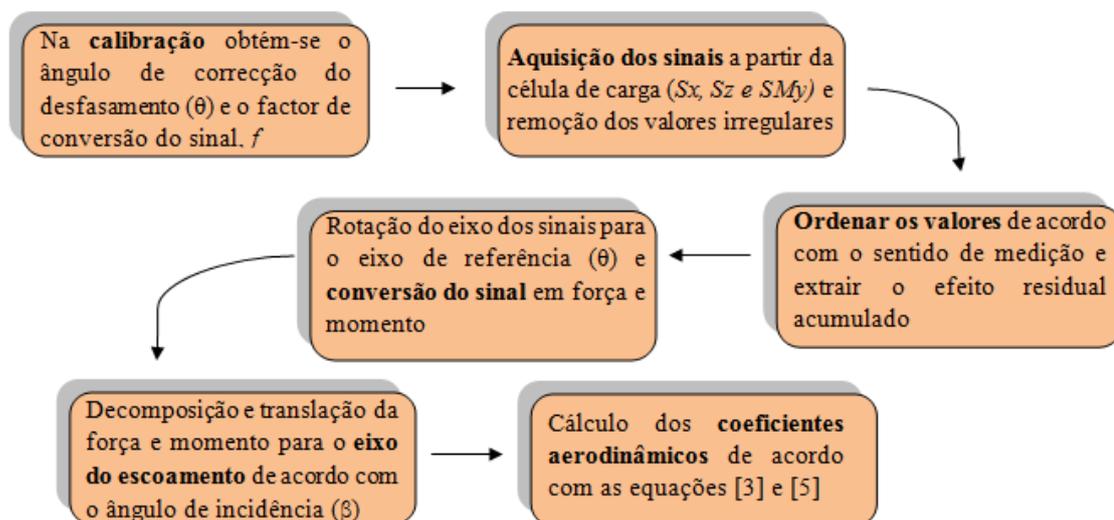


Figura 19 - Esquema do tratamento de dados.

2.4.2.1. Sinais das Forças da Célula de Carga

Durante os ensaios, a célula de carga, mecanismo de aquisição de sinais, acumula um erro residual na passagem entre cada medição, calculando-se o erro final acumulado pelo módulo da subtração entre o sinal eléctrico adquirido para o ângulo inicial de medição de 270° (posição inicial do túnel, *Figura*) e o sinal obtido para o mesmo ângulo (270°_a) depois da rotação de 360° do túnel.

No processo de tratamento de dados, numa fase inicial retirou-se o efeito residual acumulado durante as medições. O cálculo do efeito residual total foi obtido pela diferença entre o valor do sinal do ângulo inicial de “ 270° ” e a sua segunda leitura “ 270°_a ” após a rotação total, determinando o efeito acumulado. O valor residual total foi dividido pelo número de medições feitas obtendo-se o valor residual entre cada medição,

multiplicando o erro pelo número de aquisições feitas antes de cada valor a corrigir, de maneira a retirar todo o erro acumulado até ao sinal a corrigir, de acordo com [14].

$$S_n = S_n' \pm \left[\frac{S_{270^\circ a} - S_{270^\circ}}{n - 1} \times (aquisição_n - 1) \right] \quad [14]$$

A “aquisição_n” identifica a ordem em que o sinal foi registado, para assim se subtrair ou somar do erro residual acumulado. O Sinal “S_n’” corresponde ao sinal com erro e o S_n ao sinal já corrigido.

O sinal corrigido foi convertido na força aplicada nos eixos de referência, para depois serem adaptados aos ângulos de incidência do escoamento, durante a rotação. A conversão do sinal foi feita obtendo o ângulo α , entre o módulo da força aplicada e o eixo horizontal x . No cálculo de α , recorre-se à Equação [15] caso o valor de S_z seja negativo ou à Equação [16], no caso de S_z ser nulo ou positivo.

$$\alpha = 180^\circ - \theta - \tan^{-1} \left(\frac{S_x}{S_z} \right) \Rightarrow se S_z < 0 \quad [15]$$

$$\alpha = -\theta - \tan^{-1} \left(\frac{S_x}{S_z} \right) \Rightarrow se S_z \geq 0 \quad [16]$$

A força decompõe-se nos eixos de referência x e z de acordo as fórmulas [17] e [18], respectivamente com o auxílio da *Figura 20*:

$$F_{x_0} = \cos \alpha \times \frac{Mód_s}{f_f} \times \frac{9,81}{1000} \quad [N] \quad [17]$$

$$F_{z_0} = \sin \alpha \times \frac{Mód_s}{f_f} \times \frac{9,81}{1000} \quad [N] \quad [18]$$

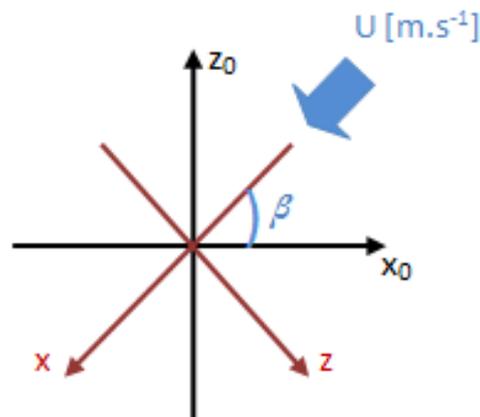


Figura 20 - Esquema da relação do eixo de referência com o eixo do escoamento.

Sendo “ $Mód_S$ “, o módulo dos sinais S_z e S_x sem o efeito residual, e” f_f ” o factor de conversão calculado anteriormente na calibração das massas. Estas forças representam o valor no referencial fixo, assim e de acordo com os diferentes ângulos de escoamento, obtivemos o valor representativo de cada força segundo o seu eixo de escoamento, utilizando as expressões [19] e [20].

$$F_x = -F_{z_0} \times \text{sen}\beta - F_{x_0} \times \text{cos}\beta \quad [19]$$

$$F_z = F_{x_0} \times \text{sen}\beta - F_{z_0} \times \text{cos}\beta \quad [20]$$

O parâmetro β é o ângulo que o escoamento faz com a horizontal, o qual coincide com o lado do túnel oblíquo por onde entra o escoamento, de acordo com a *Figura 21*. A orientação dos eixos relativamente ao escoamento, como se observa na *Figura 22*.

O referencial do escoamento, *Figura 22*, acompanha sempre o escoamento, não se verificando valores negativos no eixo do x por este lhe ser sempre paralelo e positivo na sua direcção.

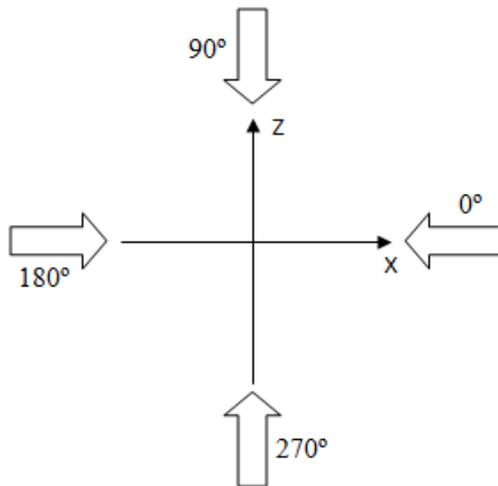


Figura 21 - Direcção do escoamento com a rotação do túnel.

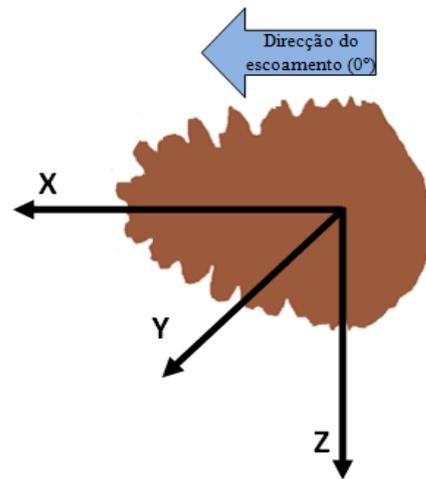


Figura 22 - Referencial utilizado dependente da orientação do escoamento

As forças aplicadas nos dois eixos, vão possibilitar o cálculo dos coeficientes aerodinâmicos de arrasto e de sustentação, designados por C_x e C_z , respectivamente. O C_y também é calculado mas não é relevante para o estudo aerodinâmico da partícula, por o estudo ser bidimensional. Os cálculos dos coeficientes são realizados pela mesma fórmula, apenas varia a força aplicada, como foi já representado na fórmula genérica [3] anteriormente definida.

No denominador, em [3], as características do escoamento, a densidade do ar, a velocidade do ar relativamente à partícula e a área representativa são factores constantes ao longo do ensaio, enquanto as forças em x , y e z variam com a forma da partícula, durante a rotação do túnel.

2.4.2.2. Sinais dos Momentos da Célula de Carga

A célula de carga adquire os três sinais de momentos, segundo x , y e z mas somente o SM_y é relevante, por se tratar de um estudo bidimensional. Adoptou-se que o sentido dos ponteiros do relógio, coincide com o sinal positivo do momento.

O sinal inicial $S'M_y$ foi corrigido dando origem ao sinal SM_y da mesma forma que se retirou o efeito residual ao sinal das forças. O momento relativo ao ponto de aplicação My_{PA} foi calculado de igual forma ao do momento acima indicado, porque o ponto de aplicação coincide com o eixo horizontal da fixação da célula de carga.

O momento relativo ao centro de gravidade da partícula em estudo, My_{cg} , é obtido de acordo com a fórmula [21].

$$My_{CG} = My_{PA} + d \times Fz_0 \quad [21]$$

O parâmetro d indica a distância entre o ponto de aplicação e o centro de gravidade da partícula, e o Fz_0 representa a força em z segundo o eixo de referência, dando o produto entre ambos, o momento adicional provocado pela heterogeneidade mássica da partícula.

No caso dos momentos, o coeficiente aerodinâmico do momento, CM_y , cria uma tendência para que o corpo rode sobre si mesmo, calculando-se este factor de acordo com a equação [5], mas utilizando outras designações mais específicas, [22].

$$CM_{y_{CG}} = \frac{2 \times My_{CG}}{\rho_{ar} \times U^2 \times A_{representativa} \times l} \quad [22]$$

Sendo l , uma característica física, o seu comprimento e o significado dos outros factores já foram mencionados anteriormente.

O tratamento de dados e calibração dos sinais foram realizados após cada ensaio, tanto para as forças como para os momentos. No presente estudo calculou-se a influência do escoamento na pinha em função da sua geometria, determinando-se as forças aplicadas recorrendo a uma célula de carga. Nos ensaios realizados no túnel de combustão oblíquo são obtidas as forças de F_x (F_L), de F_z (F_D) e o momento My , influentes na pinha ao longo dos 360° em sua volta.

2.5. Familiarização com os ensaios aerodinâmicos (Placas Planas)

Com vista à familiarização das técnicas, cálculos necessários e comprovação da fiabilidade técnica para utilização do túnel oblíquo de combustão, realizaram-se alguns ensaios com objectos metálicos em forma de placa com diferentes tamanhos, ($PL1$ - $50 \times 100 \text{ mm}^2$; $PL2$ - $50 \times 150 \text{ mm}^2$; $PL3$ - $100 \times 100 \text{ mm}^2$; $PL4$ - $100 \times 150 \text{ mm}^2$). As placas foram ensaiadas com uma orientação paralela à horizontal, comprovando-se com valores teóricos. Os coeficientes aerodinâmicos das forças e dos momentos analisados são apresentados nos *Gráfico 3*, *Gráfico 4* e *Gráfico 5*, respectivamente.

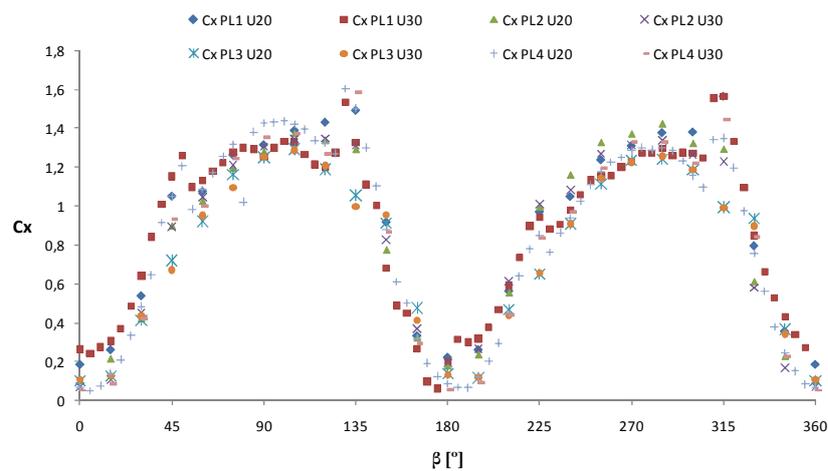


Gráfico 3- Valores de C_x das diferentes placas em função do escoamento β .

Da análise dos gráficos, confirma-se que o C_x é superior para as posições de 90° e 270° , coincidindo com intersecção do escoamento nas faces planas de maior área representativa, sendo a resistência provocada essencialmente pelo campo de pressões, havendo ocorrência de separação, associada a uma grande dissipação de energia (Oliveira & Lopes, 2006).

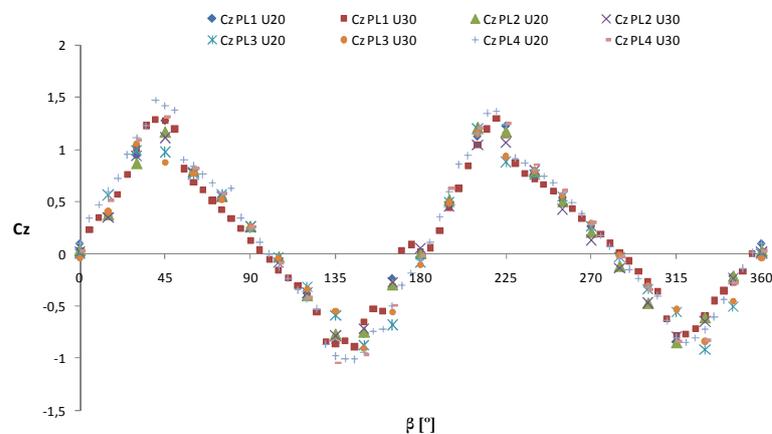


Gráfico 4- Valores de C_z das diferentes placas em função do escoamento β .

Os valores de C_z obtidos apresentam um perfil simétrico em relação aos 180° , situando-se os máximos absolutos nos 45° , 135° , 225° e 315° , com valores do coeficiente de sustentação entre 1 e 1,5.

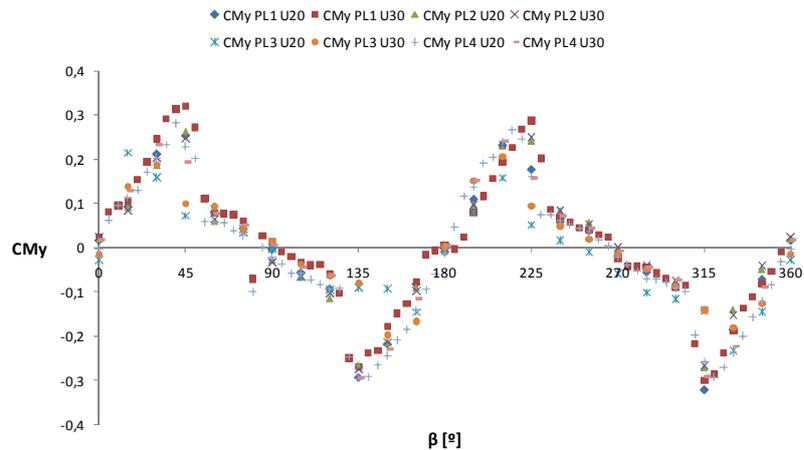


Gráfico 5 - Valores de CM_y das diferentes placas em função do escoamento β .

O CM_y apresenta valores com perfil pouco contínuo nas transições de 135° e 315° , observando-se uma descontinuidade de valores quando são atingidos os máximos, verificando-se ainda uma simetria relativamente aos 180° .

O valor máximo médio de C_x dos ensaios foi $1,45$, inserindo-se entre os valores bibliográficos dos coeficientes de placas planas a 90° de $1,17$, e de placas planas infinitas a 90° de $1,98$, situando-se num intervalo válido, segundo Mecânica Fluidos (2009). Relativamente aos valores de C_z e CM_y não foi encontrado suporte bibliográfico.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Todos os ensaios e consequentes resultados apresentados no presente capítulo foram realizados no TCO, onde se avaliaram as características aerodinâmicas (C_x , C_z e CM_y) de pinhas inteiras e pinhas com perda de massa parcial. Os resultados obtidos foram complementados com a análise de gráficos e tabelas, organizando-se o capítulo em pinhas inteiras e pinhas com perda parcial de massa.

De realçar, que os ensaios aerodinâmicos tanto para pinhas inteiras como para pinhas parcialmente queimadas foram realizados para intervalos de 5° e velocidade de escoamento de U20 (aproximadamente 13 m.s^{-1}), aproximando-se das velocidades terminais desta espécie de pinhas, sendo os primeiros ensaios realizados para uma velocidade de U25 e posteriormente convertidos para U20 por não se saber inicialmente o valor das suas velocidades terminais típicas.

Todos os resultados obtidos neste capítulo são para ensaios, considerando a fixação da pinha pela haste em U (Apêndice A) no TCO, podendo contribuir este método na influência dos resultados.

3.1. Pinhas Inteiras

Na análise de resultados é caracterizado cada tipo de pinhas, de acordo com as categorias anteriormente mencionadas, em função da forma e tamanho de cada amostra. Estudar as características das pinhas inteiras, é importante para poder caracterizar o modelo de cada coeficiente aerodinâmico., para definir a sua trajectória.

Nos ensaios realizados para as pinhas inteiras (0% de perda de massa), anularam-se 4 amostras do total de 12 pinhas, por terem resultados divergentes das restantes amostras, para assim, obter uma melhor aproximação dos coeficientes aerodinâmicos, da pinha *Pinus halepensis*, Gráfico 7 Gráfico 7 e Gráfico 8, respectivamente C_x , C_z e CM_y .

No cálculo da média de cada coeficiente aerodinâmico, não se distinguiu os 4 tipos de pinhas em estudo, ilustrando-se somente as curvas dos valores máximos e mínimos. Na legenda dos gráficos está representado a sigla “Mod” que se refere ao modo

como se obteve a característica de cada curva, aproximando-se uma função, aos valores médios.

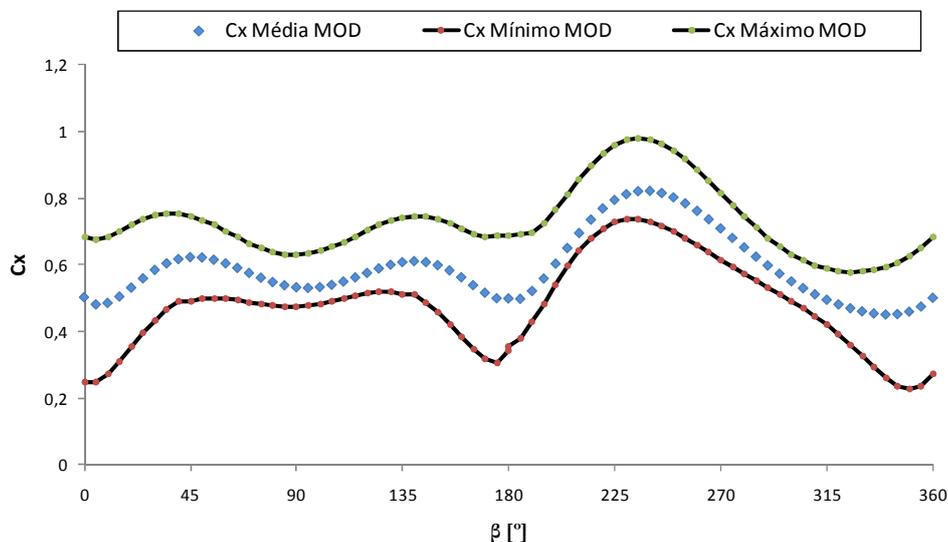


Gráfico 6 – Valores do C_x médio, mínimo e máximo (média de 8 amostras intactas).

No transporte da pinha, o escoamento incide horizontalmente, orientando-se a partícula segundo o ângulo de maior valor de C_x , nesta pinha esse valor médio é de 0,82 e coincide com os 235°. Após a análise do *Gráfico 6*, verifica-se um decréscimo nos 90°, não havendo qualquer aspecto físico da pinha que provoque tal alteração. Assim, por hipótese, assume-se que na posição que o túnel apresenta para os 90°, o ventilador que o alimenta está junto ao chão, podendo haver deficiência de caudal de ar, influenciando o escoamento nesta posição do túnel.

Na análise do C_z , considerou-se novamente a média dos coeficientes, verificando-se a curva média, mínima e máxima, de acordo com o *Gráfico 7*

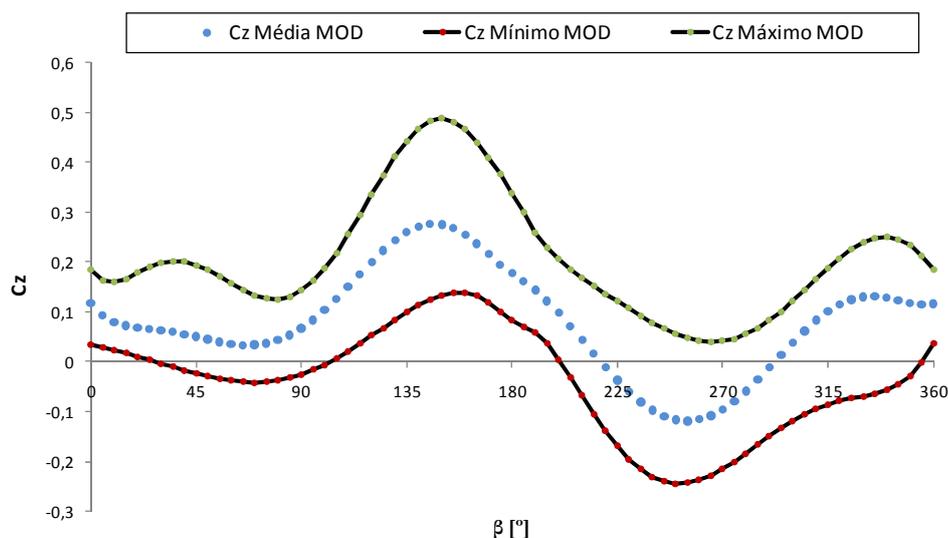


Gráfico 7 - Valores do Cz médio, mínimo e máximo (média de 8 amostras intactas)

Numa análise directa do *Gráfico 7*, verifica-se que os maiores valores absolutos da componente da força segundo z , verificam-se para os ângulos de escoamento de 135° , 250° e 330° , aproximadamente, verificando-se um valor de sustentação (força ascendentes) no intervalo entre os 135 e os 170° .

A pinha é uma partícula com características simétricas no seu perfil. Contudo, da análise do *Gráfico 7*, não se verifica tal simetria no eixo longitudinal da pinha (180°). Este facto poderá relacionar-se com as diferentes posições das escamas no coração da pinha, existindo assim diferentes graus de abertura nas duas superfícies simétricas. Considero que o coração da pinha assume importância na análise da simetria da pinha, por apresentar uma curvatura, como se poderá observar mais adiante, na *Figura 23*.

Os perfis dos coeficientes aerodinâmicos do momento, CM_y , são descritos no *Gráfico 8*.

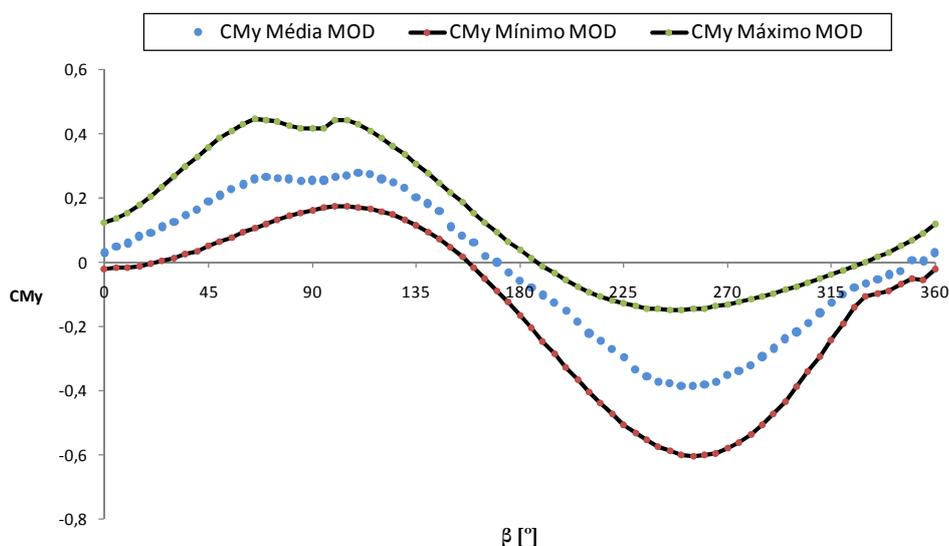


Gráfico 8 - Valores do CM_y médio, mínimo e máximo (média de 8 amostras intactas).

No *Gráfico 8*, verifica-se que os maiores valores absolutos da componente do momento segundo a rotação do eixo y , observa-se para os ângulos de escoamento de 90° , 260° , aproximadamente. A pinha, após nova análise do *Gráfico 8* e dos valores que CM_y apresenta, pode concluir-se que esta tende a rodar no sentido horário, com o escoamento a incidir entre 0 e os 175° . Da mesma forma podemos concluir que dos 175 aos 360° a pinha tem tendência a rodar no sentido anti-horário.

Nos ensaios obtiveram-se características aerodinâmicas (C_x) e físicas, que possibilitaram o cálculo da velocidade terminal de cada pinha segundo fórmula [6] acima definida, observando-se os resultados finais para as pinhas inteiras na *Tabela 4*.

Tabela 4 - Dados característicos obtidos nos ensaios realizados, a verde os valores incorrectos, e a negrito os máximos e mínimos (12 amostras de pinhas inteiras)

	Referência	C_x Máximo	U_T [$m \cdot s^{-1}$]	Grau do C_x Máx. [$^\circ$]	G_A
Pequenas	PC1	1,00	8,91	45°	2,94
	PC5	0,90	10,05	240°	2,71
	PC9	1,00	9,04	235°	2,92
Médias	PC4	0,91	10,70	235°	2,19
	PC7	0,69	12,63	210°	2,12
	PC11	0,99	10,06	250°	2,20
Grandes	PC3	0,80	11,95	270°	1,87
	PC6	0,83	12,12	240°	1,79
	PC12	0,85	11,24	50°	2,06
Longas	PC2	0,53	16,06	200°	1,94
	PC8	0,87	12,07	270°	1,95
	PC10	0,79	11,51	240°	2,33

Assinalado a negrito representa-se o valor mínimo e máximo obtido nos ensaios efectuados para a U_T . e a verde as pinhas anuladas devido à incoerência de valores em algumas características, relativamente às outras pinhas. Os menores valores de U_T verificam-se para as pinhas pequenas, devido à sua menor massa e volume, variando as duas da mesma forma, para uma densidade efectiva constante, como se verifica da análise da *Tabela 4*.

As pinhas inteiras, para uma amostra de 11 (não se considerou uma pinha longa PC2 por apresentar valores muito dispares, possivelmente causado por um erro no ensaio), apresentaram um valor de U_T médio de $10,93 \text{ m.s}^{-1}$ ($\sigma=1.21$). No estudo de Clements (1977) obtiveram-se velocidades terminais para seis amostras entre os $8,64 \text{ m.s}^{-1}$ para a *Pinus echinata* e os $16,55 \text{ m.s}^{-1}$ para a *Pinus clausa*, sendo que a pinha *Pinus banksiana* é a que adquire U_T 's próximas da pinha em estudo, $10,84 \text{ m.s}^{-1}$.

Corrigindo a interferência da haste de fixação em U, verificam-se velocidades terminais médias de $13,57 \text{ m.s}^{-1}$ ($\sigma=1.43$). Para este estudo optou-se por considerar todos os valores tendo em conta a haste em U, uma vez que os resultados obtidos no cálculo da interferência da haste não foram conclusivos (*Apêndice A*).

Relacionando os valores U_T em função da raiz quadrada da massa (m), da área (A_r), e do C_x , obtém-se o Gráfico 9, para os quatro tipos de pinhas.

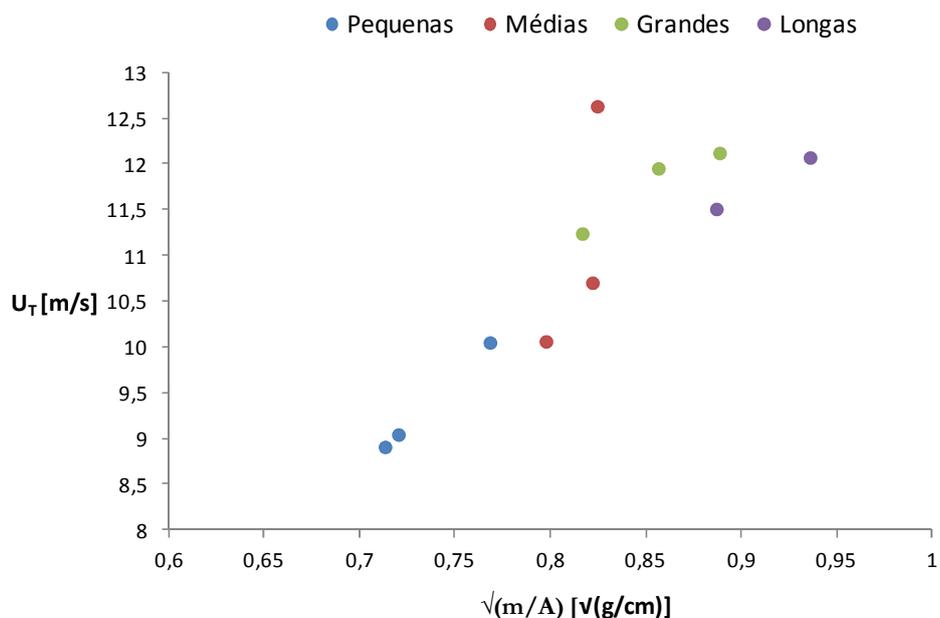


Gráfico 9 - Relação de U_T em função de $\sqrt{m/A}$.

Da análise do gráfico, verifica-se uma diminuição da velocidade terminal, com o decréscimo da massa nas amostras e com a diminuição da área, de acordo com a fórmula, tendo uma variação linear, vamos obter pouca variação do valor de C_x , observando-se baixas velocidades terminais para as pinhas pequenas.

No estudo dos coeficientes, a sustentação aumenta proporcionalmente com o grau de abertura, considerando uma pinha simétrica, devido à concavidade (perfil da escama em concha) das escamas, e à posição em que se encontra a pinha ao longo do ensaio. A relação do C_z máximo de cada pinha com o G_A , representa-se no *Gráfico 10*.

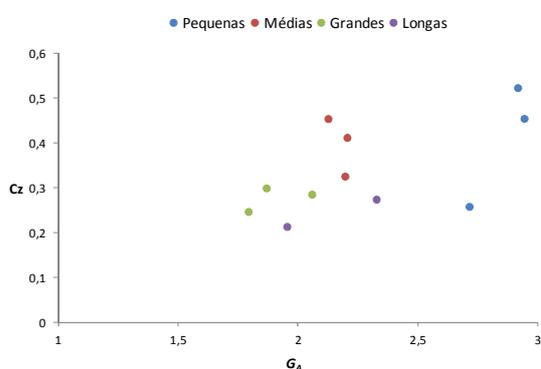


Gráfico 10 - Variação do C_z em função do G_A .

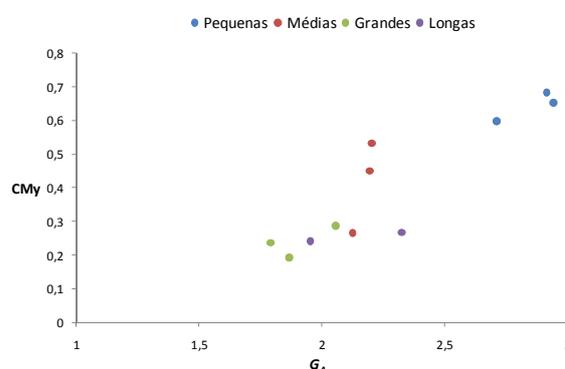


Gráfico 11 - Variação do CM_y em função do G_A .

Da análise do *Gráfico 10*, não se verifica qualquer variação com o grau de abertura, observando-se o contrário com o CM_y , no *Gráfico 11*.

Inicialmente, pensava-se que quanto maior fosse o grau de abertura, maior seria a sustentação, devido ao escoamento incidente na abertura das escamas, no entanto, tal não sucede, não se verificando qualquer relação com o grau de abertura, segundo o *Gráfico 10*, estando as pinhas grandes na zona do menor G_A , verificando-se o contrário nas pinhas pequenas. O G_A depende directamente do comprimento e largura da pinha e indirectamente da massa da amostra, de acordo com a equação [13], tendo a massa da partícula uma importância na sustentação da partícula.

3.2. Pinhas Parcialmente Queimadas

Após a realização de todos os ensaios das pinhas inteiras no TCO, recorreu-se ao laboratório da ADAI para o procedimento da queima parcial das mesmas, caracterizando-se as mudanças visíveis a olho nu na estrutura da pinha de acordo com a sua perda de massa, *Tabela 5*.

Tabela 5 - Descrição visual das pinhas para diferentes % de perda de massa.

% Perda de massa (aprox.)	Descrição Visual
15%	Libertação de gases, sem perda de volume ou forma.
50%	Perda de algumas escamas da zona mais afastada do pecíolo da pinha.
75%	Perda de grande parte das escamas, restando as que se situam em torno do pecíolo.
85%	Perda da totalidade das escamas, ficando apenas o coração da pinha.

Da tabela e da observação feita ao longo do procedimento experimental verifica-se que 10 a 15 % da massa da pinha é constituída por resinas e compostos orgânicos voláteis que reagem produzindo fumo, não se verificando grande alteração do volume. A perda de volume ou forma verifica-se a partir dos 30% de perda de massa, observando-se na *Figura 23*, a ausência de algumas escamas para uma perda de massa de 50%.



Figura 23 - Sequência fotográfica das perdas de massa, 50, 70 e 80%, respectivamente

Das três figuras representadas, observa-se um enorme decaimento de volume entre os 50 e os 80 % de perda de massa, com a perda quase total das escamas nos 70%, ficando apenas as escamas na zona do pecíolo. O coração da pinha apresenta aproximadamente 20% do peso total da pinha.

Após a queima das pinhas, realizaram-se os ensaios das pinhas parcialmente queimadas, considerando somente uma pinha de cada tipo na elaboração da *Tabela 6*.

Tabela 6 - Variações da U_T e C_x com a % perda de massa.

	Referência	C_x Máx.	Perda de massa [%]	U_T [m/s]	ΔU_T [%]	ΔC_x Máx [%]
Pequenas	PC9	1,00	0,00%	9,04	-	-
	PcB9	1,13	55,22%	6,94	-30,21%	11,32%
	PcB13	1,58	61,02%	6,53	-6,26%	28,68%
	PcB17	1,70	78,58%	6,45	-1,32%	6,91%
Médias	PC11	0,99	0,00%	10,06	-	-
	PcB10	1,19	62,11%	6,76	-48,89%	16,44%
	PcB14	0,91	67,16%	7,90	-	-
	PcB18	1,79	75,96%	6,85	-15,40%	49,04%
Grandes	PC12	0,85	0,00%	11,24	-	-
	PcB11	0,59	51,41%	10,55	-6,48%	-
	PcB15	1,43	63,32%	6,87	-53,60%	58,79%
	PCB19	1,19	80,50%	8,34	-	-
Longas	PC10	0,79	0,00%	11,51	-	-
	PCB12	0,45	61,70%	13,92	-	-
	PcB16	1,18	74,52%	7,84	-46,82%	33,49%
	PcB20	1,64	84,10%	7,13	-9,85%	27,91%

Na *Tabela 6*, calculam-se as variações da velocidade terminal com a percentagem de perda de massa, calculando a diferença entre as velocidades, observando-se um decréscimo da velocidade terminal com o aumento da perda de massa.

Através dos valores da *Tabela 6*, criou-se um gráfico para melhor compreensão da relação anterior, relacionando a velocidade terminal adimensional com a perda de massa. A velocidade terminal unitária é obtida fazendo a divisão de todas as velocidades terminais, com diferentes perdas de massa, pela velocidade terminal com perda de massa nula, adimensionalizando a velocidade.

O apresenta a variação da função da velocidade terminal adimensional, em função da percentagem de perda de massa por combustão das pinhas.

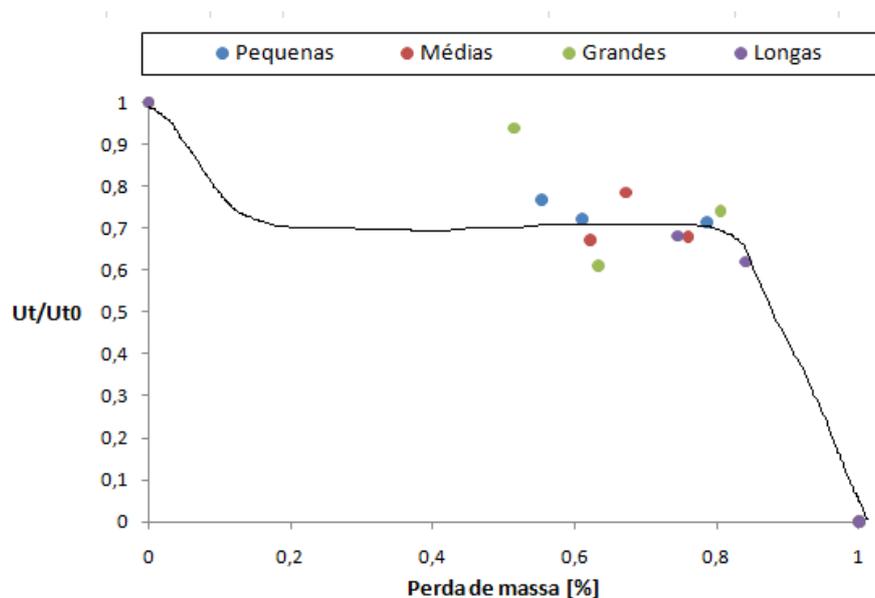


Gráfico 12 - Variação de UT em função da perda de massa.

No *Gráfico 12* observa-se que com a diminuição da perda de massa durante o transporte aerodinâmico, a velocidade terminal da pinha diminui, de acordo com a curva ilustrada.

Inicialmente foi determinada uma função polinomial de 3ª grau que aproximasse dos valores obtidos na variação da velocidade terminal em função da perda de massa, obtendo-se uma variação não linear entre os 15% e os 85 %.

Assim, para melhor compreensão da relação da velocidade unitária com a perda de massa, foi traçada uma curva no , tendo em conta as seguintes condições: o valor da velocidade unitário inicial, a linearidade dos valores obtidos, o valor nulo da velocidade para uma perda de massa total e os resultados obtidos em Almeida et al. (2010). Estes factores no seu conjunto, verificaram o decaimento inicial da velocidade terminal devido à perda de compostos voláteis até cerca de 20% de perda de massa, uma linearidade até aos 80% e novamente um declínio na velocidade terminal até que a pinha supostamente se extinga na totalidade.

Considera-se que a linearidade obtida é justificada pelo equilíbrio entre a perda de massa e o declínio da área; enquanto que a fase de decréscimo entre os 0 e 20% e os 80% e 100% de perda de massa é explicada pela diminuição da massa, mantendo-se a área da amostra constante.

4. MODELO EMPÍRICO

A definição dos modelos empíricos dos coeficientes aerodinâmicos das pinhas *Pinus halepensis* dificulta-se por não se verificar simetria das forças relativamente ao seu eixo longitudinal, causada pela dissemelhança da posição das escamas, do grau de abertura e da curvatura do coração da pinha.

O maior valor de C_x da pinha indica a orientação com que a partícula se vai deslocar durante o seu transporte aerodinâmico, coincidindo com a menor velocidade terminal. Na obtenção do perfil dos valores médios de C_x , o valor máximo obtido foi nos 235° , optando-se assim por definir o modelo empírico dos três coeficientes aerodinâmicos para o intervalo de 180 a 360° , não se optando pelo intervalo de 0 a 180° por este incluir o ângulo no qual se pressupõe que há interferência do ventilador no escoamento (90°), como já foi referido.

O modelo empírico definido para o coeficiente de arrasto é determinado pela seguinte função e respectivas constantes [24].

$$f(x) = a_1 e^{((x-a_2)^2 / +a_3)} + a_4 \cdot x \quad [24]$$

$$a_1=0,519 \quad a_2=235,2 \quad a_3=3427 \quad a_4=0,142 \cdot 10^{-2}$$

A aproximação da função é de $R^2 = 0,87$ e caracteriza a aerodinâmica da pinha no intervalo de 180° a 360° , como se vê no *Gráfico 13*. Devido à simetria da pinha relativamente aos 180° de incidência de escoamento, espelhou-se os resultados obtidos no intervalo de 180 a 360° para o intervalo de 0 a 180° de maneira a obterem-se os valores que se deveriam ter adquirido efectivamente, sem a influência dos dados devido à insuficiência na exaustão de ar na posição de incidência do escoamento nos 90° .

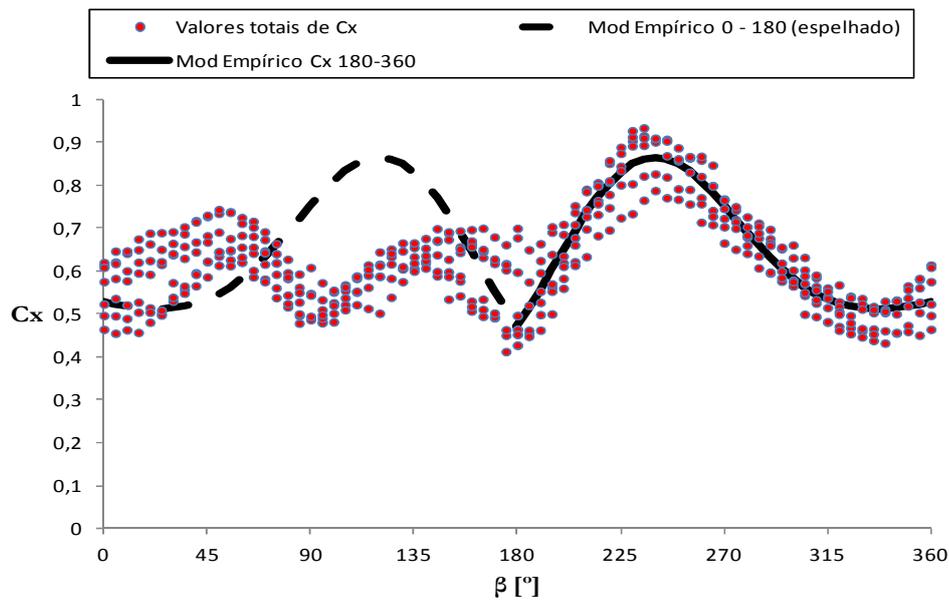


Gráfico 13 - Definição do modelo empírico de Cx (180 a 360°)

No cálculo do modelo utilizaram-se sete amostras de pinhas ensaiadas, eliminando-se os valores mais dispersos e melhorando a aproximação. Os gráficos obtidos no programa informático *LABFit*, referentes aos intervalos de 180° a 360° estão representados no *Anexo*. No desenvolvimento do modelo de determinação do coeficiente de sustentação (C_z) obteve-se a função seguinte e respectivas constantes, [25].

$$f(x) = a1 \times \cos(a2 \cdot x + a3) + a4 \quad [25]$$

$$a1=0,165 \quad a2=0,0385 \quad a3=12,89 \quad a4=0,0117$$

De realçar que em Almeida et al (2011), foi obtida uma função do modelo igual à definida em [25], para um combustível diferente e outros valores de coeficientes.

Com uma aproximação de $R^2 = 0,82$, determinou-se a caracterização da aerodinâmica da pinha no intervalo de 180° a 360° , como se vê no *Gráfico 14*.

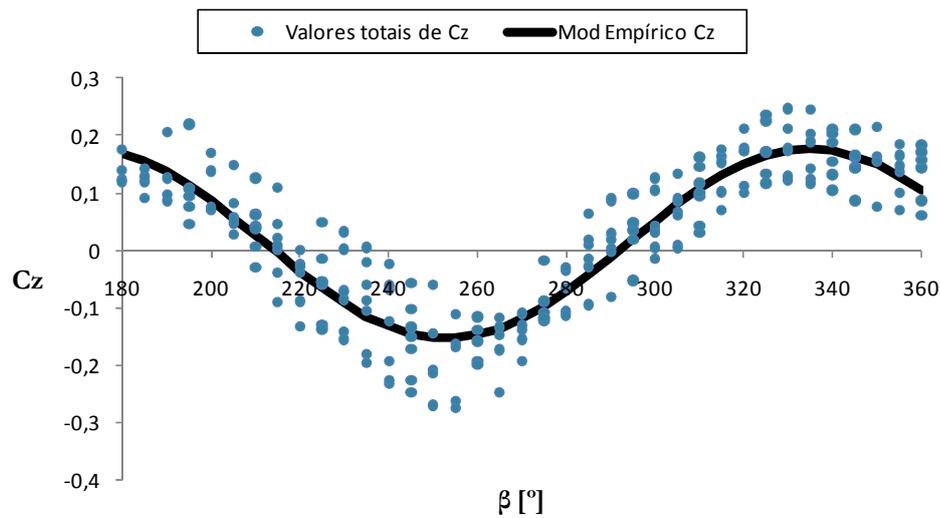


Gráfico 14 - Definição do modelo empírico de C_z (180 a 360°)

Na caracterização do coeficiente aerodinâmico de momento em torno do eixo y , consideraram-se duas curvas de caracterização do modelo de C_{My} devido aos resultados divergentes, obtidos para as diferentes categorias de pinhas. A justificação deste dois agrupamentos das pinhas em P e M, G e L, é clara após a análise do *Gráfico 15*.

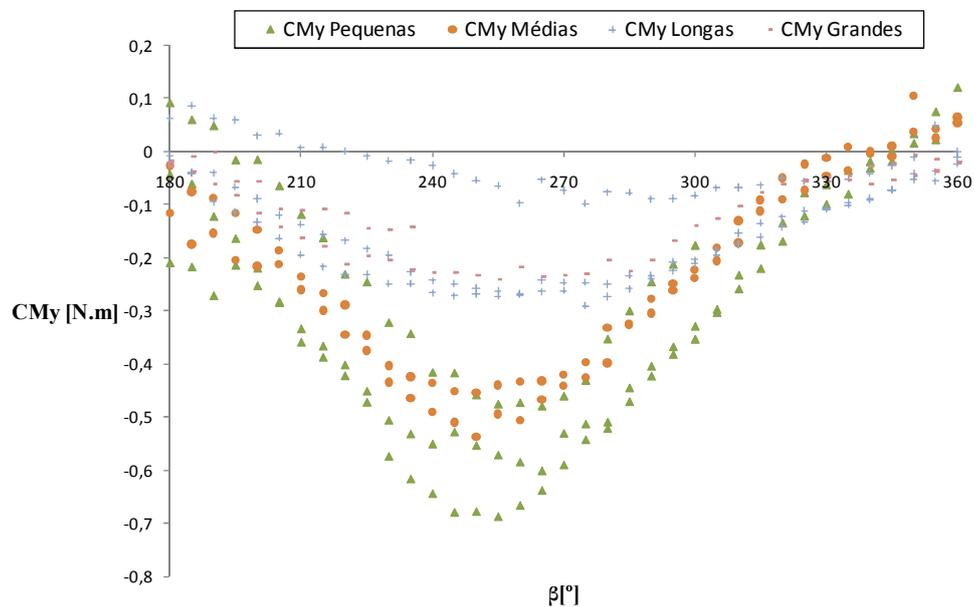


Gráfico 15 - Valores de C_{My} em função do escoamento para os 4 tipos de pinhas.

Os modelos obtidos para os dois grupos de pinhas mencionados, são representados nas Equações [26] e [27] e apresentados no *Gráfico 15*.

Verificando-se uma maior tendência de rotação nas pinhas de menor comprimento e menor relação l/b_0 , enquanto que para as pinhas G e L se verifica o

contrário, sendo a caracterização dada pela função [26] e respectivas constantes, com uma aproximação de $R^2 = 0,81$.

$$f(x) = a1 + (a2 \cdot x) + (a3 \cdot x^2) + (a4 \cdot x^3) \quad [26]$$

$$a1=3,81 \quad a2=-0,038 \quad a3=0,119 \cdot 10^{-3} \quad a4=-0,113 \cdot 10^{-6}$$

As pinhas P e M possuem características com maior afinidade para originar momento, caracterizadas pela função e constantes respectivas [27], tendo uma aproximação de $R^2 = 0,91$.

$$f(x) = a1 \sin(a2 \cdot x + a3) + a4 \quad [27]$$

$$a1=0,287 \quad a2=0,031 \quad a3=-9,39 \quad a4=-0,249$$

Essa discrepância de perfis entre os dois grupos de pinhas é observada no *Gráfico 16*.

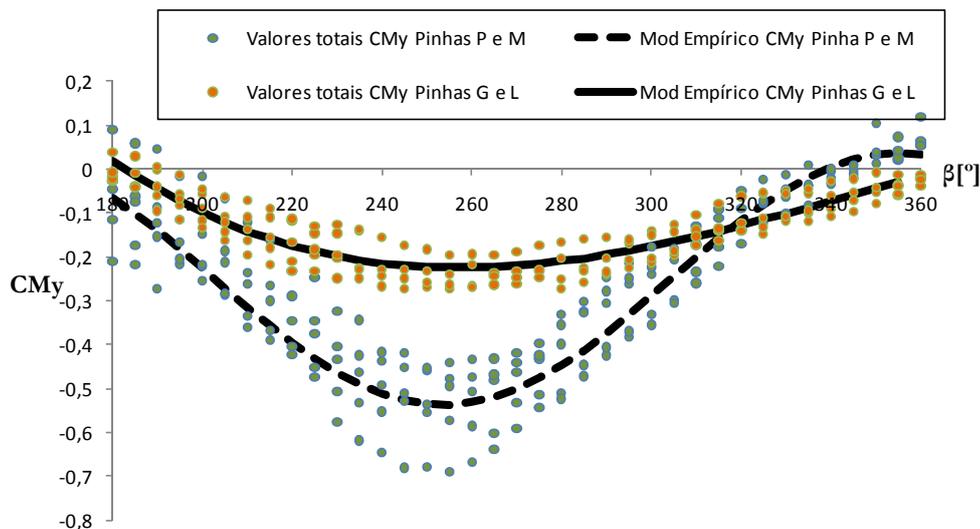


Gráfico 16 - Definição do modelo empírico de CM_y para dois grupos de pinhas (180 a 360°).

Na aplicação do modelo de CM_y não faz sentido termos duas funções para caracterizar uma pinha, complicando o desempenho do programa. Desta forma, calculou-se o modelo de CM_y para a média dos ensaios, obtendo-se uma função característica igual à do modelo das pinhas P e M [27], considerando as seguintes constantes e gráfico representativo *Gráfico 17*.

$$a1=0,1562 \quad a2=0,0317 \quad a3=-9,39 \quad a4=-0,249$$

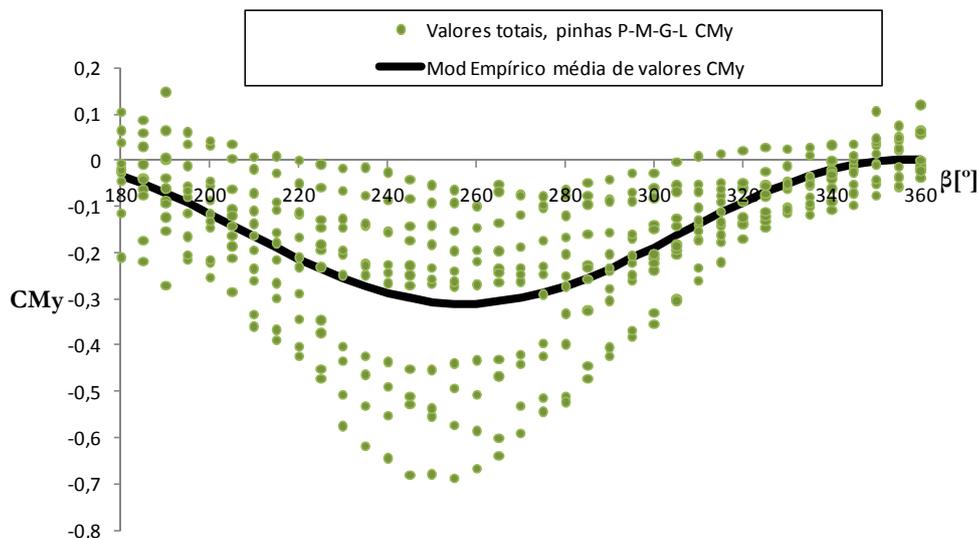


Gráfico 17 - Definição do modelo empírico de CM_y , de valores médios (180 a 360°).

A aproximação da função da linha média de valores é de $R^2 = 0,99$, verificando-se maior concentração de valores no perfil característico das pinhas G e L.

A definição dos modelos de C_x , C_z e CM_y para os 360° de incidência do escoamento, estão representadas no *Anexo*.

4.1. Breve aplicação do programa de transporte aerodinâmico de uma partícula

O programa realizado por Almeida, M. (2011), calcula o trajecto de uma partícula incandescente tendo em conta as características do vento no seu percurso. Inicialmente, inserem-se os dados de entrada no programa, especificamente o intervalo de tempo entre cada cálculo, a posição, velocidade aceleração inicial da partícula, as características físicas da partícula, as características do ambiente e por último o ângulo inicial da partícula. Os resultados obtidos pelo programa indicam graficamente a distância que a partícula irá alcançar e o tempo de queda da mesma.

O programa permite aplicação dos valores característicos aerodinâmicos do modelo da pinha *Pinus halepensis*, das suas especificidades físicas, da altura a que foi lançada a partícula, do perfil de vento a simular, conduzindo á representação gráfica da distância alcançada pela pinha, de acordo com o *Gráfico 18*.

No caso do nosso estudo, considerou-se a temperatura ambiente 32°C , uma velocidade de escoamento com variação de acordo com $Z^{0,2}$ igual à velocidade terminal

média da pinha, $10,93 \text{ m.s}^{-1}$, fornecendo assim as condições ideais de transporte aerodinâmico desta espécie. Considerou-se também uma velocidade inicial nula, com a pinha na vertical, com o pecíolo direccionado para baixo e uma queda de 100 m de altura (valor que varia com a intensidade do fogo na pluma térmica).

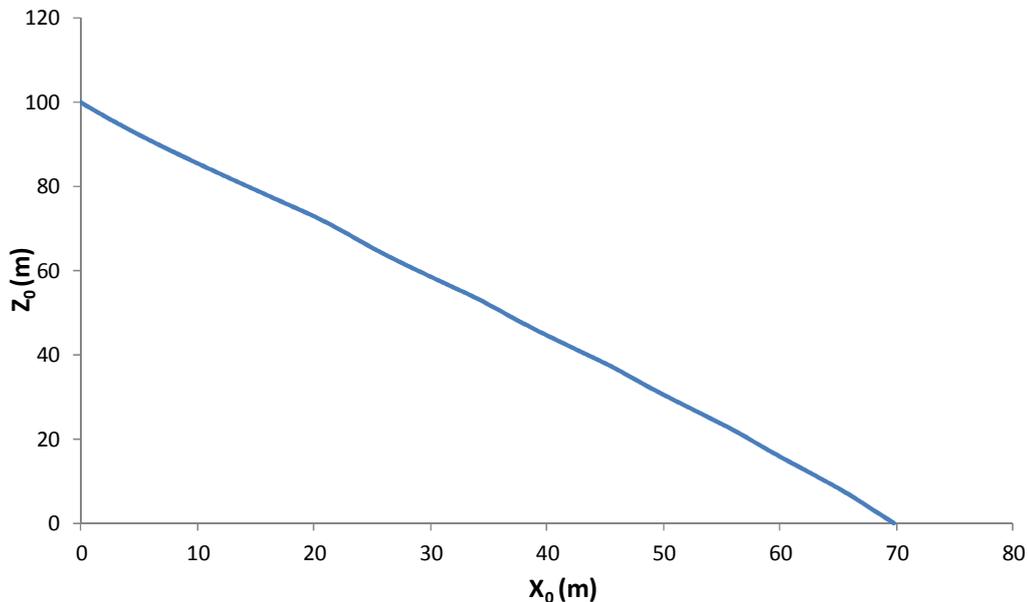


Gráfico 18 - Simulação do transporte da pinha para uma queda de 100 m.

Da análise do *Gráfico 18*, verifica-se uma linearidade da queda da partícula, no sentido do escoamento da partícula, alcançando a partícula uma distância $X_0=69 \text{ m}$. A distância alcançada pela pinha para as condições indicadas é elevada, verificando-se que esta pinha tem algumas potencialidades para originar focos secundários de curta distância.

Neste estudo, não se contabilizou o efeito adicional do G_A da pinha no C_x , nem a perda de massa ao longo do transporte, considerando somente que a pinha é transportada sem estar em combustão, por não possuir modelo característico da queima da partícula.

Um factor que se adicionou ao programa, foi o momento adicional provocado pelo não-alinhamento do centro de massa com o centro geométrico, o qual produz um momento adicional.

5. CONCLUSÕES

O estudo desta espécie de pinhas surgiu no âmbito do grande incêndio que deflagrou em Israel no mês de Dezembro de 2010, contribuindo para esclarecer algumas incertezas que existiam sobre a capacidade deste combustível em originar novos focos secundários, devido ao seu tamanho e massa típicos. A preferência por pinhas reais/naturais em vez de pinhas artificiais/regulares enriqueceu a veracidade dos resultados, contudo dificultou a realização de ensaios e a análise de dados obtidos, por se tratar de pinhas com diferentes características físicas.

No estudo do comportamento dos incêndios, mais propriamente de focos secundários, foi proposto inicialmente o estudo das características físicas e aerodinâmicas da pinha *Pinus halepensis*, contribuindo de certa forma para aumentar a base de dados de combustíveis em programas que prevêem trajetórias de partículas incandescentes em incêndios florestais.

Algum equipamento utilizado, tal como a haste de fixação, foram construídos especificamente para os ensaios realizados ao longo deste estudo. A haste de fixação do combustível à célula de carga permitiu efectuar os ensaios, não se definindo ao certo a relevância da sua interferência nos resultados finais.

A caracterização física da pinha, como é o caso da determinação do seu grau de abertura através do modelo definido, tendo por base as suas características geométricas, valorizou o estudo no campo da comparação das características aerodinâmicas entre cada uma, auxiliando na obtenção de conclusões.

A densidade efectiva deste tipo de pinhas influencia o seu comportamento relativamente às distâncias que pode percorrer durante o incêndio; o número de pinhas existentes por ramo aumenta a possibilidade de se verificar a sua libertação e consequente a formação de mais fogos secundários.

Os ensaios foram realizados para velocidades de escoamento de $13 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, que é um valor próximo da velocidade máxima de queda, o qual corresponde a um intervalo de ângulo de orientação da pinha entre os 210° e os 270° , independente do tamanho e massa da mesma.

Realizaram-se ensaios com pinhas inteiras, sem perda de massa, e com pinhas parcialmente queimadas, com diferentes percentagens de perda de massa, verificando-se uma diminuição da velocidade terminal com a redução da perda de massa ao longo da queima da partícula.

O estudo dos coeficientes aerodinâmicos da pinha, foi obtido através de um procedimento de cálculo directo (ensaios no TCO), ao contrário do que se tem utilizado, até então, que se baseia na análise visual do lançamento de partículas em queda livre em vídeo. A obtenção de valores no presente estudo é mais detalhada, uma vez que permite um cálculo do escoamento para todos os ângulos de incidência deste na pinha, possibilitando uma ideia geral do comportamento da pinha.

Ao longo da análise e tratamento de dados considerámos a área da amostra definida pelo produto de l por b_0 . Na verdade a área da pinha transversal ao escoamento está sempre a alterar-se durante os diferentes ângulos de incidência do escoamento na pinha. O aumento da perda de massa vai provocar uma mudança de forma considerável devido à alteração do perfil da pinha com a perda de escamas, estando neste caso, a considerar-se a área característica da amostra, um rectângulo e não a sua área projectada. Este factor pode alterar os coeficientes aerodinâmicos calculados para percentagens de perda massa acima dos 50%, como foi observado nos ensaios realizados.

A investigação destas pinhas com diferentes perdas de massa confirmou que ao longo do transporte aerodinâmico vai existir perda de massa causada pela combustão, promovendo assim um aumento do coeficiente de arrasto e conseqüente diminuição da velocidade, como descrito por Clements (1977). Verificou-se o decaimento da velocidade terminal da pinha até aos 15% de perda de massa, mantendo-se constante até aos 80% e a partir daí um novo decréscimo até se verificar a queima total da pinha, obtendo-se uma velocidade nula.

5.1. Perspectivas e Estudos Futuros

Dos resultados obtidos no decorrer desta dissertação, estes indicam que deverá ser realizado um estudo mais alargado acerca deste tema. As conclusões experimentais obtidas poderão contribuir para enriquecer os modelos de previsão do transporte de pinhas de *Pinus halepensis*, da propagação e comportamento do fogo antevendo a sua direcção.

No entanto, com o objectivo de optimizar os modelos definidos, principalmente na análise do C_{My} , propõe-se um estudo com um maior número de amostras, para ângulos fixos de incidência de escoamento, analisando a interferência do peso da pinha na posição adquirida durante o seu transporte aerodinâmico.

A influência da haste na aerodinâmica da pinha foi feita no presente estudo, surgindo dúvidas da sua influência no final da análise, sugerindo que se fizesse um estudo mais aprofundado da interferência deste tipo de fixação nos resultados finais, consolidando se os resultados obtidos. Nos ensaios do TCO, seria interessante verificar-se o decréscimo do escoamento para a posição de 90° do túnel, como foi referido na presente dissertação, para futuramente se corrigir os ensaios realizados.

Seria também interessante e pertinente a realização de um estudo para a obtenção do modelo aerodinâmico em ensaios de combustão considerando a perda de massa ao longo do transporte aerodinâmico, o que levaria a uma maior aproximação à realidade, o transporte aerodinâmico da pinha *Pinus halepensis*.

No âmbito de fornecer e completar os estudos de focos secundários, seria importante estudar novas espécies de pinhas e novos tipos de combustíveis, enriquecendo os programas que prevêm o comportamento do fogo.

6. 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. (1983), Potential Spotting Distance from Wind - Driven Surface Fires. USDA Forest Service, Research Paper INT-309, IFRES - USA.
- Almeida (2005) - Almeida, M. A. de Figueiredo Bernardo, Dissertação, Caracterização da Combustibilidade de Leitões Florestais Heterogêneos, 2005
- 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. X. et. al. (2010), Aerodynamic Characteristics of Some Potential Embers - VI International Conference on Forest Fire Research.
- Almeida M. (2011); Propagação de Incêndios Florestais por Focos Secundários; Tese de Doutorado em Engenharia Mecânica (submetido a aguardar defesa); Universidade de Coimbra; Coimbra; Portugal
- Anderson J. D. (1991), "Fundamentals of Aerodynamics. 2ª Ed, McGraw-Hill, Inc. New York 1991. McGraw-Hill Series in Aeronautical and Astronautical Engineering
- Berlad, A. L. e S.L. Lee. (1968). Long Range Spotting. *Combustion & Flame*, Vol. 12, Pp. 172-174.
- Byram (1959) - Byram, G. M. (1959). Combustion of Forest Fuels. In K. P. Davis, ed., *Forest Fire: Control and Use*. McGraw-Hill.
- Boston News – Wildfire in Israel (2010). (s.d). Obtido em Julho de 2011, http://www.boston.com/bigpicture/2010/12/wildfire_in_israel.html
- Clements, H. B. (1977), Lift-Off of Forest Firebrands. USDA Forest Service Research Paper SE-159.
- DGRF (2008) - DGRF — Autoridade Florestal Nacional, Estatísticas 2008, (Pesquisa

Pinha halepensis)

- Ellis (2000) - Ellis, P.F.(2000), The Aerodynamic and Combustion Characteristics of Eucalypt Bark - A Firebrand Study, Ph. D. Dissertation, Australian National University, Camberra
- Ellis (2010), The effect of the aerodynamic behaviour of flakes of jarrah and karri bark on their potential as firebrands, Journal of the Royal Society of Western Australia, 93: 21–27, 2010
- EUFORGEN (2008) - EUFORGEN, EUROPEAN FOREST GENETIC, map published by W.B.Critchfield & E.L.Little, Jr., Geographic Distribution of the Pines of the World
- Ganteaume, A; -Maillet, C. L., Guijarro, M., Hernando, C, Fonturbel, M. J. T, Gorostiaga, P.P. and Vega, J. A.; Spot fires: Fuel bed flammability and ignition capability of firebrands, International Journal of Wildland Fire 18 (2009) 18 p.
- Koo (2010) - Koo Eunmo, Pagni Patrick J., Weise David R. e Woycheese John P., Firebrands and spotting ignition in large-scale fires, International Journal of Wildland Fire 2010, CSIRO Publishing, Vol. 19, Pág. 818 - 843
- Lee, S. L. e J.M. Hellman. (1969). Study of firebrand trajectories in a turbulent swirling natural convection plume. Combustion and Flame, 13: 645-655.
- Leone V, Sarracín A, Trabaud L, Velez R (2000) Fire prevention and management policies in west Mediterranean pine forest. In 'Ecology, Biogeography and Management of *Pinus halepensis* and *P. brutia* Forest Ecosystems in the Mediterranean Basin
- Manzello S. L. (2007a), Measurement of Firebrand Production and Heat Release Rate (HRR) from Burning Korean Pine Trees, 7th Asia-Oceania Conference, CD of Contributed Papers, Hong Kong, China, 2007
- Manzello S. L. (2007b), On the use of a Firebrand Generator to Investigate the Ignition of Structures in Wildland-Urban Interface (Wui) Fires, Building and Fire Research Laboratory (BFRL) and National Institute of Standards and Technology (NIST), Japan 2007
- Manzello S. L. (2008), Mass and Size Distribution of Firebrands Generated from Burning Korean Pine (*Pinus Koraiensis*) Trees, Building and Fire Research Laboratory (BFRL) 2008
- Mec. Fluidos, PUCRS (2009) - Apontamentos de Mecânica dos Fluidos - Capítulo 11: escoamento Viscoso Externo - Forças Aerodinâmicas, DEM, Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul - PUCRS
- Morris, G. A. (1987), A Simple Method for Computing Spotting Distances From Wind-Driven Surface Fires. USDA Forest Service, Res. Note INT-374.

- Muraszew, A. (1974), Firebrand Phenomena. Aerospace Rep. ATR-74(8165-01)-1, The Aerospace Corp., El Segundo, Calif.
- Muraszew, A. e J.B. Fedele. (1976), Statistical Model for Spot Fire Hazard. Aerospace Rep. ATR-77(7588)-1, The Aerospace Corp., El Segundo, Calif.
- Oliveira & Lopes (2006) - Oliveira, Luís A. & Lopes, António G., “Mecânica dos Fluidos”, 1ª Edição, ETEP - Edições Técnicas e Profissionais
- Pires, J. N. (2003), JR3 PCI Software Version 13-2003, <http://robotics.dem.uc.pt/norberto/jr3pci/>
- Pitts (1991) - Pitts VM (1991) Wind effects on fire, Progress in Energy and Combustion Science 17, 83 - 134
- Quezel, (1986) - Quezel, P, 1986 Les pinus du groupe halepensis, Ecologic Végétation Ecophysiology, Options méditerranéennes.
- Rothermel, R. C. (1972), A mathematical model for predicting fire spread in wildland fuels. Research Paper INT-RP-115. Ogden, UT: USDA Forest Service, Intermountain Forest and Range Experiment Station. 52 p
- Rothermel, R. C (1983), Rothermel RC. 1983. How to Predict the Spread and Intensity of Forest and Range Forest. General Technical Report INT-143. USDA Forest Service, Intermountain Forest and Range Experiment Station.
- Sardoy, N. et. al (2007), Modelling transport and combustion of firebrands from burning trees, Combustion and Flame 150, 151-169.
- Schlichting, H. (1979), Boundary – Layer Theory, (1979), McGraw-Hill
- Silva, W. P., Silva, C. M. D. (2009) LAB Fit Curve Fitting Software (NonlinearRegression and Treatment of Data Program) V 7.2.46 (1999-2009), onlineavailable from: www.labfit.net.
- Tarifa, (1962) - Tarifa, C.S, Open Fires and Transport of Firebrands GRANT FG SP-114, Instituto Nacional de Tecnica Aeronautica "Esteban Terradas" Madrid, Spain; (1962)
- 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.
- Trabaud, L., Grosman, J. e T. Walter (1985). Recovery of burnt *Pinus halepensis* Miller forest. Forest Ecology and Management, vol 12-13.
- Tse, S. D. e Fernandez-Pello A. C. (1998) On the flight paths of metal particles and

- embers generated by power lines in high winds and their potential to initiate wildland fires. *Fire Safety*, 30:333–56.
- Tsitsoni and Karagiannakidou (2000) - T. Tsitsoni and V. Karagiannakidou (2000), Site quality and stand structure in *Pinus halepensis* forest of north Greece, Institute of Chartered Foresters.
- Turns (1996) - Stephen R. Turns ,An Introduction to Combustion: Concepts and Applications, First Edition 1996
- Vallejo (2008) - Ramon Vallejo, Fenómeno dos incêndios no mundo: causas e consequências, Land Care In Desertification Affected Areas, Fascículo B, Nr.2
- Viegas, D. X. (2005) - Manual prático para a prevenção e o combate a incêndios: guia actual para peritos em segurança do trabalho e protecção contra incêndios / [António Leça Coelho... et al.; coord. Domingos Xavier Viegas ; propr.] VERLAG DASHÖFER
- Viegas, D.X. (2006), "Modelação do Comportamento do Fogo", Em: Pereira, J.S., Pereira, J.M.N, Rego, F.C., Silva, J.M.N. e Silva, T.P (eds.), Incêndios Florestais em Portugal, Tipografia Lousanense, 14, 287-325
- Viegas, D. X. (2009), Papel da Mecânica dos Fluidos no Estudo dos Incêndios Florestais, III Conferência Nacional em Mecânica de Fluidos, Termodinâmica e Energia (MEFTE - BRAGANÇA 09)
- Viegas, D. X. (2010), Programa de computador ajuda a prever fogos secundários, D. N. Ciência, obtido em Julho de 2011, http://www.dn.pt/inicio/ciencia/interior.aspx?content_id=1704368&page=2
- Viegas, D. X., Rossa, C., Ribeiro, L. M. (2011), Incêndios Florestais, Verlag Dashöfer Portugal (2011)

APÊNDICE A

Análise da correcção do Branco (haste em U)

Os ensaios aerodinâmicos são obtidos através de um mecanismo de fixação que faz a união da célula de carga à partícula a ensaiar no interior do TCO, *Figura 24*, sujeitando-se também ao fluxo de ar incidente durante os ensaios. A fixação das pinhas só pode ser feita pelo pecíolo, a única zona rígida e compacta, tendo se construído uma haste com perfil em U, como se vê na *Figura 25*.



Figura 24 - União da célula de carga à pinha.



Figura 25 - Haste de fixação de perfil em "U".

O objecto de fixação vai interferir nas medições devido à forma que este apresenta, alterando o escoamento real que teria se não houvesse fixação, alterando os resultados finais obtidos, acumulando as forças e momentos actuantes na haste. A anulação desta interposição é feita recorrendo ao ensaio do “branco” com a haste em U usada nos ensaios das pinhas e elaborar um processo de cálculo que retire o efeito do mecanismo nas medições dos ensaios.

No cálculo da obtenção do “branco”, correspondente à interferência da haste de fixação da pinha, recorreu-se á utilização de uma pinha artificial de madeira com as dimensões de $9,3 \times 8,1 \text{ cm}^2$, aproximando-se de uma pinha de tamanho médio *Pinus halepensis*. A pinha artificial pode ser fixa lateralmente pela haste lateral ou na zona do pecíolo pela haste em U, a qual foi utilizada nos ensaios das pinhas reais por ser a única forma de fixá-las.

O “branco” obtém-se com uma sucessão de ensaios que se divide em três fases, (1) - ensaio somente da haste lateral, (2) - ensaio da haste lateral + pinha artificial e (3) - ensaio da haste U + pinha artificial. A sequência das subtrações é feita na seguinte ordem:

A - Subtrai-se os valores obtidos em (1) aos dados de (2) obtendo-se o valores somente da pinha artificial.

B – Aos valores de (2) subtrai-se os dados obtidos em A, adquirindo-se os valores apenas da haste em U.

A fórmula das subtrações é definida de acordo com [28].

$$\text{Efeito da haste em U} = \text{Ensaio (3)} - (\text{Ensaio (2)} - \text{Ensaio (1)}) \quad [28]$$

Tendo já as forças e momento do “branco” já calculados, podemos passar à subtração dos efeitos da haste U nos ensaios das pinhas e assim obter os verdadeiros coeficientes aerodinâmicos da pinha. Aplicando o método acima descrito vamos descrever o processo na prática e com os valores reais da cada etapa.

Cálculo das forças e momento aplicados na haste lateral

Seguindo as fases, o primeiro ensaio foi o da haste lateral obtido pela média de quatro medições, no caso das forças aplicadas segundo o eixo x, como se verifica no *Gráfico 19*.

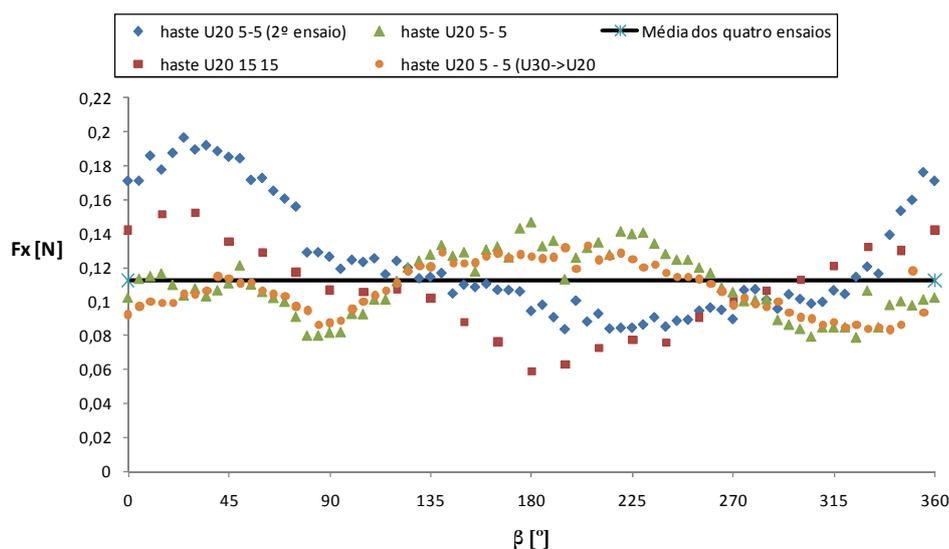


Gráfico 19 – Média de F_x da haste lateral em função da direcção do escoamento β .

A designação de “5-5” indica-nos que as medições foram feitas com intervalos de 5° e por analogia, os de “15-15” em intervalos de 15° . A linha preta é a média das

medições, dando um $F_{x\text{Médio}} = 0.113\text{ N}$. Assumimos que a haste é perfeitamente cilíndrica e regular, optando assim por um valor médio de F_x para todas as direcções de escoamento.

No cálculo do “branco” em F_z não se considerou a haste lateral por não haver qualquer tipo de irregularidades na haste, por se tratar de uma haste cilíndrica, esta não deveria apresentar forças segundo o eixo z e os que apresenta são relativamente baixos aos valores obtidos em ensaios de pinhas. O *Gráfico 20* compara os valores de quatro ensaios da haste lateral para velocidades de $U20$.

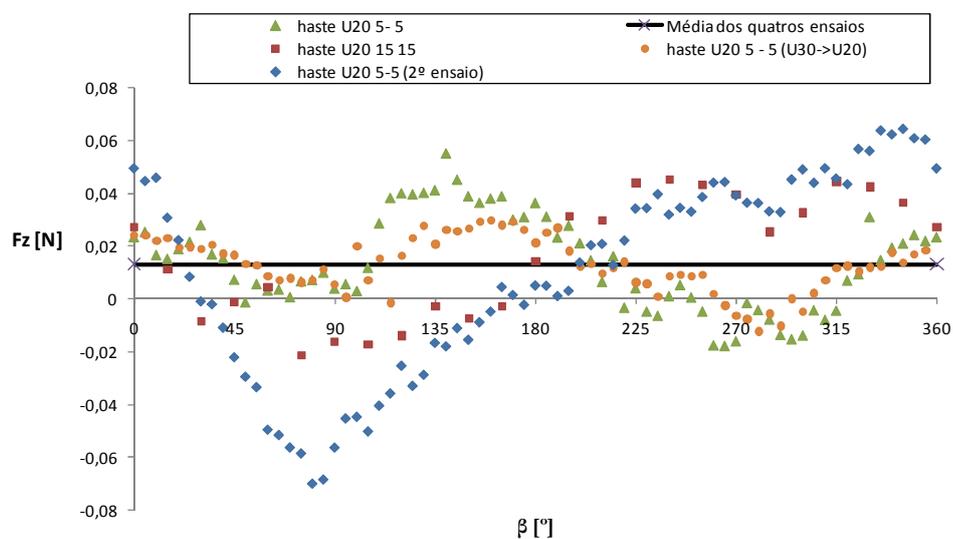


Gráfico 20 - Média da F_z da haste lateral em função da direcção do escoamento β .

Do valor médio dos ensaios, $F_{z\text{Médio}} = 0.0131\text{ N}$, verifica-se que a perturbação é mínima não se cometendo nenhum erro ao não se considerar as forças da haste lateral em z , entrando para os cálculos o total de (2) segundo z .

Na haste lateral falta analisar o momento aplicado segundo o plano xz , no *Gráfico 21* compara-se o M_y de quatro ensaios da haste lateral para velocidades de $U20$.

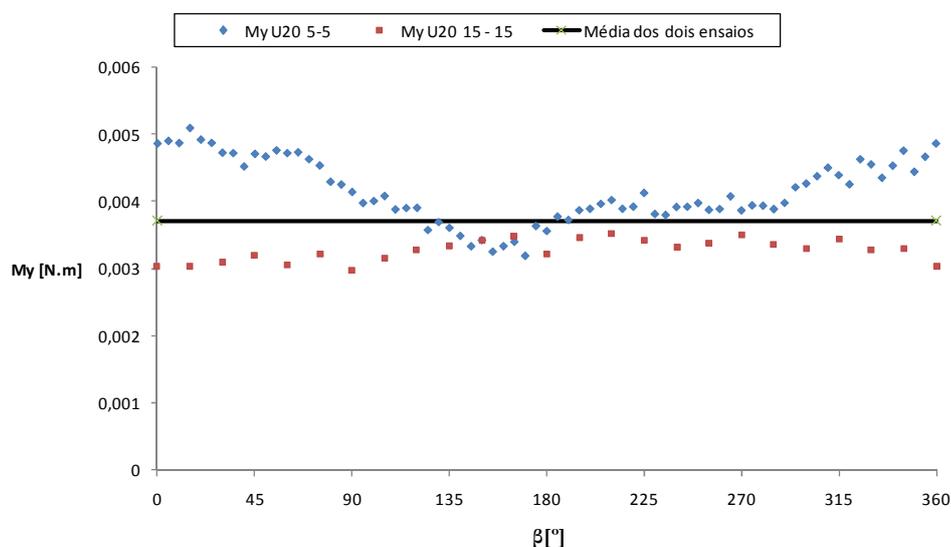


Gráfico 21 - Média do My da haste lateral em função da direção do escoamento β .

Da mesma forma e pelas mesmas razões que para F_z não se inseriu o M_y nos cálculos do “branco”, obteve-se um valor médio da interferência relativamente aos momentos característicos da haste lateral, $M_y = 0.00371 \text{ N.m}$, sendo um valor desprezável comparativamente com os valores adquiridos nos ensaios das pinhas reais.

Apenas iremos utilizar nos cálculos o F_x , desprezando o efeito das outras forças aplicadas não considerando a subtração inicial de (2) por (1) para o F_z e M_y .

No ensaio (2) da junção da haste lateral com a pinha artificial, devido à ligeira dispersão de resultados o tratamento de dados foi realizado recorrendo a funções polinomiais de aproximação. Quando o gráfico total (0° a 360°) não atinge os valores de aproximação (R^2) desejados, reparte-se o gráfico em dois, do 0° ao 180° e do 180° ao 360° , melhorando a aproximação.

No caso de F_x de (2), subtraiu-se primeiro o valor médio da haste lateral aos valores da pinha artificial antes de se aplicar a função de aproximação, estando na legenda a designação de pinha artificial de acordo com o Gráfico 22.

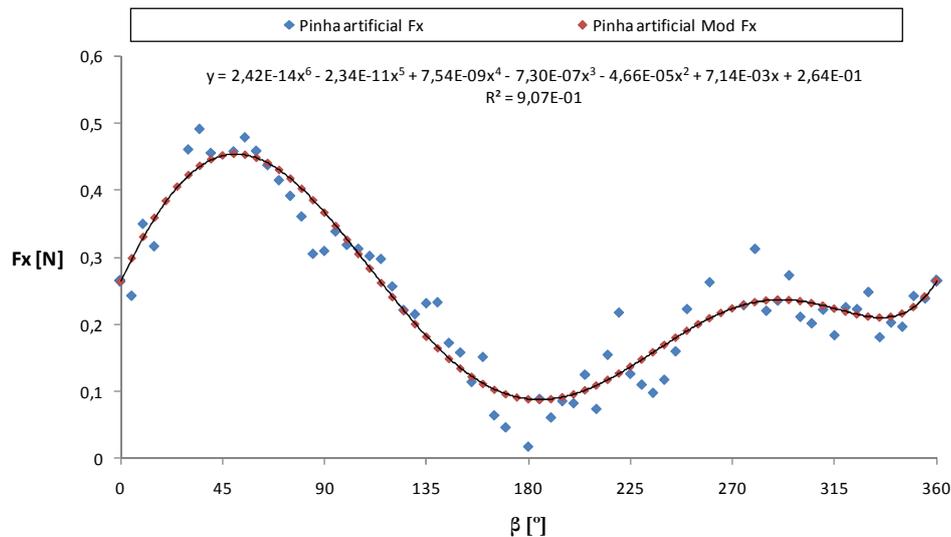


Gráfico 22 – Aproximação de F_x da pinha artificial ((2) – (1))

Verifica-se que a força máxima é aplicada nos 45° , coincidindo com a zona inferior do sulco mas o mesmo não se verifica para os 315° . Verifica-se uma ligeira simetria de valores para os 90° e os 270° , indicando que a pinha é simétrica longitudinalmente. A designação de “Mod” é referente ao modelo matemático, mais propriamente à regressão polinomial, neste caso de sexto grau de aproximação no intervalo de 0 a 180° e de 180 a 360° quando houver necessidade da divisão.

Da mesma maneira se obteve o gráfico para as forças no eixo do y , mas como não se considera a haste lateral, vamos ter as forças da pinha artificial igual às forças de (2), como se verifica no Gráfico 23.

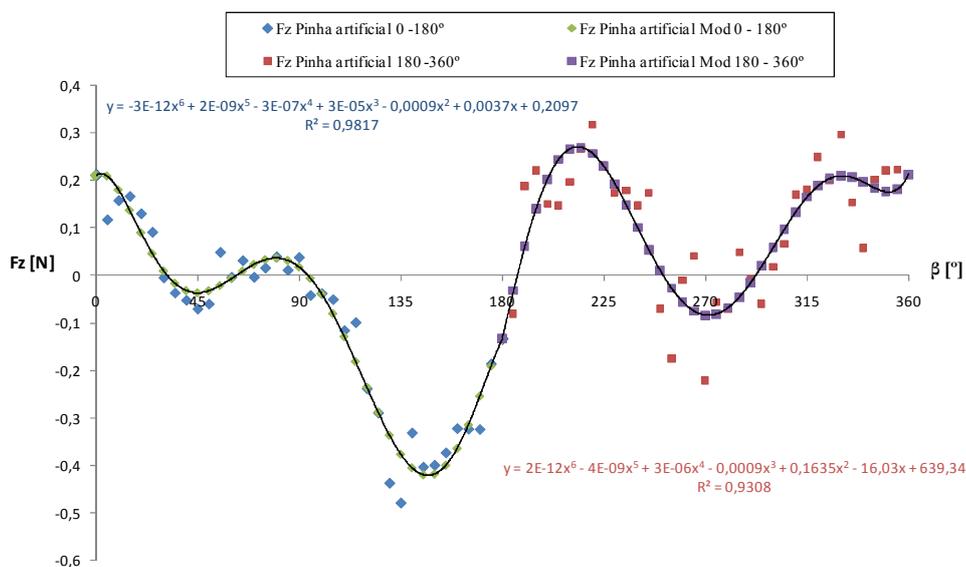


Gráfico 23 - Aproximação de F_z da pinha artificial (não considerando a haste lateral)

A divisão do gráfico é feita quando a aproximação da função polinomial for baixa e não conseguir acompanhar o perfil, de maneira a acumular o menor erro possível até à aquisição do valor final da haste em U. Da análise do *Gráfico 23* não se verifica simetria devido às deformidades da pinha artificial porque foi feita manualmente num torno e o furo de fixação da haste lateral poderá não estar aplicada no centro geométrico da pinha, resultando em dados não simétricos. O M_y aplicado à pinha artificial foi aproximado recorrendo a funções polinomiais de acordo com o *Gráfico 24*.

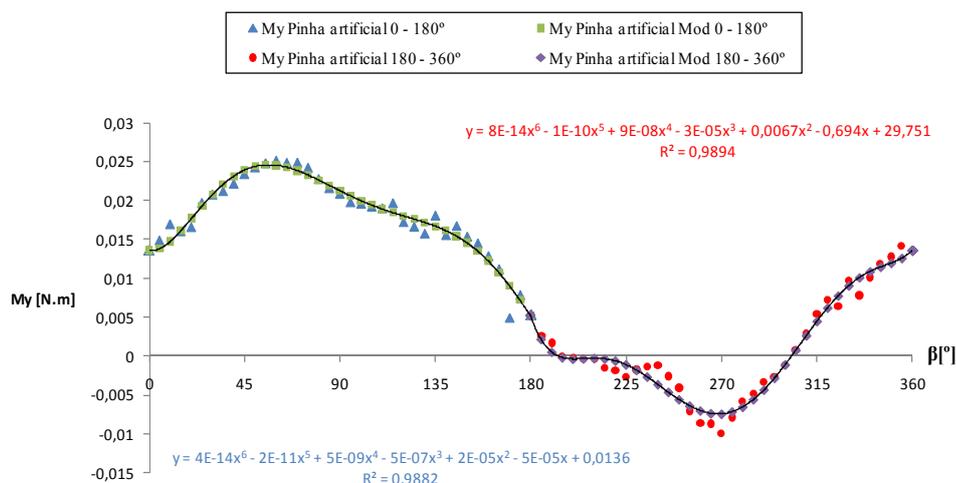


Gráfico 24 - Aproximação de M_y da pinha artificial (não considerando a haste lateral)

Os valores aproximados foram obtidos pela média de dois ensaios aplicando-se depois as funções, as medições foram sempre realizadas de 5 em 5 °.

O cálculo das forças e momentos do acoplamento da haste em U com a pinha artificial (3), foi feito da mesma maneira que para a haste lateral (2), aproximando a função polinomial aos resultados das forças obtidos em x, como representado no *Gráfico 25*.

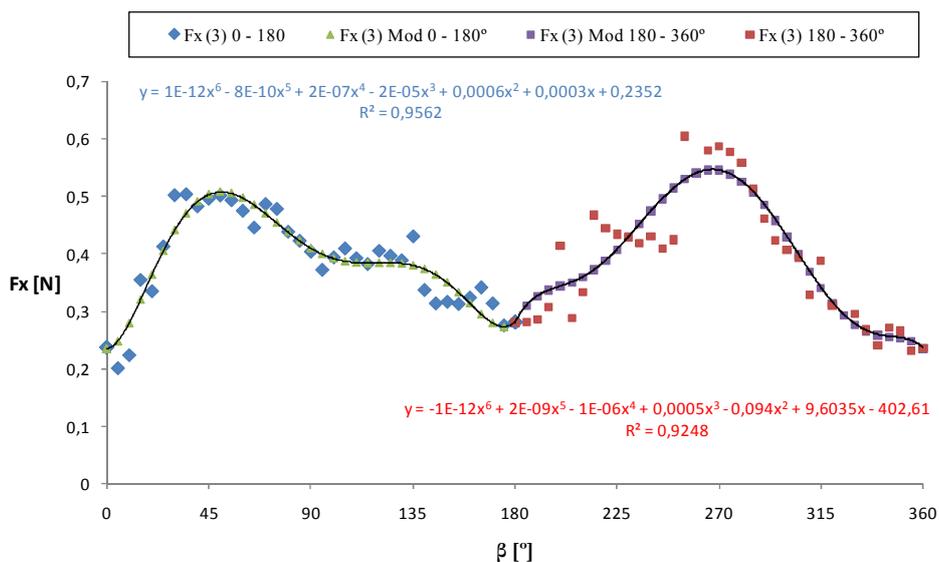


Gráfico 25 - Aproximação dos valores Fx da pinha artificial com haste em U (3).

Do gráfico anterior observa-se uma ligeira simetria relativamente aos 180° , apesar de os dois picos não terem valores iguais e serem para valores de 45° e 270° , não correspondendo, as menores forças são para os 0° , 180° e novamente 360° , coincidindo com as menores áreas representativas. Nos 180° , na junção dos dois modelos verifica-se uma ligeira concavidade devido à passagem de uma função para a outra. Os valores de F_z para (3) está representado no Gráfico 26.

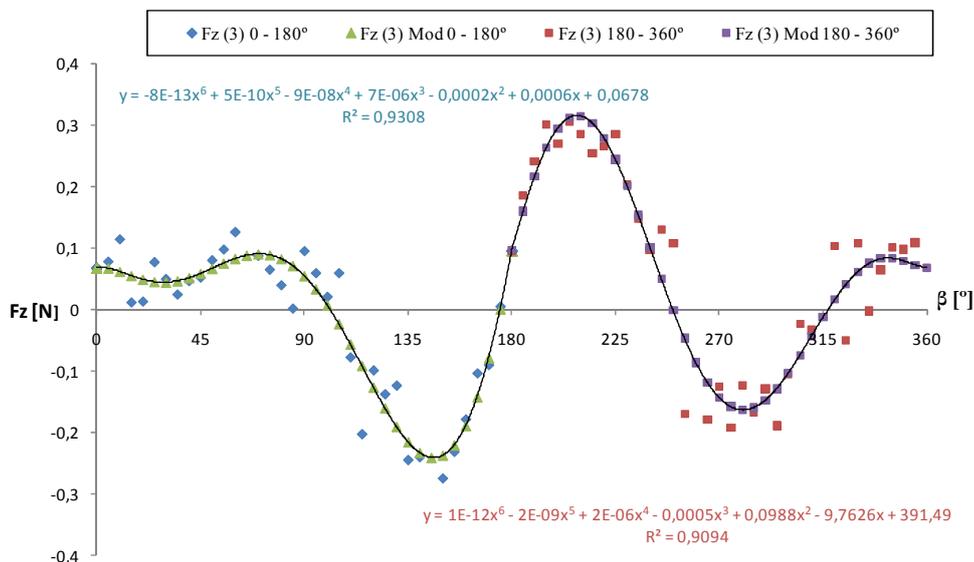


Gráfico 26 - Aproximação dos valores Fz da pinha artificial com haste em U (3).

Tal como se verificou para os valores de F_x , obtém-se uma pequena simetria relativamente aos 210° e entre os 45 e 360° , com picos nos 150° e 290° . No plano xz temos

os valores de My para (3) representado pela regressão de duas polinomiais de sexto grau no *Gráfico 27*.

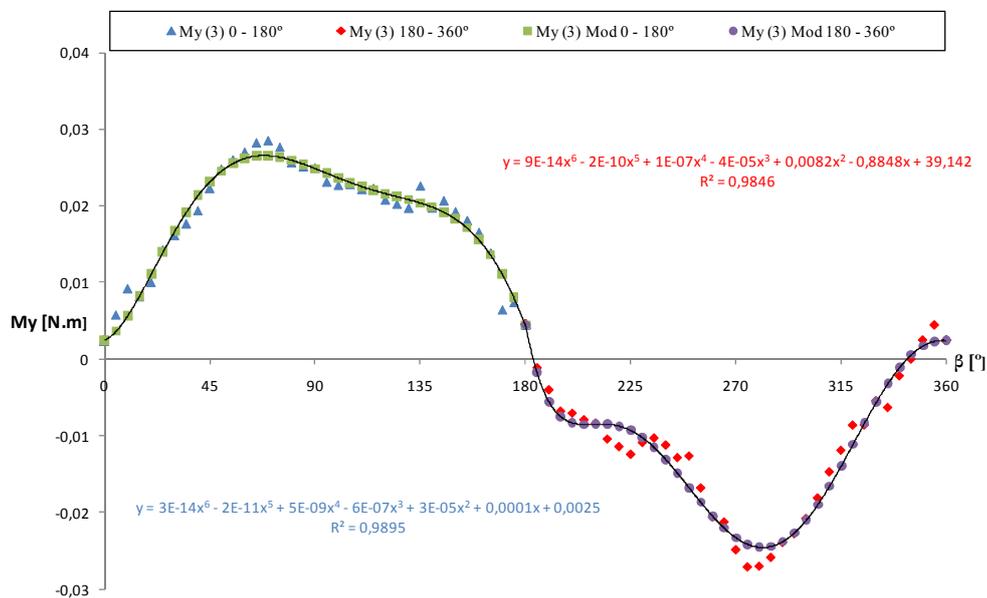


Gráfico 27 - Aproximação dos valores My da pinha artificial com haste em U (3).

Na análise do gráfico verificamos uma ligeira simetria em módulo relativamente aos 180° , observando-se uma tendência de rotação no sentido dos ponteiros do relógio entre os 0 e 180° e no sentido contrário entre os 180 e 360° .

Efeito da haste em U

Tendo os três ensaios já calculados, o efeito da haste em U é obtido de acordo com a sequência de subtrações seguinte da pinha artificial ao acoplamento da haste em U com a pinha artificial como indicado inicialmente. Adoptando a fórmula [28] às forças segundo o eixo x obtém-se a designação [29], adquirindo as características da pinha artificial subtraindo o ensaio (1) ao ensaio (2) e a haste em U subtraindo a pinha artificial ao ensaio (3), aplicando-se somente a subtração da pinha artificial ao conjunto da haste lateral com a haste em U, considerando já a subtração da haste lateral.

$$F_{x_{haste\ U}} = F_{x_{haste\ U+p.\ artificial}} - \left(F_{x_{haste\ lateral+p.\ artificial}} - F_{x_{haste\ lateral}} \right) \quad [29]$$

Os perfis da pinha artificial, do ensaio (3) e do resultado final da subtração, a haste U para x estão descritos no *Gráfico 28*.

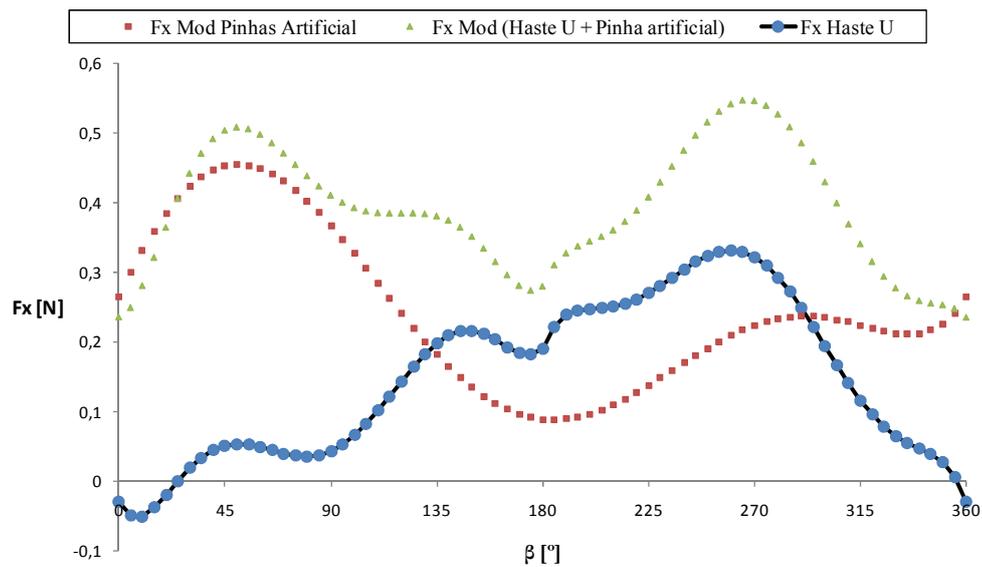


Gráfico 28 – Subtração da pinha artificial a (3), resultando a haste em U para F_x .

No *Gráfico 28* temos a vermelho o F_x da pinha artificial, a amarelo o da pinha artificial mais a haste em U e a azul o resultado final da subtração, a haste em U. Analisando o gráfico obtemos um valor de F_x negativo nos ângulos iniciais porque na subtração final a pinha artificial tem valores superiores aos de (3), dando assim valores negativos, o que na prática, tratando-se da mesma partícula não faz sentido esta ter forças de resistência superiores quando é considerada separadamente.

Aplicando a fórmula [28] ao eixo z obtemos [29]

$$F_{z\text{ haste } U} = F_{z\text{ haste } U+p. \text{ artificial}} - \left(F_{z\text{ haste lateral}+p. \text{ artificial}} - F_{z\text{ haste lateral}} \right) \quad [29]$$

A subtração da pinha artificial ao ensaio (3) segundo o eixo z é representada pelo *Gráfico 29*.

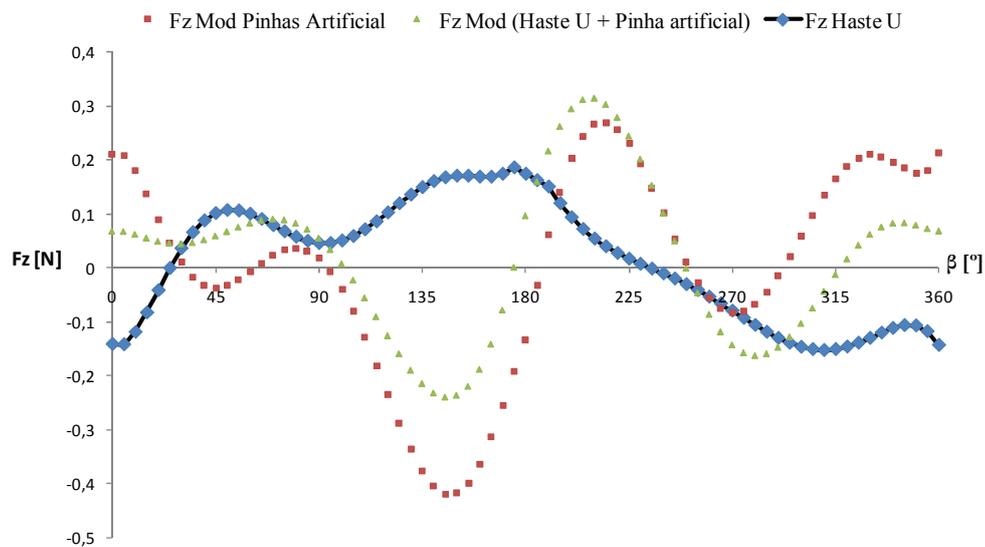


Gráfico 29 – Subtração da pinha artificial a (3), resultando a haste em U para Fz.

Temos a vermelho o F_z da pinha artificial, a amarelo o da pinha artificial mais a haste em U e a azul a representação da interferência da haste U, verificando-se uma interposição considerável entre os 135° e os 190° que coincide com o escoamento a incidir sobre a haste na zona de “concavidade”.

No cálculo dos momentos, obteve-se o perfil da haste em U subtraindo-se a pinha artificial ao conjunto da pinha artificial com a haste em U de acordo com [32], como se observa no *Gráfico 30*.

$$M_{y_{haste\ U}} = M_{y_{haste\ U+p.\ artificial}} - \left(M_{y_{haste\ latrl+p.\ artificial}} - M_{y_{haste\ latrl}} \right) \quad [32]$$

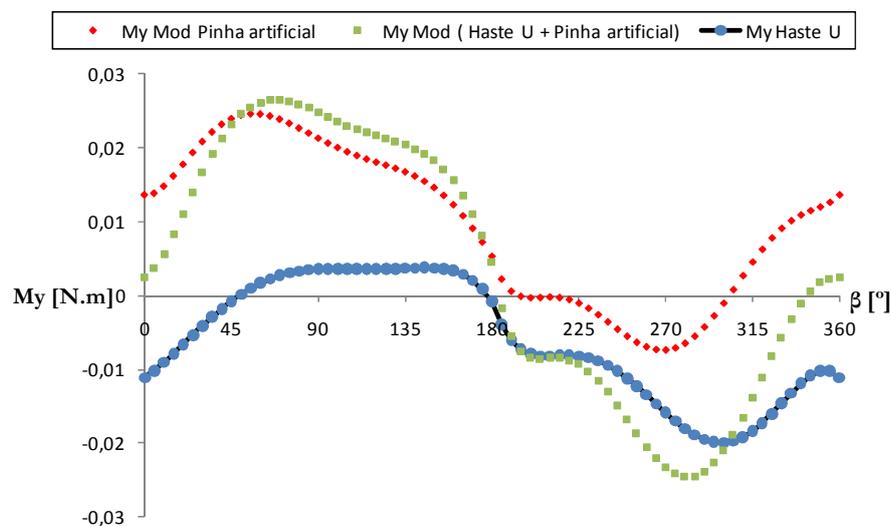


Gráfico 30 - Subtração da pinha artificial a (3), resultando a Interferência da haste U para My.

A haste U vai provocar um momento negativo adicional nos ensaios de pinhas reais no intervalo de 180 a 45° , o qual coincide com a “concavidade” da haste U.

Ensaio corrigido das amostras

Tendo calculado a interferência da haste U na incidência de escoamento para as forças e momento aplicado, basta subtraí-los às medições obtidas das amostras, ficando-se assim, somente com as forças e momento a que estão sujeitas as pinhas.

A percepção clara do efeito da haste é verificada comparando os perfis de pinhas corrigidas e não corrigidas, como se pode ver no *Gráfico 31* para a pinha PC5 os valores de F_x .

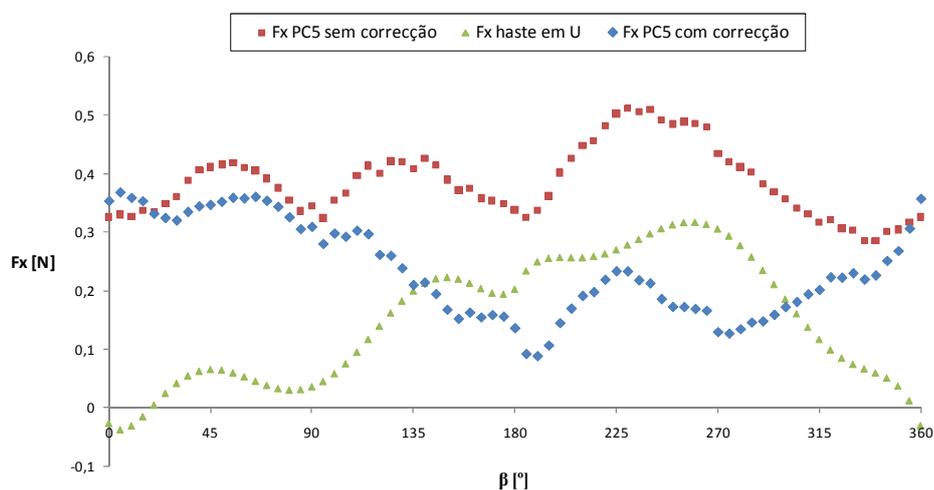


Gráfico 31 - Comparação de F_x não corrigido, corrigido e a interferência da haste U.

O efeito do branco veio aumentar a resistência segundo x entre os 100 e os 315° , verificando-se para a pinha com correção valores quase negativos para os 190° , observando-se valores de F_x consideráveis no intervalo entre os 270 e 135° .

A demonstração da força F_z é obtida da mesma maneira que para F_x , subtraindo o branco à amostra a corrigir, como se no *Gráfico 32*.

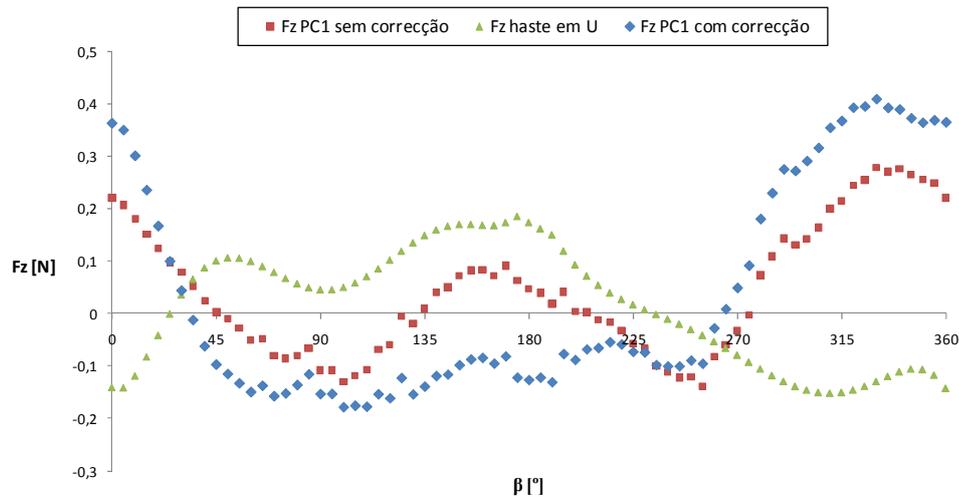


Gráfico 32 - Comparação de F_y não corrigido, corrigido e a interferência da haste U.

Neste exemplo utilizou-se a amostra PC1 para demonstrar a variação entre o perfil de uma pinha sem correção e com correção, observando-se uma redução da força aplicada sobre a haste em U entre os 20° e os 225° diminuindo o efeito de *lifting* e um incremento no restante intervalo.

No momento M_y a correção da interferência da haste é expressa no *Gráfico 33*, para a pinha PC6 segundo o plano xOz .

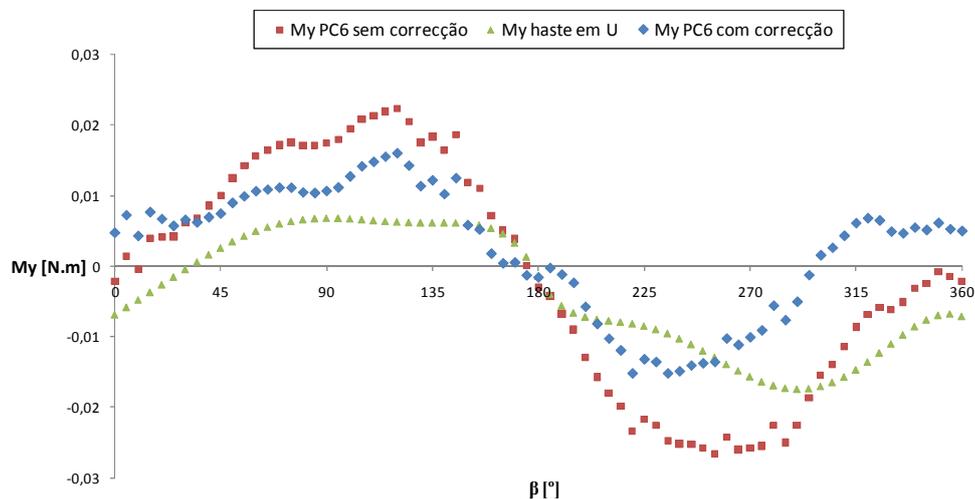


Gráfico 33 - Comparação de M_y não corrigido, corrigido e a interferência da haste U.

Do gráfico verificamos que a haste U estava aumentando o M_y positivo e negativo na parte superior e inferior da pinha respectivamente.

No entanto, apresentado a haste de fixação valores com grandezas equiparáveis às das pinhas, apresentamos o gráfico referente à correção de todos os ensaios de pinhas intactas para o coeficiente aerodinâmico no eixo do x , C_x , no *Gráfico 34*.

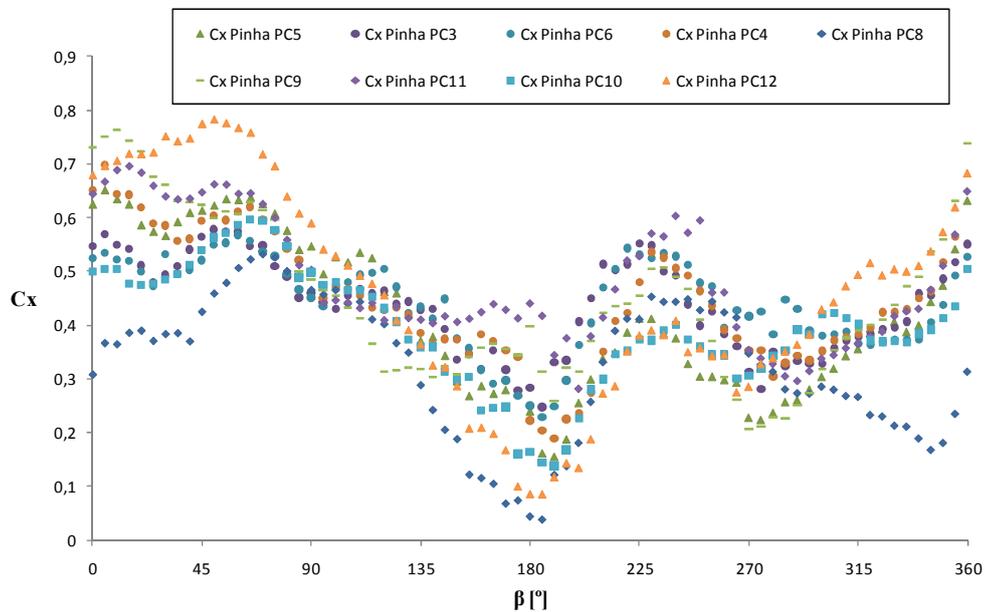


Gráfico 34 - Resultados de C_x das pinhas intactas corrigidas.

Após a correção vamos obter valores de C_x muito baixos na zona dos 180° devido à exagerada influência da haste nesta zona. Verificamos que as características aerodinâmicas das pinhas não são tão lineares como se verificou na análise das chapas, devido às suas irregularidades físicas, como a relação l/b_0 , G_A e a curvatura interna do coração, não conseguindo definir um perfil padrão, somente considerando um intervalo de variação.

A correcção das pinhas intactas para o coeficiente C_z é representada no *Gráfico 35*.

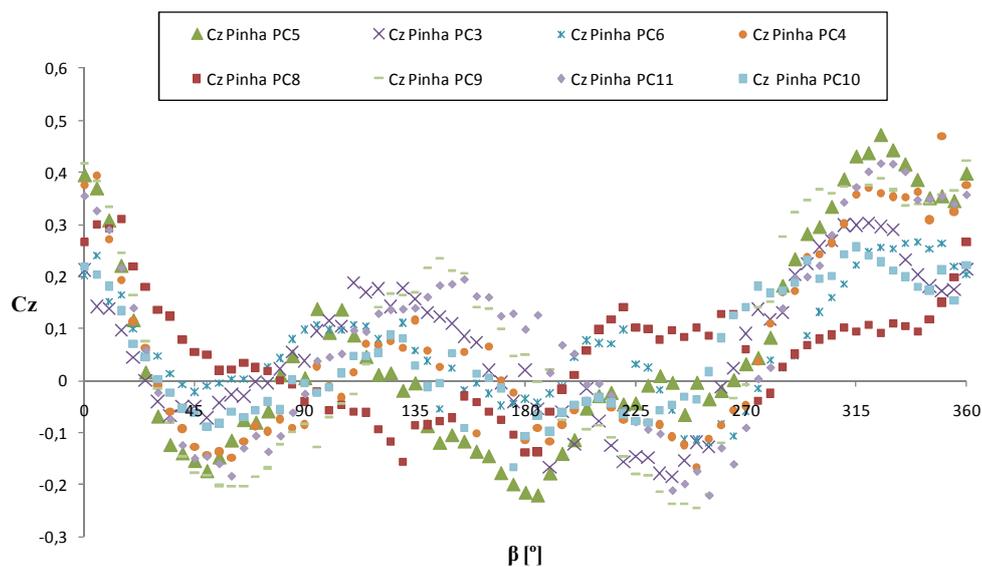


Gráfico 35 - Resultados de C_z das pinhas intactas corrigidas.

Verifica-se uma redução dos valores entre os 45° e os 225° para as diferentes espécies de pinhas, tendo valores consideráveis entre os 315° e 45° , zona de incidência do escoamento no pecíolo.

A correcção da interferência da haste U conforme o momento M_y para as amostras de pinhas intactas está representada no *Gráfico 36*.

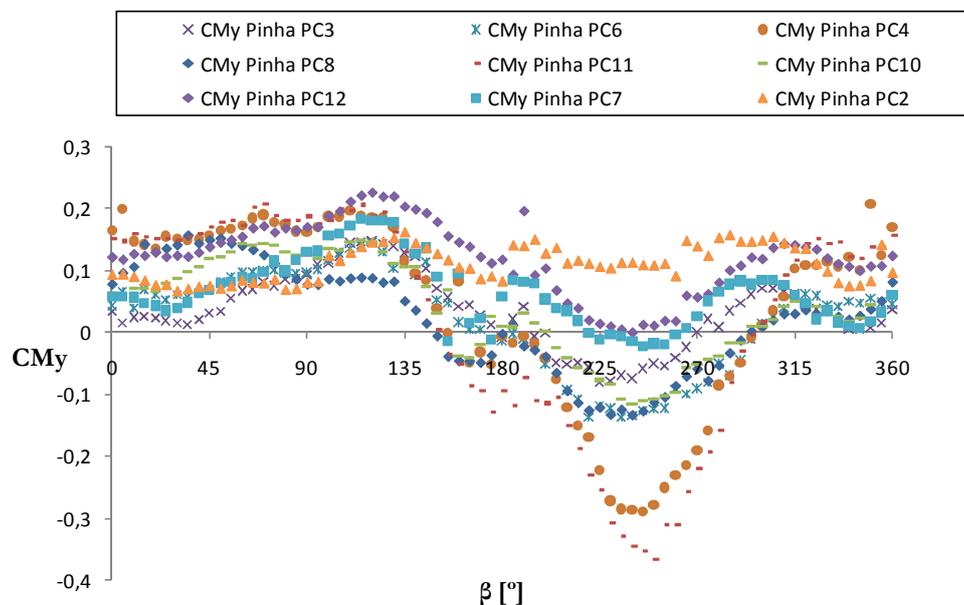


Gráfico 36 - Resultados de CM_y das pinhas intactas corrigidas.

Analisando a correcção do coeficiente CM_y verifica-se uma ligeira diminuição do momento, já não se verificando qualquer tipo de simetria, observando-se também

diversas amplitudes de momentos de acordo com as características de cada amostra, modificando consideravelmente os dados obtidos inicialmente sem correção.

Fazendo uma análise geral das correções obtidas pela influência da haste U verifica-se que a influência da haste U tem valores ligeiramente altos, tendo em conta que é uma haste cilíndrica e com pouca área exposta, não deveria estimular uma interferência tão elevada tanto nas forças em x e z como no momento segundo a rotação do eixo y , podendo ter ocorrido algum erro na obtenção do “branco” no cálculo das suas aproximações.

ANEXOS

Tabela 7 - Modelos Completos (0° - 360°) de Cx, Cz e CM_y.

<i>Coeficiente</i>	<i>Intervalo</i>	<i>Função Mod</i>	<i>Constantes</i>	<i>R²</i>
C_x	0° - 90°	$f(x) = a1 \cdot e^{((x-a2)^2/a3)} + a4 \cdot x$	a1=1,093 a2=85,47 a3= - 1,231E+5 a4= - 0.6460E-2	0.64
	90° - 180°	$f(x) = a1 \cdot x^{(a2 \cdot x + a3 \cdot x^2)} + a4$	a1=0,296E-2 a2=0,16E-1 a3= - 0,668E-4 a4= - 0.3129	0.84
	180° - 360°	$f(x) = a1 \cdot e^{((x-a2)^2/a3)} + a4 \cdot x$	a1=0,519 a2=0,235E+3 a3= - 0,343E+4 a4=0,145E-2	0.87
C_z	0° - 180°	$f(x) = a1 \cdot \cos(a2 \cdot x + a3) + a4$	a1=0,164 a2=0,385E-1 a3= - 0,129E+2 a4=0,117E-1	0.82
	180° - 360°	$f(x) = a1 \cdot \cos(a2 \cdot x + a3) + a4$	a1=0,144 a2=0,0388 a3= - 0,131E+2 a4=0,1698E-1	0.86
CM_y	0° - 180°	$f(x) = a1 + a2 \cdot x + a3 \cdot x^2 + a4 \cdot x^3$	a1=0,49E-2 a2=0,29E-2 a3= - 0,5E-5 a4=0,1308E-1	0.69
	180° - 360° (média)	$f(x) = a1 \sin(a2 \cdot x + a3) + a4$	a1=0,156 a2=0,0317 a3= - 0,9726E-1 a4= - 0,249	0.98

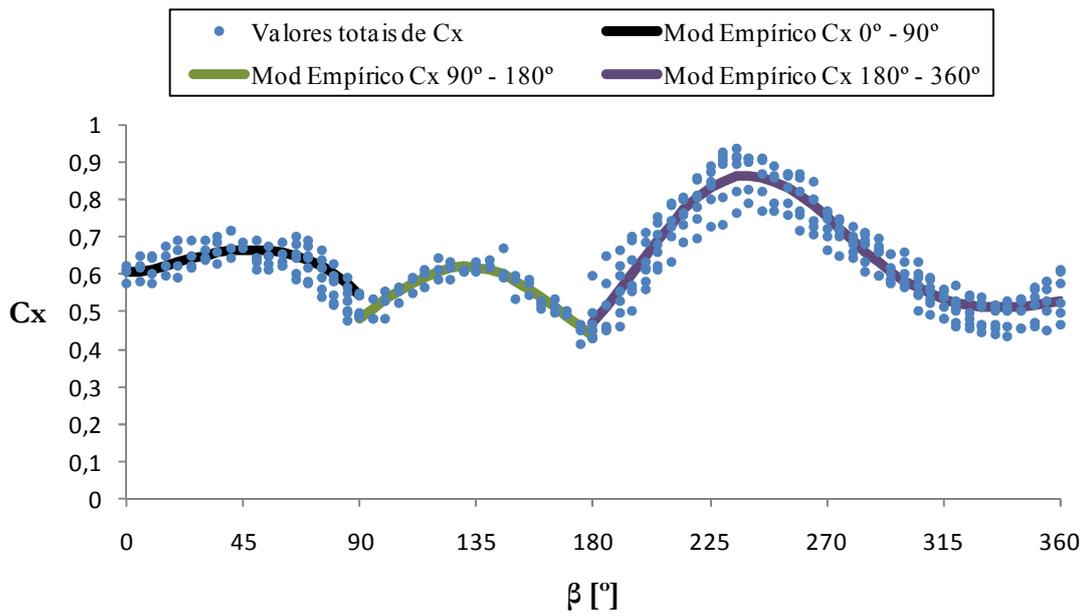


Gráfico 37 - Modelo Completo (0° - 360°) de C_x .

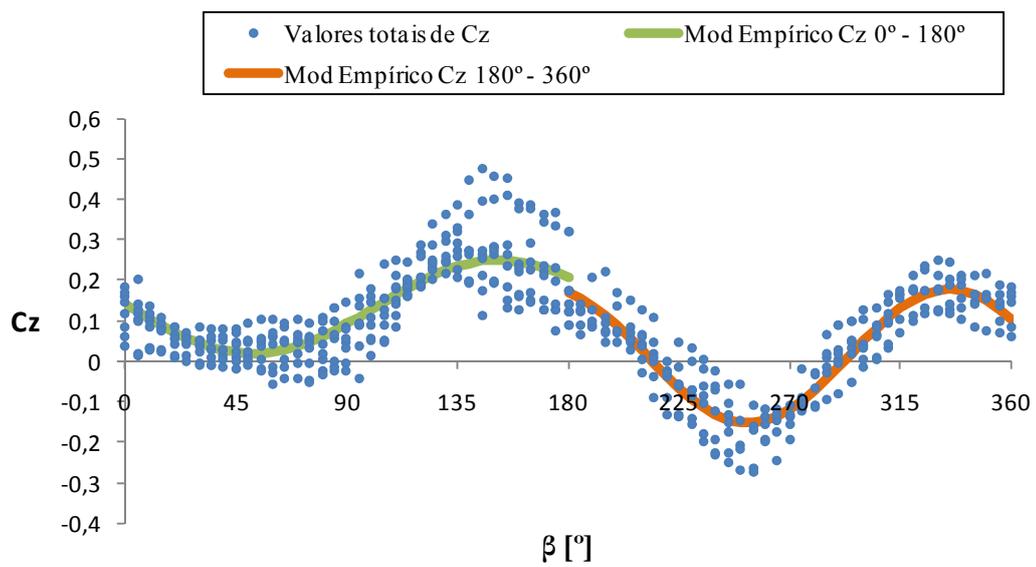


Gráfico 38 - Modelo Completo (0° - 360°) de C_z .

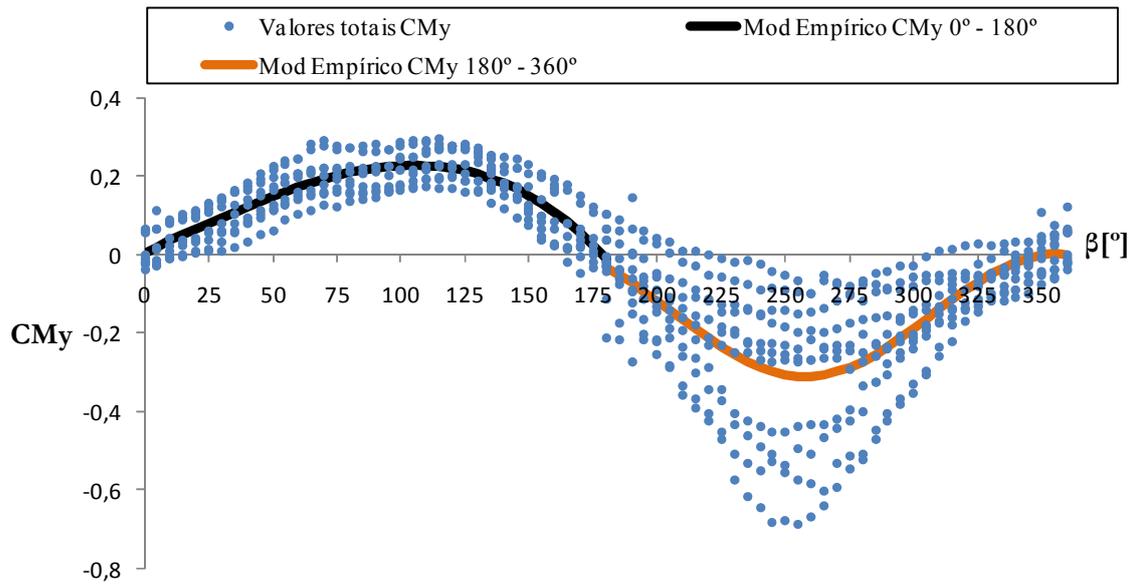
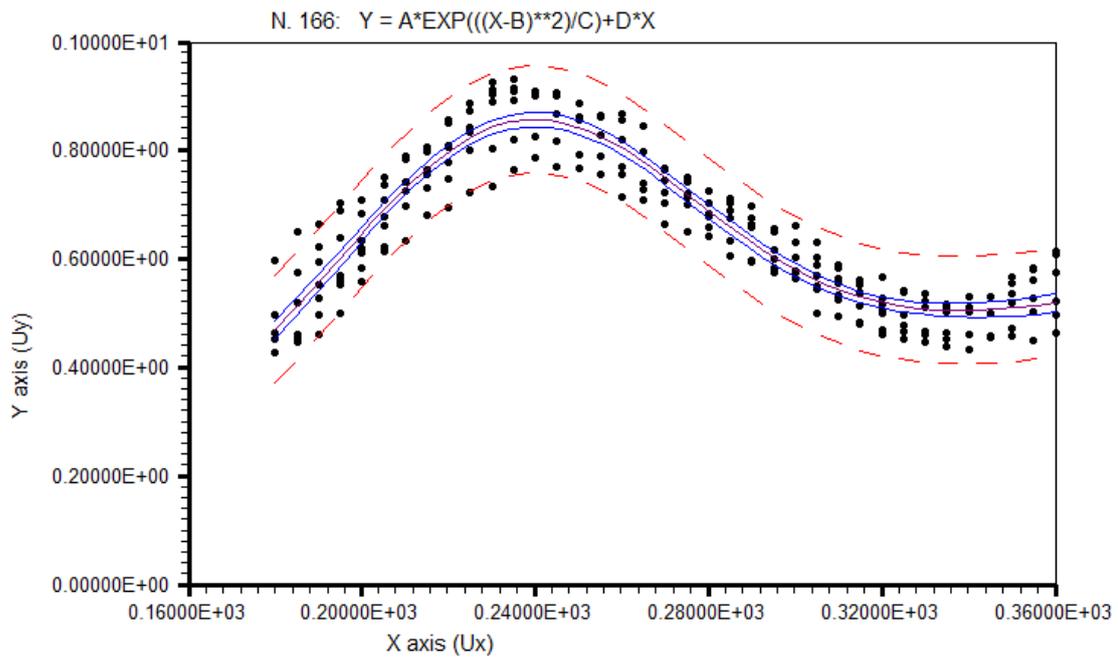


Gráfico 39 - Modelo Completo (0° - 360°) de CMy.



Legend
 $A=0.5189E+00$; $B=0.2352E+03$; $C=-.3427E+04$; $D=0.1426E-02$

Figura 26 - Gráfico da função de aproximação de C_x obtido no LABFit.

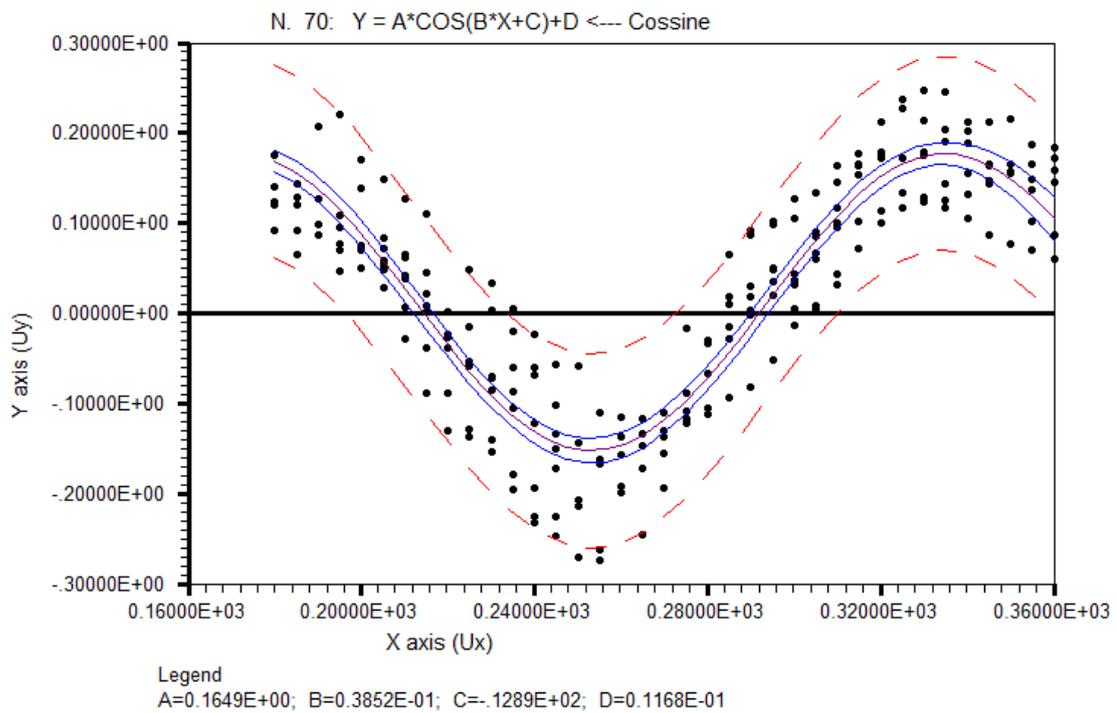


Figura 27 - Gráfico da função de aproximação de C_z obtido no LABFit.

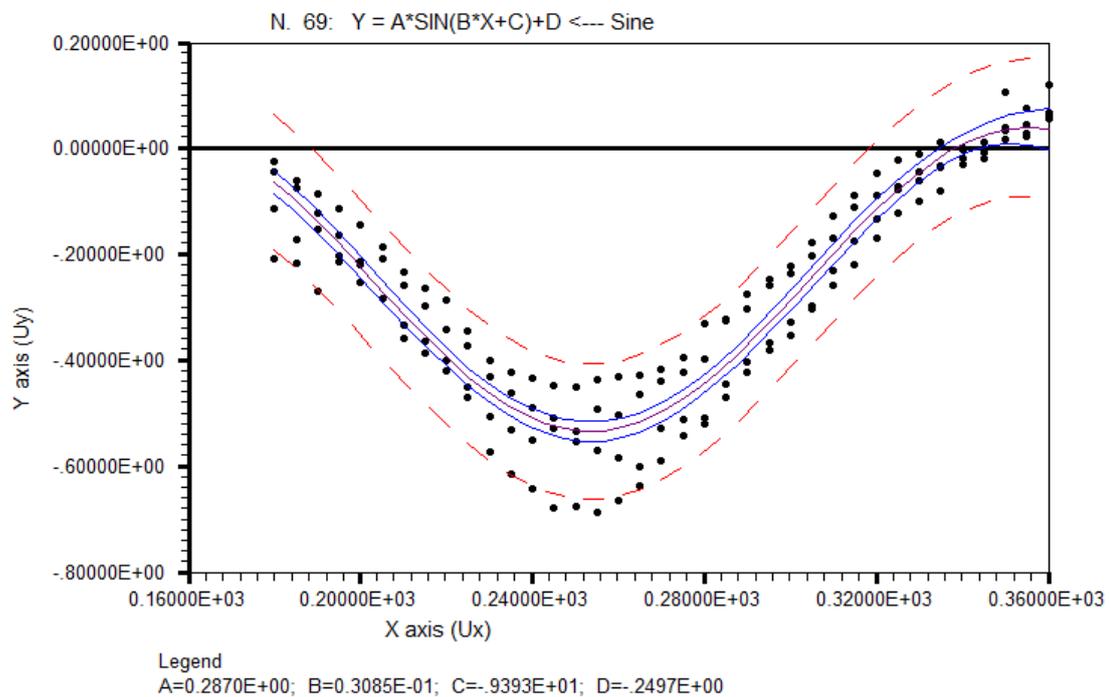


Figura 28 - Gráfico da função de aproximação de CM_y (P - M) obtido no LABFit.

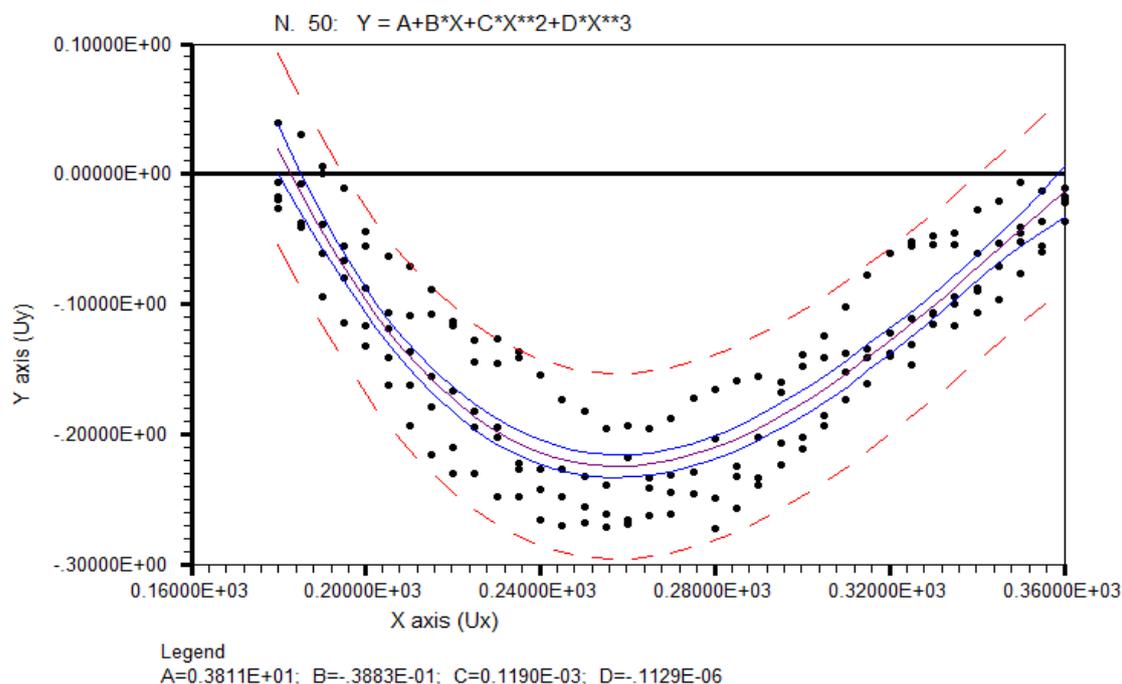


Figura 29 - Gráfico da função de aproximação de CMγ (G - L) obtido no LABFit.

Tabela 8 - Características das pinhas parcialmente queimadas.

Referência	Massa [g]	Perda de massa [%]	Diâmetro [cm]	Altura [cm]	Cx Máx	UT [ms^{-1}]
PcB1	25,15	15,6%	7,4	7,2	1,33	7,54
PcB2	35,9	24,9%	7,45	8,7	0,87	10,09
PcB3	55,8	29,2%	9,05	10,1	0,67	12,05
PcB4	43,48	21,5%	7,1	10,15	0,76	11,29
PcB5	19,8	38,1%	6,1	6,7	1,33	7,63
PcB6	37,4	23,2%	7,32	8,65	0,62	12,33
PcB7	53,22	29,4%	8,35	10,35	0,88	10,59
PcB8	42,13	27,1%	5,72	9,65	1,02	10,95
PcB9	12,9	55,2%	6,4	5,9	1,13	6,94
PcB10	18	62,1%	7,6	6,95	1,19	6,76
PcB11	31,7	51,4%	8,2	9,4	0,59	10,55
PcB12	18,52	61,7%	6,4	5,3	0,45	13,92
PcB13	11,23	61,0%	5,2	5,09	1,58	6,53
PcB14	15,6	67,2%	6,3	6,95	0,91	7,90
PcB15	23,93	63,3%	6,9	8,2	1,43	6,87
PcB16	12,32	74,5%	5,1	5,3	1,18	7,84
PcB17	6,17	78,6%	2,73	5,09	1,70	6,45
PcB18	11,42	76,0%	3,13	6,95	1,79	6,85
PcB19	12,72	80,5%	3,53	6,97	1,19	8,34
PcB20	7,69	84,1%	2,78	5,28	1,64	7,13