



FCTUC FACULDADE DE CIÊNCIAS  
E TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE DE COIMBRA

DEPARTAMENTO DE  
ENGENHARIA MECÂNICA

## **Estudo Aerodinâmico de Partículas Planas**

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

Autor

**Tiago Miguel de Oliveira Loureiro**

Orientadores

**Professor Doutor 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 Auxiliar Jorge Campos da Silva André** da  
Universidade de Coimbra

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

---



Coimbra, Setembro, 2011

“Se não se puder destacar pelo talento, vença pelo esforço.”

Dave Weinbaum

Aos meus pais, irmão e amigos

## Agradecimentos

O trabalho que se segue só foi possível graças à colaboração e apoio de algumas pessoas, às quais não posso deixar de prestar o meu reconhecimento e agradecimento, sendo impossível de nomear todas, quero agradecer:

Ao Professor Domingos Xavier Viegas pela honra que me deu ao aceitar-me como seu aluno de mestrado, pelos ensinamentos que me transmitiu, que me fizeram crescer como aluno e como pessoa. Agradeço toda a orientação neste trabalho e o facto de me ter deixado trabalhar na sua equipa de investigação, a equipa do CEIF.

Ao Mestre Miguel Almeida, investigador do CEIF, que me orientou na elaboração desta tese, na revisão bibliográfica, nos ensaios laboratoriais e no tratamento de dados recolhidos.

A toda a equipa do CEIF, que me acolheu e deu-me o privilégio da sua amizade, companheirismo e profissionalismo.

À minha prima Sónia pelo acompanhamento da escrita da minha dissertação.

Aos colegas e amigos de curso pelo ambiente fantástico e momentos que proporcionaram durante a minha vida académica.

À minha família que esteve sempre comigo e que sempre me apoiou tanto nos momentos em que me senti mais desorientado como nos bons momentos.

## Resumo

Este estudo foi realizado no âmbito dos focos secundários, onde foram estudadas as características aerodinâmicas de partículas incandescentes com capacidade para serem emitidas durante um incêndio florestal, mais propriamente num incêndio de uma floresta constituída por eucaliptos.

Este trabalho baseia-se no estudo do transporte aerodinâmico de partículas de cascas de tronco de eucalipto (*Eucalyptus globulus Lab.*) com forma plana, tendo para o efeito sido utilizado um túnel de vento com direcção do escoamento variável para a medição dos coeficientes aerodinâmicos ( $C_x$ ,  $C_z$  e  $CM_y$ ) das partículas.

Foi desenvolvido um modelo empírico com base nos resultados experimentais para cada coeficiente aerodinâmico, tendo a sua validação sido realizada através de ensaios em que as mesmas partículas foram deixadas cair de uma altura de 9,70 [m], na ausência de vento, o que permitiu comparar as velocidades terminais medidas em queda livre com as velocidades terminais obtidas através dos coeficientes aerodinâmicos. Foram também analisadas as velocidades terminais médias, medidas nos ensaios de queda livre, em função das características físicas das amostras de cascas de eucalipto.

A comparação das velocidades terminais, para verificação do modelo, não apresentou bons resultados, pois as velocidades terminais medidas na queda livre foram afectadas pelo seu movimento. As velocidades terminais dadas pelo modelo apresentaram recorrentemente valores inferiores às velocidades terminais medidas na queda livre.

A medição das velocidades terminais permitiu saber que a velocidade terminal depende da densidade das partículas planas e que as suas dimensões características não influenciam a velocidade terminal.

**Palavras-chave:** Focos secundários, transporte de partículas, partículas planas, coeficientes aerodinâmicos, modelo empírico, velocidades terminais.

## Abstract

This study was done in the spot fires, where we studied the aerodynamic characteristics of firebrands with the capacity to be emitted during a forest fire, more properly in a fire from a eucalyptus forest.

This work is based on study of particle transport, the aerodynamics of the trunk bark of eucalyptus (*Eucalyptus globulus Labill*) with flat form and has therefore was used a wind tunnel with variable direction for the monitoring of aerodynamic coefficient ( $C_x$ ,  $C_z$  and  $CM_y$ ) of the particles.

It was developed a empirical model based on experimental results for each aerodynamic coefficient, and its validation was performed through the same test in which particles have been dropped from an altitude of  $9,70\text{ m}$  in the absence of wind, which possible to compare the terminal velocities measured in free fall with terminal velocity obtained from the aerodynamic coefficients. We also analyzed the mean terminal velocities measured in tests of free fall due to the physical characteristics of samples of eucalyptus bark.

The comparison of the terminal velocity, to verify the model, did not present good results, because the terminal velocity in free fall measures was affected by your movement. Featuring the terminal velocity given by the model values always lower than the terminal velocities measured in free fall.

The measurements of the terminal velocity permitted know the terminal velocity depends on the density of the particles and flat features that the size does not affect the terminal velocity.

**Keywords** Spot fires, transport of firebrands, flat particles, aerodynamic coefficient, empirical model, terminal velocity.

## Índice

Índice de Figuras .....	v
Índice de Tabelas .....	vii
Simbologia e Siglas .....	viii
Simbologia.....	viii
Siglas .....	xi
1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1. Focos Secundários .....	4
1.2. Princípios Físicos .....	7
1.3. Objectivos .....	9
1.4. Estado da Arte.....	10
1.5. Estrutura da Dissertação .....	12
2. METODOLOGIA.....	13
2.1. Equipamento .....	14
2.1.1. Túnel de Combustão Oblíquo ( <i>TCO</i> ) .....	14
2.2. Amostras .....	16
2.3. Metodologia.....	19
2.3.1. Queda Livre de Partículas .....	19
2.3.2. Medição dos Coeficientes Aerodinâmicos .....	20
3. TRATAMENTO DE DADOS .....	25
3.1. Queda Livre de Partículas.....	25
3.2. Determinação dos Coeficientes Aerodinâmicos .....	27
3.2.1. Eliminação do Efeito Residual para Forças e Momentos.....	27
3.2.2. Conversão do Sinal em Força Referida aos Eixos de Referência.....	28
3.2.3. Conversão de $F_{x0}$ e $F_{z0}$ em $F_x$ e $F_z$ .....	29
3.2.4. Cálculo dos Momentos .....	30
3.2.5. Calculo dos Coeficientes Aerodinâmicos.....	30
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	31
4.1. Resultado dos Ensaios das Quedas Livres.....	31
4.2. Determinação dos Coeficientes Aerodinâmicos .....	34
4.2.1. Coeficiente de Resistência ( $C_x$ ) .....	34
4.2.2. Coeficiente de Sustentação ( $C_z$ ) .....	36
4.2.3. Coeficiente de Momento ( $CM_y$ ).....	37
5. MODELO EMPÍRICO .....	38
6. VALIDAÇÃO DO MODELO .....	45
7. CONCLUSÕES .....	49
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	52
ANEXO .....	55
Introdução aos ensaios em vazio .....	55
Calculo das forças e momento dos ensaios em vazio.....	56
Exemplo da correcção feita .....	67
Resultados das amostras com correcção.....	71

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 – Exemplo de um espécimen de <i>Eucalyptus globulus</i> Lab. ....	3
Figura 2 – Distribuição dos <i>Eucalyptus globulus</i> Lab. no mundo (National Biological Information Infrastructure e Discover Life) e em território português (Infopédia). ....	3
Figura 3 – Esquema de um episódio de um foco secundário .....	5
Figura 4 – Esquema do fenómeno de focos secundários (Ellis 2000).....	6
Figura 5 – Forças aerodinâmicas sobre um corpo. ....	7
Figura 6 – Forças aerodinâmicas resultantes.....	8
Figura 7 – Decomposição da força resultante. ....	8
Figura 8 – Esquema da metodologia adoptada.....	13
Figura 9 – Túnel de Combustão Obliquo .....	14
Figura 10 – Imagens do túnel oblíquo com diversas direcções de incidência do escoamento. ....	15
Figura 11 – Imagem da célula de carga.....	15
Figura 12 – Imagem do mecanismo de fixação.....	16
Figura 13 – Amostras de casca de <i>Eucalyptus globulus</i> com as dimensões em estudo. ....	17
Figura 14 – Amostras de madeira balsa ( <i>Ochroma pyramidale</i> ) com as dimensões em estudo.....	17
Figura 15 – Imagem da montagem experimental da queda livre das amostras.....	19
Figura 16 – Imagens da montagem experimental do TCO.....	20
Figura 17 – Esquema do referencial dos ensaios aerodinâmicos. ....	21
Figura 18 – Objecto de massa conhecida suspenso no TCO para calibração.....	22
Figura 19 – Esquema dos eixos da célula de carga ( $xx$ e $zz$ ) com os eixos horizontal ( $x_0$ ) e vertical ( $z_0$ ) de referência.....	22
Figura 20 – Exemplo de gráfico que relaciona sinal de força com a força aplicada. ....	23
Figura 21 - Esquema do sentido positivo do momento. ....	24
Figura 22 – Exemplo de gráfico que relaciona sinal de momento com o momento real aplicado.....	24
Figura 23 – Esquema da montagem experimental para correcção das posições retiradas das frames. ....	25
Figura 24 – Ângulo $\alpha$ , entre o módulo da força aplicada e o eixo horizontal de referencia $x_0$ . ....	28
Figura 25 – Eixos de referência ( $x_0$ e $z_0$ ) e eixo das forças ( $x$ e $z$ ).....	29
Figura 26 – Variação da velocidade terminal média com o coeficiente de forma $AR$ . ....	32
Figura 27 – Variação da velocidade terminal média com a densidade das amostras.....	33
Figura 28 – Resultados experimentais do valor de $C_x$ , para as várias amostras ensaiadas, em função da orientação do escoamento $\beta$ . ....	34
Figura 29 – Coeficiente de resistência das amostras em função do $AR$ . ....	35
Figura 30 – Resultados experimentais do valor de $C_z$ , para as várias amostras ensaiadas, em função da orientação do escoamento $\beta$ . ....	36
Figura 31 – Resultados experimentais do valor de $CM_y$ , para as várias amostras ensaiadas, em função da orientação do escoamento $\beta$ . ....	37
Figura 32 – Resultado da modelação do <i>LAB Fit</i> para o modelo do $C_x$ . ....	39
Figura 33 – Comparação do modelo com os pontos experimentais de $C_x$ . ....	40

Figura 34 – Resultado da modelação do <i>LAB Fit</i> para o modelo do $C_z$ .	40
Figura 35 – Comparação do modelo com os pontos experimentais de $C_z$ .	41
Figura 36 – Resultado da modelação do <i>LAB Fit</i> para o modelo do $CM_y$ .	42
Figura 37 – Comparação do modelo com os pontos experimentais de $CM_y$ .	43
Figura 38 – Modelos dos coeficientes aerodinâmicos com base nos dados experimentais obtidos.	43
Figura 39 – Erro das velocidades terminais em função do $AR$ .	48
Figura 40 – Resultados experimentais do valor de $F_x$ , para os ensaios da haste, em função da orientação do escoamento $\beta$ .	56
Figura 41 – Resultados experimentais do valor de $F_x$ , para os ensaios da haste, em função da orientação do escoamento $\beta$ .	57
Figura 42 – Resultados experimentais do valor de $M_y$ , para os ensaios da haste, em função da orientação do escoamento $\beta$ .	58
Figura 43 – Resultados experimentais do valor de $F_x$ , para os ensaios da haste soldada à placa $10 \times 10 \text{ cm}^2$ , em função da orientação do escoamento $\beta$ .	59
Figura 44 – Resultados experimentais do valor de $F_z$ , para os ensaios da haste soldada à placa $10 \times 10 \text{ cm}^2$ , em função da orientação do escoamento $\beta$ .	60
Figura 45 – Resultados experimentais do valor de $M_y$ , para os ensaios da haste soldada à placa $10 \times 10 \text{ cm}^2$ , em função da orientação do escoamento $\beta$ .	61
Figura 46 – Resultados experimentais do valor de $F_x$ , para os ensaios da haste com a garra soldada e a placa $10 \times 10 \text{ cm}^2$ , em função da orientação do escoamento $\beta$ .	62
Figura 47 – Resultados experimentais do valor de $F_z$ , para os ensaios da haste com a garra soldada e a placa $10 \times 10 \text{ cm}^2$ , em função da orientação do escoamento $\beta$ .	62
Figura 48 – Resultados experimentais do valor de $M_y$ , para os ensaios da haste com a garra soldada e a placa $10 \times 10 \text{ cm}^2$ , em função da orientação do escoamento $\beta$ .	63
Figura 49 - Valores de $F_x$ para o mecanismo de fixação, em função da orientação do escoamento $\beta$ .	64
Figura 50 – Valores de $F_z$ para o mecanismo de fixação, em função da orientação do escoamento $\beta$ .	65
Figura 51 – Valores de $M_y$ para o mecanismo de fixação, em função da orientação do escoamento $\beta$ .	66
Figura 52 – Comparação do $F_x$ corrigido e não corrigido, e o valor de $F_x$ do mecanismo de fixação, em função da orientação do escoamento $\beta$ .	67
Figura 53 – Comparação do $F_x$ corrigido e não corrigido, e a média do valor de $F_x$ do mecanismo de fixação, em função da orientação do escoamento $\beta$ .	68
Figura 54 – Comparação do $F_z$ corrigido e não corrigido, e o valor de $F_z$ do mecanismo de fixação, em função da orientação do escoamento $\beta$ .	69
Figura 55 – Comparação do $M_y$ corrigido e não corrigido, e o valor de $M_y$ do mecanismo de fixação, em função da orientação do escoamento $\beta$ .	70
Figura 56 – Resultados experimentais do valor de $C_x$ , para as várias amostras, com correcção.	71
Figura 57 – Resultados experimentais do valor de $C_x$ , para as várias amostras, com correcção, usando a média do efeito do mecanismo.	71
Figura 58 – Resultados experimentais do valor de $C_z$ , para as várias amostras, com correcção.	72
Figura 59 – Resultados experimentais do valor de $CM_y$ , para as várias amostras, com correcção.	73



## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 – Amostras utilizadas nos ensaios e suas características .....	18
Tabela 2 – Resultados das velocidades terminais das amostras .....	31
Tabela 3 – Velocidades terminais calculadas com base no modelo do $C_x$ .....	45
Tabela 4 – Comparação das velocidades terminais .....	46

## SIMBOLOGIA E SIGLAS

### Simbologia

$A [m^2]$  – Área representativa da amostra

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

$a_1, a_2, a_3, a_4$  – Coeficientes dos modelos

$AR$  – Factor de forma (“*Aspect de Ratio*”)

$C_F$  – Coeficientes aerodinâmicos de força

$C_M$  – Coeficiente aerodinâmico de momento

$C_x$  – Coeficiente de resistência

$CM$  – Centro de massa

$CM_y$  – Coeficiente de momento

$C_z$  – Coeficiente de sustentação

$d [m]$  – Deslocamento virtual da amostra entre duas frames

$e [mm]$  – Espessura das amostras

$F [N]$  – Força

$f_f [mV.g^{-1}]$  – Factor de conversão de sinal de forças da célula de carga em forças efectivas

$f_m [N.m.mV^{-1}]$  – Factor de conversão de sinal de 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  $F_x$ , contido no plano  $xoz$

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

$g [m.s^{-2}]$  – Aceleração gravítica

$l [cm]$  – Largura das amostras

$L [cm]$  – Comprimento das amostras

- 
- $m$  [g] – Massa das amostras
- $m_{real}$  [kg] – Massa real dos pesos
- $M$  [N.m] – Momento
- $Mod_s$  [mV] – Modulo do sinal da força aplicada
- $Mod'_s$  [mV] – Modulo do sinal da força aplicada do objecto suspenso
- $M_{real}$  [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
- $R$  – Coeficiente de correlação
- $RE$  – Relação de escala
- $t$  [s] – tempo
- $S$  [mV] – Sinal da célula de carga sem efeito residual
- $S'$  [mV] – Sinal com o efeito residual
- $Seq$  – Sequência de leitura dos dados do  $TCO$
- $SM_y$  [mV] – Sinal do momento enviado pela célula de carga em torno do eixo do  $y$  sem efeito residual
- $SM'_y$  [mV] – Sinal do momento enviado pela célula de carga em torno do eixo do  $y$  do objecto suspenso
- $S_x$  [mV] – Sinal da força segundo  $xx$  enviado pela célula de carga, sem efeito residual
- $S'_x$  [mV] – Sinal da força segundo  $xx$  enviado pela célula de carga, do objecto suspenso
- $S_z$  [mV] – Sinal da força segundo  $z$  enviado pela célula de carga, sem efeito residual
- $S'_z$  [mV] – Sinal da força segundo  $zz$  enviado pela célula de carga, do objecto suspenso
- $U$  [m.s<sup>-1</sup>] – Velocidade do escoamento
- $U_{CT}$  [m.s<sup>-1</sup>] – Velocidade ascendente gerada pela coluna térmica
- $U_t$  [m.s<sup>-1</sup>] – Velocidade terminal da amostra
- $U_x$  [m.s<sup>-1</sup>] – Velocidade do vento segundo  $x$
- $U_{xt}$  [m.s<sup>-1</sup>] – Velocidade horizontal dentro da coluna térmica

- $V [m.s^{-1}]$  – Modulo da velocidade da amostra  
 $V_x [m.s^{-1}]$  – Velocidade da amostra de segundo o eixo  $x$   
 $V_y [m.s^{-1}]$  – Velocidade da amostra segundo o eixo  $y$   
 $V_z [m.s^{-1}]$  – Velocidade da amostra segundo o eixo  $z$   
 $x$  – eixo coincidente com a direcção da velocidade do escoamento  
 $x_0$  – Eixo horizontal de referencia  
 $x'_n [m]$  – Posição virtual da amostra em relação ao eixo do  $x$   
 $x'_{n+1} [m]$  – Posição virtual da amostra posterior a posição  $n$  em relação ao eixo do  $x$   
 $xx$  – Eixo da célula de carga  
 $y$  – Eixo perpendicular ao plano  $xoz$   
 $y'_n [m]$  – Posição virtual da amostra em relação ao eixo do  $y$   
 $y'_{n+1} [m]$  – Posição virtual da amostra posterior a posição  $n$  em relação ao eixo do  $y$   
 $z$  – Eixo perpendicular a direcção da velocidade do escoamento  
 $z [m]$  – Posição real da amostra em relação ao eixo do  $z$   
 $x_0$  – Eixo vertical de referencia  
 $z' [m]$  – Posição virtual da amostra em relação ao eixo do  $z$   
 $z'_n [m]$  – Posição virtual da amostra em relação ao eixo do  $z$   
 $z'_{n+1} [m]$  – Posição virtual da amostra posterior a posição  $n$  em relação ao eixo do  $z$   
 $zz$  – Eixo da célula de carga  
 $\alpha [^\circ]$  – Ângulo do módulo do sinal com o eixo horizontal de referência  
 $\beta [^\circ]$  – Ângulo de orientação do escoamento com a amostra  
 $\delta [^\circ]$  – Ângulo de perspectiva inferior  
 $\varepsilon [^\circ]$  – Ângulo de perspectiva superior  
 $\theta [^\circ]$  – Ângulo de desfasamento da célula de carga  
 $\rho [kg.m^{-3}]$  – Densidade das amostras  
 $\rho_{ar} [kg.m^{-3}]$  – Densidade do ar atmosférico  
 $\tau [N.m^{-2}]$  – Tensão viscosa na superfície do corpo

## Siglas

*An* – Ensaio anulado

ADAI – Associação para o Desenvolvimento da Aerodinâmica Industrial

AR – Coeficiente de forma “Aspect Ratio”

CEIF – Centro de Estudos sobre Incêndios Florestais

DEM – Departamento de Engenharia Mecânica

FCTUC – Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra

*fps* – Fotogramas por segundo

TCO – Túnel de combustão oblíquo

## 1. INTRODUÇÃO

A realização desta dissertação está enquadrada no estudo dos incêndios florestais, mais propriamente num dos mecanismos de comportamento extremo do fogo, os focos secundários.

O fenómeno dos focos secundários pode ser remetido para o caso mais simples de uma fogueira ao ar livre. Observando-a, repara-se na elevação pela pluma térmica de partículas incandescentes de várias dimensões. As partículas de menores dimensões rapidamente desaparecem porque se apagam ou porque são consumidas pela combustão. As partículas maiores são transportadas pelo vento, afastando-se da fogueira ainda em combustão. Numa situação de incêndio florestal, a pluma térmica tem uma maior intensidade e velocidade ascendente, fazendo com que haja a libertação de partículas de maiores dimensões, relativamente à simples fogueira.

Este estudo foi desenvolvido com a cooperação da Associação para o Desenvolvimento da Aerodinâmica Industrial (ADAI), onde está integrado o Centro de Estudos sobre Incêndios Florestais (CEIF), da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra (FCTUC).

Pode dar-se o nome de foco secundário a um episódio onde ocorra emissão de uma partícula em combustão, sendo transportada pelo vento para fora da frente de fogo, caindo, ao fim de um certo tempo, no chão provocando a ignição do leito.

A projecção de partículas incandescentes pode manifestar o seu potencial de perigosidade aumentando a velocidade da frente de incêndio se caírem relativamente perto da frente que as originou, ou podem provocar um foco de incêndio a alguns quilómetros de distância. Tanto num caso como outro aplica-se o conceito de focos secundários de incêndios florestais.

Um dos acontecimentos mais comuns no combate a incêndios florestal é o aparecimento, a poucos quilómetros de distância, de um novo foco de incêndio, que pode originar uma nova frente de incêndio, devido às projecções mais distantes. Como normalmente os bombeiros concentram os esforços numa frente de fogo, o aparecimento destes focos pontuais a alguns quilómetros de distância leva a um incremento da

dificuldade de combate pela dispersão de meios que acarreta, o qual pode ser minorado através de uma detecção precoce. Os bombeiros têm de ser extremamente rápidos a actuar sobre estes novos focos pontuais, o que nos remete para a importância de uma previsão dos locais onde as partículas incandescentes irão cair, para que os meios no terreno se possam encontrar organizados para o combate atempadamente destes pequenos focos. Esta previsão permite aos bombeiros estarem mais atentos a esses locais e consequentemente actuarem mais rapidamente. Para realizar esta previsão são necessários estudos com vista à determinação dos trajectos que as partículas incandescentes podem seguir.

Para o estudo dos focos secundários é necessário o conhecimento dos princípios físicos que explicam o transporte de partículas, nomeadamente no que se refere ao escoamento produzido pelo vento que transporta a partícula incandescente fora da pluma térmica.

A importância deste estudo advém da facilidade das partículas incandescentes transportadas pelo vento têm em superar barreiras naturais e táticas de combate a incêndios, criando grandes dificuldades na supressão do fogo. O aprisionamento de bombeiros é uma preocupação constante para os comandantes das corporações, nas decisões que tomam, devido à possibilidade de ocorrência de focos secundários (Byram, 1959; McArthur, 1967). Tendo em conta este facto, existe uma grande necessidade de investigação da combustão e das características aerodinâmicas das potenciais partículas que podem ser emitidas por um incêndio florestal de maneira a prever com alguma precisão as distâncias que podem ser percorridas por essas partículas (Ellis, 2000).

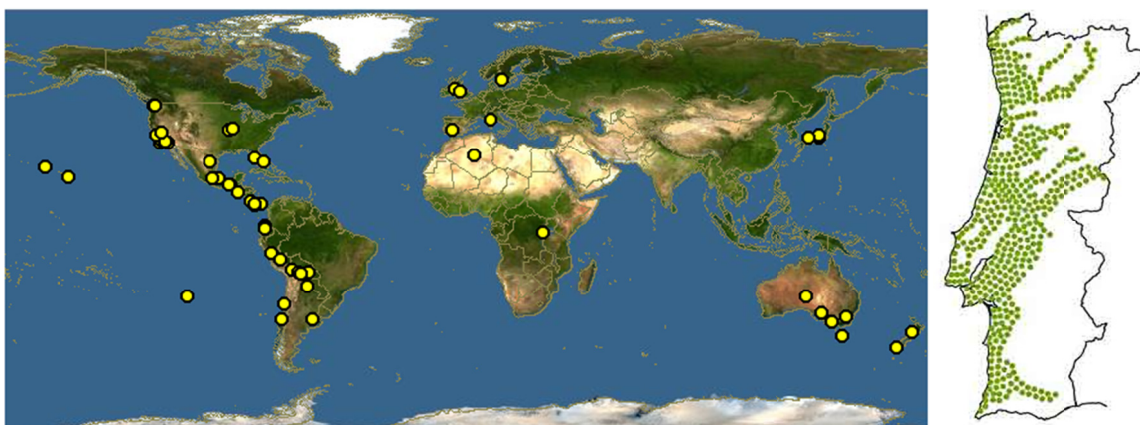
Uma das partículas mais perigosas, até agora identificadas, que podem provocar um foco secundário, é a casca de eucalipto (McArthur, 1967; Cheney e Bary, 1969), sendo esta, o tipo de amostra em estudo. Na natureza, estas podem aparecer fundamentalmente em duas formas distintas, em longas tiras aproximadamente planas, ou enroladas com uma forma aproxima de um cilíndrico.

Na *Figura 1* está representado um exemplar de *Eucalyptus globulus Labill*, onde podemos observar as cascas presas ao troco. Na presença de um incêndio, as cascas poderão ser libertadas devido à combustão ou pela força do escoamento provocado pela pluma térmica, sendo elevadas posteriormente pela mesma e na presença de vento, poderão ser transportadas para um local onde podem ou não iniciar um foco secundário.

Esta espécie de eucalipto, originário da Tasmânia-Austrália (Vitti e Brito, 2003), é hoje uma das árvores mais representativas das florestas de exploração, sendo utilizadas para fabrico de pasta de papel e óleo essencial de eucalipto (Vitti e Brito, 2003). Na *Figura 2* mostra-se a distribuição do *Eucalyptus globulus Labill* no mundo e no território nacional.



**Figura 1 – Exemplo de um espécimen de *Eucalyptus globulus Lab.***



**Figura 2 – Distribuição dos *Eucalyptus globulus Lab.* no mundo (National Biological Information Infrastructure e Discover Life) e em território português (Infopédia).**

Como é visível no mapa-mundo, as plantações de *Eucalyptus globulus Lab.* distribuem-se pela América central, América do Sul, Austrália, Europa e com menos incidência na África e na Ásia. No nosso país as plantações ocupam praticamente metade do território português. Visto esta distribuição no mundo e o crescimento do número de



plantações de eucaliptos, o problema do fenómeno dos focos secundários pode afectar todo o mundo e cada vez com mais frequência, quando se tem condições propícias a incêndios florestais.

As ocorrências mais graves de focos secundários em todo o mundo, tanto em termos de distância como concentração de focos secundários, têm sido documentadas na Austrália (Ellis, 2000), uma vez que este país apresenta grandes manchas de eucaliptal, com uma topografia do terreno e condições meteorológicas favoráveis à ocorrência de incêndios e por consequência, o aparecimento de focos secundários.

### **1.1. Focos Secundários**

O processo pelo qual as partículas incandescentes são emitidas e transportadas, desde a frente principal do fogo para outras zonas a jusante do vento, dando origem a novos incêndios são chamados de focos secundários (Byram, 1959; Tarifa et al., 1967; McArthur, 1967; Albin, 1979). Este comportamento de propagação do fogo é característico dos grandes incêndios (Byram 1959) principalmente em tipos de floresta de eucalipto (McArthur 1967; Cheney e Bary, 1969). As partículas incandescentes podem ser transportadas somente pelo vento (Byram, 1959; Hodgson, 1968), ou erguidas pela pluma térmica provocada pelo incêndio, ou ainda serem levantadas por vórtices verticais formados pelo próprio incêndio.

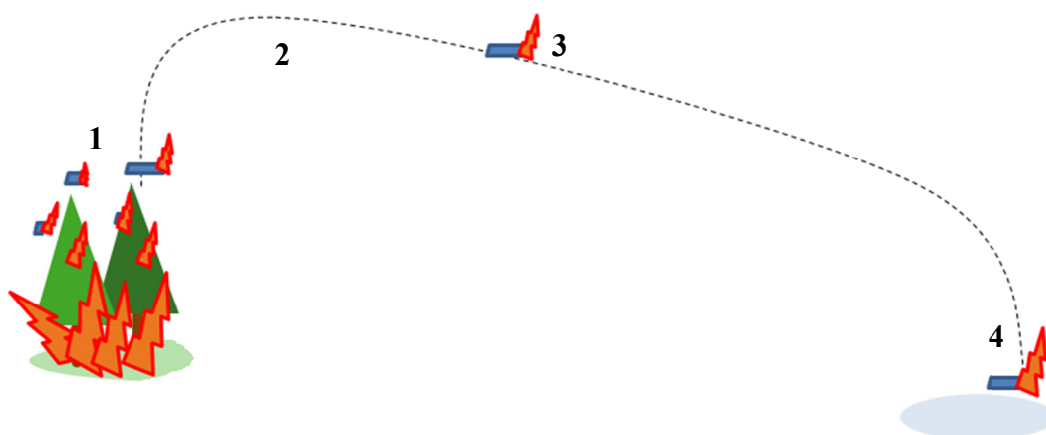
Este fenómeno pode ser caracterizado em termos de distância do incêndio que lhe deu origem e em termos de escala temporal (Byram, 1959; McArthur, 1967; Cheney e Bary, 1969). Os focos secundários podem ser classificados em quatro tipos (Byram, 1959; McArthur, 1967; Cheney e Bary, 1969):

- Focos secundários com ignição contínua de alta densidade a curtas distâncias, que aumentam a velocidade da frente de chama (Viegas, 2010);
- Focos secundários com ignição simultânea até 1 *km* de distância da frente de chama;
- Focos secundários com ignição de grupos isolados de focos secundários à distância da frente de chama de vários quilómetros;

- Focos secundários de incêndios isolados a dezenas de quilômetros de distância da frente de chama.

O fenómeno dos focos secundários depende do sentido do campo de ventos no momento em que o incêndio lavra, da intensidade de combustão, das propriedades da partícula incandescente que está a ser transportada, factores meteorológicos e as características topográficas do terreno (Byram, 1959; McArthur, 1967; Tarifa et al., 1967; Cheney e Bary, 1969).

O aparecimento de um episódio de foco secundário pode ser dividido em quatro fases distintas (*Figura 3*): (1) emissão de partículas, (2) transporte das partículas, (3) combustão das partículas e (4) queda das partículas com probabilidade de ignição do leito.

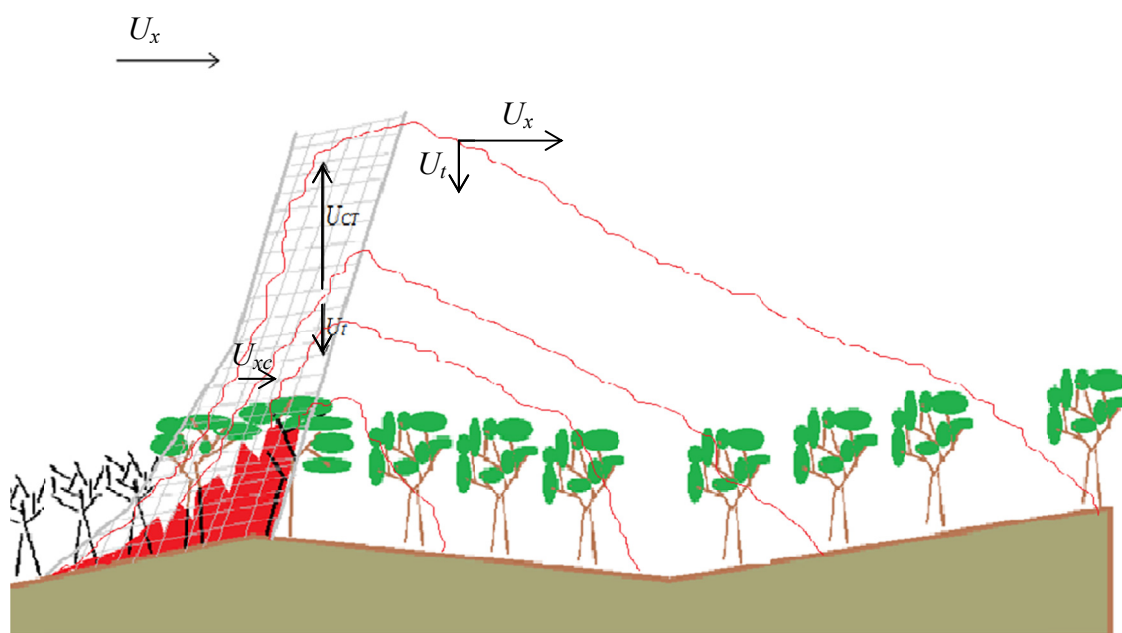


**Figura 3 – Esquema de um episódio de um foco secundário**

A emissão das partículas (1), depende da intensidade do incêndio, do tipo de partículas a emitir e do campo de ventos. O transporte da partícula (2), pode ocorrer dentro da pluma térmica e fora dela, e depende das características físicas da partícula incandescente, da velocidade de combustão da mesma e da intensidade do campo de ventos. A combustão da partícula (3), ocorre durante simultaneamente na fase da emissão da partícula (1) e no seu transporte (2), dependendo das características físicas, do seu teor de humidade, do tipo de combustão e do tipo de movimento que tem em relação ao escoamento. A queda das partículas com probabilidade de ignição do leito de combustível (4), depende do tipo de combustão que a partícula tem no momento de contacto com o solo podendo apresentar-se em combustão com chama ou em combustão sem chama, o teor de humidade do leito, da forma como se encontra disposto o leito e da forma como a partícula

incandescente se posiciona no leito de combustíveis onde aterra (Byram, 1959; McArthur, 1967; Cheney e Bary, 1969; Lucas e McArthur, 1978).

De seguida apresentamos um esquema (*Figura 4*) representativo de um incêndio, onde ocorre focos secundários com base no conhecimento das publicações dos autores atrás mencionados:



**Figura 4 – Esquema do fenómeno de focos secundários (Ellis 2000)**

No esquema acima estão representadas quatro trajetórias hipotéticas de quatro partículas incandescentes, onde cada uma delas tem uma velocidade terminal,  $U_t$ , que varia ao longo do seu transporte. Dentro da pluma térmica a ascensão inicial da partícula deve-se sobretudo à velocidade vertical da coluna térmica gerada pelo incêndio ( $U_{CT}$ ) e o seu transporte na horizontal dentro da mesma, é devido à velocidade horizontal ( $U_{xc}$ ). Uma vez fora da pluma térmica a velocidade das partículas incandescentes depende da sua velocidade terminal  $U_t$ , da velocidade do campo de ventos  $U_x$ , no momento do incêndio e da sua forma geométrica (Ellis, 2000).

A velocidade terminal ( $U_t$ ) das partículas incandescentes varia ao longo do tempo, pois como são transportadas em combustão, têm perda de massa e de volume ao longo do transporte (Tarifa et al., 1965; 1967; Lee e Hellman, 1969; Muraszew, 1974; Albini, 1979). A velocidade vertical da coluna térmica ( $U_{CT}$ ) gerada pelo incêndio é função da intensidade do incêndio (Albini, 1979; Raupach, 1990) podendo ser constante ou função da distância a que se encontra do solo (Raupach, 1990). A velocidade e direcção do vento

dentro da coluna térmica ( $U_{xc}$ ) são constantes ou são função da altura acima do incêndio (Raupach, 1990). A velocidade do vento fora da coluna térmica ( $U_x$ ) depende da altura a que a partícula se encontra do solo.

Como foi anteriormente descrito, o fenómeno dos focos secundários é bastante complexo e difícil de estudar, em virtude das suas variantes. Sendo assim este estudo limitar-se-á a análise das características aerodinâmicas do transporte pelo vento das partículas planas, a duas dimensões, de cascas de eucalipto com dimensões predefinidas que mais a frente serão apresentadas.

## 1.2. Princípios Físicos

Para se estudar e compreender o fenómeno dos focos secundários é necessário entender os conceitos de mecânica dos fluidos e aerodinâmica aplicados ao fenómeno. Neste subcapítulo enunciam-se e explicitam-se as principais leis associadas ao transporte aerodinâmico das partículas em estudo.

Todo o corpo que está na presença de um escoamento está sujeito a forças aerodinâmicas devido a duas causas básicas: à distribuição da pressão ( $p$ ) e à distribuição da tensão viscosa ( $\tau$ ) na superfície do corpo (*Figura 5*). Ambas actuam na superfície do corpo, no entanto a pressão actua na direcção normal e a tensão viscosa actua tangencialmente aos contornos do corpo, ambas tendo dimensões de força por unidade de área ( $N.m^{-2}$ ).

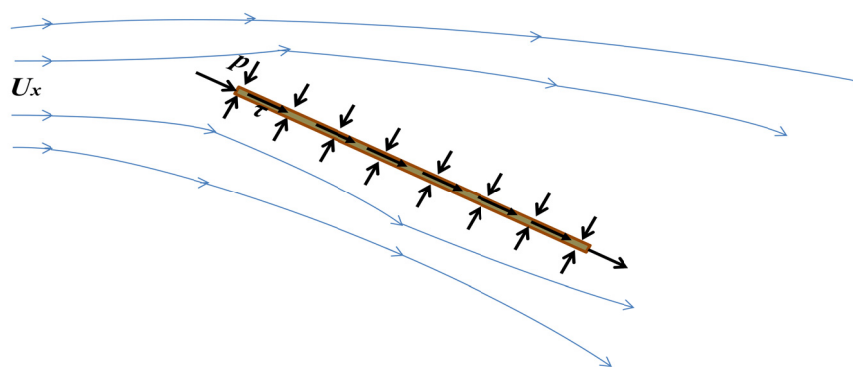


Figura 5 – Forças aerodinâmicas sobre um corpo.

O efeito da distribuição de  $p$  e  $\tau$  integrado ao longo da superfície do corpo, origina uma força resultante ( $F_R$ ) e um momento ( $M$ ) (*Figura 6*) aplicado no centro de massa ( $CM$ ) do corpo.

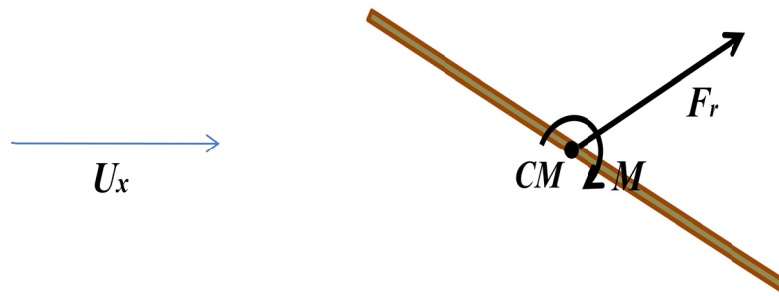


Figura 6 – Forças aerodinâmicas resultantes.

A força resultante pode ser decomposta numa força horizontal  $F_x$  e numa força vertical  $F_z$ .

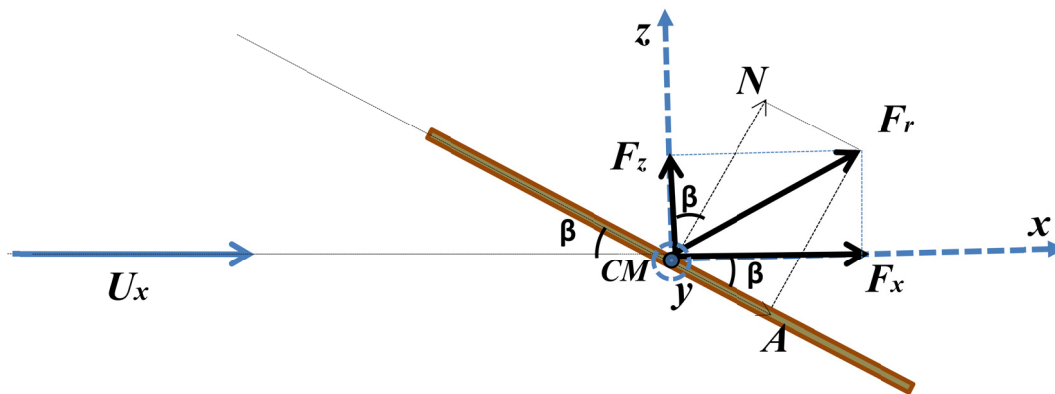


Figura 7 – Decomposição da força resultante.

Com base na figura anterior (*Figura 7*) deduz-se as seguintes fórmulas para a força segundo  $x$  (1) e segundo  $z$  (2):

$$F_x = N \times \sin\beta + A \times \cos\beta \quad (1)$$

$$F_z = N \times \cos\beta - A \times \sin\beta \quad (2)$$

Onde  $N$  é a componente normal da força à placa,  $A$  é a componente axial da força à placa e  $\beta$  é o ângulo entre o escoamento e a placa.

Com as forças decompostas, pode agora definir-se parâmetros adimensionais que relacionam a força e o produto da pressão dinâmica do escoamento de aproximação por uma área, em que a área é característica do corpo em estudo.

O  $C_x$  (coeficiente de resistência) relaciona a força,  $F_x$ , com o produto entre densidade do ar ( $\rho_{ar}$ ), velocidade do escoamento ( $U$ ), segundo  $x$ , e a área da amostra ( $A$ ):

$$C_x = \frac{2 \times F_x}{\rho_{ar} \times U^2 \times A} \quad (3)$$

O  $C_z$  (coeficiente de sustentação) relaciona a força,  $F_z$ , com o produto entre densidade do ar ( $\rho_{ar}$ ), velocidade do escoamento ( $U$ ), segundo  $x$ , e a área da amostra ( $A$ ):

$$C_z = \frac{2 \times F_z}{\rho_{ar} \times U^2 \times A} \quad (4)$$

O  $CM_y$  (coeficiente de momento) relaciona o momento ( $M_y$ ) com o produto entre a densidade do ar ( $\rho_{ar}$ ), velocidade do escoamento ( $U$ ), segundo  $x$ , a área da amostra ( $A$ ) e o comprimento da amostra ( $L$ ).

$$CM_y = \frac{2 \times M_y}{\rho_{ar} \times U^2 \times A \times L} \quad (5)$$

Com estes três parâmetros já se pode caracterizar os nossos ensaios adimensionalmente e compara-los.

Alem de poder comparar os ensaios das amostras, no fim de definidos os coeficientes aerodinâmicos para todas as direcções de escoamento em torno da partícula, é possível elaborar um modelo computacional que calcula as trajectórias dessas mesmas partículas.

### 1.3. Objectivos

O presente estudo foca-se no transporte de partículas planas, transportadas pelo vento, o transporte é feito a três dimensões, no entanto a análise que desenvolvemos é apenas a duas dimensões. Este trabalho incide na medição dos coeficientes aerodinâmicos de partículas planas, com várias dimensões, para as várias direcções do escoamento incidente, permitindo o desenvolvimento de um modelo que permite determinar os coeficientes aerodinâmicos de partículas planas, com geometria semelhante às amostras ensaiadas, em função da orientação do escoamento.

O modelo desenvolvido foi validado através da velocidade terminal medida em ensaios de queda livre, comparando as velocidades terminais obtidas com as dadas pelo modelo dos coeficientes aerodinâmicos. Os ensaios em queda livre serviram igualmente para observar as trajectórias e tipo de movimento das amostras comparando com os encontrados por alguns autores que ensaiaram partículas planas em queda livre.

Relacionou-se ainda as características físicas das partículas ensaiadas com as velocidades terminais medidas em queda livre e coeficientes aerodinâmicos.

## 1.4. Estado da Arte

Os estudos no âmbito dos focos secundários foram iniciados por Tarifa et. al. (1965 e 1967), que estudou os coeficientes de resistência para várias formas regulares, tais como: esferas, cilindros e placas de diversos tipos de madeira, num túnel vertical por ele construído, utilizando-o para calcular a velocidade terminal com o objectivo de determinar a distância máxima de transporte para cada forma geométrica, no entanto os coeficientes aerodinâmicos determinados são somente para uma direcção de escoamento incidente nas formas geométricas estudadas. O seu estudo foi seguido por Albini (1979, 1981, 1982, 1983) que teve em conta a alteração da direcção do vento na presença da pluma térmica. Estudos computacionais e matemáticos de transporte e combustão também foram realizados por Rothermel (1972), Anthenien (2006) ou Sardoy (2007) neste campo. Manzello (2007, 2008) estudou a emissão das partículas a partir da queima de vários tipos de árvores e arbustos, medindo a perda de massa de cada arbusto e o tamanho das partículas por elas emitidas.

Muraszew (1976) modelou trajectórias de finas placas de madeira e cascas planas e concluiu que estas formas têm maior alcance que qualquer outro tipo de formas geométricas do mesmo tipo.

David L. Finn (2007) estudou as trajectórias de um cartão de identificação feito de cartolina, caracterizando o tipo de movimento e trajectória que adopta em queda livre. À semelhança deste autor, Hirata e Shimisu (2009) fizeram estudos hidrodinâmicos de queda livre que caracterizam a trajectória e os diferentes tipos de movimento que as partículas planas tomam. Filmaram as trajectórias destas partículas em água e concluíram que o tipo de movimento que elas tomam depende dos seus coeficientes aerodinâmicos.

Outros autores calcularam, de uma forma empírica, a velocidade terminal de partículas que podem provocar um foco secundário, medindo as velocidades terminais em queda livre. Um deles foi Clements (1977), que atirou de uma ponte as várias partículas que podem causar um foco secundário, medindo a velocidade terminal de cada uma delas, e relacionando o tempo de queda com a altura a que se encontrava a ponte do solo. Este autor destacou a grande importância dos coeficientes aerodinâmicos no estudo da velocidade terminal.

À semelhança de Tarifa (1967), Ellis (2000) utilizou um túnel de combustão vertical, para analisar as características aerodinâmicas das cascas de eucalipto, utilizou cascas de diferentes espécies de eucaliptos com diferentes formas. Testou cascas com forma aproximada de um floco e cascas com forma aproximada de um cilindro, obtendo as velocidades terminais para cada uma delas. Nesse mesmo estudo, calculou a probabilidade de ignição de um leito com as amostras anteriores em combustão com e sem chama.

Ellis (2010) à semelhança de Clements (1977) realizou um estudo de velocidades terminais de cascas de diferentes espécies de eucalipto. Atirou estas amostras de uma altura de cerca de 22,7 m, medindo as suas velocidades terminais de queda caracterizando o seu movimento, relacionou-as com a sua densidade e comparou-as com as velocidades terminais obtidas pelas fórmulas aerodinâmicas.

Mais recentemente Almeida et al. (2009) estudaram a perda de massa de duas amostras em combustão, pinhas de *Pinus pinaster* e cascas de *Eucalyptus globulus Lab.* em forma de cilindro, no túnel de combustão vertical, variando a velocidade do escoamento e o ângulo de inclinação com a horizontal entre os  $\pm 90^\circ$ . Estes mesmos autores estudaram no túnel de combustão oblíquo a variação dos coeficientes aerodinâmicos com as diferentes orientações do escoamento, para obtenção das velocidades terminais de pinhas de *Pinus pinaster* e cascas de *Eucalyptus globulus Lab.* em forma de cilindro.

No presente trabalho, à semelhança de Almeida et al. (2009), vamos medir coeficientes aerodinâmicos, tal como alguns autores atrás mencionados, no entanto fazemo-lo para todas as direcções de escoamento incidente na partícula, elaborando um modelo de forma a determinar os coeficientes aerodinâmicos em função da direcção do escoamento. Calcula-se, tal como Clements (1977) e Ellis (2010), as velocidades terminais em queda livre das partículas planas, juntando a este estudo, o estudo de David L. Finn (2007), observando o movimento da partícula na trajectória em queda livre, relacionando no final as velocidades terminais com as características físicas das amostras. Por fim relaciona-se as medições dos coeficientes aerodinâmicos com as velocidades terminais obtidas em queda livre.



## 1.5. Estrutura da Dissertação

Esta secção apresenta a estrutura e resume os conteúdos de cada capítulo presente na dissertação. Assim como os fundamentos teóricos associados aos focos secundários, o estado da arte e os objectivos do trabalho

Capítulo **2. METODOLOGIA**, sintetiza-se a metodologia usada nos ensaios experimentais, assim como se menciona o material mais importante e descrevemo-lo.

Capítulo **3. TRATAMENTO DE DADOS**, apresenta-se todos os métodos de cálculo utilizados, para o tratamento de dados, de modo a chegar aos resultados obtidos.

Capítulo **4. RESULTADOS E DISCUSÃO**, apresenta-se os resultados obtidos nos ensaios experimentais com a discussão dos mesmos.

Capítulo **5. MODELO EMPÍRICO**, elabora-se e desenvolve-se um modelo empírico para a determinação de cada um dos coeficientes aerodinâmicos, com base nos resultados experimentais obtidos.

Capítulo **6. VALIDAÇÃO DO MODELO**, compara-se as velocidades terminais dadas pelo modelo com as obtidas nos ensaios de queda livre das amostras.

Capítulo **7. CONCLUSÃO**, aborda-se todas as conclusões que podemos retirar deste trabalho.

No **Anexo**, explicita-se e demonstra-se uma tentativa de correcção dos ensaios aerodinâmicos, devido ao mecanismo de fixação utilizado para fixar as amostras dentro do túnel.

## 2. METODOLOGIA

Neste capítulo sintetiza-se a metodologia utilizada neste trabalho e caracterizam-se os materiais e equipamentos mais importantes utilizados nos ensaios experimentais.

A metodologia adoptada para o presente estudo está representada no esquema seguinte (*Figura 8*):

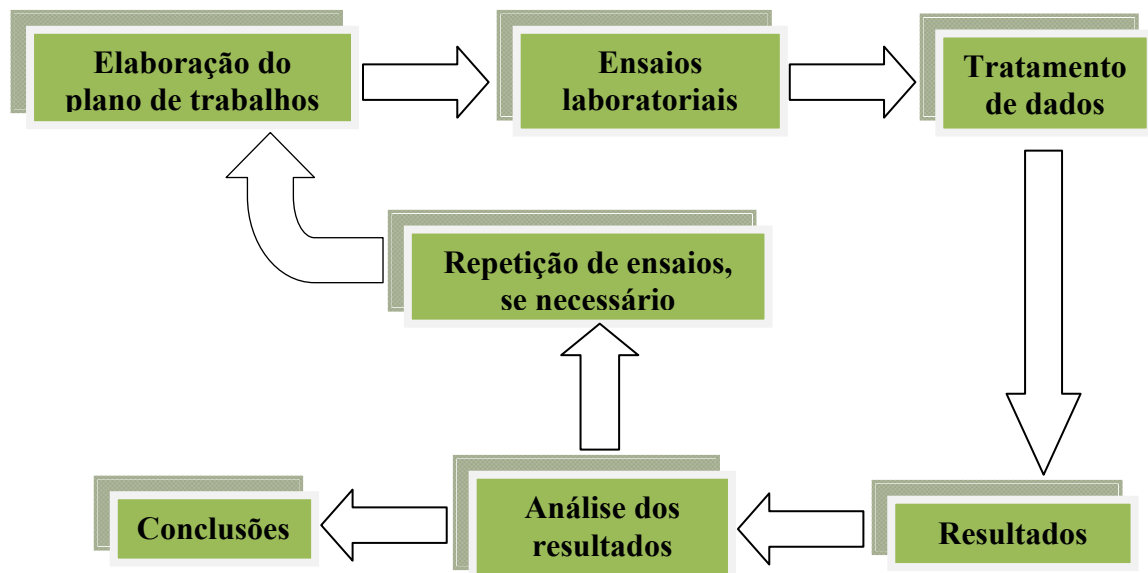


Figura 8 – Esquema da metodologia adoptada

Antes de entrar no laboratório, elabora-se um plano de trabalho bem pormenorizado, onde indicamos o procedimento experimental e material a utilizar nos ensaios. Depois de definido o plano de trabalho, efectua-se os ensaios experimentais, recolhendo os dados para serem trabalhados. No fim dos dados tratados, e obtidos os resultados dos ensaios, é necessário analisá-los, compara-los com outros autores que tenham feito algo idêntico, e reflectir sobre eles, pois nem sempre os resultados experimentais correspondem ao esperado. No fim de analisados os resultados, dependendo da sua coerência e reprodutibilidade, poderemos retirar as conclusões dos ensaios experimentais ou ter que repetir novamente os ensaios experimentais, com um novo plano de trabalhos, até os resultados analisados apresentarem a coerência e reprodutibilidade exigida.

## 2.1. Equipamento

O equipamento utilizado mais importante a caracterizar nos ensaios experimentais será o túnel de combustão oblíquo (*TCO*), onde se efectuou as medições para os ensaios aerodinâmicos.

Existe ainda equipamento que faz parte do *TCO*, a célula de carga, que permite efectuar a medição do sinal das forças e dos momentos a que estavam sujeitas as amostras no túnel.

Alem deste equipamento mais relevante, foi usado 3 câmaras de filmar para efectuar as medições das velocidades terminais em queda livre, balança e paquímetro para determinação das características físicas das amostras.

### 2.1.1. Túnel de Combustão Oblíquo (*TCO*)

O túnel de combustão oblíquo (*Figura 9*) é um mecanismo original que foi projectado para o estudo de partículas incandescentes e está instalado no Laboratório de Estudos de Incêndios Florestais da ADAI, na Lousã.



Figura 9 – Túnel de Combustão Oblíquo

A sua principal característica consiste na possibilidade de variação da orientação do escoamento. A partícula é fixa numa posição pré-definida num suporte que é independente do movimento da câmara onde se dá o escoamento de fluxo. A velocidade do escoamento e direcção pode ser alterada continuamente em relação à partícula ao longo dos ensaios.

O túnel de combustão oblíquo tem uma altura total de  $3,3\text{ m}$ , uma secção quadrada invariável com  $0,4 \times 0,4\text{ m}^2$  e tem uma conduta vertical com um ventilador axial de sucção colocado numa das extremidades. O ar entra da extremidade oposta ao ventilador. A câmara de trabalho pode ser rodada electronicamente dos  $0^\circ$  até aos  $360^\circ$ , como é visível na *Figura 10*.



**Figura 10 – Imagens do túnel oblíquo com diversas direcções de incidência do escoamento.**

A velocidade do escoamento no túnel é controlada pela velocidade de rotação do ventilador, sendo esta controlada electronicamente através de um potenciômetro manual. Este potenciômetro fornece um valor de frequência ( $Hz$ ) que é proporcional à sua rotação, variando a velocidade dentro da câmara de ensaios de  $0\text{ m.s}^{-1}$  até um máximo de  $40\text{ m.s}^{-1}$ .

A partícula que está a ser testada é fixada por um mecanismo de fixação a uma célula de carga (*Figura 11*) que mede 6 graus de liberdade, obtendo assim o sinal de 3 forças ( $F_x$ ,  $F_y$  e  $F_z$ ) e 3 momentos ( $M_x$ ,  $M_y$  e  $M_z$ ) a que a partícula é sujeita. No entanto, em virtude do estudo incidir numa base bidimensional, utilizou-se apenas três graus de liberdade medindo a componente vertical segundo  $z$ , a componente horizontal segundo  $x$  e o momento segundo  $y$  (perpendicular ao plano  $xz$ ).



**Figura 11 – Imagem da célula de carga.**

Estes sinais são continuamente transferidos e armazenados informaticamente pelo programa informático de aquisição de dados (*JR3 PCI Software*) (Pires, 2003).

O mecanismo de fixação (*Figura 12*), sendo um equipamento usado para efectuar as medições no *TCO*, é um equipamento que é independente do mesmo, pois para cada forma geométrica diferente, o mecanismo de fixação também é diferente.



Figura 12 – Imagem do mecanismo de fixação.

## 2.2. Amostras

As amostras utilizadas nos ensaios são de casca de *Eucalyptus globulus Lab.* e madeira balsa (*Ochroma pyramidale*).

As cascas de *Eucalyptus globulus* em estudo são de matéria seca fibrosa, tendo uma densidade média de  $530 \text{ kg.m}^{-3}$ , que são retiradas dos troncos em longas e estreitas peças, ainda que aderentes em determinadas partes do caule, podendo aparecer na forma de longas faixas, fitas resistentes ou em pedaços que encaracolam.

O material para as amostras de cascas de *Eucalyptus globulus* foram recolhidas em dias secos num eucaliptal situado em Coimbra, não apresentando deteriorações observáveis a olho nu, tendo sido posteriormente pintadas e recortadas de maneira a corresponderem às dimensões e forma desejadas, ficando com o seguinte aspecto:

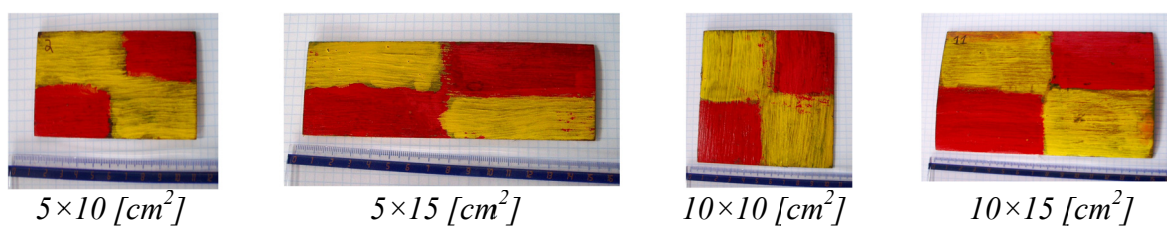


Figura 13 – Amostras de casca de *Eucalyptus globulus* com as dimensões em estudo.

As amostras foram pintadas com estas cores e desta forma para que nas imagens das filmagens de queda livre fosse mais fácil de as identificar e ainda para reconhecer mais facilmente o tipo de movimento que adoptavam na sua trajectória.

A madeira balsa (*Ochroma pyramidale*) é um tipo de madeira leve e resistente, com uma densidade média de aproximadamente  $150 \text{ kg.m}^{-3}$ , usada principalmente para confecção de aeromodelos rádio controlados.

O material para as amostras de madeira balsa foi adquirido numa loja de aeromodelos situada em Coimbra, posteriormente foram recortadas de maneira a corresponderem às dimensões desejadas, ficando com o seguinte aspecto:

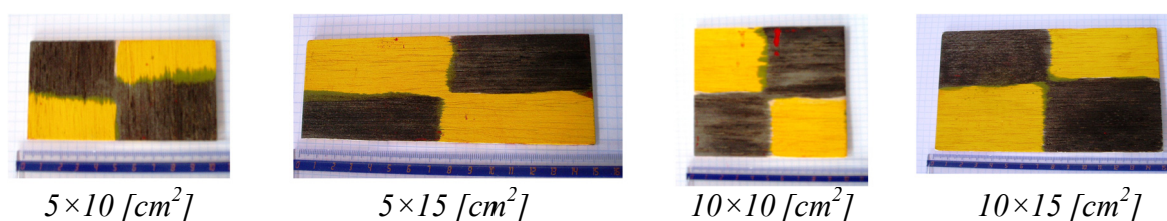


Figura 14 – Amostras de madeira balsa (*Ochroma pyramidale*) com as dimensões em estudo.

A utilização das amostras de madeira balsa deve-se à necessidade de garantir uma homogeneidade das amostras, pois as cascas de eucalipto não correspondiam a placas regulares, apresentando por vezes físsuras, mudanças na secção da espessura e empenamentos e facilitar as filmagens para a medição das velocidades terminais, pois como são mais leves, a sua velocidade terminal é menor que as amostras de casca de *Eucalyptus globulus*.

Na tabela seguinte (*Tabela 1*) sintetizam-se as características físicas das amostras que foram ensaiadas na queda de partículas, para medição das suas velocidades terminais e as que foram usadas para as medições dos seus coeficientes aerodinâmicos no TCO.

Tabela 1 – Amostras utilizadas nos ensaios e suas características

Amostra	Características				
	$L$ [cm]	$l$ [cm]	$e$ [cm]	$m$ [g]	$\rho$ [kg.m <sup>-3</sup> ]
C1	10,0	5,0	0,2	6,0	600
C2*	10,0	5,0	0,2	5,3	530
C3	10,0	5,0	0,2	5,3	533
C4	10,0	5,0	0,2	6,1	612
C5	15,0	5,0	0,2	8,0	531
C6	15,0	5,0	0,4	12,0	399
C7	15,0	5,0	0,2	6,0	401
C8	10,0	10,0	0,2	11,5	574
C9	10,0	10,0	0,2	11,2	559
C10	15,0	10,0	0,2	16,3	543
C11	15,0	10,0	0,2	17,2	572
B1	10,0	5,0	0,3	2,3	150
B2	10,0	5,0	0,3	2,3	150
B3	15,0	5,0	0,3	3,2	140
B4	15,0	5,0	0,3	3,6	159
B5	10,0	10,0	0,3	4,7	155
B6	10,0	10,0	0,3	4,5	150
B7	15,0	10,0	0,3	7,0	155
B8	15,0	10,0	0,3	6,9	152

\*As amostras realçadas a cinzento foram somente ensaiadas nos ensaios aerodinâmicos.

Todas as amostras foram ensaiadas nos ensaios de queda livre para medição das suas velocidades terminais. Nos ensaios aerodinâmicos, somente as que estão sombreadas a cinzento foram ensaiadas.

O critério de escolha das amostras para os ensaios aerodinâmicos foi ensaiar uma amostra de cada dimensão e de cada tipo, uma balsa e uma casca de eucalipto, escolhendo as que estavam em melhor estado, pois algumas foram danificadas nos ensaios de queda livre.

## 2.3. Metodologia

Neste subcapítulo explicita-se como foram realizados os ensaios e as técnicas utilizadas para cada metodologia adoptada.

Foram feitos dois tipos de ensaios experimentais diferentes: a medição dos coeficientes aerodinâmicos no *TCO* e a medição das velocidades terminais na queda livre de partículas.

### 2.3.1. Queda Livre de Partículas

Para a medição das velocidades terminais das amostras utiliza-se uma plataforma elevatória que permitiu largar as amostras, niveladas com a horizontal, de uma altura de 9,7 m aproximadamente, na ausência de vento. Durante a queda, as partículas foram filmadas por intermédio de 3 câmaras de vídeo orientadas segundo os 3 eixos ( $x$ ,  $y$  e  $z$ ), como se pode ver na figura seguinte (*Figura 15*):



Figura 15 – Imagem da montagem experimental da queda livre das amostras.



A aquisição das velocidades terminais das amostras foi feita através da análise das imagens (*frames*) retiradas dos filmes com uma cadência de 5 em 5 frames (de 0,2 s em 0,2 s) numa resolução de 25 *fps*.

As medições das posições das amostras foram feitas em relação à posição inicial, sendo o eixo vertical o eixo do  $z$  e o eixo horizontal os eixo dos  $x$ .

Depois de retiradas as posições das amostras nas frames, procedeu-se à sua correcção, uma vez que estas não correspondiam às posições reais das amostras, devido à perspectiva das filmagens.

Este procedimento foi repetido 3 vezes, para cada amostra acima mencionadas repetiram-se as quedas livres 3 vezes.

### 2.3.2. Medição dos Coeficientes Aerodinâmicos

Para a medição dos coeficientes aerodinâmicos fixou-se as amostras escolhidas e mencionadas anteriormente, com o mecanismo de fixação à célula de carga dentro da câmara do *TCO*, niveladas com a horizontal, para efectuar as medições das forças a que estavam sujeitas na presença de um determinado escoamento.

Na figura seguinte (*Figura 16*) mostramos a montagem experimental dentro do *TCO*:

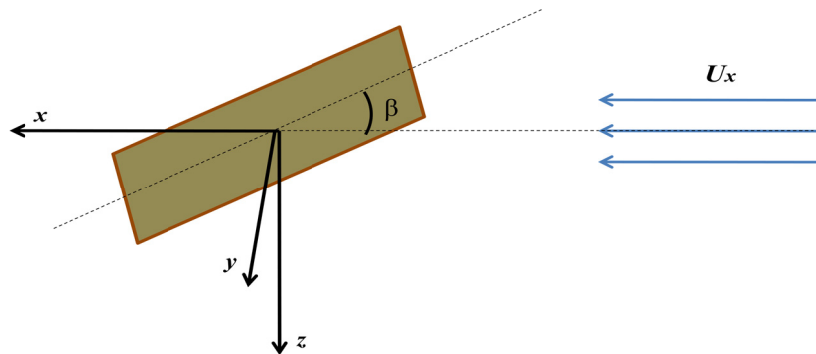


Figura 16 – Imagens da montagem experimental do *TCO*.

Para cada amostra utilizou-se velocidades diferentes de maneira a não viciar as medições dos ensaios. Verificando que velocidades muito altas levavam à deformação da amostra limitou-se a velocidade de escoamento a  $20 \text{ m.s}^{-1}$ . A velocidade mínima ensaiada foi de  $5 \text{ m.s}^{-1}$  que, para além de garantir a não deformação da casca, garantia um escoamento uniforme dentro da câmara de ensaios do túnel.

A medição das forças começava com a orientação do escoamento  $\beta=270^\circ$ , fazendo as medições de  $5^\circ$  em  $5^\circ$  graus ou de  $15^\circ$  em  $15^\circ$ , até perfazer a volta completa, medindo novamente a orientação  $270^\circ$ , para no tratamento de dados, retirarmos o efeito residual acumulado durante o ensaio. Foram feitas pelo menos duas medições para cada amostra de maneira a confirmar os resultados obtidos.

Os sinais das forças são medidos tendo em conta o seguinte referencial (*Figura 17*):



**Figura 17 – Esquema do referencial dos ensaios aerodinâmicos.**

Onde  $x$ ,  $y$  e  $z$ , representam o referencial ortonormado,  $\beta$  representa o ângulo entre a amostra e o escoamento e  $U_x$  a direção da velocidade do escoamento.

Os sinais das forças eram enviados para um computador com o software de aquisição de dados que os armazenava em ficheiros de texto para posterior tratamento de dados para obtenção dos coeficientes aerodinâmicos segundo as orientações do escoamento.

#### **2.3.2.1. Calibração**

É necessário fazer a calibração para as forças e para os momentos, visto que são feitas de maneira diferente, vamos apresentar uma secção para cada uma delas.

##### **2.3.2.1.1. Calibração para as forças**

Os eixos da célula de carga apresentam um desfasamento relativamente aos eixos ortogonais de referência, pelo que teve de se calcular o ângulo de desfasamento. A calibração foi realizada suspendendo na célula de carga, na vertical, coincidindo com a direção do eixo de referência vertical ( $z_0$ ), 4 objectos com massas diferentes, como mostra a *Figura 18*.



Figura 18 – Objecto de massa conhecida suspenso no TCO para calibração

Foram suspensos a fim de se determinar os sinais de força medidos pela célula de carga.

Depois de saber os sinais de força correspondentes a cada objecto, calculou-se o ângulo de desfasamento ( $\theta$ ), entre o eixo horizontal de referência ( $x_0$ ) e o eixo definido por  $zz$  (Figura 19). O ângulo  $\theta$  é a média dos ângulos encontrados para cada objecto suspenso, e é calculado com a fórmula (6) baseada na Figura 19.

$$\theta = \text{média} \left[ \tan^{-1} \left( \frac{S'_z}{S'_x} \right) \right] \quad (6)$$

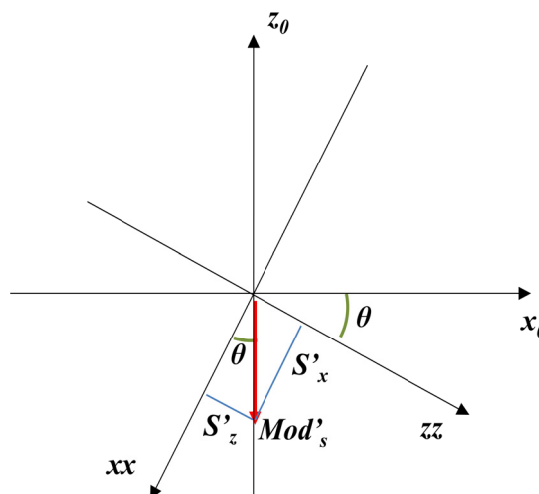


Figura 19 – Esquema dos eixos da célula de carga ( $xx$  e  $zz$ ) com os eixos horizontal ( $x_0$ ) e vertical ( $z_0$ ) de referência.

Ao mesmo tempo que se calcula o ângulo de defasamento da célula de carga, calcula-se também um factor de conversão do sinal de força ( $S$ ) para força ( $F$ ). Sendo necessário calcular o módulo dos sinais de força  $S'_x$  e  $S'_z$  correspondente a cada um dos 4 objectos suspensos, através da equação (7):

$$Mod'_s = \sqrt{S'_x{}^2 + S'_z{}^2} \quad (7)$$

A relação do sinal de força ( $S$ ), medido na célula de carga, com a força ( $F$ ) aplicada pela suspensão do objecto, pode ser determinada através do gráfico do módulo do sinal ( $Mod'_s$ ) em função da massa real dos objectos usados na calibração, de acordo com o exemplo da figura seguinte:

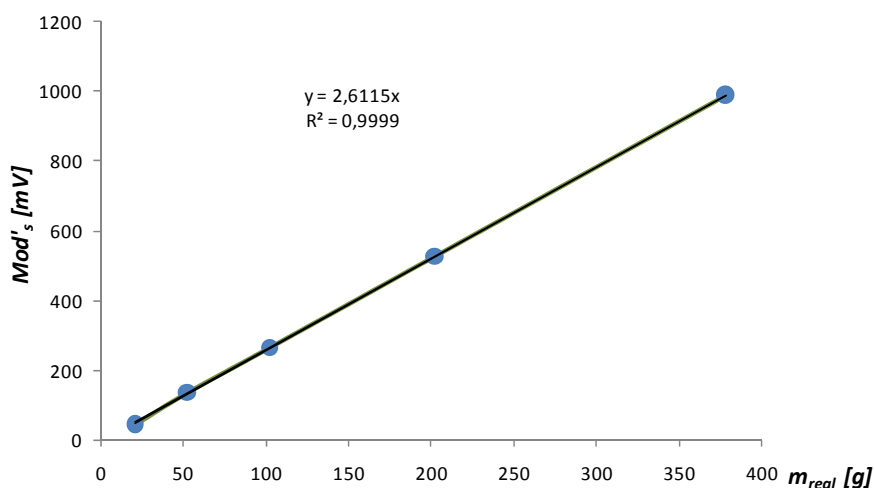


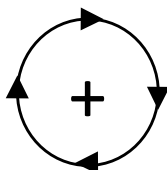
Figura 20 – Exemplo de gráfico que relaciona sinal de força com a força aplicada.

Onde o declive da recta que passa por esses quatro pontos é o factor de conversão “ $f_f$ ” e neste caso toma o valor de  $2,6115 [mV.g^{-1}]$ .

### 2.3.2.1.2. Calibração para os momentos

Procedendo do mesmo modo usado na determinação do factor de conversão do sinal das forças na força aplicada, utilizou-se os mesmos quatro pesos para converter o sinal do momento medido na célula de carga no momento aplicado.

Considerou-se que o sentido dos ponteiros do relógio corresponde ao sinal positivo do momento, como está representado na figura seguinte (*Figura 21*):



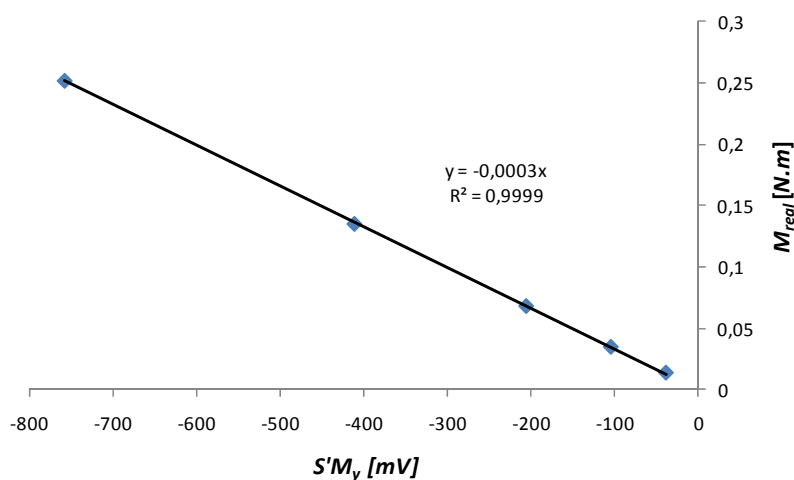
**Figura 21 - Esquema do sentido positivo do momento.**

Sendo o braço segundo o eixo do  $x_0$  igual a 6 [cm], o momento real aplicado pelos pesos em cada ensaio de calibração foi calculado por:

$$M_{real} = m_{real} \times 6 \times 9,81 \times 10^{-5} \quad (8)$$

Sendo “ $m_{real}$ ” a massa dos pesos utilizados em cada ensaio.

O factor de conversão “ $f_m$ ”, do sinal em momento, foi determinado através do gráfico que relaciona o momento real ( $M_{real}$ ) aplicado na célula de carga com o sinal do momento ( $S'M_y$ ) obtido para cada objecto suspenso (*Figura 22*).



**Figura 22 – Exemplo de gráfico que relaciona sinal de momento com o momento real aplicado.**

O declive desta recta é o factor de conversão “ $f_m$ ”. Invariavelmente este factor de conversão foi igual a  $-0.0003 \text{ N.m.mV}^{-1}$ .

### 3. TRATAMENTO DE DADOS

Neste capítulo detalha-se todos os métodos de cálculo efectuados até a obtenção dos resultados finais

#### 3.1. Queda Livre de Partículas

Na queda de partículas os dados são retirados das *frames* dos vídeos por intermédio de uma grelha graduada, que se sobre punha sobre as frames seleccionadas e se media o deslocamento virtual. Existindo uma relação de escala da *frame* para a realidade obtêm-se o deslocamento real.

As posições das amostras são calculadas segundo as seguintes fórmulas:

$$x'_{n+1} = x'_n + RE \times d \quad (9)$$

$$y'_{n+1} = y'_n + RE \times d \quad (10)$$

$$z'_{n+1} = z'_n + RE \times d \quad (11)$$

A posição  $n+1$ , é igual a posição anterior  $n$ , somado ao deslocamento  $d$  que a partícula teve de uma frame para a outra, multiplicado pela relação de escala  $RE$ .

Visto que estes dados são retirados de frames de filmagens, tem-se erros associados à perspectiva das filmagens, logo deverão corrigir-se as posições retiradas das frames, com base no seguinte esquema (*Figura 23*):

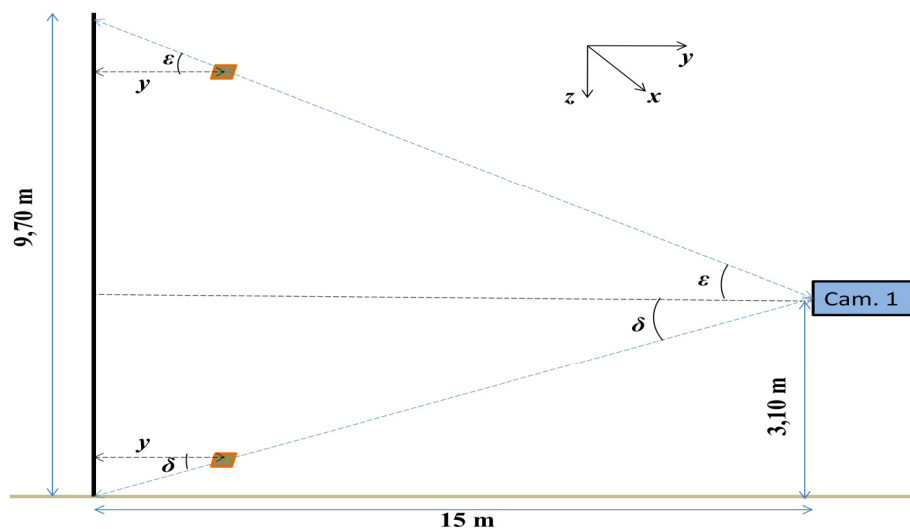


Figura 23 – Esquema da montagem experimental para correcção das posições retiradas das frames.

Tendo em conta a *Figura 23* deduz-se as seguintes fórmulas para a correcção da posição das partículas:

$$\left\{ \begin{array}{l} z' > 6,60 \text{ m} \rightarrow z = z' - \left( \frac{z' - 6,6}{15} \right) \\ z' < 6,60 \text{ m} \rightarrow z = z' + \left( \frac{6,6 - z'}{15} \right) \times y' \end{array} \right. \quad (12)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} z' > 6,60 \text{ m} \rightarrow z = z' - \left( \frac{z' - 6,6}{15} \right) \\ z' < 6,60 \text{ m} \rightarrow z = z' + \left( \frac{6,6 - z'}{15} \right) \times y' \end{array} \right. \quad (13)$$

Optou-se por fazer apenas a correcção da coordenada  $z$ , uma vez que é a mais relevante nas medições e é uma das coordenadas onde se sente mais o efeito do erro da perspectiva das filmagens pela distância a que se encontra a câmara.

A velocidade é determinada pelas seguintes fórmulas:

$$V_x = \frac{x_{n+1} - x_n}{t} \quad (14)$$

$$V_y = \frac{y_{n+1} - y_n}{t} \quad (15)$$

$$V_z = \frac{z_{n+1} - z_n}{t} \quad (16)$$

A velocidade foi calculada com a diferença entre a posição da amostra nas frames analisadas, dividindo pelo tempo entre cada frame. Uma vez que a resolução das filmagens foi de 25 *fps* e a cadência de congelamento das imagens / *frame* foi feita a cada 5 *frames*, o tempo decorrido entre cada análise foi de 0,2s.

Com as componentes da velocidade pode-se agora calcular o módulo da velocidade terminal, que as amostras estão sujeitas ao longo da queda. Visto que estamos a fazer um estudo bidimensional, apenas consideramos as componentes de velocidade segundo os eixos  $x$  e  $z$ .

$$V = \sqrt{V_x^2 + V_z^2} \quad (17)$$

Uma vez que o objectivo destes ensaios é a determinação da velocidade terminal de queda, fez-se a média da velocidade ao longo da queda a que está sujeita uma amostra ao fim do primeiro segundo, pois no primeiro segundo a amostra encontra-se a acelerar à custa da aceleração gravítica até atingir uma velocidade terminal aproximadamente constante até ao final da queda.

Seguindo este tratamento de dados, obteve-se o resultado da queda livre de partículas, para mais tarde comparar a velocidade terminal das quedas com a velocidade terminal dada pelos modelos dos coeficientes aerodinâmicos.

### 3.2. Determinação dos Coeficientes Aerodinâmicos

Os dados são armazenados em ficheiros de texto pelo programa de aquisição de dados *JR3 PCI Software* (Pires, 2003), optou-se por retirar dos dados experimentais cerca de 40 medições por cada direcção de cada amostra, e armazenou-se para cada amostra os ângulos de medição e respectivas médias das 40 medições efectuadas.

O tratamento de dados laboratoriais necessários à determinação dos coeficientes aerodinâmicos engloba:

- Remoção do efeito residual, que consiste em retirar em todas as medições o incremento da célula de carga;
- Conversão dos sinais em força e momento, utilizando os dados da calibração passa-se os impulsos eléctricos da célula de carga para forças e momentos;
- Conversão das componentes das  $F_{x_0}$  e  $F_{z_0}$  em  $F_x$  e  $F_z$  respectivamente,
- Cálculo dos coeficientes aerodinâmicos em relação às forças calculadas.

#### 3.2.1. Eliminação do Efeito Residual para Forças e Momentos

Antes de usar o ângulo de desfaseamento ( $\theta$ ) e os factores de conversão de sinal ( $f_f$  e  $f_m$ ), definidos no capítulo da *Metodologia* (2.3.2.1.1 e 2.3.2.1.2), para efectuar os cálculos com os sinais da célula de carga, é necessário retirar os erros associados as medições.

Durante a realização dos ensaios no *TCO*, verificou-se que a célula de carga incrementava um valor residual ao valor da medição. Este erro residual incrementado era variável, ao longo do tempo de ensaio, e aparecia de forma consistente. Visto que as medições efectuadas no túnel, por amostra, demoram cerca de 25 a 30 minutos, a célula de carga vai incrementar nas medições um valor residual que adquire ao longo do tempo. A eliminação do efeito residual, para as forças e para o momento, é retirada ao longo de cada medida de cada ângulo e é feita através da seguinte fórmula:

$$S = S' - \left[ \frac{S_{270^\circ-a} - S_{270^\circ}}{n - 1} \times (seq - 1) \right] \quad (18)$$

Em que:  $S$  corresponde ao sinal com o efeito residual retirado,  $S'$  é o sinal da célula de carga para uma dada orientação, onde vamos retirar o efeito residual,  $n$  o número



de medições que efectuámos durante um ensaio, sendo 73 para as medições de 5° em 5°,  $S_{270^\circ}$  é o primeiro sinal a ser medido e  $S_{270^\circ_a}$  é o último sinal a ser medido, sendo ambos para a orientação dos 270°,  $seq$  é o número de ordem de cada a medição.

### 3.2.2. Conversão do Sinal em Força Referida aos Eixos de Referência

Depois de se retirar os erros associados ao efeito residual a todas as medições, utiliza-se o ângulo de desfaseamento ( $\theta$ ) e o factor de conversão de sinal de força em força ( $f_f$ ), definidos no capítulo da *Metodologia* (2.3.2.1.1).

A conversão do sinal em força referida aos eixos de referência vertical e horizontal foi realizada com recurso ao ângulo  $\alpha$  (Figura 24), entre o módulo do sinal da força aplicada e o eixo horizontal de referência  $x_0$ .

$$\text{se } S_z < 0 \Rightarrow \alpha = 180^\circ - \theta - \tan^{-1} \left( \frac{S_x}{S_z} \right) \quad (19)$$

$$\text{se } S_z \geq 0 \Rightarrow \alpha = -\theta - \tan^{-1} \left( \frac{S_x}{S_z} \right) \quad (20)$$

Calculando agora o módulo do sinal sem o efeito residual ( $Mod_s$ ):

$$Mod_s = \sqrt{S_x^2 + S_z^2} \quad (21)$$

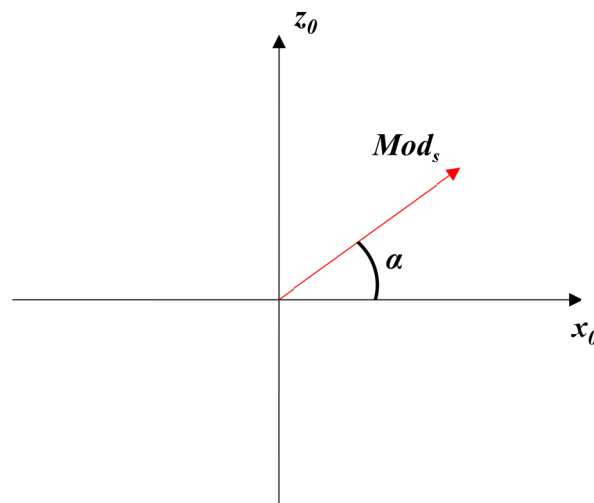


Figura 24 – Ângulo  $\alpha$ , entre o módulo da força aplicada e o eixo horizontal de referencia  $x_0$ .

As componentes em  $x_0$  e em  $z_0$  da força em Newton são calculadas pelas equações:

$$F_{x_0} = \cos \alpha \times \frac{Mod_S}{f_f} \times \frac{9,81}{1000} \quad (22)$$

$$F_{z_0} = \sin \alpha \times \frac{Mod_S}{f_f} \times \frac{9,81}{1000} \quad (23)$$

Sendo  $S_x$  e  $S_z$ , e “ $f_f$ ” o factor de conversão calculado acima.

### 3.2.3. Conversão de $F_{x_0}$ e $F_{z_0}$ em $F_x$ e $F_z$

Os cálculos anteriormente descritos foram efectuados considerando os eixos vertical e horizontal como referência. Tendo em vista uma análise dos dados mais facilitada, as forças aplicadas foram calculadas tendo como referencial a direcção e sentido do escoamento. Nesta perspectiva, considerou-se que o vector da velocidade de escoamento era coincidente com o eixo do  $x$ , e conseqüentemente com a componente  $F_x$  da força aplicada na casca. O eixo do  $z$ , e conseqüentemente a componente  $F_z$  da força, foi considerado como sendo perpendicular ao escoamento, incluído no plano perpendicular ao eixo da célula de carga. A figura seguinte (*Figura 25*) apresenta um esquema que ajuda a compreender a definição dos eixos.

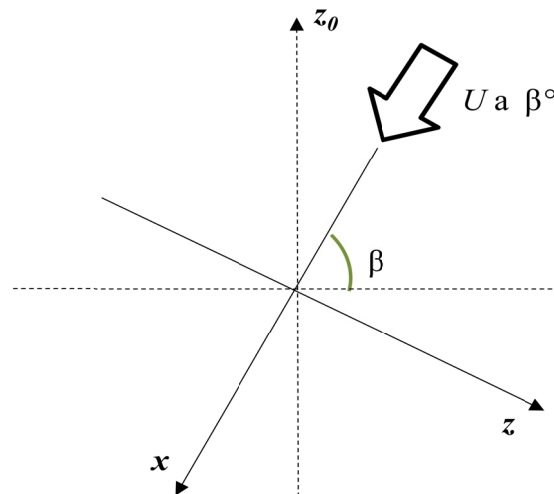


Figura 25 – Eixos de referência ( $x_0$  e  $z_0$ ) e eixo das forças ( $x$  e  $z$ )

A conversão das componentes  $F_{x_0}$  e  $F_{z_0}$  nas componentes das forças  $F_x$  e  $F_z$ , referidas aos eixos definidos pela direcção do escoamento, foi realizada através das equações 24 e 25 com base no esquema acima.

$$F_x = -F_{z_0} \times \sin \beta - F_{x_0} \times \cos \beta \quad (24)$$

$$F_z = F_{x_0} \times \sin \beta - F_{z_0} \times \cos \beta \quad (25)$$

Sendo  $\beta$  o ângulo do escoamento com a amostra.

### 3.2.4. Cálculo dos Momentos

Depois de definido o factor de conversão de sinal de momento em momento ( $f_m$ ) no capítulo da *Metodologia* efectuou-se a conversão.

Visto que as amostras se encontram fixas à célula de carga por um sistema de fixação que passa pelo eixo do seu centro de gravidade, em todos os ensaios, o momento  $M_y$  é calculado através da fórmula seguinte:

$$M_y = f_m \times SM_y = -0,0003 \times SM_y \quad (26)$$

### 3.2.5. Calculo dos Coeficientes Aerodinâmicos

Os coeficientes aerodinâmicos foram calculados com base nas forças  $F_x$ ,  $F_z$  e  $M_y$  dando origem a  $C_x$ ,  $C_z$  e  $CM_y$  com base nas fórmulas:

$$C_F = \frac{2 \times F}{\rho_{ar} \times U^2 \times A} \quad (27)$$

$$C_M = \frac{2 \times M}{\rho_{ar} \times U^2 \times A \times L} \quad (28)$$

Sendo “ $A$ ” a área representativa da casca de eucalipto ou das balsas, calculada pelo produto do comprimento pela sua largura, “ $U$ ” a velocidade do escoamento dentro do túnel e “ $\rho_{ar}$ ” a densidade do ar para a temperatura ambiente.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo apresentam-se os resultados obtidos nos ensaios em que as partículas foram deixadas cair de uma plataforma elevada (queda livre), assim como nos ensaios para determinação dos coeficientes aerodinâmicos. Simultaneamente é feita uma reflexão e uma crítica aos resultados obtidos.

### 4.1. Resultado dos Ensaios das Quedas Livres

Nesta secção apresenta-se os resultados das velocidades terminais obtidos para a queda livre das amostras e analisam-se a variação da velocidade terminal das amostras com as suas características físicas. Os resultados das velocidades médias terminais obtidas na queda das amostras estão representados na seguinte tabela:

Tabela 2 – Resultados das velocidades terminais das amostras

Amostra	Características						Velocidade medida [ $m.s^{-1}$ ]			Velocidade média [ $m.s^{-1}$ ]
	$L$ [ $cm$ ]	$l$ [ $cm$ ]	$e$ [ $cm$ ]	$m$ [ $g$ ]	$AR$ [ $L/l$ ]	$\rho$ [ $kg.m^{-3}$ ]	1°	2°	3°	
C1	10,0	5,0	0,2	6,0	2	600	4,37	<i>An*</i>	4,25	4,31
C2	10,0	5,0	0,2	5,3	2	530	<i>Na</i>	3,79	4,22	4,01
C3	10,0	5,0	0,2	5,3	2	533	<i>Na</i>	<i>An</i>	4,08	4,08
C4	10,0	5,0	0,2	6,1	2	612	<i>Na</i>	<i>An</i>	4,20	4,20
C5	15,0	5,0	0,2	8,0	3	531	4,18	4,32	<i>An</i>	4,25
C6	15,0	5,0	0,4	12,0	3	399	<i>Na</i>	<i>An</i>	<i>An</i>	<i>An</i>
C7	15,0	5,0	0,2	6,0	3	401	4,08	<i>An</i>	<i>An</i>	4,08
C8	10,0	10,0	0,2	11,5	1	574	4,48	4,13	3,98	4,20
C9	10,0	10,0	0,2	11,2	1	559	4,25	4,13	3,88	4,09
C10	15,0	10,0	0,2	16,3	1,5	543	3,98	4,08	4,19	4,09
C11	15,0	10,0	0,2	17,2	1,5	572	4,07	4,07	4,18	4,11
B1	10,0	5,0	0,3	2,3	2	150	<i>Na</i>	<i>An</i>	2,57	2,57
B2	10,0	5,0	0,3	2,3	2	150	<i>Na</i>	<i>An</i>	2,55	2,55
B3	15,0	5,0	0,3	3,2	3	140	<i>Na</i>	<i>An</i>	<i>An</i>	<i>An</i>
B4	15,0	5,0	0,3	3,6	3	159	2,65	2,54	<i>A</i>	2,60

Tabela 2 (Cont.) – Resultados das velocidades terminais das amostras

Amostra	Características						Velocidade medida [m.s <sup>-1</sup> ]			Velocidade média [m.s <sup>-1</sup> ]
	L [cm]	l [cm]	e [cm]	m [g]	AR [L/l]	$\rho$ [kg.m <sup>-3</sup> ]	1°	2°	3°	
B5	10,0	10,0	3	4,7	1	155	2,30	An	An	2,30
B6	10,0	10,0	0,3	4,5	1	150	2,47	2,92	2,79	2,73
B7	15,0	10,0	0,3	7,0	1,5	155	2,71	An	2,56	2,64
B8	15,0	10,0	0,3	6,9	1,5	152	2,43	An	An	2,43

\*An – Ensaios anulados.

As células da tabela acima, com a abreviatura “An”, significa que o ensaio foi anulado porque não possível medirem-se a velocidade terminal dessa amostra.

A dependência da velocidade terminal de uma partícula em função da sua massa e dimensões pode ser analisada na *Figura 26*.

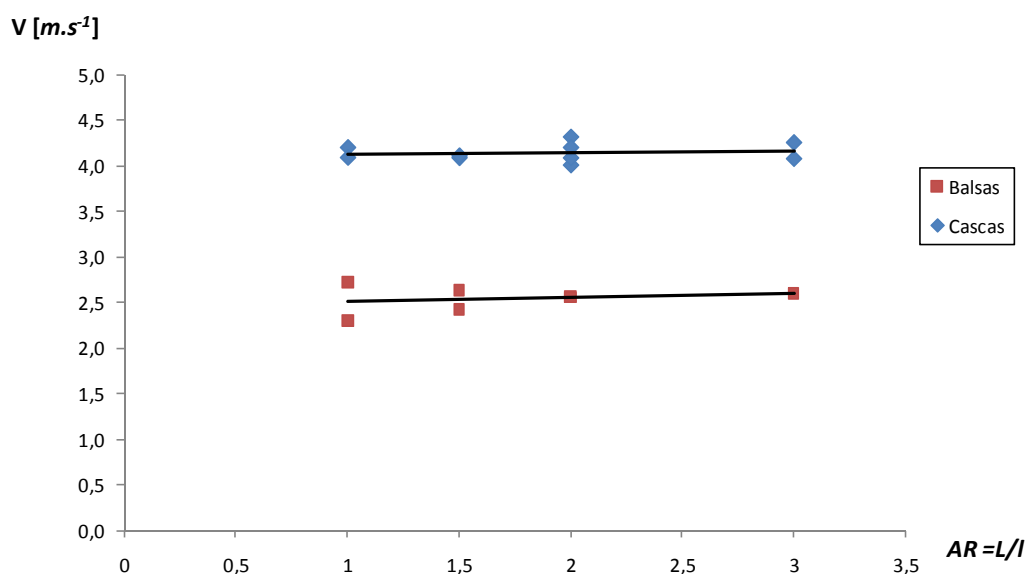


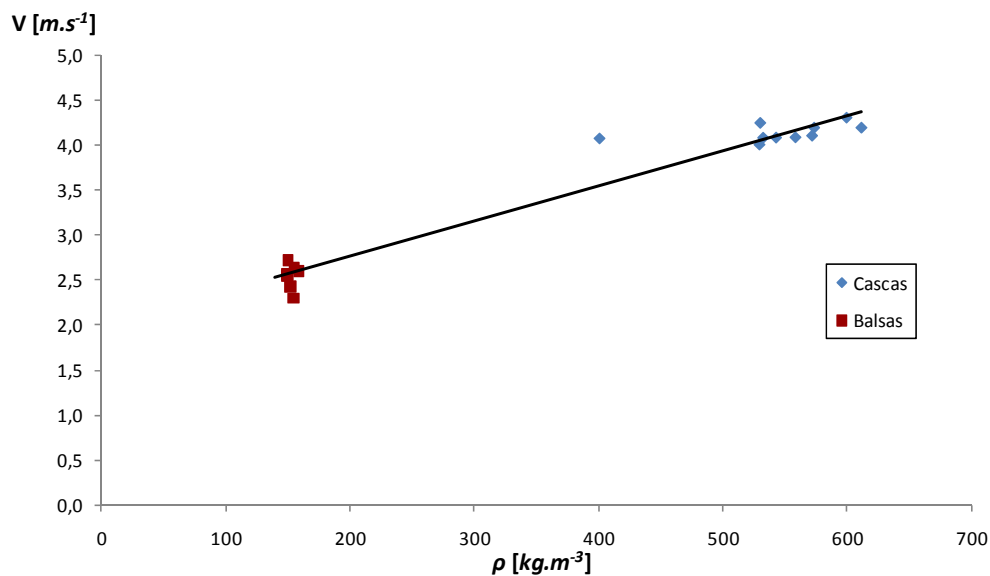
Figura 26 – Variação da velocidade terminal média com o coeficiente de forma AR.

A dependência de  $U_t$  relativamente à massa poderá ser constatada através da comparação da velocidade terminal de uma amostra de casca de eucalipto com uma amostra de balsa, com o mesmo factor de forma, isto é com as mesmas dimensões. Neste caso a única característica que varia é a densidade das amostras, em que a casca de eucalipto mais densa e conseqüentemente apresenta uma velocidade terminal maior relativamente a uma peça de balsa com as mesmas dimensões.

Na *Figura 26* compara-se ainda amostras do mesmo tipo, mas com dimensões diferentes, verificando-se que as velocidades terminais não são claramente influenciadas

pelas suas dimensões características, indicando que cada tipo de amostra tem uma velocidade terminal, explicando-se isto pelo facto de só se conseguir aumentar a massa de um tipo de amostra quando se aumenta as suas dimensões. Aumentando-se as dimensões, aumenta-se a área de resistência ao escoamento logo, em queda livre, uma partícula com maior massa pode não ter maior velocidade terminal devido à sua maior área de resistência. Esta observação leva que a cada tipo de amostra tenha uma velocidade terminal característica.

Todas estas observações feitas anteriormente levam admitir a existência de uma relação entre a velocidade terminal e a densidade de cada tipo de amostra, como se vê na seguinte figura (*Figura 27*):



**Figura 27 – Variação da velocidade terminal média com a densidade das amostras.**

Como é visível a velocidade terminal de cada tipo de amostra é característica da sua densidade. Podendo dizer-se que a velocidade terminal aumenta com o aumento da densidade.

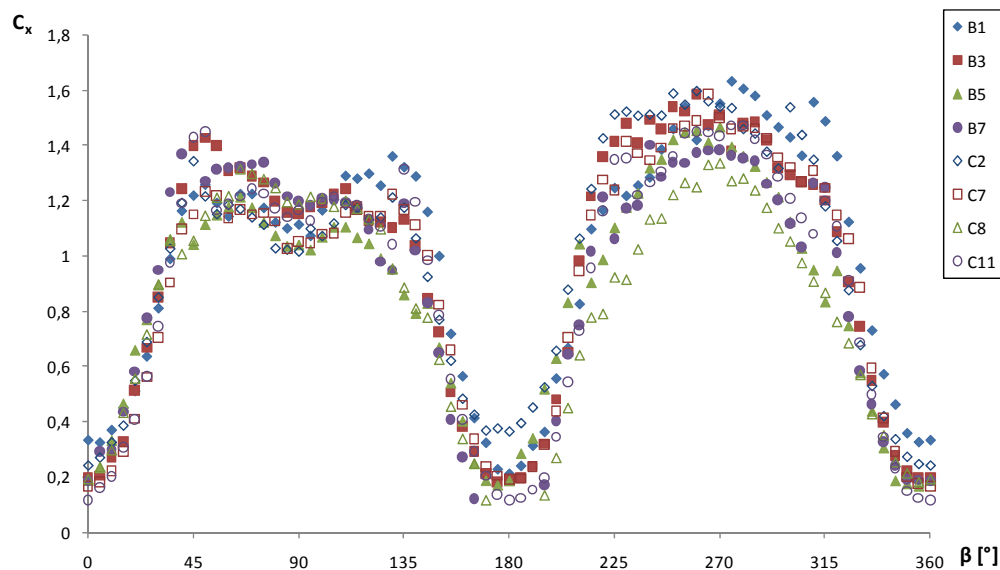
## 4.2. Determinação dos Coeficientes Aerodinâmicos

Nesta secção apresenta-se os resultados obtidos nos ensaios aerodinâmicos com as amostras ensaiadas.

Como foi referido na Metodologia, foram ensaiadas várias placas de cascas de eucalipto e de placas de balsa, com diferentes dimensões, sujeitas a variadas velocidades de escoamento. O cálculo dos coeficientes aerodinâmicos para as diversas amostras sujeitas a diferentes velocidades de escoamento, conduziu a valores dos coeficientes aerodinâmicos semelhantes, que apenas variaram em função do ângulo de incidência do escoamento.

### 4.2.1. Coeficiente de Resistência ( $C_x$ )

Os resultados obtidos nos ensaios para o coeficiente de resistência ( $C_x$ ), para as várias orientações de escoamento incidente e diferentes amostras ensaiadas no túnel, estão representados na *Figura 28*.



**Figura 28** – Resultados experimentais do valor de  $C_x$ , para as várias amostras ensaiadas, em função da orientação do escoamento  $\beta$ .

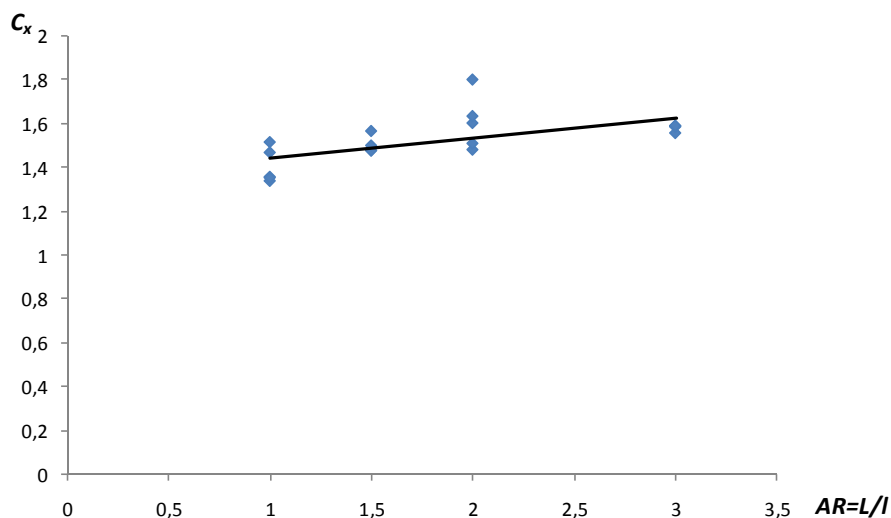
Como era esperado o valor de  $C_x$  é máximo, para os ângulos de orientação do escoamento próximos de  $\beta=270^\circ$  e deveria ser máximo para  $\beta=90^\circ$ , pois é quando as amostras estão com a maior área transversal ao escoamento. Este valor é mínimo quando se encontra com a menor área transversal ao escoamento, o que acontece para valores de orientação do escoamento próximos de  $\beta=0^\circ$ ,  $\beta=180^\circ$  e  $\beta=360^\circ$ .

Considera-se que o mecanismo de fixação das partículas, embora sendo de dimensões reduzidas, pode ser um factor de erro na determinação destes resultados. Os resultados anteriormente apresentados incluem as forças de resistência provocada pelo mecanismo de fixação. Na tentativa de determinar este erro experimental. Os cálculos efectuados e os resultados obtidos encontram-se em *Anexo*. Verifica-se que o erro obtido é pouco credível uma vez que atinge forças de resistência e sustentação bastante próximas das mesmas forças obtidas para as placas. Nesta perspectiva, decidiu-se considerar este erro desprezável, não o incluindo no cálculo final da determinação dos coeficientes aerodinâmicos.

Verificou-se ainda que as amostras, sendo simétricas entre as duas faces, apresentavam uma concavidade na zona próxima de  $\beta=90^\circ$ , o mesmo não acontecendo na região em torno de  $\beta=270^\circ$ . Este comportamento da zona de  $\beta=90^\circ$  poderá dever-se à proximidade da exaustão do ar do túnel ao chão para as medições das direcções próximas de  $\beta=90^\circ$ , pois é quando o ventilador se encontra mais próximo do chão, perturbando assim a saída de ar no túnel, reduzindo a velocidade na câmara de ensaios do *TCO*.

O valor de  $C_x$  para  $\beta=90^\circ$ , para uma placa plana é de 1,17 e para uma placa plana comprida é de 1,98, segundo a bibliografia consultada (Alé 2010), assim sendo os dados experimentais estão dentro do intervalo dado.

Na figura seguinte (*Figura 29*) relacionamos o valor de  $C_x$  máximo de cada amostra com as dimensões características de cada amostra, o gráfico representa o valor de  $C_x$  em função do factor de forma *AR* (“*Aspect Ratio*”):



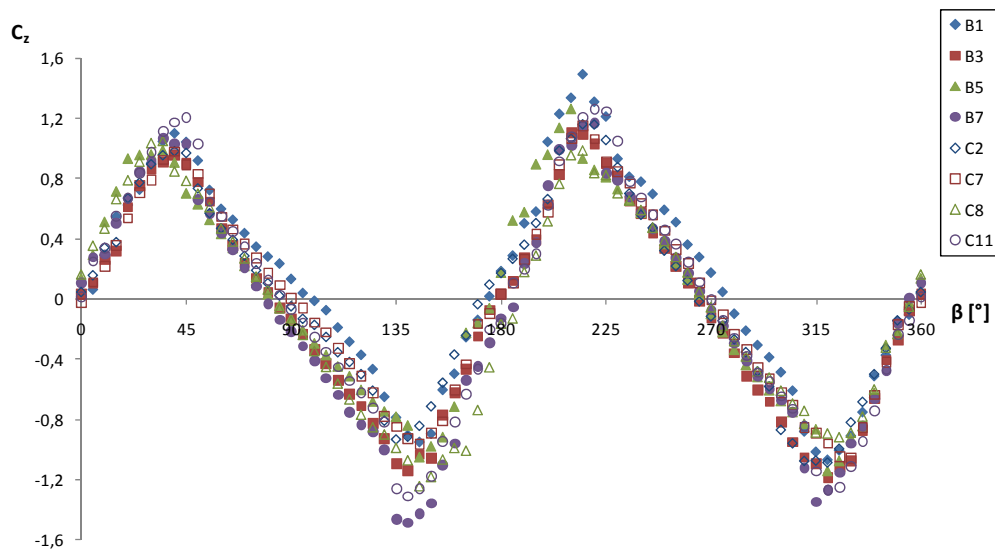
**Figura 29 – Coeficiente de resistência das amostras em função do *AR*.**



Com a representação do gráfico do  $C_x$  em função do factor de forma, obtemos uma relação de quanto maior for a razão entre o comprimento e a largura da amostra, maior será o  $C_x$ , o que vai de acordo com a bibliografia encontrada (Alé 2010).

#### 4.2.2. Coeficiente de Sustentação ( $C_z$ )

Os resultados obtidos para o coeficiente de sustentação, para as diferentes amostras segundo a orientação do escoamento, estão representados na *Figura 30*.

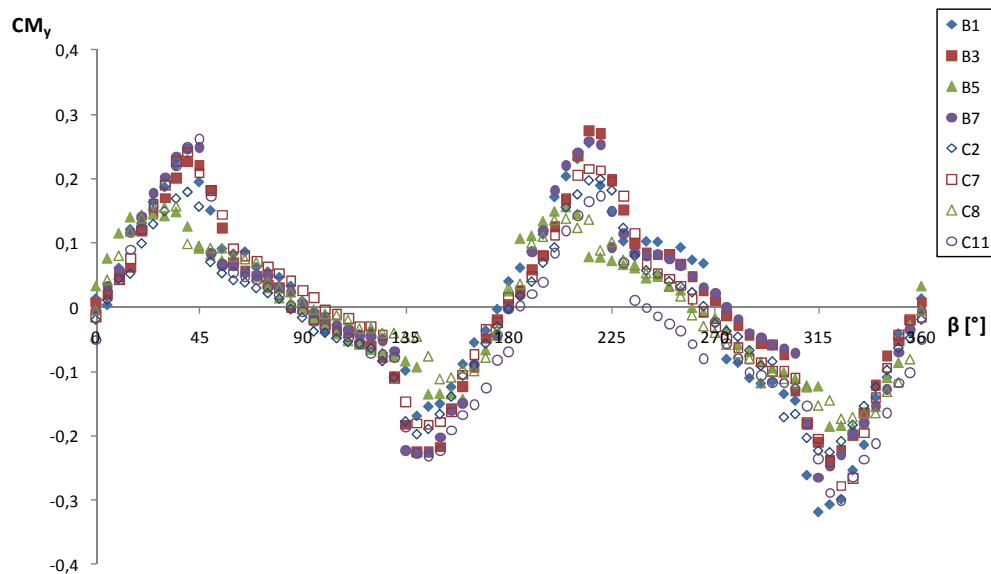


**Figura 30 – Resultados experimentais do valor de  $C_z$ , para as várias amostras ensaiadas, em função da orientação do escoamento  $\beta$ .**

Como seria de esperar o valor  $C_z$  é máximo quando as amostras se encontram sujeitas a um escoamento que as façam ficar com uma maior componente da força segundo  $z$ , isto acontece para valores de inclinação do escoamento próximos de  $\beta=45^\circ$ ,  $\beta=135^\circ$ ,  $\beta=225^\circ$  e  $\beta=315^\circ$ . Os valores mínimos de  $C_z$  são para valores de orientação do escoamento próximos de  $\beta=0^\circ$ ,  $\beta=180^\circ$  e  $\beta=360^\circ$ , pois é quando o escoamento se encontra orientado com a amostra, visto que é plana, não causa sustentação.

### 4.2.3. Coeficiente de Momento ( $CM_y$ )

Os resultados obtidos para o coeficiente de momento, para as diferentes amostras segundo a orientação do escoamento, estão representados na *Figura 31*.



**Figura 31** – Resultados experimentais do valor de  $CM_y$ , para as várias amostras ensaiadas, em função da orientação do escoamento  $\beta$ .

Para os valores do  $CM_y$ , os máximos encontram-se quando o escoamento produz momento máximo segundo  $y$ , isto é, quando o escoamento se encontra orientado aproximadamente para  $\beta=45^\circ$ ,  $\beta=135^\circ$ ,  $\beta=225^\circ$  e  $\beta=315^\circ$ , produzindo uma força de rotação segundo o eixo do  $y$ . Os valores mínimos do  $CM_y$  encontram-se quando o escoamento é perfeitamente perpendicular à face da amostra, para valores de orientação do escoamento de  $\beta=90^\circ$  e  $\beta=270^\circ$ , pois as forças de momento anulam-se, e quando o escoamento se encontra orientado com a amostra, para valores de orientação do escoamento próximos de  $\beta=0^\circ$ ,  $\beta=180^\circ$  e  $\beta=360^\circ$ , não produzindo forças de momento, pois as amostras são simétricas.

## 5. MODELO EMPÍRICO

O modelo que aqui vai ser formulado permite determinar os valores de  $C_x$ ,  $C_z$  e  $CM_y$  a partir de  $\beta$ .

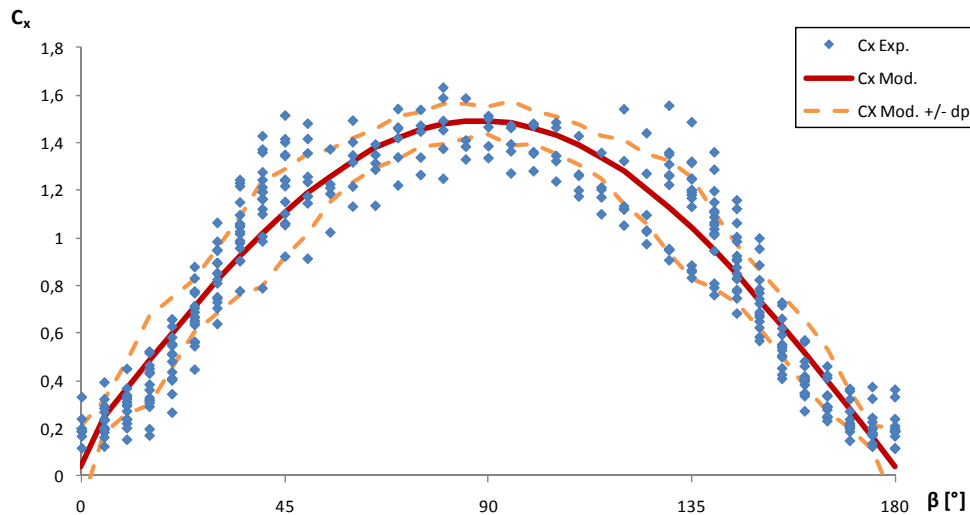
A formulação de um modelo, com base nas medições experimentais, permite estudar mais facilmente todos os tipos de amostras com geometria semelhante à utilizada nos ensaios. No caso deste modelo, a formulação é feita com base nos resultados obtidos experimentalmente de todas as amostras, utilizando os valores dos coeficientes aerodinâmicos para as respectivas orientações do escoamento, ajustando uma função que passe pela curva descrita por esses mesmos pontos. Para isso necessita-se de um programa que nos permita colocar os pontos experimentais e que trace uma função aproximada à curva descrita por esses mesmo pontos, o programa escolhido foi o *LAB Fit* (Silva e Silva, 2004).

Para obter uma melhor aproximação dividiram-se os ensaios em dois intervalos de  $\beta$ :  $0^\circ-180^\circ$  e  $180^\circ-360^\circ$ , duplicando assim o numero de resultados para a mesma direcção. Uma vez que as amostras são simétricas nestas duas gamas de valores.

Para a modelação do modelo  $C_x$  utilizamos somente os valores experimentais das medições de  $C_x$ , desprezando a relação do  $C_x$  com  $AR$ .

Ao sobrepor as curvas do  $C_x$ ,  $\beta$ :  $0^\circ-180^\circ$  e  $\beta$ :  $180^\circ-360^\circ$ , retiramos os dados que se encontravam na zona da concavidade de  $\beta=90^\circ$  por não terem a coerência já atrás mencionada, ficando somente com os resultados da zona de  $\beta=270^\circ$ .

Os valores foram analisados com o programa *Lab Fit* obtendo-se a representação dos valores de  $C_x$  evidenciada na *Figura 32*.



**Figura 32 – Resultado da modelação do *LAB Fit* para o modelo do  $C_x$ .**

A função encontrada pelo *LAB Fit* está representada na figura acima por uma linha contínua, com os pontos que lhe deram origem, e a tracejada encontra-se o desvio padrão médio dos pontos experimentais em relação ao modelo encontrado.

O modelo  $C_x$  tem uma função do tipo:

$$Y = a_1 \times \cos(a_2 \times \beta + a_3) + a_4 \quad (29)$$

Com os parâmetros a tomarem o valor de:

$$a_1 = 1,3078$$

$$a_2 = 0,0183$$

$$a_3 = -1,6137$$

$$a_4 = 0,1849$$

E um coeficiente de correlação,  $R^2 = 0,89$ .

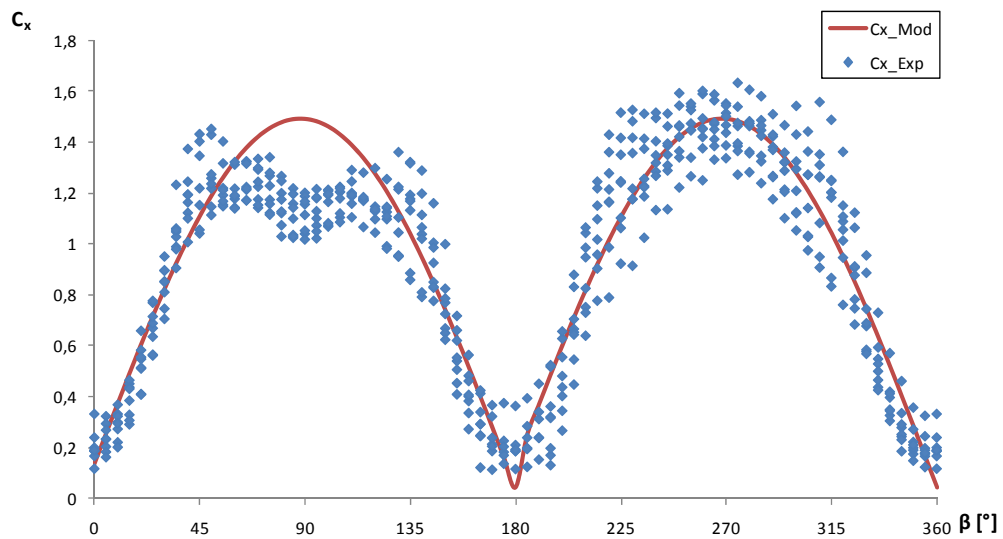
Visto que a função encontrada só se aplica dos  $0^\circ$  até aos  $180^\circ$ , teremos de transformar a função para representar os valores dos  $180^\circ$  até aos  $360^\circ$ , obtendo a seguinte função:

$$Y = a_1 \times \cos(a_2 \times (\beta - 180) + a_3) + a_4 \quad (30)$$

Em resumo, as funções que regem o modelo do  $C_x$  encontrado são:

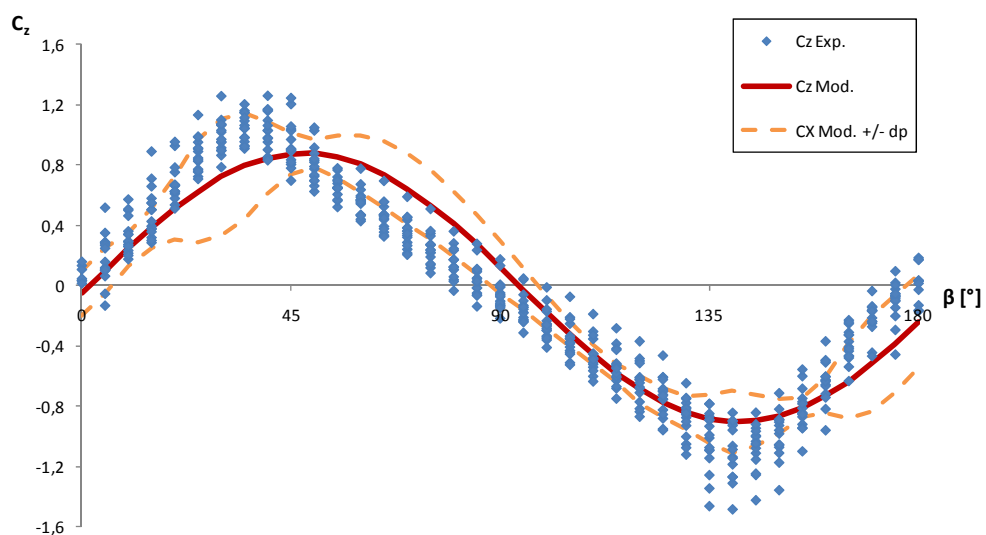
$$\begin{cases} C_x = 1,3078 \times \cos(0,0183 \times \beta - 1,6137) + 0,1849 \rightarrow \beta \in [0^\circ; 180^\circ] & (31) \\ C_x = 1,3078 \times \cos(0,0183 \times (\beta - 180) - 1,6137) + 0,1849 \rightarrow \beta \in [180^\circ; 360^\circ] & (32) \end{cases}$$

Comparando os dados experimentais de  $C_x$  com a curva do modelo de  $C_x$  na *Figura 33*, obtêm-se:



**Figura 33 – Comparação do modelo com os pontos experimentais de  $C_x$ .**

Para encontrar o modelo do coeficiente de sustentação procedeu-se da mesma forma, obtendo a seguinte curva (*Figura 34*):



**Figura 34 – Resultado da modelação do LAB Fit para o modelo do  $C_z$ .**

A função encontrada pelo *LAB Fit* está representada na figura a cima por uma linha contínua, com os pontos que lhe deram origem, e a tracejado encontra-se o desvio padrão médio dos pontos experimentais em relação ao modelo encontrado.

O modelo  $C_z$  tem uma função do tipo:

$$Y = a_1 \times SEN(a_2 \times \beta + a_3) + a_4 \quad (33)$$

Com os parâmetros a tomarem o valor de:

$$a_1 = 0,8926$$

$$a_2 = 0,0337$$

$$a_3 = -6,1114$$

$$a_4 = -0,0132$$

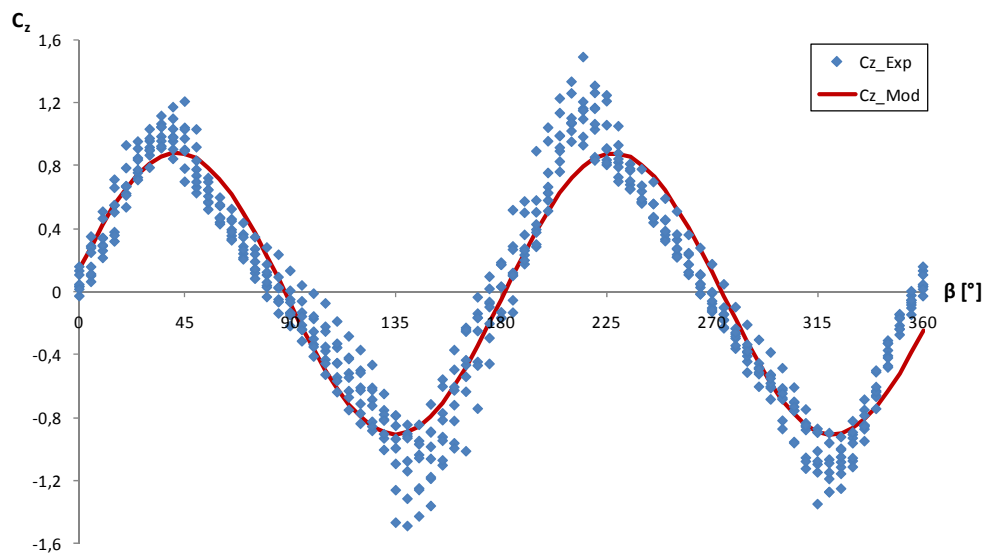
Com um coeficiente de correlação,  $R^2 = 0,93$

Em resumo, a função que rege o modelo do  $C_z$  encontrado é:

$$C_z = 0,8926 \times SEN(0,0337 \times \beta - 6,1114) - 0,0132 \quad (34)$$

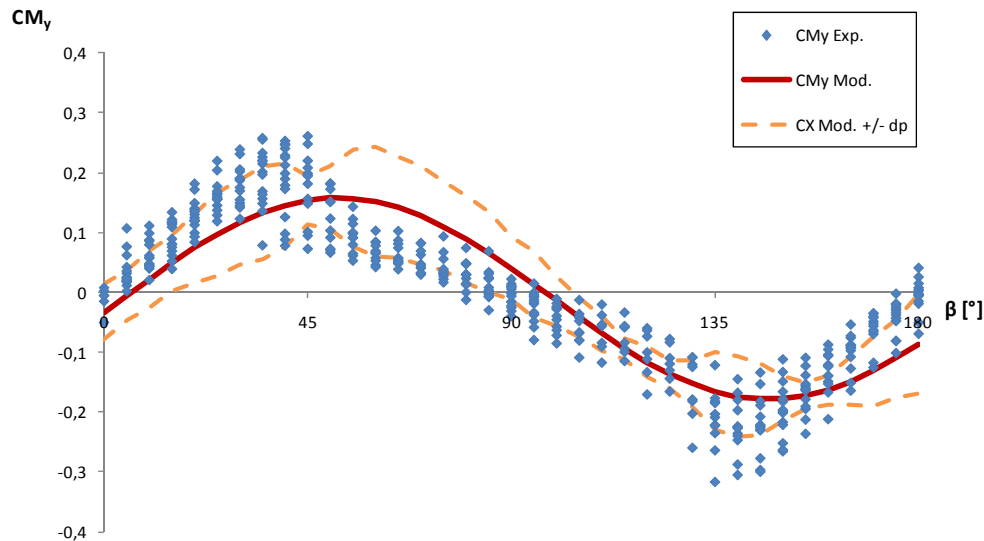
Comparando os dados experimentais de  $C_z$  com a curva do modelo de  $C_z$  na

*Figura 35*, obtêm-se:



**Figura 35 – Comparação do modelo com os pontos experimentais de  $C_z$ .**

Para modelar a função do modelo de  $CM_y$ , precedeu-se da mesma forma dos restantes modelos, obtendo a seguinte curva (*Figura 36*):



**Figura 36 – Resultado da modelação do LAB Fit para o modelo do  $CM_y$ .**

A função encontrada pelo *LAB Fit* está representada na figura a cima por uma linha contínua, com os pontos que lhe deram origem e a tracejado encontra-se o desvio padrão médio dos pontos experimentais em relação ao modelo encontrado.

O modelo  $CM_y$ , como o modelo de  $C_z$ , tem uma função do tipo:

$$Y = a_1 \times SEN(a_2 \times \beta + a_3) + a_4 \quad (33)$$

Com os parâmetros a tomarem o valor de:

$$a_1 = 0,1683$$

$$a_2 = 0,0330$$

$$a_3 = -6,0758$$

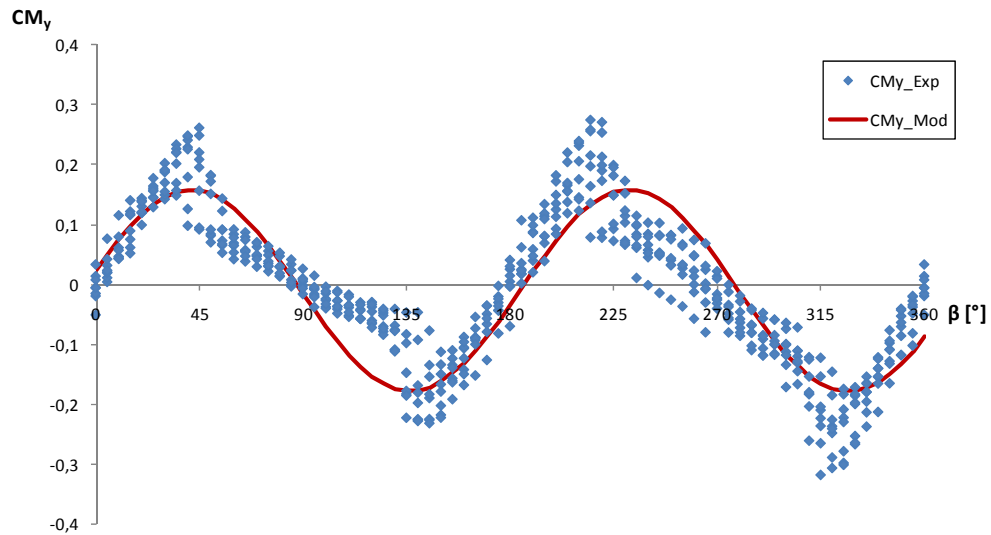
$$a_4 = -0,0102$$

Com um coeficiente de correlação,  $R^2 = 0,87$

Em resumo, a função que rege o modelo de  $CM_y$  encontrado é:

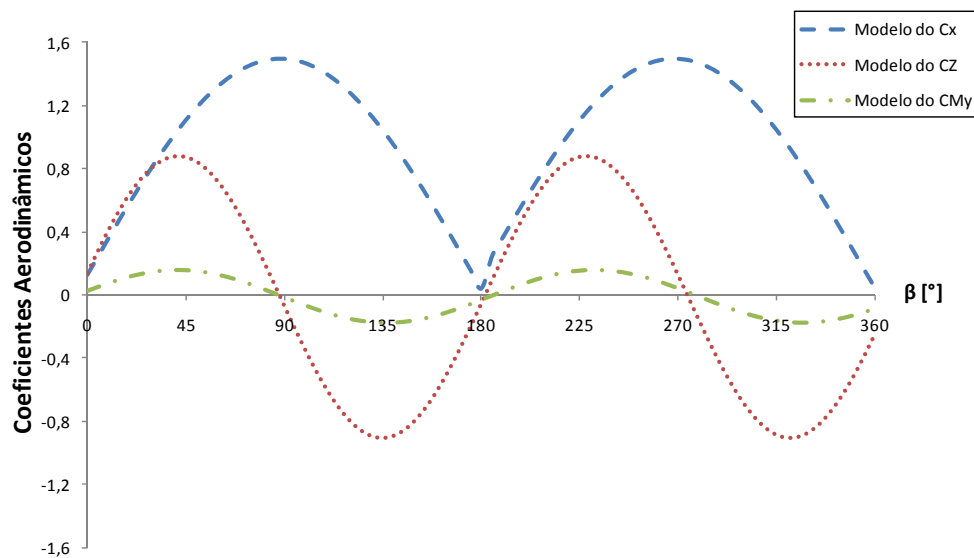
$$CM_y = 0,1683 \times SEN(0,0330 \times \beta - 6,0758) - 0,0102 \quad (35)$$

Comparando os dados experimentais de  $CM_y$  com a curva do modelo de  $CM_y$ , na *Figura 37*, obtêm-se:



**Figura 37** – Comparação do modelo com os pontos experimentais de  $CM_y$ .

Obtendo no final as seguintes curvas dos modelos dos coeficientes aerodinâmicos (*Figura 38*):



**Figura 38** – Modelos dos coeficientes aerodinâmicos com base nos dados experimentais obtidos.



Todos os modelos dos coeficientes aerodinâmicos aqui modelados vão de encontro aos modelos encontrados por Almeida (2010) para os coeficientes aerodinâmicos de cascas de forma cilíndricas.

Comparando as linhas de desvio padrão médio em relação aos modelos dos coeficientes aerodinâmicos obtidos verifica-se uma boa aproximação do modelo de  $C_x$  encontrado, no entanto para os modelos de  $C_z$  e  $CM_y$ , já não acontece o mesmo, pois a faixa definida pelo desvio padrão médio nesses casos é bastante superior à do modelo de  $C_x$ .

## 6. VALIDAÇÃO DO MODELO

Para aferir a validade do modelo desenvolvido, sujeitaram-se as amostras a uma queda de 9,7 m, para medição das suas velocidades terminais de queda, comparando posteriormente os valores obtidos com a velocidade terminal calculada através do coeficiente de resistência. É de verificar, como já foi dito na metodologia, que a queda livre das amostras é feita na ausência de vento.

Em virtude da posição inicial a que foram lançadas as amostras e a posição que as amostras têm na queda livre, aproximadamente horizontal, tendo a direcção do escoamento mais ou menos aos 270°, escolheu-se o valor máximo de  $C_x$  do modelo, para fazer a verificação do mesmo.

Com as características das amostras, o valor máximo do modelo de  $C_x$  e com base na seguinte fórmula,

$$U_t = \sqrt{\frac{2F}{\rho_{ar} \times A \times C_x'}} \quad (36)$$

obteve-se a velocidade terminal das amostras dada pelo modelo do coeficiente de resistência.

Onde  $F$  corresponde a força gravítica ( $F = m \times g$ ), visto que é a única força a actuar nas amostras, e  $A$  corresponde a área da amostra ( $A = L \times l$ ).

Com base nestas fórmulas e no modelo de  $C_x$  determinado pelos ensaios aerodinâmicos, vamos proceder ao cálculo das velocidades terminais.

Calculou-se a as velocidades terminais com base no modelo do  $C_x$  para a orientação do escoamento de  $\beta=270^\circ$ , representadas na seguinte tabela:

**Tabela 3 – Velocidades terminais calculadas com base no modelo do  $C_x$**

Amostra	$L$ [cm]	$l$ [cm]	$m$ [g]	$C_x$ do modelo	$U_t$ [m.s <sup>-1</sup> ]
C1	10,0	5,0	6,00	1,492	3,58
C2	10,0	5,0	5,30	1,492	3,37
C3	10,0	5,0	5,33	1,492	3,38

Tabela 3 (Cont.) – Velocidades terminais calculadas com base no modelo do  $C_x$ 

Amostra	$L$ [cm]	$l$ [cm]	$m$ [g]	$C_x$ do modelo	$U_t$ [m.s <sup>-1</sup> ]
C4	10,0	5,0	6,12	1,492	3,62
C5	15,0	5,0	7,96	1,492	3,37
C6	15,0	5,0	11,97	1,492	4,13
C7	15,0	5,0	6,02	1,492	2,93
C8	10,0	10,0	11,48	1,492	3,50
C9	10,0	10,0	11,18	1,492	3,46
C10	15,0	10,0	16,30	1,492	3,41
C11	15,0	10,0	17,17	1,492	3,50
B1	10,0	5,0	2,25	1,492	2,19
B2	10,0	5,0	2,25	1,492	2,19
B3	15,0	5,0	3,15	1,492	2,12
B4	15,0	5,0	3,58	1,492	2,26
B5	10,0	10,0	4,65	1,492	2,23
B6	10,0	10,0	4,51	1,492	2,20
B7	15,0	10,0	6,99	1,492	2,23
B8	15,0	10,0	6,85	1,492	2,21

Recorrendo agora às velocidades terminais da *Tabela 2* e da *Tabela 3* para comparação e cálculo do erro:

Tabela 4 – Comparação das velocidades terminais

Amostra	Velocidade média na queda [m.s <sup>-1</sup> ]	Velocidade calculada [m.s <sup>-1</sup> ]	AR [L/l]	Erro [%]
C1	4,31	3,58	2	16,91
C2	4,01	3,37	2	15,99
C3	4,08	3,38	2	17,34
C4	4,20	3,62	2	13,82
C5	4,25	3,37	3	20,76
C6	An*	4,13	3	An
C7	4,08	2,93	3	28,13
C8	4,20	3,50	1	16,54
C9	4,09	3,46	1	15,44
C10	4,09	3,41	1,5	16,58
C11	4,11	3,50	1,5	14,83

Tabela 4 (Cont.) – Comparação das velocidades terminais

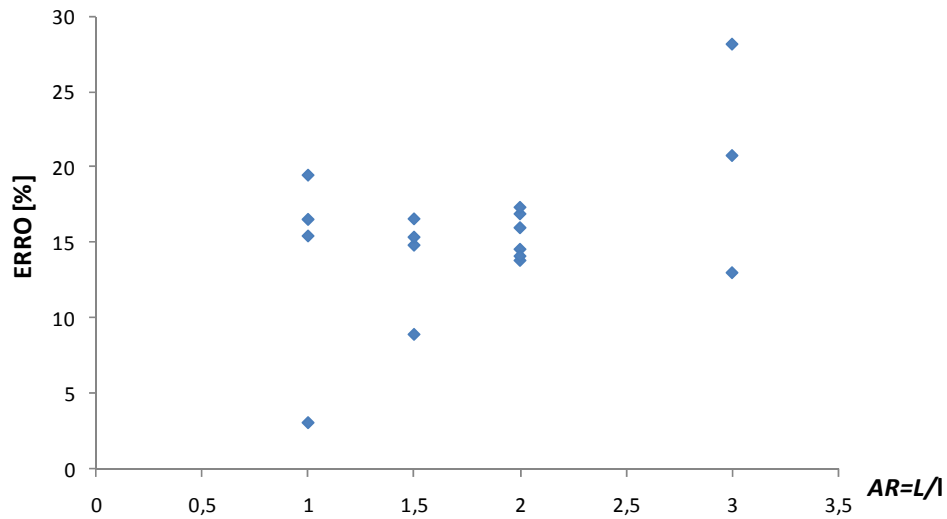
Amostra	Velocidade média na queda [ $m.s^{-1}$ ]	Velocidade calculada [ $m.s^{-1}$ ]	AR [L/l]	Erro [%]
B1	2,57	2,19	2	14,56
B2	2,55	2,19	2	14,11
B3	An	2,12	3	An
B4	2,60	2,26	3	13,01
B5	2,30	2,23	1	3,09
B6	2,73	2,20	1	19,46
B7	2,64	2,23	1,5	15,36
B8	2,43	2,21	1,5	8,93

\*An – Ensaios anulados.

Mesmo só considerando, para os cálculos da velocidade média terminal, somente o intervalo de tempo que a amostra apresenta velocidade aproximadamente constante na queda, a média do erro das velocidades calculadas com base no modelo do coeficiente de resistência, é de aproximadamente 16%.

Como se pode verificar, as velocidades terminais calculadas são sempre inferiores às velocidades medidas na queda livre das amostras, este facto deve-se à diferença da posição para que é calculada a velocidade terminal e a posição que as amostras tomam na queda livre, isto é, as velocidades terminais foram calculadas para a posição de  $C_x$  máximo ( $\beta=90^\circ$ ), visto que é a sua posição de equilíbrio, porque sendo simétrica, é a posição de maior resistência, e ainda porque foi a posição inicial da queda livre das amostras. Durante a queda, a amostra vai assumindo valores de  $\beta$  que variam entre  $225^\circ$  e os  $315^\circ$ . Esta oscilação tem como consequência, o aumento da sua velocidade terminal em relação à velocidade calculada para a orientação do modelo do  $C_x$  dos  $270^\circ$ .

Na figura seguinte (*Figura 39*) representamos graficamente o erro das velocidades terminais para cada dimensão de amostra, tem-se o erro em função do factor de forma (*AR*).



**Figura 39 – Erro das velocidades terminais em função do  $AR$ .**

Como se pode verificar pela distribuição do erro para as amostras ensaiadas, não existe qualquer dependência ou relação, entre as dimensões das amostras e o erro obtido das velocidades terminais.

## 7. CONCLUSÕES

Tal como foi referido no início desta dissertação, os objectivos propostos consistiam na determinação dos coeficientes aerodinâmicos de partículas planas para as várias orientações do escoamento incidente, elaborando um modelo com base nos dados obtidos experimentalmente, que seria validado por comparação da velocidade terminal medida em queda livre com a velocidade obtida através dos modelos aerodinâmicos. E ainda, a relação das características físicas das amostras com os valores de  $C_x$  e velocidade terminal medida nos ensaios de queda livre. Para além das observações necessárias ao cumprimento dos objectivos enunciados anteriormente, observa-se nos ensaios de queda livre, as trajectórias e tipo de movimento que as amostras tomavam, embora não tenha sido analisado e detalhado na dissertação.

Todo este trabalho contribuiu para uma melhor compreensão sobre o transporte de partículas planas, que por sua vez ajudou a compreender o transporte das partículas incandescentes emitidas por um incêndio.

O túnel de combustão oblíquo foi projectado e construído para a realização de ensaios relacionados com os focos secundários. Para o usar de forma correcta, foi imprescindível o seguimento de uma metodologia, para a calibração e obtenção dos coeficientes aerodinâmicos. No entanto, ainda existe uma lacuna no tratamento de dados, uma vez que não se conseguiu implementar um método de cálculo para a eliminação da presença do mecanismo de fixação ao escoamento, sendo este contabilizado pela célula de carga, bem como, as forças e momentos a que estão sujeitas as amostras, afectando assim os valores dos coeficientes aerodinâmicos. Em *Anexo* apresenta-se uma tentativa de implementar um método de cálculo para retirar o efeito do mecanismo de fixação, que no entanto conduziu a diversos problemas, levando ao seu abandono.

A escolha do tipo de amostras analisadas, cascas de eucalipto, também é de grande interesse, uma vez que são pouco estudadas e pela sua grande representatividade na floresta portuguesa.

O facto de os ensaios terem sido realizados com partículas naturais e formas regulares muito parecidas com as amostras de cascas de eucalipto, tornou o estudo mais

concreto e aproximado à realidade. No entanto esta escolha dificultou tanto a análise de dados como a preparação das amostras e realização dos ensaios.

A análise das características das amostras estudadas foi fundamental para a compreensão do estudo, tendo permitido relacionar os parâmetros aerodinâmicos e velocidades terminais médias medidas com as características físicas das amostras, obtendo dessas relações conclusões que vão de encontro com a bibliografia consultada.

Relacionando as características físicas das amostras com a velocidade terminal média medida, concluí-se que esta não varia com as dimensões características das amostras do mesmo tipo, tendo uma velocidade característica para cada tipo de amostra. Conclui-se ainda que a velocidade terminal depende da densidade.

A medição dos coeficientes aerodinâmicos está de acordo com os valores elencados na bibliografia encontrada, como já havia sido referido, e concluímos que existe uma dependência do  $C_x$  com o factor de forma (*Aspect Ratio*), isto é, quanto maior a razão entre o comprimento e largura, maior será o valor de  $C_x$ .

As funções dos modelos encontradas para os coeficientes aerodinâmicos são próximas dos resultados experimentais obtidos, principalmente o modelo do coeficiente de resistência ( $C_x$ )

Apesar das medições dos coeficientes aerodinâmicos e do modelo aerodinâmico se encontrarem dentro dos valores da bibliografia encontrada, as velocidades terminais calculadas através do modelo e as velocidades terminais medidas nos ensaios de queda livre não são coerentes. As velocidades terminais calculadas através do modelo para a orientação do escoamento de  $270^\circ$ , apresentam sempre um valor inferior às velocidades terminais medidas em queda livre. Assim conclui-se que esta diferença pode ser devida ao tipo de movimento que as amostras tomam em queda livre, pois as amostras tomam dois tipos de movimento: descem a “planar” variando a direcção entre elas e o escoamento de aproximadamente entre os  $225^\circ$  e os  $315^\circ$  ou adoptam um movimento de rotação em torno do seu eixo longitudinal o que leva ao aumento das velocidades de queda das amostras.

O erro encontrado na diferença entre velocidades terminal do modelo e a velocidade terminal média medida não tem qualquer relação com as dimensões características das amostras.

O tipo de movimento que as partículas planas tomam na sua trajetória em queda livre é um tema complexo e de elevado interesse, pois a velocidade de combustão está relacionada com o tipo de movimento das partículas incandescentes.

Com este estudo concluiu-se ainda, que a partir do momento em que um incêndio, numa floresta de eucaliptos, tenha uma intensidade suficiente para gerar uma pluma térmica com velocidade ascendente superior a  $5 \text{ m.s}^{-1}$  pode dar-se a libertação de partículas planas de cascas de *Eucalyptus globulus* Lab., podendo dar origem a focos secundários.

No âmbito do estudo dos focos secundários, para melhorar a sua compreensão e como continuação deste estudo, poderá ser analisada a velocidade combustão de partículas planas, relacionando a perda de massa com a velocidade de escoamento. Pode igualmente ser estudada a variação da velocidade de combustão com os dois tipos de movimento identificados na queda livre das amostras.

Este estudo pode ser ainda utilizado para outros tipos e formas geométricas de combustíveis, que se encontrem nas nossas florestas e que possam provocar focos secundários.



## 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.
- Alé, J. A. V. (2010), Apostila de Escoamentos Viscosos - DEM, Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul – PUCRS, 7, Pp 90. Acedido em 25 de Julho de 2011, em [http://www.feng.pucrs.br/lsvm/MaqFluxo/Maq-Fluxo/APOSTILA\\_ESCOAMENTOS\\_VISCOSOS\\_2010.pdf](http://www.feng.pucrs.br/lsvm/MaqFluxo/Maq-Fluxo/APOSTILA_ESCOAMENTOS_VISCOSOS_2010.pdf)
- Almeida, (2009), Almeida, M, Viegas, XV, Miranda, AI, Reva, V (2009) Combustibility of Potential Firebrands, 18th IMACS – World Congress MODSIM09 – International Congress on Modelling and Simulations, Cairns – Australia, 13-17 July.
- 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.
- Cheney, N. P. and G.A.V. Bary. (1969). The Propagation of Mass Conflagrations in a Standing Eucalypt Forest by the Spotting Process. Paper A6, Mass Fire Symposium, Canberra, February 1969, C of A.
- Clements, H. B. (1977), Lift-Off of Forest Firebrands. USDA Forest Service Research Paper SE-159.
- 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
- Ellis, (2000) - Ellis, P.F.(2000), *The Aerodynamic and Combustion Characteristics of Eucalypt Bark - A Firebrand Study*, Ph. D. Dissertation, Australian National University, Camberra
- Finn, D. L. (2007), Falling Paper and Flying Business Cards, *SIAM News*, Vol. 40, Number 4.
- Hodgson, A. (1968), Control Burning in Eucalypt Forests in Victoria, Australia. *Aust. J. For.* 66(8): 601-605.
- Hirata, K. e Shimizu, K. et. al. (2009), Aerodynamic Characteristics of a Tambling Plane under Free Flight - *Journal of Fluid Science and Technology*, Vol. 4, No 1.

- Infopédia, Eucalipto (*Eucalyptus globulus*) e sua distribuição em Portugal, Enciclopédia e Dicionário da Porto Editora, Acedido em 10 de Julho de 2011, em [http://www.infopedia.pt/\\$eucalipto,2?docid=10652400](http://www.infopedia.pt/$eucalipto,2?docid=10652400)
- SocialTwist Tell-a-Friend
- 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.
- Luke, R. H. e A.G. McArthur (1978), *Bushfires in Australia*. CSIRO Div. Forest Res. AGPS Canberra.
- Manzello, S. L. (2007), 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. (2007), 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
- McArthur, A. G. (1967). Fire behaviour in eucalypt forests. *Comm. of Australia For. & Timber Bur. Leaflet No. 107*.
- 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.
- National Biological Information Infrastructure e Discover Life, *Eucalyptus globulus* Labill, Acedido em 10 de Julho de 20011, em <http://www.discoverlife.org/mp/20m?kind=Eucalyptus+globulus>
- Oliveira & Lopes (2006) - Oliveira, Luís A. & Lopes, António G., “Mecânica dos Fluidos”, 1ª Edição, ETEP - Edições Técnicas e Profissionais
- Pagni P. J., Woicheese J. P. (2000), Fire Spread by Brand Spotting; Fifteenth Meeting of the UJNR Pane on Fire Research an Safety – March 1-7, Volume 2.
- Pires, J. N. (2003), JR3 PCI Software Version 13-2003, <http://robotics.dem.uc.pt/norberto/jr3pci/>
- Raupach, M. R. (1990), Similarity analysis of the interaction of bushfire plumes with ambient winds. *Mathl. Comput. Modelling*, Vol. 13, No.12, Pp. 113-121.
- 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
- Sardoy N. et. al (2007), Modelling transport and combustion of firebrands from burning trees, *Combustion and Flame* 150, 151-169.
- Silva W. P., Silva, C. M. D. (2009) LAB Fit Curve Fitting Software (Nonlinear Regression and Treatment of Data Program) V 7.2.46 (1999-2009), online available from: [www.labfit.net](http://www.labfit.net).
- 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.
- 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.
- 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. e Almeida M. et. al. (2009), *Combustibility of Potential Firebrands*, 18th IMACS – World Congress MODSIM09 – International Congress on Modelling and Simulations, Cairns – Australia, 13-17 July.
- Viegas D. X. (2010), Programa de computador ajuda a prever fogos secundários, D. N. Ciência, Acedido em 10 de Julho de 2011, em [http://www.dn.pt/inicio/ciencia/interior.aspx?content\\_id=1704368&page=2](http://www.dn.pt/inicio/ciencia/interior.aspx?content_id=1704368&page=2)
- Viegas D. X. e Almeida M. et. al. (2010), *Aerodynamic Characteristics of Some Potential Embers - VI International Conference on Forest Fire Research*.
- Vitte A. M. S. e Brito J. O. (2003), *Óleo Essencial de Eucalipto*, Universidade de São Paulo, Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Documentos Florestais, Nº 17, Agosto de 2003, ISSN 0103-4715.
- Wilson, A.A.G. (1992), *Eucalypt Bark Hazard Guide*. Research Rep. No. 32. Fire Mgt. Branch. Dept. Cons. & Environment - Victoria.
- Young, P. H. (1973), *Firebrand Trajectory Model*. Aerospace Rep. ATR-74(8158)-1, The Aerospace Corp., El Segundo, Calif.

---

## ANEXO

### Introdução aos ensaios em vazio

Os ensaios aerodinâmicos foram realizados recorrendo a mecanismos que fixam as amostras à célula de carga. Estes mecanismos, por se encontrarem dentro do túnel aerodinâmico, sujeitos à ventilação, e ligados à célula de carga, vão interferir nos resultados das medições dos sinais das forças e dos momentos fornecidos pela célula de carga. Nesta perspectiva, as forças registadas pela célula de carga devem-se, não apenas, às forças actuantes na partícula em análise, mas também às forças actuantes no mecanismo de fixação.

Sendo assim, para obter somente a medição das forças e do momento na amostra, efectuámos ensaios em vazio com os mecanismos de fixação utilizados e elaborámos um método de cálculo de forma a retirar o efeito desses mecanismos nas medições dos ensaios.

Os ensaios em vazio são feitos em três etapas. A primeira etapa consiste em ensaiar somente uma haste igual à utilizada na fixação da amostra. A segunda etapa consiste em ensaiar uma haste igual à anterior, soldada a uma placa de metal com  $10 \times 10 \text{ cm}^2$ . A terceira e última etapa, consiste em ensaiar uma placa metálica  $10 \times 10 \text{ cm}^2$  presa por uma garra, tipo crocodilo, que está soldada a uma haste, igual às anteriores, e segura da mesma forma que se prendem as amostras.

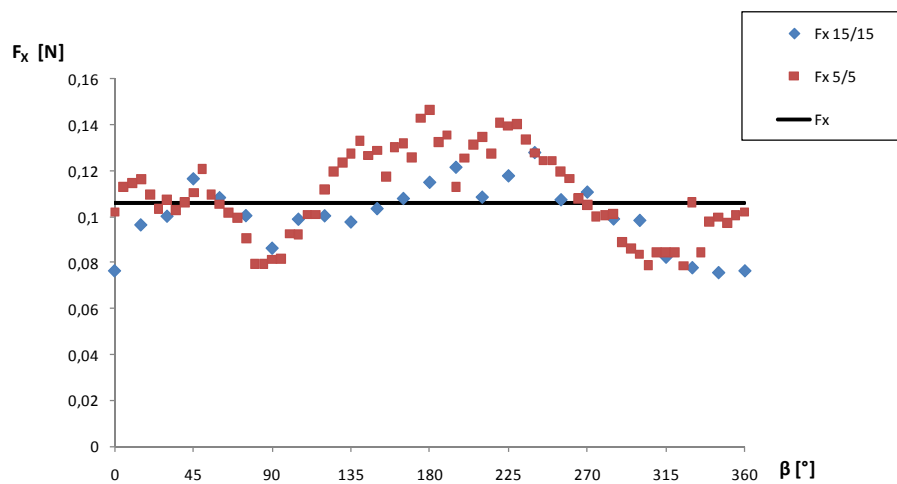
Depois destes três ensaios, estamos em condições de saber os efeitos do mecanismo de fixação. Para isso basta subtrair o ensaio da primeira etapa ao da segunda, e subtrair ao ensaio da terceira o resultado da subtracção dos ensaios anteriores.

No fim destas subtracções ficamos com as forças e momento que o mecanismo de fixação incrementa nas medições dos ensaios aerodinâmicos. Podendo aí subtrair aos resultados das medições das forças e do momento das amostras, as forças e momento incrementados pela presença do mecanismo de fixação.

## Calculo das forças e momento dos ensaios em vazio

Como já atrás foi referido, é necessário fazer os três ensaios em vazio para retirar o efeito do mecanismo de fixação nos ensaios das amostras.

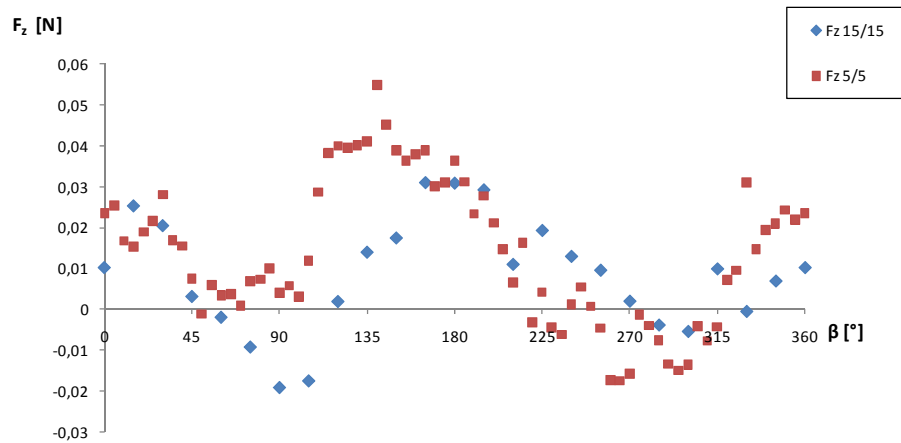
O primeiro ensaio em vazio a ser feito foi o da haste. Repetiu-se o ensaio duas vezes, a primeira vez medimos de  $5^\circ$  em  $5^\circ$  e na segunda vez medimos de  $15^\circ$  em  $15^\circ$ . Na figura seguinte representamos graficamente o resultado da força segundo  $x$  (*Figura 40*):



**Figura 40 – Resultados experimentais do valor de  $F_x$ , para os ensaios da haste, em função da orientação do escoamento  $\beta$ .**

A série  $F_x$  15/15 corresponde às medições feitas de  $15^\circ$  em  $15^\circ$ , a série  $F_x$  5/5 corresponde às medições feitas de  $5^\circ$  em  $5^\circ$ , por fim, a série  $F_x$  é a média das duas medidas anteriores. Uma vez que, a haste que ensaiamos, a olho nu, é perfeitamente cilíndrica e regular, não tinha qualquer coerência usar um valor de  $F_x$  diferente para cada direcção diferente do escoamento, logo, levou-nos a considerar um valor médio constante de  $F_x$ , para qualquer que fosse a direcção do escoamento, optando assim pelo valor médio dos dois ensaios.

O gráfico que se segue, *Figura 41*, representa o resultado das medições para a força segundo  $z$ :

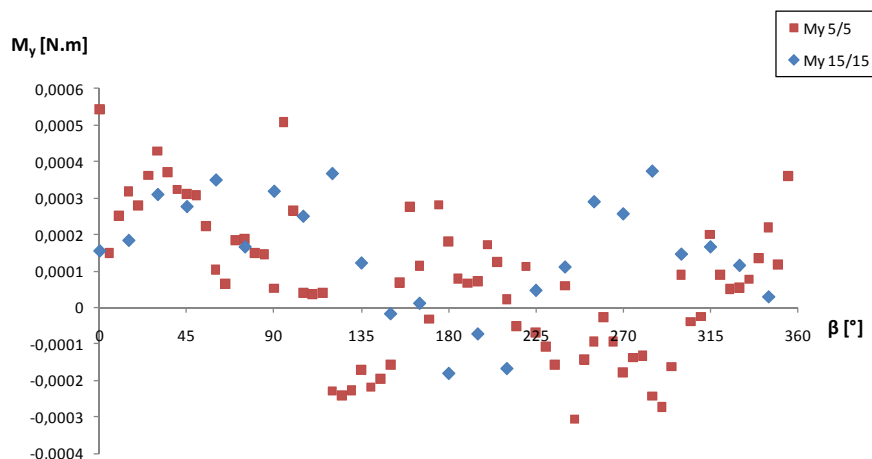


**Figura 41 – Resultados experimentais do valor de  $F_z$ , para os ensaios da haste, em função da orientação do escoamento  $\beta$ .**

A série  $F_z$  15/15 corresponde às medições feitas de  $15^\circ$  em  $15^\circ$ , a série  $F_z$  5/5 corresponde às medições feitas de  $5^\circ$  em  $5^\circ$ .

Perante os resultados que obtivemos da força segundo  $z$ , não as considerámos nos cálculos dos ensaios em vazio por três razões: a primeira, é pela incoerência dos resultados das medições para a mesma direcção de escoamento, a segunda, prende-se com o facto de que a haste que ensaiámos é perfeitamente cilíndrica e regular a olho nu, logo esta forma geométrica não deveria gerar uma força de sustentação segundo  $z$ , qualquer que seja a orientação do escoamento, a terceira e última razão é pelo facto que a força segundo  $z$  da haste, medida pela célula de carga, é cerca de 20 vezes mais pequena que a força medida numa amostra, logo pode ser desprezada.

O gráfico que se segue, *Figura 42*, representa o resultado das medições para o momento segundo  $y$ :



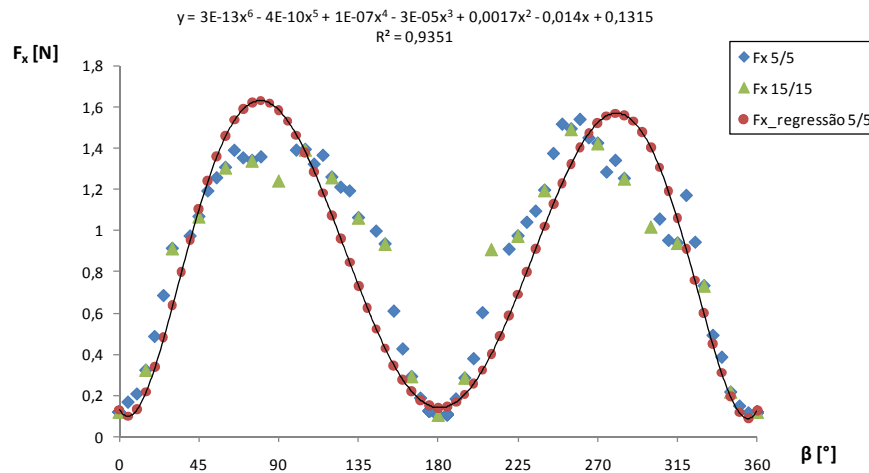
**Figura 42 – Resultados experimentais do valor de  $M_y$ , para os ensaios da haste, em função da orientação do escoamento  $\beta$ .**

A série  $M_y$  15/15 corresponde às medições feitas de  $15^\circ$  em  $15^\circ$ , a série  $M_y$  5/5 corresponde às medições feitas de  $5^\circ$  em  $5^\circ$ .

Perante os resultados que obtivemos do momento segundo  $y$ , não os considerámos nos cálculos dos ensaios em vazio por três razões: a primeira, é pela incoerência dos resultados das medições para a mesma direcção do escoamento, a segunda, prende-se com o facto de que a haste que ensaiámos é perfeitamente cilíndrica e regular a olho nu, logo esta forma geométrica não deveria gerar momento segundo  $y$ , qualquer que seja a orientação do escoamento, a terceira e última razão, é pelo facto que o momento da haste, medido pela célula de carga, é cerca de 80 vezes mais pequeno que o momento medido para uma amostra, logo pode ser desprezado.

Em resumo, no ensaio de vazio da haste, a única variável que vamos considerar é o valor médio da força segundo  $x$ .

O segundo ensaio em vazio a ser feito foi o da haste soldada à placa de metal de  $10 \times 10 \text{ cm}^2$ . Este ensaio foi medido de  $5^\circ$  em  $5^\circ$  e de  $15^\circ$  em  $15^\circ$ . Na figura seguinte (Figura 43) representamos graficamente o resultado da força segundo  $x$ :



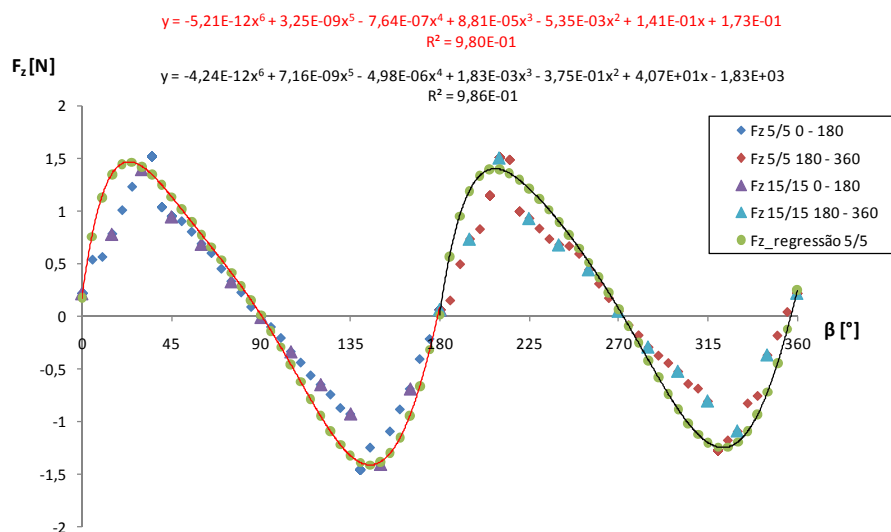
**Figura 43 – Resultados experimentais do valor de  $F_x$ , para os ensaios da haste soldada à placa  $10 \times 10 \text{ cm}^2$ , em função da orientação do escoamento  $\beta$ .**

A série  $F_x$  5/5 corresponde às medições feitas de  $5^\circ$  em  $5^\circ$ , a série  $F_x$  15/15 corresponde às medições feitas de  $15^\circ$  em  $15^\circ$  e a série  $F_x$ \_regressão 5/5 corresponde aos pontos da função que obtivemos com a regressão linear de 6º grau dos pontos experimentais.

Analisando os resultados das medições (série  $F_x$  5/5 e série  $F_x$  15/15), constatamos que definem uma curva com os seus pontos experimentais, no entanto a subtração ponto a ponto para efectuar os cálculos dos ensaios em vazio do mecanismo de fixação, traz-nos algumas dificuldades, porque existem sempre alguns pontos experimentais que saem da curva definida pela maioria. Para evitar esses desvios, efectuámos uma regressão linear das curvas experimentais (série  $F_x$  5/5 e série  $F_x$  15/15).



O gráfico que se segue, *Figura 44*, representa o resultado das medições para a força segundo z:

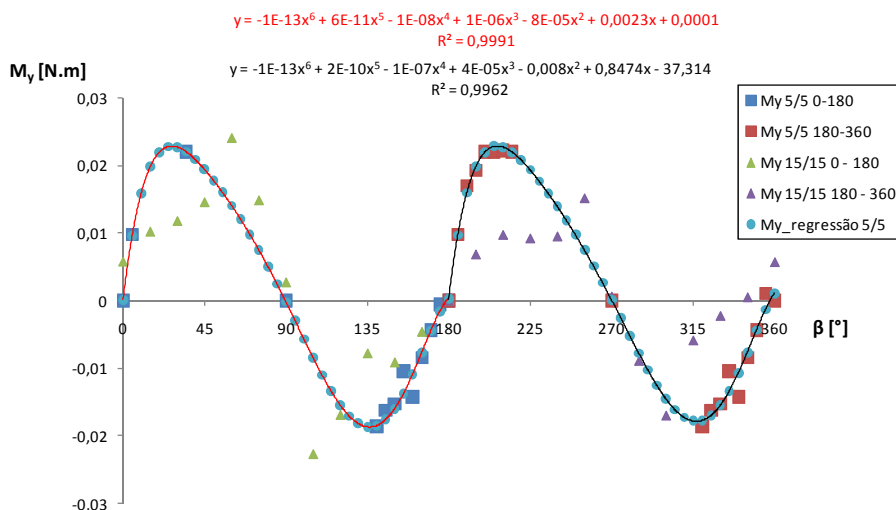


**Figura 44 – Resultados experimentais do valor de  $F_z$ , para os ensaios da haste soldada à placa  $10 \times 10 \text{ cm}^2$ , em função da orientação do escoamento  $\beta$ .**

A série  $F_z$  5/5 0-180 corresponde às medições feitas de  $5^\circ$  em  $5^\circ$  no intervalo dos  $0^\circ$  até aos  $180^\circ$ , a série  $F_z$  5/5 180-360 corresponde às medições feitas de  $5^\circ$  em  $5^\circ$  no intervalo dos  $180^\circ$  até aos  $360^\circ$ , a série  $F_z$  15/15 0-180 corresponde às medições feitas de  $15^\circ$  em  $15^\circ$  no intervalo dos  $0^\circ$  até aos  $180^\circ$ , a série  $F_z$  15/15 180-360 corresponde às medições feitas de  $15^\circ$  em  $15^\circ$  no intervalo dos  $180^\circ$  até aos  $360^\circ$ , a série  $F_z$  regressão 5/5 correspondem os pontos das funções que obtivemos com as regressões lineares de 6º grau dos pontos experimentais.

Tal como  $F_x$ , para evitar os desvios, efectuámos as regressões lineares dos pontos experimentais de  $F_z$ , no entanto, para obter uma boa aproximação das regressões lineares de 6º grau, foi necessário dividir as medições experimentais em duas séries, obtendo assim uma função no intervalo dos  $0^\circ$  até aos  $180^\circ$  e outra no intervalo dos  $180^\circ$  até aos  $360^\circ$ .

O gráfico que se segue, *Figura 45*, representa o resultado das medições para o momento segundo  $y$ :

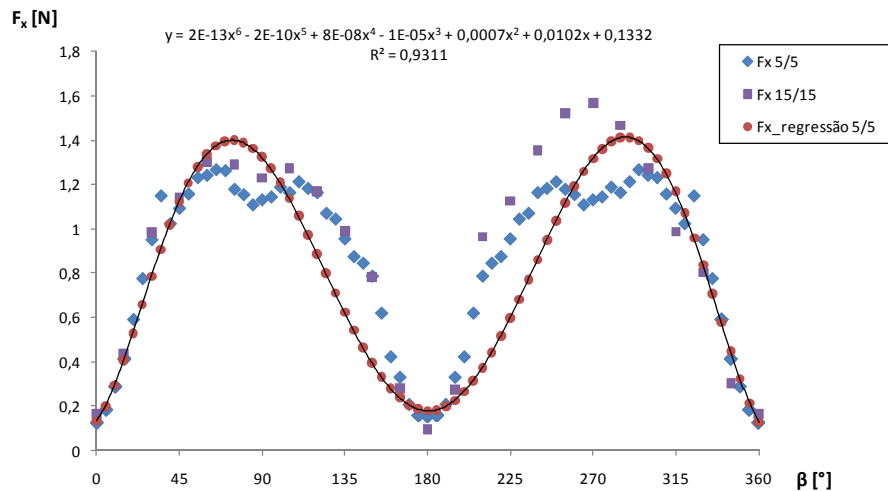


**Figura 45 – Resultados experimentais do valor de  $M_y$ , para os ensaios da haste soldada à placa  $10 \times 10 \text{ cm}^2$ , em função da orientação do escoamento  $\beta$ .**

A série  $M_y$  5/5 0-180 corresponde às medições feitas de  $5^\circ$  em  $5^\circ$  no intervalo dos  $0^\circ$  até aos  $180^\circ$ , a série  $M_y$  5/5 180-360 corresponde às medições feitas de  $5^\circ$  em  $5^\circ$  no intervalo dos  $180^\circ$  até aos  $360^\circ$ , a série  $M_y$  15/15 0-180 corresponde às medições feitas de  $15^\circ$  em  $15^\circ$  no intervalo dos  $0^\circ$  até aos  $180^\circ$ , a série  $M_y$  15/15 180-360 corresponde às medições feitas de  $15^\circ$  em  $15^\circ$  no intervalo dos  $180^\circ$  até aos  $360^\circ$ , a série  $M_y$ \_regressão 5/5 corresponde aos pontos das funções que obtivemos com as regressões lineares de  $6^\circ$  grau dos pontos experimentais

Tal como fizemos para  $F_x$  e  $F_z$ , para evitar os desvios, efectuámos as regressões lineares dos pontos experimentais de  $M_y$  e dividimos a curva dos dados experimentais em duas curvas, para obter maior aproximação.

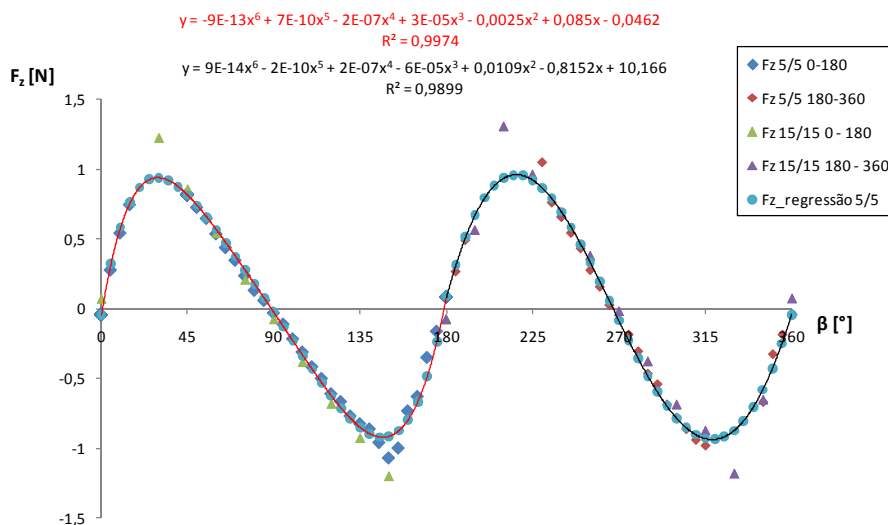
O terceiro e último ensaio em vazio a ser feito, foi o da haste soldada à garra e à placa de  $10 \times 10 \text{ cm}^2$  presa da mesma forma que se prendem as amostras. Na figura seguinte representamos graficamente o resultado da força segundo  $x$  (*Figura 46*):



**Figura 46 – Resultados experimentais do valor de  $F_x$ , para os ensaios da haste com a garra soldada e a placa  $10 \times 10 \text{ cm}^2$ , em função da orientação do escoamento  $\beta$ .**

A série  $F_x$  5/5 corresponde às medições feitas de  $5^\circ$  em  $5^\circ$ , a série  $F_x$  15/15 corresponde às medições feitas de  $15^\circ$  em  $15^\circ$  e a série  $F_x$ \_regressão 5/5 corresponde aos pontos da função que obtivemos com a regressão linear de 6º grau dos pontos experimentais. A regressão linear foi feita pelos motivos já atrás referidos.

O gráfico que se segue, *Figura 47*, representa o resultado das medições para a força segundo  $z$ :

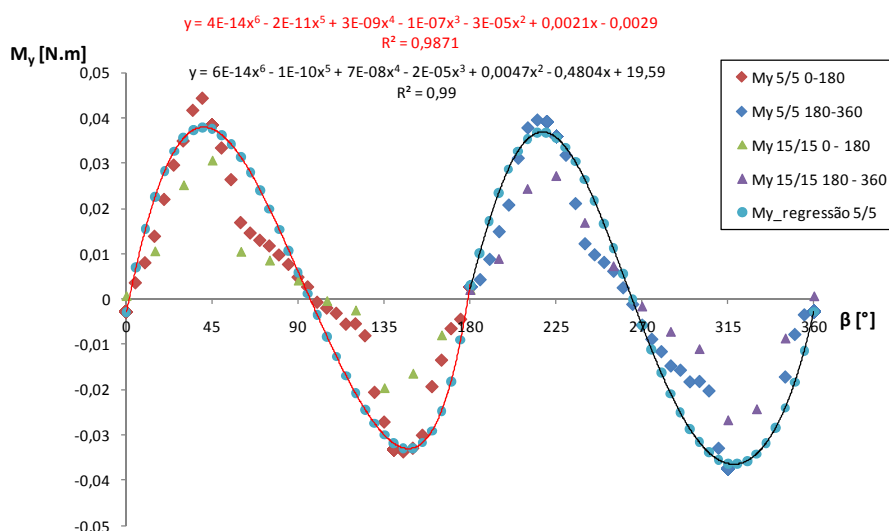


**Figura 47 – Resultados experimentais do valor de  $F_z$ , para os ensaios da haste com a garra soldada e a placa  $10 \times 10 \text{ cm}^2$ , em função da orientação do escoamento  $\beta$ .**

A série  $F_z$  5/5 0-180 corresponde às medições feitas de  $5^\circ$  em  $5^\circ$  no intervalo dos  $0^\circ$  até aos  $180^\circ$ , a série  $F_z$  5/5 180-360 corresponde às medições feitas de  $5^\circ$  em  $5^\circ$  no intervalo dos  $180^\circ$  até aos  $360^\circ$ , a série  $F_z$  15/15 180-360 corresponde às medições feitas de  $15^\circ$  em  $15^\circ$  no intervalo dos  $0^\circ$  até aos  $180^\circ$ , a série  $F_z$  15/15 180-360 corresponde às medições feitas de  $15^\circ$  em  $15^\circ$  no intervalo dos  $180^\circ$  até aos  $360^\circ$ , a série  $F_z$ \_regressão 5/5 correspondem aos pontos das funções que obtivemos com as regressões lineares de  $6^\circ$  grau dos pontos experimentais.

A regressão linear e a divisão da curva dos dados experimentais em duas foram feitas pelos motivos já atrás apontados.

O gráfico que se segue, *Figura 48*, representa o resultado das medições para o momento segundo  $y$ :



**Figura 48 – Resultados experimentais do valor de  $M_y$ , para os ensaios da haste com a garra soldada e a placa  $10 \times 10 \text{ cm}^2$ , em função da orientação do escoamento  $\beta$ .**

A série  $M_y$  5/5 0-180 corresponde às medições feitas de  $5^\circ$  em  $5^\circ$  no intervalo dos  $0^\circ$  até aos  $180^\circ$ , a série  $M_y$  5/5 180-360 corresponde às medições feitas de  $5^\circ$  em  $5^\circ$  no intervalo dos  $180^\circ$  até aos  $360^\circ$ , a série  $M_y$  15/15 180-360 corresponde às medições feitas de  $15^\circ$  em  $15^\circ$  no intervalo dos  $0^\circ$  até aos  $180^\circ$ , a série  $M_y$  15/15 180-360 corresponde às medições feitas de  $15^\circ$  em  $15^\circ$  no intervalo dos  $180^\circ$  até aos  $360^\circ$ , a série  $M_y$ \_regressão 5/5 corresponde os pontos das funções que obtivemos com as regressões lineares de  $6^\circ$  grau dos pontos experimentais.

Após de ter o tratamento dos resultados dos ensaios em vazio concluídos, estamos em condições de calcular as forças e momentos que resultam da exposição do mecanismo de fixação ao escoamento.

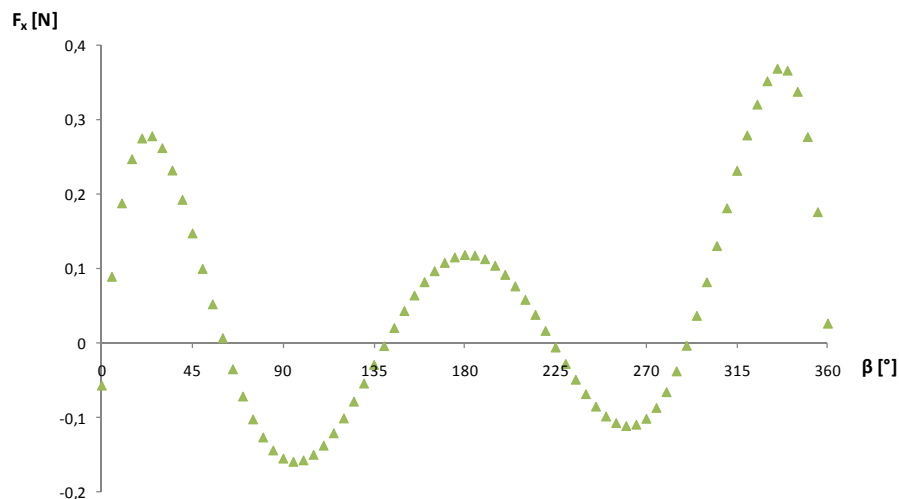
Como já foi referido anteriormente, para obter as forças e momentos do mecanismo, basta subtrair ao terceiro ensaio a diferença entre o segundo e primeiro ensaio. Isto é:

$$\text{Efeito do mecanismo} = 3^{\text{o}}_{\text{Ensaio}} - (2^{\text{o}}_{\text{Ensaio}} - 1^{\text{o}}_{\text{Ensaio}}) \quad (37)$$

Esta equação aplica-se directamente aos gráficos, isto é, subtrai-se ao gráfico de  $F_x$  do terceiro ensaio a diferença entre os gráficos de  $F_x$  do segundo e do primeiro, pois os ensaios foram feitos sempre para a mesma velocidade do escoamento, daí obtemos:

$$F_{x_{\text{mecanismo}}} = F_{x_{\text{haste+garra+placa}}} - (F_{x_{\text{haste+placa}}} - F_{x_{\text{haste}}}) \quad (38)$$

O resultado desta subtracção dá-nos o valor de  $F_x$  a que está sujeito o mecanismo de fixação segundo a direcção do escoamento e pode ser observado na figura do gráfico seguinte (*Figura 49*):



**Figura 49 - Valores de  $F_x$  para o mecanismo de fixação, em função da orientação do escoamento  $\beta$ .**

Os pontos no gráfico correspondem à força segundo  $x$  que está sujeito o mecanismo de fixação, com a variação do ângulo do escoamento.

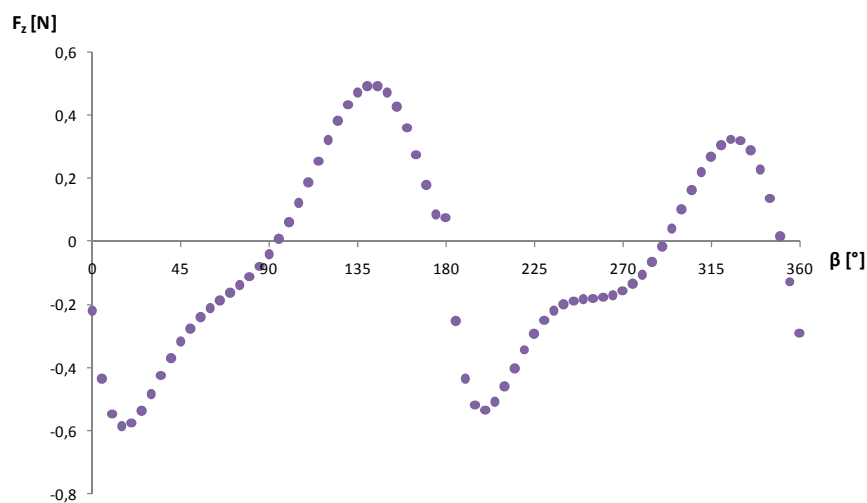
À primeira vista, é estranho obtermos valores negativos de  $F_x$  para os ensaios aerodinâmicos em termos de sentido físico, no entanto estes valores negativos de  $F_x$  vão

compensar os valores de  $F_x$  das medições dos ensaios das amostras como vamos demonstrar mais à frente.

Para as forças segundo  $z$ , como já foi referido, despreza-se o valor da haste, devido à sua incoerência ao longo da variação do ângulo do escoamento, pela sua forma geométrica, um cilindro perfeito a olho nu, não tem forças segundo a componente  $z$  e ainda pelo valor medido pela célula de carga ser 20 vezes mais pequeno que a força medida numa amostra, logo a fórmula para o efeito do mecanismo da força segundo  $z$ , será:

$$F_{z_{mecanismo}} = F_{z_{haste+garra+placa}} - F_{z_{haste+placa}} \quad (39)$$

O resultado desta subtracção dá o valor de  $F_z$  a que está sujeito o mecanismo segundo a direcção do escoamento e pode ser observado na figura do gráfico que se segue (*Figura 50*):



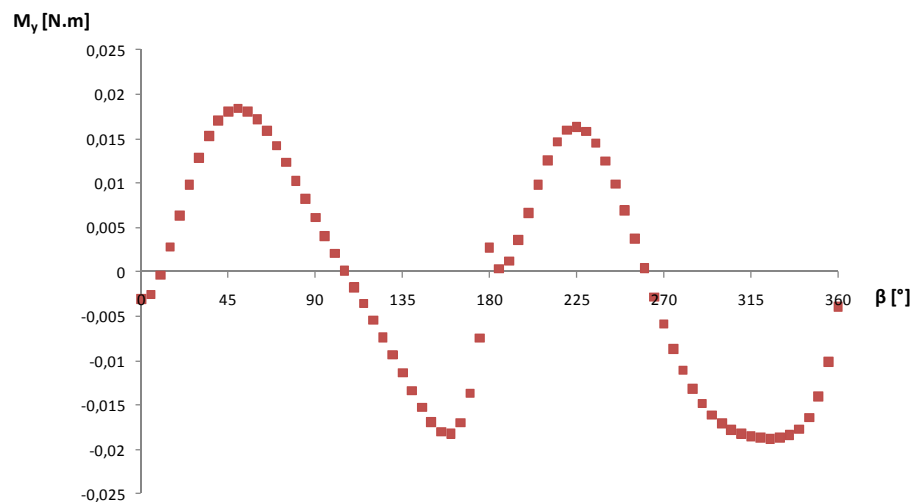
**Figura 50 – Valores de  $F_z$  para o mecanismo de fixação, em função da orientação do escoamento  $\beta$ .**

Os pontos representados no gráfico correspondem às forças segundo  $z$  que está sujeito o mecanismo de fixação, com a variação do ângulo do escoamento.

Para o momento, despreza-se o valor da haste, devido à sua incoerência ao longo da variação do ângulo do escoamento, pela sua forma geométrica, um cilindro perfeito a olho nu, não tem momento segundo a componente  $y$  e ainda pelo valor medido pela célula de carga ser 80 vezes mais pequeno que a força medida num ensaio de uma amostra, logo a fórmula para o momento que está sujeito o mecanismo segundo  $y$ , será:

$$M_{y_{mecanismo}} = M_{y_{haste+garra+placa}} - M_{y_{haste+placa}} \quad (40)$$

O resultado desta subtração dá o valor de  $M_y$  a que está sujeito o mecanismo de fixação segundo a direcção do escoamento e pode ser observado na figura gráfico que se segue (*Figura 51*):



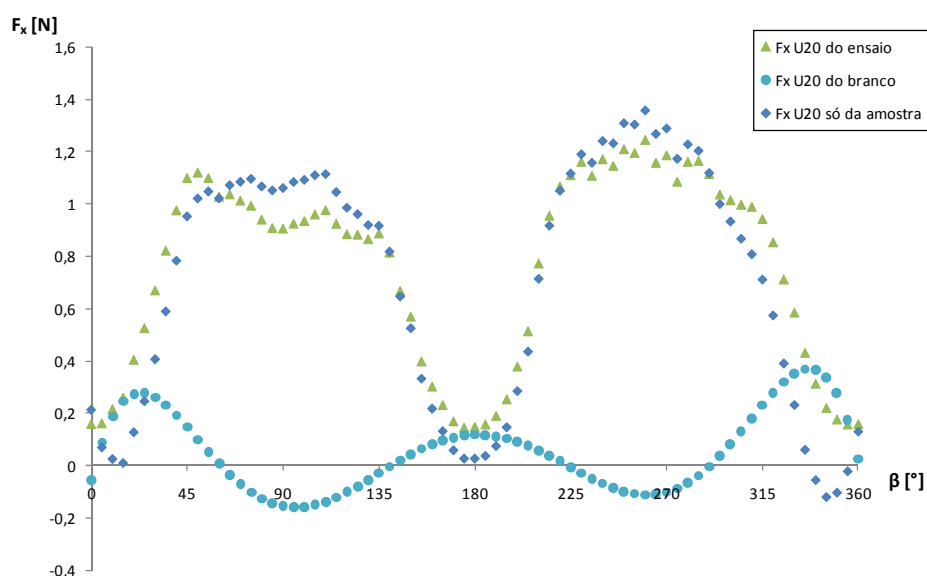
**Figura 51 – Valores de  $M_y$  para o mecanismo de fixação, em função da orientação do escoamento  $\beta$ .**

Os pontos representados no gráfico correspondem ao momento segundo  $y$  que está sujeito o mecanismo fixação com a variação do ângulo do escoamento.

## Exemplo da correcção feita

Tendo os resultados do efeito do mecanismo sujeito ao escoamento, basta subtraí-los às forças medidas nas amostras, ficando assim somente com as forças que estão sujeitas as amostras.

Vamos dar um exemplo de como se faz a correcção dos ensaios, apresentando a seguir (*Figura 52*) a correcção do valor de  $F_x$  dos ensaios realizados:



**Figura 52 – Comparação do  $F_x$  corrigido e não corrigido, e o valor de  $F_x$  do mecanismo de fixação, em função da orientação do escoamento  $\beta$ .**

A série  $F_x$  U20 do ensaio é a medição da força segundo  $x$  que estão sujeitos o mecanismo fixação e a amostra, a série  $F_x$  U20 do branco é a força segundo  $x$  que está sujeito o mecanismo, a subtração de  $F_x$  U20 do branco à série de  $F_x$  U20 do ensaio dá-nos a força a que está sujeita somente a amostra, que no gráfico corresponde à série  $F_x$  U20 da amostra. Com esta última, vamos saber o valor de  $C_x$  para as várias orientações do escoamento da amostra.

Os valores negativos de  $F_x$  do branco vão atenuar a concavidade que existe nos resultados de  $F_x$  próximos da orientação do escoamento a  $90^\circ$ , fazendo com que os valores de  $F_x$  das amostras sejam mais coerentes para essas direcções.

No entanto, a subtração dos ensaios de vazio traz-nos alguns problemas nas orientações do escoamento próximas de  $\beta=0^\circ$ ,  $\beta=180^\circ$  e  $\beta=360^\circ$ , pois dá-nos valores negativos de  $F_x$  e consequentemente valores negativos de  $C_x$ , que não tem qualquer sentido físico.



Observando estes problemas na subtracção dos ensaios em vazio às medições de  $C_x$  dos ensaios das amostras, surgiu-nos outra forma de correcção para esses mesmos valores.

Está nova forma consiste em fazer a média da série  $F_x U20$  do branco ao longo das várias orientações do escoamento, encontrando um valor constante de  $F_x$  para o efeito do mecanismos, e retirar este valor constante aos ensaios das amostras efectuados. Na figura seguinte (Figura 53) apresentamos um exemplo dessa forma de correcção.

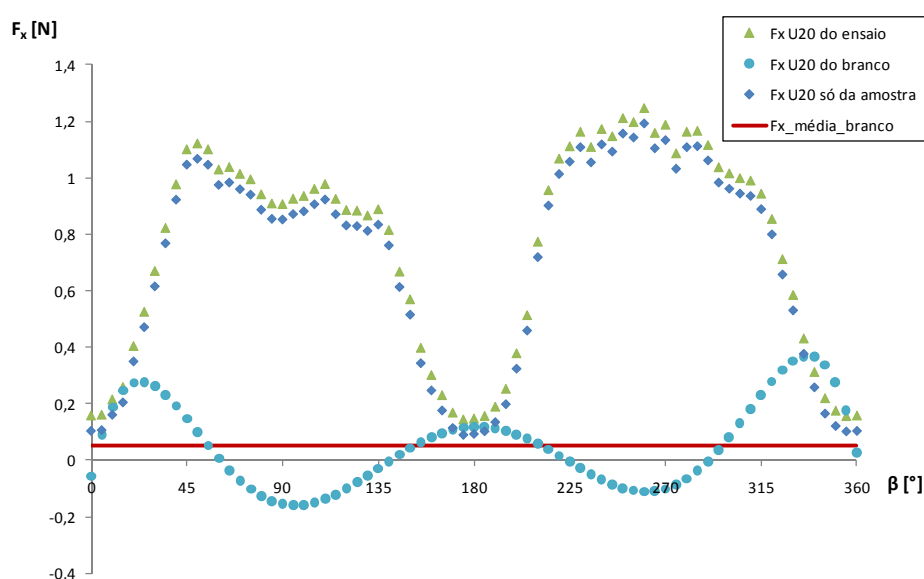
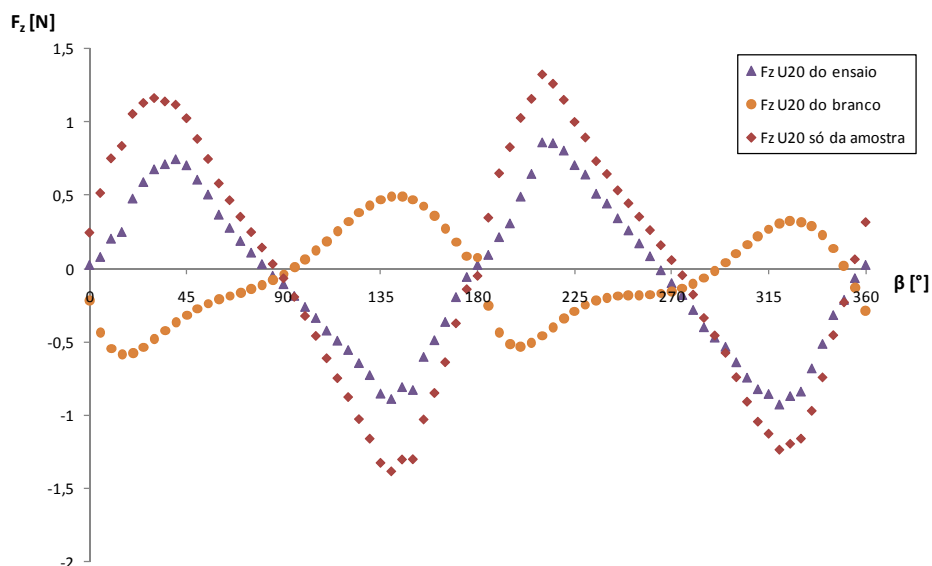


Figura 53 – Comparação do  $F_x$  corrigido e não corrigido, e a média do valor de  $F_x$  do mecanismo de fixação, em função da orientação do escoamento  $\beta$ .

Como era de esperar, este método de cálculo, vai influenciar todos os valores de igual forma, fazendo com que a curva descrita pelos resultados da série  $F_x U20$  do ensaio reduzam todos igualmente o valor do efeito médio do mecanismo de fixação, que por este método de cálculo, é de aproximadamente  $0,053 N$  para todas as direcções do escoamento.

No gráfico a seguir (*Figura 54*) apresentamos o exemplo da correção para a força segundo  $z$ :

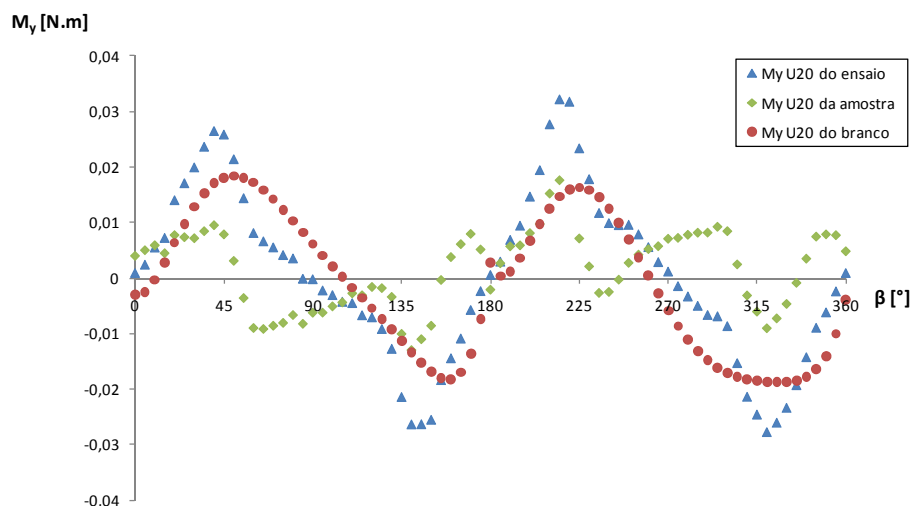


**Figura 54 – Comparação do  $F_z$  corrigido e não corrigido, e o valor de  $F_z$  do mecanismo de fixação, em função da orientação do escoamento  $\beta$ .**

A série  $F_z U20$  do ensaio é a medição da força segundo  $z$  que estão sujeitos o mecanismo e a amostra, a série  $F_z U20$  do branco é a força segundo  $z$  que está sujeito o mecanismo, a subtração de  $F_z U20$  do branco à série de  $F_z U20$  do ensaio dá-nos a força que está sujeita somente a amostra, que no gráfico corresponde à série  $F_z U20$  da amostra. Com esta última, vamos saber o valor de  $C_z$  para as várias orientações do escoamento somente da amostra.

Como é visível no gráfico acima, o mecanismo de fixação nos ensaios das amostras, estava a influenciar os ensaios por defeito, isto é estava a atenuar o efeito de *lifting* na amostra. No entanto para valores de orientação do escoamento de  $0^\circ$  e  $360^\circ$  dá-nos valores que não têm sentido físico, pois uma amostra completamente plana, para as orientações do escoamento anteriores deveria aprestar valores de  $F_z$  nulos ou aproximadamente nulos.

Na figura seguinte (*Figura 55*) apresentamos o exemplo da correcção para o momento segundo  $y$ :



**Figura 55 – Comparação do  $M_y$  corrigido e não corrigido, e o valor de  $M_y$  do mecanismo de fixação, em função da orientação do escoamento  $\beta$ .**

A série  $M_y U20$  do ensaio é a medição do momento segundo  $y$  que estão sujeitos o mecanismo e a amostra, a série  $M_y U20$  do branco é o momento segundo  $y$  que está sujeito o mecanismo, a subtração de  $M_y U20$  do branco à série de  $M_y U20$  do ensaio dá-nos o momento que está sujeita a amostra, que no gráfico corresponde à série  $M_y U20$  da amostra. Com esta última, vamos saber o valor de  $CM_y$  para as várias orientações do escoamento somente da amostra.

Através da figura do gráfico a cima observamos que o momento corrigido não tem qualquer sentido físico, o que nos leva a concluir que o momento do mecanismo de fixação está mal calculado ou o método de cálculo não será o melhor, pois os valores dos ensaios em vazio do mecanismo de fixação têm grandezas muito próximas dos momentos medidos com o mecanismo de fixação e da amostra, para a mesma orientação do escoamento. Logo quando vamos fazer a subtração do momento dos ensaios em vazio ao momento medido no ensaio, o resultado não apresentará qualquer lógica.

## Resultados das amostras com correcção

No gráfico seguinte (*Figura 56*) estão representados os valores de  $C_x$  corrigidos da forma inicial, para as amostras ensaiadas:

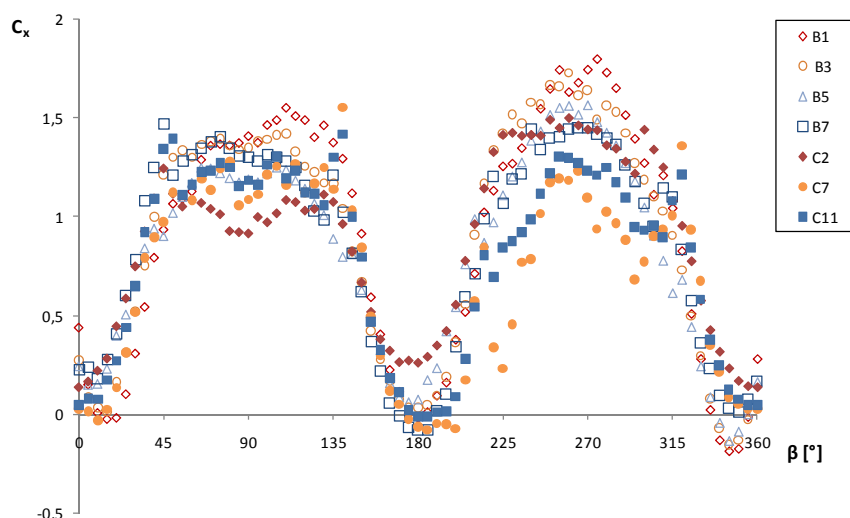


Figura 56 – Resultados experimentais do valor de  $C_x$ , para as várias amostras, com correcção.

Os resultados do  $C_x$  com as forças corrigidas apresentam alguma incoerência para as orientações de escoamento próximas de  $\beta=0^\circ$ ,  $\beta=180^\circ$  e  $\beta=360^\circ$ , pois não existem valores de  $C_x$  negativos.

Apresenta-se na figura seguinte (*Figura 57*), os resultados dos  $C_x$  corrigidos usando a média do efeito do mecanismo.

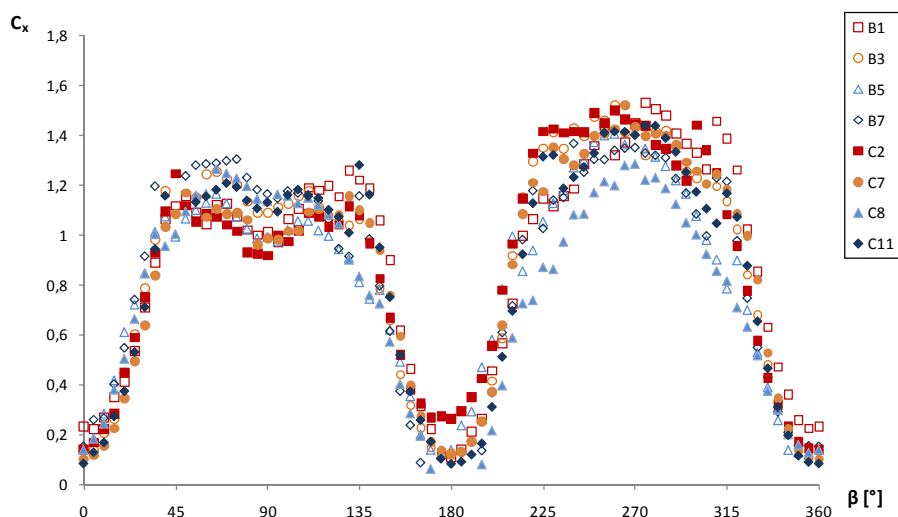
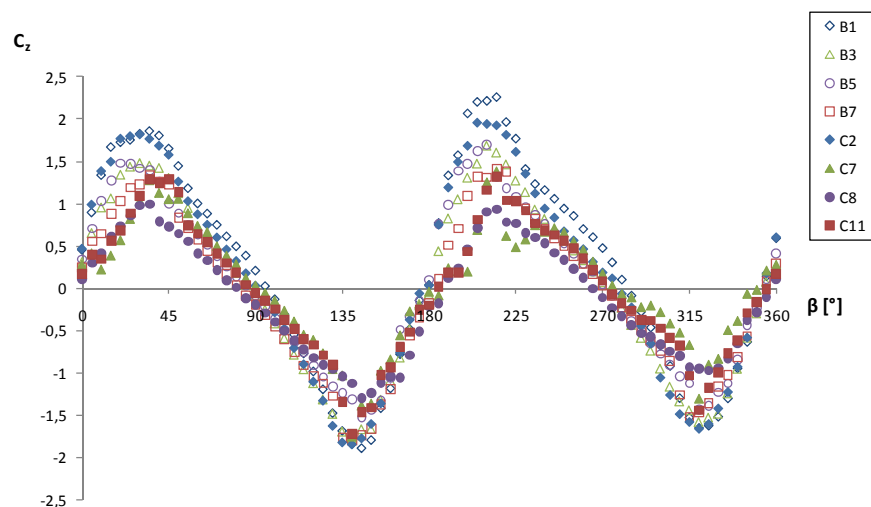


Figura 57 – Resultados experimentais do valor de  $C_x$ , para as várias amostras, com correcção, usando a média do efeito do mecanismo.

Como podemos verificar no gráfico, a correção do  $C_x$  apresenta-se com maior sentido físico, deixando de existir os valores negativos próximos das orientações de escoamento de  $\beta=0^\circ$ ,  $\beta=180^\circ$  e  $\beta=360^\circ$ . No entanto de forma muito próxima, basicamente o que esta correção implementa de novo nos resultados iniciais, é reduzir em todos os pontos de medição a média do efeito do mecanismo de fixação.

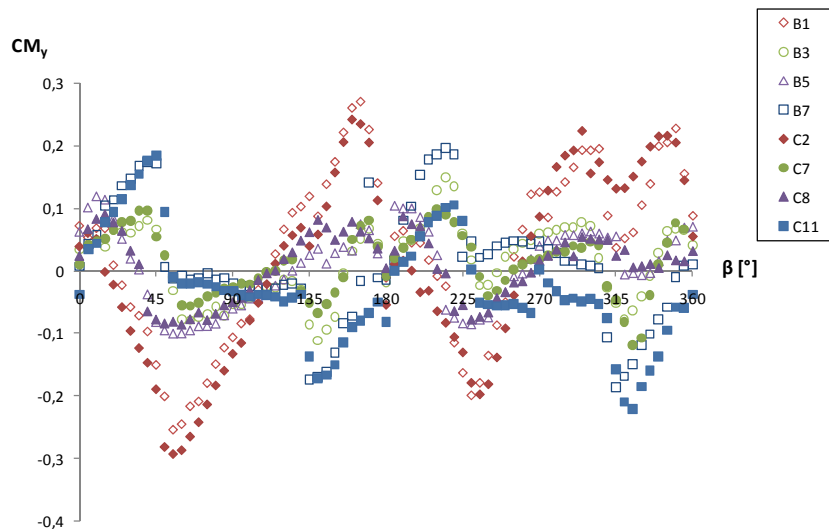
No gráfico seguinte (*Figura 58*) estão representados os valores de  $C_z$  corrigidos para as amostras ensaiadas:



**Figura 58 – Resultados experimentais do valor de  $C_z$ , para as várias amostras, com correção.**

Os resultados do  $C_z$  com as forças corrigidas apresentam alguma coerência, no entanto os resultados dos pontos para as orientações do escoamento de  $\beta=0^\circ$  e  $\beta=360^\circ$  apresentam um  $C_z$  bastante elevado para partículas planas.

No gráfico seguinte (*Figura 59*) estão representados os valores de  $CM_y$ , corrigidos para as amostras ensaiadas:



**Figura 59 – Resultados experimentais do valor de  $CM_y$ , para as várias amostras, com correcção.**

Observando o gráfico acima concluímos que a correcção do momento não tem qualquer coerência nem sentido físico. Foi por este motivo e pelos valores corrigidos sem coerência de  $C_x$  e  $C_z$  que não foi considerado este capítulo no corpo da dissertação, apresentando-o em anexo.