



FCTUC FACULDADE DE CIÊNCIAS
E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE COIMBRA

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

PROPAGAÇÃO DE INCÊNDIOS FLORESTAIS POR FOCOS SECUNDÁRIOS

Miguel Abrantes de Figueiredo Bernardo de Almeida

Coimbra

2011

FACULDADE DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE DE COIMBRA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

PROPAGAÇÃO DE INCÊNDIOS FLORESTAIS POR FOCOS SECUNDÁRIOS

**Tese para a obtenção do grau de Doutor em Engenharia Mecânica na Especialidade de
Riscos Naturais e Tecnológicos**

Autor

Miguel Abrantes de Figueiredo Bernardo de Almeida

Orientadores

Domingos Xavier Filomeno Carlos Viegas

Ana Isabel Couto Neto da Silva Miranda

ISBN: 978-972-8954-23-9

Coimbra

Abril de 2011

AGRADECIMENTOS

As minhas primeiras palavras de agradecimento vão para o meu orientador, Professor Domingos Xavier Viegas. Agradeço-lhe não apenas a orientação da tese e os conhecimentos que partilhou comigo, mas também o seu exemplo de integridade, sensatez e gentileza que serviram e servirão como referência ao longo minha vida.

Um reconhecimento especial à Professora Ana Isabel Miranda. A simpatia e a alegria da sua forma de estar conferem ao trabalho uma leveza única. A sua revisão final, como sempre muito atenta e profícua, foi essencial para o resultado desta tese.

Ao longo destes anos experimentei com os colegas do CEIF-ADAI um forte espírito de companheirismo e amizade, o qual não poderia deixar de salientar neste capítulo de agradecimentos. Neste aspecto, gostaria ainda de deixar uma palavra especial de agradecimento ao Carlos Viegas e ao Nuno Leitão, do Departamento de Engenharia Mecânica, que me ajudaram directamente na realização de diversos ensaios.

Este trabalho não teria sido possível sem apoio institucional. A ADAI e o Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Coimbra disponibilizaram-me todas as condições para realização dos ensaios laboratoriais. A Fundação para a Ciência e Tecnologia proporcionou-me o apoio financeiro de que eu necessitava. Para além do agradecimento, gostava de manifestar a minha satisfação pela existência destas instituições.

Finalmente uma menção muito especial para aqueles que me são mais importantes – a minha Família. A Sofia, a Susana, o Joca, a Beatriz, a Ana, a Sara e a Maria são uma força constante que me faz acreditar em mim. A minha Mãe, é simplesmente a minha Mãe – a melhor representação de Amor que Deus me poderia ter dado. O meu Pai é o meu Espírito Guardião. Mesmo não estando fisicamente comigo, a sua lembrança acompanha-me permanentemente, garantindo-me que nesta ou noutra dimensão eu terei sempre alguém que zele por mim. Teresa, a Mulher da minha vida, a companheira do meu corpo e da minha alma, uma amiga, uma confidente, enfim – a plenitude.

Devo ainda agradecer ao meu menino ou à minhas menina que estão para vir. Queria que soubesses que foste o meu alento nesta recta final. Estou ansioso para brincar contigo.

RESUMO

A propagação de incêndios florestais por focos secundários pode ser dividida em três fases distintas: (1) libertação das partículas; (2) elevação das partículas em combustão na pluma térmica; (3) transporte, pelo vento, das partículas em combustão; e (4) contacto da partícula com o solo.

A presente tese apresenta o estudo do transporte de partículas pelo vento (fase 3) e a combustão que ocorre durante esse transporte. Os combustíveis analisados foram pinhas individuais de *Pinus pinaster*, as escamas constituintes dessas pinhas, e cascas do tronco de árvores de *Eucalyptus globulus*.

Para além de um aprofundamento na compreensão do fenómeno dos focos secundários, aplicado especificamente aos combustíveis analisados, este trabalho teve como objectivo último a criação de um programa que permite simular o transporte, pelo vento, de uma partícula incandescente depois de ter sido elevada a uma determinada altura pela pluma térmica. Nesta perspectiva foram realizados diversos ensaios de caracterização dos combustíveis mencionados, ensaios de combustão das partículas e ensaios de caracterização do seu comportamento aerodinâmico.

O estudo efectuado focou-se apenas em duas dimensões, concentrando-se no plano vertical que passa pelo centro de gravidade da partícula e é paralelo à direcção do escoamento. Os ensaios realizados pretenderam representar as constantes alterações da orientação e as transformações físicas que uma partícula em combustão conhece ao longo do seu transporte.

Os ensaios foram realizados em diversos equipamentos existentes no Laboratório de Estudo sobre Incêndios Florestais (*LEIF*) da Associação para o Desenvolvimento da Aerodinâmica Industrial (*ADA*) da Universidade de Coimbra. Destes equipamentos salientam-se o Túnel de Combustão Vertical e o Túnel Oblíquo.

Os resultados apresentados dividem-se nos seguintes tópicos:

- Estudo das propriedades físicas dos combustíveis analisados;
- Análise da combustão em função das características físicas, da velocidade relativa do escoamento a que são sujeitas e da sua orientação relativamente ao vento incidente;
- Análise das velocidades terminais e dos coeficientes aerodinâmicos (coeficiente de resistência, coeficiente de sustentação e coeficiente de momento) das partículas em combustão ao longo do seu transporte.
- Criação e validação de um programa que integra os diversos modelos empíricos obtidos e que permite prever a trajectória de uma partícula incandescente libertada durante uma situação de incêndio.

A contribuição mais evidente deste estudo consiste na determinação de parâmetros aerodinâmicos e de combustão específicos que conferem maior rigor na simulação das trajetórias de combustíveis com uma importância fulcral na floresta portuguesa.

O programa final obtido aplica-se fundamentalmente à fase do transporte em que a partícula já não é elevada, sendo unicamente sujeita à acção do vento horizontal e à força gravítica.

Palavras-Chave: Incêndios Florestais; Propagação do Fogo; Combustíveis Florestais; Focos Secundários; Projecção de Partículas, Pinhas, Cascas de Eucalipto.

LISTA DE SÍMBOLOS

$A [m^2]$ - área representativa da partícula;

$a_1, a_{1U}, a_{1\theta}, a_2, a_3, a_4, a_5$ - coeficientes dos modelo de previsão;

$A_{cal} [m^2]$ - Área da secção do *TCV* onde foram realizadas as medições para calibração deste equipamento;

ADAI - Associação para o Desenvolvimento da Aerodinâmica Industrial;

$A_{ens} [m^2]$ - Área da secção do *TCV* referente à altura em que foram realizados os ensaios de combustão;

asc - ensaios em que se deu um aumento da velocidade de escoamento;

$ax_{0n} [m.s^{-2}]$ - componente vertical da aceleração da partícula no início do instante do intervalo de tempo t ;

$az_{0n} [m.s^{-2}]$ - componente vertical da aceleração da partícula;

$b_0 [cm]$ - diâmetro médio da secção da casca;

$b_0 [m]$ - diâmetro aparente da casca de eucalipto;

$b_1 [cm]$ - largura média dos topos da casca desenrolada;

$b_1 [m]$ - largura do topo da casca de eucalipto desenrolada;

CE - extinção da combustão;

CMz_n - Coeficiente de momento em torno do eixo perpendicular ao plano *XZ*;

C_x - coeficiente de resistência;

C_{x_0} - coeficiente aerodinâmico referente à força F_{x_0} ;

$C_{x_{0n}}$ - Coeficiente aerodinâmico referente à componente vertical da força actuante na partícula;

C_{x_T} - coeficiente de resistência para um escoamento igual à velocidade terminal da partícula;

C_z - coeficiente de sustentação;

C_{z_0} - coeficiente aerodinâmico referente à força F_{z_0} ;

$C_{z_{0n}}$ - Coeficiente aerodinâmico referente à componente vertical da força actuante na partícula;

C_{z_T} - coeficiente de sustentação para um escoamento igual à velocidade terminal da partícula;

$D [m]$ - diâmetro maior de uma pinha;

desc - ensaios em que se deu uma diminuição da velocidade de escoamento;

dp - desvio padrão;

DR - dispositivo de rotação;

e [mm] - espessura da casca;

EB - cascas de eucalipto;

f_1 - termo do modelo de previsão dependente de θ ;

f_2 - termo do modelo de previsão dependente de U ;

f_{alav} - factor multiplicativo de resposta da alavanca do sistema de aquisição de massas do *TCV*;

FC - combustão com chama;

$f_F [N^{-1}]$ - factor de conversão do sinal de forças da célula de carga nas forças efectivas;

$F_M [N^{-1}.m^{-1}]$ - factor de conversão do sinal de momento da célula de carga no momento efectivo;

freq [Hz] - frequência proporcional à rotação do ventilador do *TO*;

$F_x [N]$ - força aplicada segundo o eixo definido pelo escoamento;

$F_{x_0} [N]$ - força aplicada segundo o eixo horizontal;

$F_{x_{0n}} [N]$ - componente horizontal da força actuante sobre a partícula;

$F_z [N]$ - força aplicada segundo o eixo perpendicular a F_x , contido no plano *XX-ZZ*;

$F_{z_0} [N]$ - força aplicada segundo o eixo vertical;

$F_{z_{0n}} [N]$ - componente horizontal da força actuante sobre a partícula;

$g [m.s^{-2}]$ - aceleração da gravidade;

G_A - grau de abertura de uma pinha;

G_E - grau de enrolamento de uma casca de eucalipto;

Gr - número adimensional de Grashoff;

$h [m]$ - altura de uma pinha correspondendo ao comprimento do seu eixo longitudinal;

$I_{casca\ n}$ - momento de inércia da partícula no instante t_n ;

$k [s^{-1}]$ - coeficiente de decaimento de massa;

$k_0 [s^{-1}]$ - coeficiente de decaimento de massa durante todo o processo de combustão da partícula;

$k_{0n} [s^{-1}]$ - coeficiente de decaimento de massa no intervalo de tempo $[t_n, t_{n-1}]$;

$k_1 [s^{-1}]$ - coeficiente de decaimento de massa durante a combustão com chama da partícula;

$k_1 [s^{-1}]$ - coeficiente de decaimento de massa na fase de combustão com chama;

$k_2 [s^{-1}]$ - coeficiente de decaimento de massa durante a combustão sem chama da partícula;

$k_2 [s^{-1}]$ - coeficiente de decaimento de massa na fase de combustão sem chama;

$k_{laboratório} [s^{-1}]$ - coeficiente de decaimento de massa obtido nos ensaios laboratoriais;

$k_{modelo} [s^{-1}]$ - coeficiente de decaimento de massa obtido por aplicação do modelo desenvolvido (Equação 55);

$L [m]$ - comprimento da casca de eucalipto;

$L_0 [cm]$ - comprimento inicial da casca;

$L_0 [m]$ - comprimento inicial da partícula;

LEIF - Laboratório de Estudos sobre Incêndios Florestais;

$L_n [m]$ - comprimento da partícula no instante t_n ;

$m [kg]$ - massa do combustível num determinado instante;

m'_{lab} - declive da recta tendente dos valores de decaimento de massa obtidos laboratorialmente;

m'_{mod} - declive da recta tendente dos valores de decaimento de massa resultantes do modelo matemático (Equação 55);

$m_0 [g]$ - massa inicial da casca;

$m_0 [kg]$ - massa inicial da partícula combustível;

$m_{1f} [kg]$ - massa da partícula no final da fase de combustão com chama;

$m'_2 [kg.s^{-1}]$ - coeficiente de decaimento linear de massa na fase de combustão sem chama;

$m_2 [kg]$ - massa da partícula na fase de combustão sem chama;

$m_{2f} [kg]$ - massa da partícula no final da fase de combustão sem chama;

MAE - média absoluta do erro;

m_b [kg] - valor registado na balança electrónica proporcional à massa do objecto de calibração suspenso no TCV ;

m_{bal} [kg] - valor registado na balança electrónica proporcional ao peso da partícula combustível suspenso no TCV ;

m_{BS} [kg] - massa do combustível em base seca;

m_c [kg] - massa conhecida do objecto suspenso no TCV ;

m_f [kg] - massa da partícula no final da combustão;

m_{haste} [kg] - valor registado na balança electrónica proporcional à resistência ao escoamento da haste do dispositivo de aquisição de massas do TCV ;

m_i [kg] - massa da partícula no início da aquisição de dados;

m_n [kg] - massa da partícula no instante t_n ;

$Mods$ - módulo do sinal da força aplicada;

m_{real} [kg] - massa real do objecto suspenso no TO ;

M_{real} [N.m] - momento real aplicado;

Mr_n [N.m] – Resistência ao momento em torno do eixo perpendicular ao plano XZ ;

My [N.m] - momento aplicado em torno do eixo YY ;

My_{CG} [N.m] - momento em torno do eixo YY aplicado ao centro de gravidade da partícula;

My_{PA} [N.m] - momento em torno do eixo YY aplicado ao ponto de fixação da partícula;

Mz_n [N.m] - Momento em torno do eixo perpendicular ao plano XZ ;

n - número de leituras efectuadas nos ensaios realizados no TO ;

p - coeficiente de rugosidade da superfície do solo;

P [atm] - pressão do ar de escoamento;

P [atm] - pressão média durante o percurso da partícula;

P [m] - perímetro do topo de uma casca de eucalipto considerando que forma uma circunferência regular;

PC - pinhas;

PS - escamas das pinhas;

PtC - Plataforma de Combustão;

$R [J.K^{-1}.mol^{-1}]$ - constante dos gases perfeitos;

$R [m.s^{-1}]$ - velocidade de propagação da frente de chama na partícula;

r^2 - coeficiente de correlação;

$R_2 [m.s^{-1}]$ - velocidade de propagação da frente de chama na partícula na fase de combustão sem chama;

Re - número de Reynolds;

$RMSE$ - raiz quadrada média do erro;

$Rot [rpm]$ - rotação do ventilador;

S - sinal da força aplicada após a correção do erro residual;

S' - sinal da força aplicada antes da correção do erro residual;

$S'_{1^{a} leitura}$ - sinal da célula de carga na primeira leitura a 270°;

$S'_{2^{a} leitura}$ - sinal da célula de carga na segunda leitura a 270°;

$S'My$ - sinal do momento aplicado segundo o eixo YY antes da correção do erro residual;

$S'x$ - sinal da força aplicada segundo o eixo horizontal antes da correção do erro residual;

$S'z$ - sinal da força aplicada segundo o eixo vertical antes da correção do erro residual;

SC - combustão sem chama;

Seq - sequência da leitura de dados nos ensaios realizados no TO ;

SMY - sinal do momento aplicado em torno do eixo YY ;

$S-W$ - valor p de Shapiro-Wilk;

Sx - sinal da força aplicada segundo o eixo horizontal;

Sz - sinal da força aplicada segundo o eixo vertical;

$T [K]$ - temperatura do ar de escoamento;

$T [°C]$ - temperatura média ambiente;

$t [s]$ - tempo decorrido;

$t_b [s]$ - tempo total de combustão da partícula;

TCV - túnel de combustão vertical;

$t_f [s]$ - tempo de combustão com chama;

$t_{m\acute{a}x} [s]$ - tempo máximo de combustão da partícula;

TO - Túnel Oblíquo;

$T_{rel} [K]$ - diferença da temperatura de combustão da partícula e a temperatura de referência (do ar);

$U [m.s^{-1}]$ - velocidade de escoamento usada nos ensaios;

$U_{cal} [m.s^{-1}]$ - velocidade do escoamento na secção do TCV onde foram realizadas as medições para calibração deste equipamento;

$U_{ens} [m.s^{-1}]$ - velocidade de escoamento na secção do TCV à altura do combustível;

$U_f [m.s^{-1}]$ - velocidade do escoamento forçado pelo vento meteorológico ou pelo ventilador, não considerando a componente das correntes de convecção natural;

$U_n [m.s^{-1}]$ - velocidade do escoamento da célula convectiva;

$U_Q [m.s^{-1}]$ - velocidade de queda da partícula;

$U_T [m.s^{-1}]$ - velocidade terminal de uma partícula;

$U_{T0} [m.s^{-1}]$ - velocidade terminal de uma partícula no início da combustão;

$U_{Tf} [m.s^{-1}]$ - velocidade terminal de uma partícula no final da combustão;

$U_{x0\ 10} [m.s^{-1}]$ - componente horizontal da velocidade do vento a 10 m de altura;

$U_{x0\ n} [m.s^{-1}]$ - componente horizontal da velocidade do vento à altura Z_n , relativamente a um ponto parado;

$U_{x0\ rel\ n} [m.s^{-1}]$ - Componente horizontal da velocidade do vento relativamente à partícula;

$U_{z0\ 10} [m.s^{-1}]$ - componente vertical da velocidade do vento a 10 m de altura;

$U_{z0\ n} [m.s^{-1}]$ - componente vertical da velocidade do vento à altura Z_n , relativamente a um ponto parado;

$U_{z0\ rel\ n} [m.s^{-1}]$ - Componente vertical da velocidade do vento relativamente à partícula;

$V_{apar} [m^3]$ - volume aparente de uma pinha;

$V_{effect} [kg.m^{-3}]$ - volume efectivo;

$vx_n [m.s^{-1}]$ - módulo da velocidade relativa do escoamento na partícula;

$vx_0 [m.s^{-1}]$ - componente horizontal da velocidade inicial da partícula;

$v_{x_{0n}} [m.s^{-1}]$ - componente horizontal da velocidade da partícula ;
 $v_{z_0} [m.s^{-1}]$ - componente vertical da velocidade inicial da partícula;
 $v_{z_{0n}} [m.s^{-1}]$ - componente vertical da velocidade da partícula ;
 $X_{0n} [m]$ - posição inicial da partícula segundo a referência horizontal no instante de tempo t_n ;
 $X_i [m]$ - posição inicial da partícula segundo o ponto referência horizontal;
 XX - eixo horizontal contido no plano vertical paralelo ao escoamento;
 XXs - eixo da célula de carga ao qual o sinal S_x é referido;
 YY - eixo horizontal perpendicular ao plano definido por $XX-ZZ$;
 z - parâmetro característico da combustão da partícula, podendo referir-se a um tempo de combustão ou a um coeficiente de decaimento de massa;
 $Z_{0n} [m]$ - altura da partícula no instante de tempo t_n ;
 $Z_i [m]$ - altura inicial da partícula;
 ZZ - eixo vertical;
 ZZs - eixo da célula de carga ao qual o sinal S_z é referido;
 $\alpha [^\circ]$ – ângulo descrito pela direcção principal da casca de eucalipto e a direcção do escoamento;
 $\alpha_0 [^\circ]$ - ângulo descrito pelo eixo longitudinal da partícula, com o rasgo longitudinal voltado para cima, e a direcção do escoamento;
 $B [K^{-1}]$ - coeficiente de dilatação térmica;
 $\lambda [kg.m^{-1}]$ - densidade linear de uma partícula;
 $\rho_{apar} [kg.m^{-3}]$ - densidade aparente de uma pinha;
 $\rho_{ar} [kg.m^{-3}]$ - massa volúmica do ar de escoamento;
 $\rho_{ar} [kg.m^{-3}]$ - massa volúmica do ar para as condições médias de pressão e temperatura;
 $\rho_{efect} [kg.m^{-3}]$ - densidade efectiva;
 σ - desvio padrão
 $\dot{m}_1 [kg.s^{-1}]$ - decaimento de massa da partícula, na fase de combustão com chama, por unidade de tempo;
 $\dot{m}_2 [kg.s^{-1}]$ - decaimento de massa da partícula, na fase de combustão sem chama, por unidade de tempo;

\dot{m}_{1f} [$\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$] - decaimento de massa da partícula, no final da fase de combustão com chama, por unidade de tempo;

\dot{m}_{1i} [$\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$] - decaimento de massa da partícula, no início da fase de combustão com chama, por unidade de tempo;

ν [$\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$] - viscosidade do ar;

χ [$^\circ$] - ângulo descrito pela direcção da força aplicada e o eixo horizontal no plano vertical de rotação do túnel oblíquo;

θ [$^\circ$] - ângulo descrito pela direcção do eixo longitudinal da partícula e o eixo horizontal, definindo-se o sinal de acordo com a localização da ignição;

θ [$^\circ$] - ângulo descrito pelo eixo horizontal de referência e o eixo definido por S_z pela célula de carga do túnel oblíquo;

θ'_n [$^\circ$] - ângulo θ'_n [$^\circ$] reduzido ao intervalo de $[0^\circ, 360^\circ]$;

θ'_n [$^\circ$] - ângulo da direcção de propagação da combustão na partícula, segundo a Figura 43;

ω_0 [$^\circ\cdot\text{s}^{-1}$] - velocidade angular inicial da partícula;

θ_0 [$^\circ$] - ângulo original de propagação da combustão na partícula, segundo a Figura 43;

$\varnothing_{1|2}$ [m] - diâmetro da secção entre a fracção 1 e 2 de uma pinha (diâmetro maior);

α_{1n} [$^\circ$] - ângulo descrito pelo eixo longitudinal da partícula com o eixo horizontal;

$\varnothing_{2|3}$ [m] - diâmetro da secção entre a fracção 2 e 3 de uma pinha (diâmetro menor);

α_{2n} [$^\circ$] - ângulo α_{1n} [$^\circ$] reduzido ao intervalo de $[0^\circ, 360^\circ]$;

ω_n [$^\circ\cdot\text{s}^{-1}$] - velocidade angular do eixo longitudinal da partícula;

ϖ_n [$^\circ\cdot\text{s}^{-2}$] - aceleração angular do eixo longitudinal da partícula;

α_n [$^\circ$] - ângulo descrito pelo eixo longitudinal da partícula, com o rasgo longitudinal voltado para cima, e a direcção do escoamento resultante do movimento da partícula e do vento;

θ_n [$^\circ$] - transformação de θ'_n [$^\circ$] ao sistema de eixos definido no modelo da Equação 55, para determinação de k_0 ;

ψ [$^\circ$] - ângulo descrito pelas forças F_x e F_{x_0} .

ÍNDICE

1.	Introdução	1
1.1.	Enquadramento do Problema	1
1.2.	Mecanismo de Formação de Focos Secundários	7
1.3.	Objectivos e Organização do Estudo	11
2.	Caracterização dos combustíveis	15
2.1.	Pinhas	15
2.2.	Escamas de pinhas	20
2.3.	Cascas de eucalipto	22
3.	Metodologia experimental	25
3.1.	Recolha e Armazenamento de Amostras	26
3.2.	Equipamento	26
3.2.1.	Túnel de Combustão Vertical	27
3.2.1.1.	Características	28
3.2.1.2.	Calibração	30
3.2.1.3.	Metodologia dos ensaios e cálculos efectuados	31
3.2.2.	Túnel Oblíquo	34
3.2.2.1.	Características	34
3.2.2.2.	Calibração	36
3.2.2.3.	Metodologia dos ensaios e cálculos efectuados	40
3.2.2.4.	Verificação da metodologia aplicada.....	45
3.2.3.	Outros Equipamentos	47
3.2.3.1.	Plataforma de Combustão	47
3.2.3.2.	Dispositivo de Rotação	48
4.	Estudos de Combustão	49
4.1.	Influência dos parâmetros físicos	50
4.2.	Influência da orientação da partícula e da velocidade do escoamento.....	55
4.2.1.	Metodologia da análise dos ensaios.....	55
4.2.2.	Ensaios estáticos.....	59
4.2.2.1.	Apresentação de resultados e discussão.....	60
4.2.2.2.	Modelo Empírico	73
4.2.3.	Ensaios dinâmicos.....	78
4.2.3.1.	Verificação do modelo para condições dinâmicas	84
4.3.	Influência da rotação da partícula em torno do eixo longitudinal.....	86

4.4.	Análise do regime de convecção	88
4.5.	Síntese dos ensaios de combustão.....	91
5.	Estudos Aerodinâmicos.....	94
5.1.	Velocidades Terminais	94
5.1.1.	Pinhas.....	95
5.1.1.1.	Pinhas Inteiras	95
5.1.1.2.	Pinhas parcialmente queimadas	97
5.1.2.	Cascas de Eucalipto	99
5.1.2.1.	Orientação da casca de eucalipto	100
5.2.	Coeficientes Aerodinâmicos	101
5.2.1.	Ensaio realizados e metodologia associada	102
5.2.2.	Resultados obtidos	103
5.2.3.	Modelação dos resultados obtidos	108
5.3.	Síntese dos ensaios aerodinâmicos.....	112
6.	Simulação do transporte de uma partícula incandescente.....	114
6.1.	Pressupostos e explicação do programa	114
6.2.	Definição e Explicação do programa.....	117
6.3.	Simulação de casos teóricos.....	127
6.4.	Validação do programa	130
6.5.	Síntese Conclusiva do Desenvolvimento do Programa de Simulação 133	
7.	Discussão e Conclusões Finais	136
8.	Bibliografia	142

ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura 1 - Processos envolvidos na formação de focos secundários: (1) emissão de partículas, (2) elevação das partículas incandescentes, (3) transporte das partículas pelo escoamento horizontal e (4) ignição do leito onde a partícula aterra.</i>	<i>8</i>
<i>Figura 2 - Esquema de apresentação dos estudos realizados</i>	<i>12</i>
<i>Figura 3 – Formato normal de uma pinha.....</i>	<i>16</i>
<i>Figura 4 – Exemplo de ensaio para determinação do centro massa.....</i>	<i>17</i>
<i>Figura 5 – Exemplo de pinhas e respectivos graus de abertura</i>	<i>19</i>
<i>Figura 6 – Exemplo de escamas arrancadas das pinhas</i>	<i>20</i>
<i>Figura 7 – Distribuição mássica das escamas em função da massa da pinha</i>	<i>21</i>
<i>Figura 8 – Distribuição numérica das escamas em função da massa da pinha.....</i>	<i>21</i>
<i>Figura 9 – Imagens de topo de cascas de eucalipto</i>	<i>23</i>
<i>Figura 10 – Rasgo longitudinal nas cascas de eucalipto ensaiadas</i>	<i>23</i>
<i>Figura 11 – Esquema dos ensaios laboratoriais realizados.....</i>	<i>25</i>
<i>Figura 12– Imagens do túnel oblíquo com diversas direcções de incidência do escoamento.</i>	<i>27</i>
<i>Figura 13 - Túnel vertical de vento: a) imagem completa; b) esquema dos dispositivos de aquisição de dados</i>	<i>28</i>
<i>Figura 14– Mecanismos de fixação das partículas: a) pinhas; b) cascas de eucalipto ..</i>	<i>29</i>
<i>Figura 15 – Mecanismo de aquisição de massas do TCV</i>	<i>29</i>
<i>Figura 16 – Resultados da calibração da velocidade de escoamento provocada pela rotação do ventilador</i>	<i>30</i>
<i>Figura 17 – Resistência da haste do mecanismo de fixação ao escoamento.....</i>	<i>32</i>
<i>Figura 18 – Exemplo de gráfico resultante da determinação da velocidade terminal de uma pinha.....</i>	<i>33</i>
<i>Figura 19 – Exemplo de gráfico resultante da determinação da constante de decaimento de massa de uma pinha.....</i>	<i>34</i>
<i>Figura 20 – Imagem do túnel oblíquo.....</i>	<i>35</i>
<i>Figura 21 – Imagens da célula de carga do TO.</i>	<i>36</i>
<i>Figura 22 – Relação entre a frequência para rotação e a velocidade de escoamento na secção rectangular do TO</i>	<i>37</i>
<i>Figura 23 – Objecto de massa conhecida suspenso no TO para calibração.....</i>	<i>38</i>
<i>Figura 24 – Gráfico resultante da determinação do factor de conversão f_F.....</i>	<i>38</i>
<i>Figura 25 – Denominação dos eixos e do ângulo θ.....</i>	<i>39</i>
<i>Figura 26 - Gráfico resultante da determinação do factor de conversão f_M.....</i>	<i>39</i>
<i>Figura 27 – Denominação do ângulo α.....</i>	<i>40</i>
<i>Figura 28 – Exemplo de fixação de uma casca de eucalipto no TO.....</i>	<i>42</i>
<i>Figura 29 – Definição dos eixos de aplicação das forças.....</i>	<i>43</i>
<i>Figura 30 – Fixação de uma casca de eucalipto</i>	<i>44</i>
<i>Figura 31 – Ensaio no TO com formas regulares</i>	<i>45</i>
<i>Figura 32 - Resultados obtidos no ensaio com o Tubo1</i>	<i>46</i>

<i>Figura 33 - Resultados obtidos no ensaio com o Tubo2</i>	<i>46</i>
<i>Figura 34 – Imagem da Plataforma de Combustão</i>	<i>47</i>
<i>Figura 35 – Imagem do Dispositivo de Rotação</i>	<i>48</i>
<i>Figura 36– Resumo dos ensaios de combustão realizados</i>	<i>49</i>
<i>Figura 37 – Exemplo do decaimento de massa verificado num ensaios de combustão de uma pinha.....</i>	<i>51</i>
<i>Figura 38 – Coeficiente de decaimento de massa em função da massa inicial das pinhas e da velocidade de escoamento. A superfície é representada pelo modelo da Equação 35 que será desenvolvido de seguida.</i>	<i>52</i>
<i>Figura 39 - Coeficiente de decaimento de massa em função da massa inicial das pinhas e do grau de abertura. A superfície é representada pelo modelo da Equação 35 que será desenvolvido de seguida.....</i>	<i>52</i>
<i>Figura 40 - Coeficiente de decaimento de massa em função do grau de abertura das pinhas e da velocidade de escoamento. A superfície é representada pelo modelo da Equação 35 que será desenvolvido de seguida.</i>	<i>53</i>
<i>Figura 41 - Comparação dos valores do coeficiente de decaimento de massa obtidos em laboratório e obtidos por aplicação da Equação 35. A linha a tracejado corresponde à recta $y=x$.</i>	<i>54</i>
<i>Figura 42 – Exemplo de ensaio de combustão com $\theta=45^\circ$.....</i>	<i>56</i>
<i>Figura 43 – Definição do ângulo θ.....</i>	<i>56</i>
<i>Figura 44 – Regimes de combustão de uma partícula</i>	<i>57</i>
<i>Figura 45 – Variação da massa residual da combustão de escamas em função do ângulo de ignição.</i>	<i>61</i>
<i>Figura 46 - Variação da massa residual da combustão de pinhas em função do ângulo de ignição.....</i>	<i>62</i>
<i>Figura 47 - Variação da massa residual da combustão de cascas de eucalipto em função do ângulo de ignição.</i>	<i>62</i>
<i>Figura 48 – Variação do tempo de combustão com chama em função do ângulo de ignição (escamas). A linha “Model”, a ponteadado, corresponde à aplicação do modelo definido pela Equação 52, que será desenvolvido de seguida.</i>	<i>63</i>
<i>Figura 49- Variação do tempo de combustão com chama em função do ângulo de ignição (pinhas). A linha “Model”, a ponteadado, corresponde à aplicação do modelo definido pela Equação 52, que será desenvolvido de seguida.</i>	<i>63</i>
<i>Figura 50 - Variação do tempo de combustão com chama em função do ângulo de ignição (cascas de eucalipto). A linha “Model”, a ponteadado, corresponde à aplicação do modelo definido pela Equação 52, que será desenvolvido de seguida.</i>	<i>64</i>
<i>Figura 51 - Variação do tempo total de combustão em função do ângulo de ignição (pinhas). A linha a ponteadado corresponde à aplicação do modelo definido pela Equação 52, que será desenvolvido de seguida.</i>	<i>65</i>
<i>Figura 52 - Variação do tempo total de combustão em função do ângulo de ignição (cascas de eucalipto). A linha “Model”, a ponteadado, corresponde à aplicação do modelo definido pela Equação 52, que será desenvolvido de seguida.</i>	<i>66</i>

<i>Figura 53 - Variação do coeficiente de decaimento de massa no regime de combustão com chama em função do ângulo de ignição (escamas). A linha "Model", a ponteadado, corresponde à aplicação do modelo definido pela Equação 52, que será desenvolvido de seguida.....</i>	<i>67</i>
<i>Figura 54 - Variação do coeficiente de decaimento de massa no regime de combustão com chama em função do ângulo de ignição (pinhas).....</i>	<i>67</i>
<i>Figura 55 - Variação do coeficiente de decaimento de massa no regime de combustão com chama em função do ângulo de ignição (cascas de eucalipto).</i>	<i>68</i>
<i>Figura 56 - Variação do coeficiente de decaimento de massa no regime de combustão sem chama em função do ângulo de ignição (pinhas).</i>	<i>69</i>
<i>Figura 57 - Variação do coeficiente de decaimento de massa no regime de combustão sem chama em função do ângulo de ignição (cascas de eucalipto).</i>	<i>69</i>
<i>Figura 58 - Variação do coeficiente linear de decaimento de massa no regime de combustão sem chama em função do ângulo de ignição (cascas de eucalipto). A linha "Model", a ponteadado, corresponde à aplicação do modelo definido pela Equação 52, que será desenvolvido de seguida.</i>	<i>70</i>
<i>Figura 59 - Variação do coeficiente de decaimento de massa em todo o processo de combustão em função do ângulo de ignição (pinhas). A linha "Model", a ponteadado, corresponde à aplicação do modelo definido pela Equação 52, que será desenvolvido de seguida.....</i>	<i>71</i>
<i>Figura 60 - Variação do coeficiente de decaimento de massa em todo o processo de combustão em função do ângulo de ignição (cascas de eucalipto). A linha "Model", a ponteadado, corresponde à aplicação do modelo definido pela Equação 52, que será desenvolvido de seguida.....</i>	<i>71</i>
<i>Figura 61 - Variação da velocidade de propagação da frente de combustão durante o regime de combustão sem chama em função do ângulo de ignição (cascas de eucalipto).....</i>	<i>72</i>
<i>Figura 62 – Variação do tempo de combustão com chama em função de U e θ para as pinhas (a) e para as cascas de eucalipto (b). A superfície representa a aplicação do modelo definido na Equação 55.</i>	<i>76</i>
<i>Figura 63 – Variação do tempo total de combustão em função de U e θ para as pinhas (a) e para as cascas de eucalipto (b). A superfície representa a aplicação do modelo definido na Equação 55.</i>	<i>76</i>
<i>Figura 64 – Variação do coeficiente de decaimento de massa em função de U e θ para as pinhas (a) e para as cascas de eucalipto (b). A superfície representa a aplicação do modelo definido na Equação 55.....</i>	<i>77</i>
<i>Figura 65 - Variação do coeficiente linear de decaimento de massa em função de U e θ para as cascas de eucalipto. A superfície representa a aplicação do modelo definido na Equação 55.</i>	<i>77</i>
<i>Figura 66 - Comparação dos resultados obtidos nos ensaios dinâmicos e nos ensaios estáticos com diminuição de θ. No modelo estático aplicou-se a equação 55.</i>	<i>79</i>

<i>Figura 67 – Exemplos da variação de massa num ensaio com variação decrescente da ventilação (a) num ensaio com variação crescente de U (b). Comparação dos resultados com os valores do modelo da equação 55.</i>	<i>80</i>
<i>Figura 68 – Variação do ângulo definido pelos declives obtidos pelo modelo e pelos valores laboratoriais em função da velocidade de ventilação (Seq. 2).</i>	<i>81</i>
<i>Figura 69 – Variação de k_0 em função da velocidade para os ensaios de variação de ventilação decrescente (a) e crescente (b).</i>	<i>81</i>
<i>Figura 70 – Variação do ângulo definido pelos declives obtidos pelo modelo e pelos valores laboratoriais em função da velocidade de ventilação (Seq. 3).</i>	<i>82</i>
<i>Figura 71 – Comparação dos ângulos m'_{mod} e m'_{lab} obtidos para a sequência 2 e para a sequência 3 nos ensaios com variação decrescente (a) e crescente de U.</i>	<i>83</i>
<i>Figura 72 - Variação de k_0 em função da diminuição da velocidade de escoamento durante o ensaio.</i>	<i>83</i>
<i>Figura 73 - Variação de k_0 em função do aumento da velocidade de escoamento durante o ensaio.</i>	<i>84</i>
<i>Figura 74 – Comparação dos valores obtidos com os limites propostos no estudo dinâmico.</i>	<i>85</i>
<i>Figura 75 – Variação do coeficiente de decaimento de massa em função da rotação da partícula em torno do eixo longitudinal (cascas de eucalipto).</i>	<i>87</i>
<i>Figura 76 - Variação do coeficiente de decaimento de massa em função da velocidade linear da rotação da partícula em torno do eixo longitudinal (cascas de eucalipto).</i>	<i>88</i>
<i>Figura 77 – Esquema dos escoamentos associados ao movimento de uma partícula ..</i>	<i>89</i>
<i>Figura 78 – Exemplo de ensaio em com ventilação descendente e $\theta = -90^\circ$</i>	<i>90</i>
<i>Figura 79 – Variação da velocidade terminal de uma pinha em função da: (a) massa inicial, (b) área representativa, (c) da densidade do ar de escoamento e (d) relação entre os parâmetros mencionados.</i>	<i>95</i>
<i>Figura 80 – Variação do quadrado da velocidade terminal com (a) o coeficiente de resistência de pinhas e (b) o grau de abertura.</i>	<i>96</i>
<i>Figura 81 – Imagem de algumas pinhas parcialmente queimadas (a altura média final destas pinhas é 12 cm)</i>	<i>97</i>
<i>Figura 82 – Variação da velocidade terminal de queda de uma pinha ao longo da sua combustão.</i>	<i>98</i>
<i>Figura 83 - Variação do coeficiente de resistência de uma pinha ao longo da sua combustão</i>	<i>99</i>
<i>Figura 84 - Variação da velocidade terminal de queda de uma casca de eucalipto em função da sua orientação relativamente ao escoamento ($\alpha = 270^\circ$ refere que o eixo principal da partícula se encontra paralela ao escoamento).</i>	<i>100</i>
<i>Figura 85– Incidência do escoamento no rasgo da casca de eucalipto tubular (o rasgo é apresentado na parte superior da figura da casca).</i>	<i>101</i>
<i>Figura 86 – Definição dos eixos relativamente à direção do escoamento.</i>	<i>102</i>
<i>Figura 87 – Variação do coeficiente Cx_0 em função do ângulo de incidência do escoamento</i>	<i>104</i>

<i>Figura 88 – Variação do coeficiente Cz_0 em função do ângulo de incidência do escoamento</i>	105
<i>Figura 89 – Variação do coeficiente de resistência em função do ângulo de incidência do escoamento</i>	106
<i>Figura 90 – Variação do coeficiente de sustentação em função do ângulo de incidência do escoamento</i>	107
<i>Figura 91 – Variação do coeficiente de momento em função do ângulo de incidência do escoamento.</i>	108
<i>Figura 92 – Comparação entre a média dos dados de Cx_0 obtidos em laboratório e os resultados determinados por aplicação dos modelos de previsão para o mesmo coeficiente aerodinâmico.</i>	110
<i>Figura 93 – Comparação entre a média dos dados de Cy_0 obtidos em laboratório e os resultados determinados por aplicação dos modelos de previsão para o mesmo coeficiente aerodinâmico.</i>	110
<i>Figura 94 – Comparação entre a média dos dados do coeficiente de resistência Cx obtidos em laboratório e os resultados determinados por aplicação dos modelos de previsão para o mesmo coeficiente aerodinâmico.</i>	111
<i>Figura 95 – Comparação entre a média dos dados do coeficiente de sustentação Cy obtidos em laboratório e os resultados determinados por aplicação dos modelos de previsão para o mesmo coeficiente aerodinâmico.</i>	111
<i>Figura 96 – Comparação entre a média dos dados do coeficiente de momento CM_y obtidos em laboratório e os resultados determinados por aplicação dos modelos de previsão para o mesmo coeficiente aerodinâmico.</i>	112
<i>Figura 97 – Esquema do transporte de uma casca de eucalipto.</i>	115
<i>Figura 98 – Esquema das forças do escoamento aplicadas numa casca de eucalipto</i>	116
<i>Figura 98 – Algoritmo do programa de simulação.</i>	116
<i>Figura 98 – Esquema da sequência de cálculos.</i>	123
<i>Figura 98 – Trajectória da casca do exemplo nas condições definidas.</i>	125
<i>Figura 98 – Variação da perda de massa e da diferença entre o tempo total de combustão e o tempo decorrido da casca do exemplo nas condições definidas.</i>	125
<i>Figura 99 – Trajecto seguidos pelas cascas no programa de simulação.</i>	128
<i>Figura 100 – Fotografia do edifício da Segurança Social em Viseu.</i>	130
<i>Figura 101 – Trajectos percorrido pelas cascas no ensaio e comparação com o trajecto obtido pelo programa de simulação.</i>	132
<i>Figura 102 – Velocidades de queda das cascas de eucalipto medidas nos ensaios e comparação com as velocidades de queda obtidas no programa de simulação.</i>	133

1. Introdução

Quando se olha para a uma fogueira observa-se a libertação de partículas de diversas dimensões que são transportadas na pluma térmica. Algumas destas partículas rapidamente perdem a incandescência, enquanto outras se afastam da fogueira ainda em combustão. Numa situação de incêndio florestal, em que o tamanho e a velocidade da pluma térmica é muito superior ao de uma simples fogueira, também se verifica a elevação de partículas que, estando em combustão e sendo de maiores dimensões, representam um factor de risco elevado. Algumas partículas incandescentes podem ser transportadas a distâncias muito curtas, contribuindo para o aumento da velocidade de propagação do incêndio. Outras podem ser transportados a distâncias mais longas, constituindo um novo caso de incêndio, que pode ou não vir a juntar-se à frente de chama original. Tanto nos casos em que há ignições a curtas distâncias, como nos casos em que as projecções são mais longínquas, se aplica o conceito de focos secundários de incêndios, que são o objecto de estudo da presente dissertação.

Frequentemente, quando os meios de combate estão concentrados num determinado local, em torno de um incêndio florestal, se observa o aparecimento de outro foco de incêndio. Caso não seja imediatamente combatida, esta pequena nova ignição poderá degenerar numa grande frente, de dimensões superiores àquela que lhe deu origem, o que poderia ser evitado caso a detecção tivesse ocorrido precocemente. Por este motivo, a deslocalização de atenções para locais onde haja uma grande probabilidade de ocorrência de focos secundários, poderá assumir-se como altamente vantajosa. No entanto, para que as atenções sejam desviadas para os sítios correctos, é necessários que sejam efectuados estudos com vista à determinação dos trajectos que as partículas combustíveis seguem. O trabalho aposentado nesta dissertação pretende ser um contributo para a compreensão deste problema.

1.1. Enquadramento do Problema

A propagação de um incêndio florestal pode ocorrer das seguintes formas: (1) por contacto directo de uma frente de chama com uma superfície combustível, (2) por transferência de calor radiativo ou convectivo ou (3) através do mecanismo de propagação por focos secundários. Na propagação de um incêndio por focos secundários dá-se o transporte aerodinâmico de uma partícula incandescente que, aterrando num leito de combustível com boas condições de inflamabilidade, poderá provocar uma nova ignição, dando origem a um novo foco de incêndio. Este conceito pode igualmente ser definido como um processo no qual uma partícula em combustão, com chama ou sem

chama, é transportada para jusante do local de origem provocando uma nova ignição (Byram, 1954; Tarifa et al., 1967; McArthur, 1967; Albin, 1979; Ellis, 2000) ou como um mecanismo de propagação de incêndios, através de transferência de massa e energia térmica, que ocorre sob determinadas condições (Porterie et al. 2007; Sardoy et al. 2007).

O transporte horizontal das partículas incandescentes poderá ocorrer a curtas distâncias (até algumas dezenas de metros), a médias distâncias (algumas centenas de metros) ou a longas distâncias (alguns quilómetros). Há relatórios de projecções a muito longas distâncias, superiores a 10 km (McArthur, 1967; Cheney e Bary, 1969), frequentemente verificadas na Austrália. Estas projecções mais longas referem-se normalmente a partículas de cascas de eucalipto (Cheney e Bary, 1969; Luke e Mc Arthur, 1978). O foco secundário a maior distância alguma vez reportado, ocorreu no incêndio de Victoria, em 1965, em que uma partícula provocou uma nova ignição a 29 km do seu local de origem (McArthur, 1967).

Os focos secundários têm sido causadores de diversos episódios trágicos de destruição de bens e da morte de pessoas e animais. Em incêndios como os de Mann Gulch (Rothermel, 1993), Storm King Mountain (Butler et al., 1998) ou Guadalajara (Viegas et al., 2009), a morte de pessoas deveu-se em grande medida à propagação por focos secundários. A catástrofe ocorrida em Fevereiro de 2009 em Victoria (Austrália) não foi mitigada porque os focos secundários não permitiram a actuação eficaz dos bombeiros, que se limitaram à evacuação de pessoas, enquanto as condições atmosféricas não se alteravam e conseqüentemente enquanto não abrandou o número de focos secundários (Viegas et al., 2009). Manzello (2007) considerou que um dos grandes problemas nos incêndios na interface urbano-florestal, nomeadamente nos incêndios do sul da Califórnia em 2003, se deve ao mecanismo dos focos secundários. A perda de mais de 500 casas verificada nos incêndios de Camberra (ACT – Austrália) deveu-se às inúmeras projecções de partículas incandescentes que ocorreram (Wang, 2006). Perry (1992, in Woicheese, 1997) estimou que no incêndio de Oakland Hills, em Outubro de 1991, cada casa ardida com o telhado em ripado de madeira deu origem a 600 novas projecções de partículas incandescentes. Em condições atmosféricas ideais com forte vento, baixa humidade e alta temperatura, aliadas a disponibilidade de combustível, o crescimento exponencial deste fenómeno torna a propagação do fogo de tal forma rápida que o seu combate é praticamente impossível.

O problema dos focos secundários ganha maior relevo quando se reúnem condições favoráveis ao seu aparecimento. A falta de limpeza das matas e florestas provoca o envelhecimento dos combustíveis que apresentam maior facilidade de desprendimento da árvore e uma menor densidade, tendo como consequência um maior potencial de perigosidade. O vento forte não só

promove um transporte mais longo e de partículas mais pesadas, como também tem um efeito no aumento da intensidade do fogo, provocando células convectivas maiores, facilitando o desprendimento e elevação das partículas incandescentes. Estes efeitos são igualmente sentidos nos períodos mais secos e quentes que, para além da sua acção nos fragmentos combustíveis, também aumentam a inflamabilidade do leito de combustíveis onde essas partículas incandescentes podem vir a aterrar. O tipo de espécies combustíveis e a topografia do terreno também influenciam decisivamente a probabilidade de ocorrência de focos secundários de incêndio.

Os dados de 2010, revelados pelo Autoridade Florestal Nacional, indicam que mais de metade da Floresta Portuguesa é ocupada por plantações pinheiro bravo – *Pinus pinaster* – e de eucalipto – *Eucalyptus globulus*. Apenas no ano de 2010 o crescimento da área de eucalipto aumentou em 10% e, segundo esta entidade, pela primeira vez em 2010, esta espécie tornou-se na segunda árvore dominante em Portugal, com 23% de representatividade. O eucalipto apresenta-se como uma espécie de grande perigosidade na formação de partículas com potencial para a formação de focos secundários (Wilson, 1992 in Ellis, 2000), devido às características aerodinâmicas e propriedades combustíveis das cascas do seu tronco. Aliando este aspecto, às alterações climáticas que se têm vindo a verificar, com períodos mais longos de altas temperaturas e com ausência de pluviosidade, será de antever que o problema dos focos secundários em Portugal apresente tendência para se agravar.

Várias estratégias de prevenção e combate de incêndios incluem a existência de faixas de interrupção de combustível para que a progressão da frente de chama seja interrompida. A eficácia destas discontinuidades pode ser comprometida por 4 mecanismos distintos (Alexander, 2004): (1) contacto directo da parte superior da chama com o combustível a jusante da faixa; (2) radiação térmica; (3) formação de turbilhões de fogo; (4) focos secundários. Enquanto o risco de passagem do fogo pelos três primeiros mecanismos pode ser eliminado perante um aumento da largura das faixas de interrupção, no caso dos focos secundários, a existência deste tipo e barreiras, com maior ou menor largura, pode tornar-se totalmente ineficaz.

Numa situação real de incêndio, os meios de combate são normalmente concentrados perto da(s) frente(s) de chama ou em locais onde se prevê a sua passagem. Quando a propagação é feita por focos secundários, os locais das novas ignições encontram-se muitas vezes desprovidos de meios de combate, levando ao início de novas frentes que podem assumir dimensões superiores às do fogo original, quando poderiam ter sido facilmente combatidas, caso a sua detecção tivesse sido precoce. Por este motivo se torna evidente a importância do estudo deste fenómeno no sentido da previsão dos locais onde podem ocorrer novos focos secundários de incêndio.

Do ponto de vista científico, a importância dos focos secundários deve-se sobretudo à grande dificuldade na sua compreensão (*Pastor, 2003*).

Um dos primeiros investigadores a focar o conceito de focos secundários nos seus estudos foi *Byram* (1954) que desenvolveu teorias fundamentais no estudo das correntes de convecção por análise da intensidade de uma frente de chama. Foi no entanto *Tarifa* (1965) que, integrando alguns conceitos de *Byram*, efectuou um estudo abrangente em que analisou as trajectórias e os tempos de combustão de partículas de madeira com forma regular (cilindros, placas e esferas). Este investigador concluiu que uma partícula com grande resistência ao escoamento, acelera rapidamente sobre acção do vento, até atingir uma determinada velocidade (velocidade terminal), que permanece praticamente constante até que quase toda a partícula tenha sido consumida pelo processo de combustão. *Tarifa et al.* (1967) deram continuidade aos seus estudos, desenvolvendo um modelo bidimensional de previsão da trajectória de partículas.

Baseando-se nos dados dos ensaios de *Tarifa* com esferas de madeira, *Lee e Helman* (1969, 1970) desenvolveram um modelo tridimensional que prevê a alteração do diâmetro deste tipo de partículas, assumindo que a sua densidade permanece constante assim como o coeficiente de decaimento de massa resultante da combustão.

Outros trabalhos de grande relevância no âmbito dos focos secundários foram desenvolvidos por *Muraszew et al.* (1975, 1976) com partículas de madeira com formas regulares (cilindros e placas). Estes autores concluíram que a intensidade de uma frente de chama não produzia uma corrente ascensional suficientemente forte para elevar partículas de maiores dimensões a alturas suficientemente altas para provocar focos secundários a longas distâncias, embora este fenómeno fosse uma realidade. A continuação dos seus estudos levou-os a concluir que a formação de turbilhões na pluma térmica era a responsável pela elevação de partículas de grande massa que iam provocar novas ignições a grandes distâncias do fogo original. Uma vez que a formação dos turbilhões se dá num processo tridimensional, este autor rejeita os modelos bidimensionais para prever a efectiva elevação das partículas na coluna de convecção para focos secundários a longas distâncias.

Os estudos de *Clements* (1977) distinguiram-se por terem usado partículas combustíveis naturais, enquanto os trabalhos mencionados anteriormente usavam partículas com formas regulares. *Clements* analisou a velocidade terminal de queda de vários tipos de pinhas e folhas, deixando cair estas partículas de uma plataforma com altura conhecida e medindo os tempos decorridos. Simultaneamente efectuou estudos com objectivos idênticos, usando um túnel de combustão vertical com as partículas fixas, obtendo resultados similares àqueles que obteve na plataforma de combustão. A

utilização de combustíveis naturais deveu-se à sua convicção de que as formas regulares não apresentam coeficientes de resistência suficientemente elevados para provocar focos secundários a distâncias tão longas como aquelas que ocorrem naturalmente. Este autor concluiu que o formato das partículas, as suas dimensões e a sua massa influenciam de forma efectiva a sua velocidade de deslocamento. Verificou ainda que os movimentos erráticos do escoamento alteram significativamente tanto o transporte, como a combustão das partículas transportadas.

Albini (1979, 1981, 1983a, 1983b) desenvolveu uma série de trabalhos fundamentais no estudo dos focos secundários. Usando pedaços de madeira com dimensões conhecidas, criou modelos que permitem prever a trajectória dessas partículas quando elevadas por incêndios em grupos de árvores (*Albini, 1979*), em amontoados de combustíveis (*Albini, 1981*), sujeitos a ventos de superfície (*Albini, 1983a*) ou caracterizados por uma frente de chama linear. Nestes modelos *Albini* considerou a alteração da velocidade terminal da partícula durante o seu consumo por combustão. Enquanto *Albini* desenvolve o conceito de energia térmica do fogo com o intuito de determinar a elevação do combustível, *Raupach (1990)* desenvolveu o conceito da flutuação do combustível numa coluna térmica num fogo com uma intensidade determinada pelo seu modelo.

Weber e Mestre (1990) realizaram estudos teóricos da combustão de partículas singulares mostrando a grande influência da velocidade e direcção do vento na velocidade de perda de massa. Nas suas conclusões, este autor salienta a grande necessidade dos modelos de previsão no âmbito dos focos secundários na inclusão destes dois parâmetros como variáveis de entrada.

Usando um túnel de combustão vertical, *Ellis (2000)* realizou uma série de ensaios com diversos tipos de cascas de eucalipto (não utilizou cascas de *Eucalyptus globulus*) com formas maioritariamente planas. A particularidade dos seus estudos deveu-se ao facto de que as determinações do coeficiente de decaimento de massa e os tempos de combustão foram obtidos em ensaios com as partículas a flutuarem livremente na conduta do túnel de combustão. Para evitar que as partículas embatessem nas paredes, efectuou algumas alterações no túnel de forma a criar uma sobrepressão do escoamento na zona adjacente às paredes. Desta forma a combustão da partícula efectuou-se com os seus movimentos naturais de rotação, embora causasse alguma dificuldade na determinação da velocidade terminal das partículas ensaiadas com base na velocidade de escoamento. Este autor estudou ainda a probabilidade de ignição de leitos de combustível com caruma e feno, por contacto das cascas de eucalipto estudadas em combustão com e sem chama.

Pagni e Woicheese (2000) efectuaram diversos ensaios com pedaços de madeira para diversas velocidades de escoamento. Nos seus estudos

analisaram o tempo de combustão com chama e o tempo total de combustão de partículas, assim como a massa final após a extinção.

Mais recentemente houve diversos investigadores que se dedicaram igualmente ao um aperfeiçoamento dos modelos de previsão no âmbito dos focos secundários. *Fonda e Varner (2004)* estudaram a combustibilidade de pinhas de diversas espécies concluindo que, apesar da sua massa, estas partículas apresentam potencial para provocar focos secundários. *Porterie et al. (2005)* desenvolveram um estudo de simulação numérico que conclui que o número de partículas projectadas decresce exponencialmente em função da distância à frente de chama. *Anthenien (2006)* construiu um modelo que considera a combustão de partículas durante o seu transporte pelo vento. *Manzello et al. (2007)* estudaram a geração de partículas produzidas por árvores de *Pseudotsuga menziesii* de diferentes dimensões. Neste estudo, as partículas geradas pelas árvores em combustão foram recolhidas em recipientes contendo água. *Sardoy et al. (2007)* efectuaram estudos numéricos relativos ao transporte e combustão de partículas provenientes de árvores a arder. Estes autores relacionaram a intensidade do fogo, a velocidade do vento e as dimensões e densidade das partículas, estimando o tempo que as partículas permanecem em combustão durante o seu transporte. Posteriormente, efectuaram cálculos numéricos de análise das características e distribuição das partículas quando aterram no solo (*Sardoy et al., 2008*).

Nos estudos aerodinâmicos de modelação anteriormente citados, os autores focaram fundamentalmente a sua atenção na fase de elevação da partícula com o intuito da determinação a altura máxima atingida pelas peças que analisaram. Nos cálculos para determinação do trajecto descendente, apenas consideram uma velocidade do vento associada à aceleração da gravidade, não tendo em consideração os coeficientes aerodinâmicos para as diversas orientações que a partícula assume. Esta abordagem apenas lhes permitiu determinar a distância horizontal máxima que pode ser atingida pela partícula em questão.

Outro aspecto que tem sido negligenciado nos diversos trabalhos de investigação, é o tipo de movimento das partículas na sua deslocação que apresenta a seguinte sequência: queda (*tumbling*, em inglês) *fluttering*¹ ou caótico (*Anderson, 2005a*). Em determinadas condições, as partículas com maior inércia, como aquelas que provocam focos secundários a longas distâncias, não apresentam a fase caótica no seu transporte no entanto, o movimento em *fluttering* deve ser tido em consideração uma vez que altera o comportamento aerodinâmico da partícula. Combustíveis com formas planas apresentam uma grande tendência para rapidamente passarem para os

¹ A tradução directa deste termo para português é “esvoaçar”. No entanto, uma vez que normalmente se faz referência a este tipo de movimento como “*fluttering*”, decidi manter-se o mesmo nome em inglês sem tradução para português.

movimentos de *fluttering* ou mesmo para o movimento caótico (Anderson, 2005a e 2005b; Hirata, 2009), no entanto este comportamento não tem vindo a ser tido em consideração. Também a posição da partícula transportada assume uma grande relevância no comportamento aerodinâmico durante o transporte. Finn (2007) realizou ensaios com um cartão em forma plana (na realidade era um cartão de visita) verificando que quando o largava numa posição inicial vertical, este assumia um comportamento completamente distinto dos ensaios em que o mesmo cartão era lançado numa posição inicial horizontal. Kolomenskiy e Schneider (2010) realizaram um estudo de simulação numérica da queda de modelos teóricos de folhas de árvores, verificando uma grande tendência para a movimentação em *fluttering* que chega a provocar movimentos ascensionais.

Todos os modelos referidos consideram as características das partículas e as condições ambientais (velocidade do vento, intensidade do fogo, etc.). Alguns aspectos como a orientação do escoamento relativamente à partícula ou a transição entre as velocidades de vento são normalmente negligenciados. Por outro lado, não foram desenvolvidos quaisquer modelos aplicados especificamente às cascas de eucalipto (*Eucalyptus globulus*) dominante nas florestas portuguesas.

1.2. Mecanismo de Formação de Focos Secundários

Pagni e Woicheese (2000) consideraram que os focos secundários poderiam ser divididos em 3 fases distintas: (1) elevação da partícula incandescente, (2) transporte com maior componente horizontal e (3) deposição da partícula com início de uma nova ignição. Outros autores (Tarifa, 1965, 1967; Albini, 1979, 1981, 1982 1983a e 1983b) combinaram o efeito da elevação da partícula com o seu transporte por correntes horizontais. No presente estudo considera-se que, para efeitos de análise, o mecanismo da propagação por focos secundários pode ser dividido em quatro fases distintas como é apresentado na Figura 1.

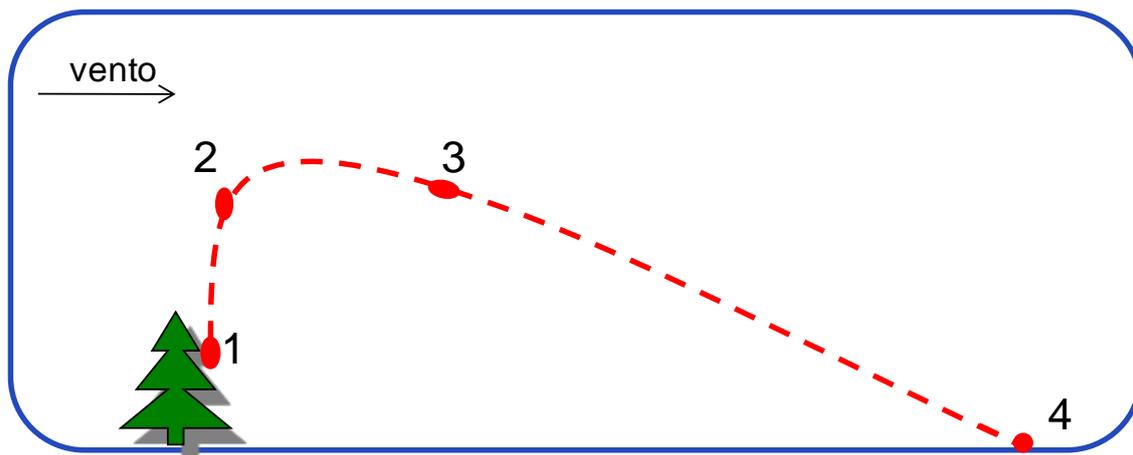


Figura 1 - Processos envolvidos na formação de focos secundários: (1) emissão de partículas, (2) elevação das partículas incandescentes, (3) transporte das partículas pelo escoamento horizontal e (4) ignição do leito onde a partícula aterra.

A primeira fase consiste na libertação da partícula incandescente do seu local original. Esta fase é altamente dependente da intensidade do fogo e do tipo de combustível que sustenta o incêndio. A libertação da partícula pode ser precedida da sua ignição ou pode acontecer que uma partícula seja libertada e a sua combustão se inicie no instante seguinte.

Alguns tipos de combustível apresentam uma maior tendência para se libertarem e serem elevados, dando origem à fase de transporte. *Byram (1954)* referenciou pedaços de madeira envelhecida ou de carvão, cascas de árvores e pedaços de musgo como sendo partículas suficientemente leves para, ardendo em combustão sem chama, provocarem novos focos de incêndios a longas distâncias. *Albini (1979)* considerou que tufo de caruma, cascas de árvores (principalmente com uma forma aplanada), escamas de pinhas, pinhas abertas e touceiras de musgo seco, seriam tipos de combustíveis com alto potencial para provocarem focos secundários. O mesmo autor evidenciou ainda a libertação de pequenos ramos com folhagem, que associam grandes tempos de combustão sem chama a uma velocidade terminal de queda relativamente baixa quando comparada com ramos da mesma dimensão despidos de folhas. Vários autores (*McArthur, 1967; Cheney e Bary, 1969; Luke e Mc Arthur, 1978; Ellis, 2000*) consideraram as cascas de eucalipto como o tipo de partículas que maior perigosidade apresenta na disseminação do fogo por projecções de partículas incandescentes. Para além do tipo de combustível, também o seu estado de envelhecimento ou de maturação e a sua humidade, influenciam decisivamente a facilidade de libertação das partículas antes do seu transporte.

Uma vez que a libertação das partículas ocorre a alturas muito baixas, em que a rugosidade da superfície reduz o escoamento horizontal a valores muito baixos, apenas o escoamento vertical se assume relevante nesta fase. Por este motivo a intensidade do fogo, responsável pelo escoamento ascensional, assume-se de grande relevância nesta fase, uma vez que provoca as correntes

convectivas que soltam as partículas em combustão, dando início à sua elevação (início da fase 2).

O transporte ascensional é altamente dependente da intensidade do fogo que poderá causar uma maior ou menor corrente de convecção influenciando a altura de elevação da partícula. Nesta perspectiva, também as características físicas da partícula elevada, actuam na determinação da sua altura máxima de elevação uma vez que definem a força de resistência ao escoamento. Em situações de topografia plana, a partícula será elevada até uma altura em que a velocidade ascensional da corrente convectiva do fogo iguale a sua velocidade terminal de queda.

À medida que uma partícula vai sendo elevada, a componente horizontal do escoamento vai se fazendo sentir com maior incidência para atingir o maior valor na altura máxima de elevação. Quando a partícula termina o seu movimento ascensional, dá-se início à fase 3 do processo de formação de focos secundários. A componente horizontal verificada nesta altura, deve-se não apenas ao vento meteorológico, mas também à corrente horizontal da célula de convecção. Em fogos de grande intensidade ocorrem por vezes vários focos secundários de incêndio numa zona restrita a jusante da frente de chama. Esta zona coincide normalmente no local de escoamento descendente da célula convectiva (*Cheney e Bary, 1969; Luke e Mc Arthur, 1978*).

Durante a fase de transporte, uma partícula viaja normalmente a uma velocidade, relativa ao escoamento, próxima da sua velocidade terminal. No entanto, devido à complexidade do campo de ventos meteorológico e convectivo, a partícula experimenta pontualmente diversos tipos de escoamento, tanto em termos de velocidade, como em termos de direcção. Este fenómeno leva a que a partícula experimente diversas posições e várias velocidades de combustão.

Durante as fases 2 e 3, uma partícula pode experimentar vários estados de combustão, nomeadamente combustão com chama, combustão sem chama e/ou extinção da combustão. A combustão com chama provoca um consumo mais rápido da partícula pelo que as fases de transporte que são dominadas por este tipo de combustão, apresentam um perigo de novas ignições a curtas distâncias. A combustão sem chama caracteriza-se por apresentar velocidades de consumo da partícula muito baixas durante períodos de tempo relativamente longos, sendo normalmente associadas a focos secundários a longas distância. Por vezes a combustão pode extinguir-se durante o transporte da partícula, devido ao seu consumo total ou apenas porque as condições deixaram de ser favoráveis à combustão. Neste caso, a partícula perde a capacidade de provocar um novo foco secundário de incêndio. Normalmente estes três estados de combustão aparecem de forma sequencial: combustão com chama – combustão sem chama – extinção. Por vezes verifica-se que uma partícula

em combustão lenta (sem chama) retorna à fase de combustão com chama (Ellis, 2000). Este fenómeno de reacendimento poderá dever-se a uma alteração brusca das condições a que a partícula é sujeita, nomeadamente alteração do escoamento. A passagem directa do estado de combustão com chama para o estado de extinção verifica-se quando a partícula foi totalmente consumida.

Uma partícula pode apresentar-se a arder de forma generalizada ou de uma extremidade para a outra. A combustão generalizada caracteriza-se por ser mais estável, apresentando maior dificuldade na transição entre fases até ao consumo total da partícula. No entanto este tipo de combustão é mais rápido, pelo que aparece mais associada a focos secundários a curtas distâncias. Quando a partícula transportada arde de uma extremidade para a outra poderá ter mais tendência para que a combustão se extinga antes do consumo total. Apresentando tempos de combustão relativamente maiores, este tipo está normalmente associado a ignições a distâncias mais longas.

A velocidade de combustão de uma partícula depende das suas características físico-químicas, da velocidade e direcção do escoamento a que é sujeita e das condições termodinâmicas da sua envolvente, nomeadamente temperatura e humidade.

O estudo comparado do tempo de transporte da partícula com o tempo de combustão da partícula é de grande interesse uma vez que apenas quando o tempo de combustão é superior ao tempo de transporte existe um perigo efectivo no surgimento de um novo foco secundário.

Quando uma partícula incandescente termina o seu trajecto, poderá aterrar num local com maiores ou menores possibilidades de ignição. Para além das espécies constituintes do leito de combustíveis, a probabilidade de ignição é altamente influenciada pelas suas características físicas (declive, altura e porosidade) e termodinâmicas (temperatura e humidade). A sua exposição ao vento também assume um relevo de importância extrema. Nos seus estudos de doutoramento, Ellis (2000) verificou que o contacto de uma partícula em combustão com chama num leito com humidade inferior a 8% conduziu a uma probabilidade de ignição de 100%. Em ensaios sem ventilação, Pita (2010) não obteve qualquer ignição no contacto de cascas de eucalipto em combustão sem chama com leitos de combustíveis finos. Larjavaara (2004) realizou estudos de ignição de leitos com base em episódios reais de incêndios ocorridos durante 37 anos, tendo verificado a grande influência de factores como a humidade e o vento no começo de um novo foco de incêndio.

Após o processo de formação de focos secundários deverá ainda ter-se em consideração a interacção entre os diversos pontos ou frentes de chama. Para ignições a curtas distâncias, é natural que a frente de chama original atinja os novos focos de incêndio, havendo um natural acréscimo na sua velocidade de

propagação. Para projecções a médias distâncias, a nova ignição poderá provocar uma nova frente de chama que interage com o incêndio na sua globalidade. Para projecções a longas distâncias, a frente de chama original dificilmente terá qualquer tipo de interacção com o foco secundário pelo que podem ser tratados como duas ocorrências distintas. A possível interacção entre os focos original e secundários dependem sobretudo da intensidade do fogo, das condições topográficas e do tempo que levam a ser extintos.

1.3. Objectivos e Organização do Estudo

A presente tese incide no estudo dos focos secundários provocados por partículas combustíveis típicas da floresta portuguesa com grande potencial de projecção enquanto incandescentes. As partículas analisadas foram as cascas do tronco de eucalipto (*Eucalyptus globulus*), pinhas de *Pinus pinaster* e escamas de pinhas da mesma espécie. Este estudo focou-se no transporte com maior componente horizontal (fase 3 do mecanismo de formação dos focos secundários) e na combustão que ocorre ao longo do transporte.

A escolha dos três combustíveis estudados teve em consideração a sua grande perigosidade enquanto partículas com grande potencial de iniciação de focos secundários. A perigosidade das cascas de eucalipto e das escamas de pinhas tem sido reportada ao longo de diversos trabalhos científicos (*Clements, 1977; Albini, 1979; Ellis, 2000; Manzello, 2008*, entre outros). A escolha das pinhas, enquanto partícula única, deveu-se a alguns relatos não reportados de bombeiros e de fotógrafos de incêndios que afirmam ter observado pinhas incandescentes a ser transportadas pelas correntes de convecção. Os eucaliptos e os pinheiros das espécies estudadas ocupam, respectivamente, 23 e 27% da floresta portuguesa (Autoridade Florestal Nacional, 2010), sendo igualmente importantes na floresta mediterrânica, pelo que a escolha destes combustíveis se torna ainda mais interessante. A facilidade de obtenção deste tipo de partículas também influenciou a sua preferência.

O objectivo principal deste trabalho consiste na criação de uma ferramenta informática que permita prever a trajectória bidimensional seguida por uma partícula incandescente com determinadas características físicas. Para atingir este propósito foram realizados ensaios para determinar as variações que a partícula sofre ao longo do transporte e ensaios para perceber o comportamento aerodinâmico da partícula sujeita a um escoamento. As metodologias e os resultados laboratoriais, os cálculos e as principais conclusões são desenvolvidos ao longo da presente tese. A Figura 2 esquematiza os estudos realizados e a sua forma de apresentação.

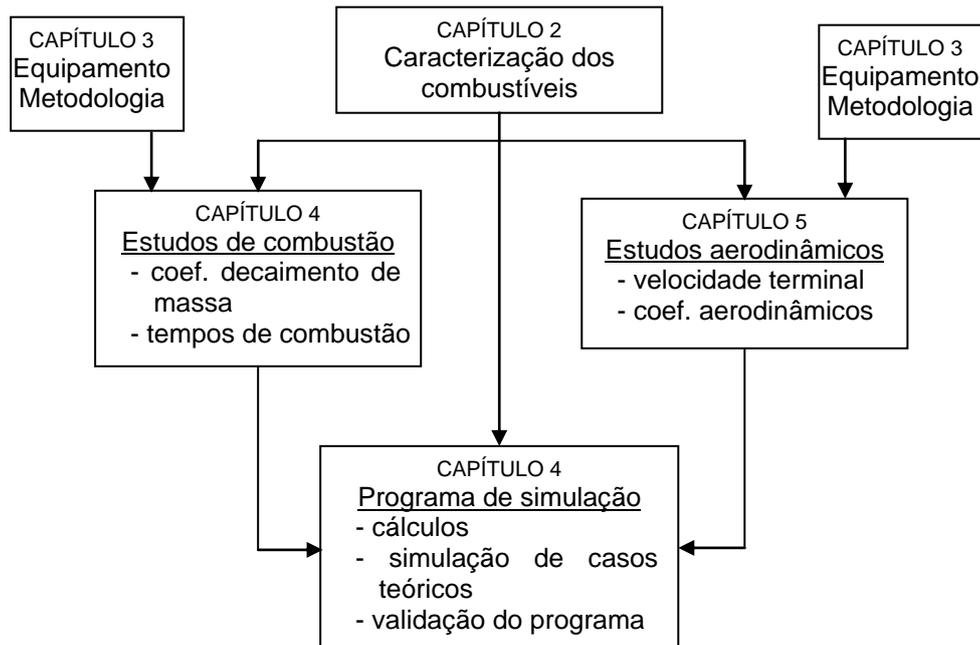


Figura 2 - Esquema de apresentação dos estudos realizados

Após a escolha dos combustíveis, foi feita uma análise às suas características físicas, nomeadamente aquelas que influenciam de forma mais evidente o seu comportamento aerodinâmico e a sua velocidade de combustão. Uma vez que as cascas de eucalipto apresentam configurações muito variadas, com dimensões muito discrepantes, foi definido que iriam ser analisadas cascas de eucalipto que naturalmente enroladas, apresentam uma forma tubular com um comprimento de 30,0 cm e um diâmetro em torno de 2,5 cm. O estudo das características dos combustíveis é desenvolvido no Capítulo 2.

No Capítulo 3 é feita uma descrição dos principais equipamentos utilizados, assim como das metodologias seguidas nos ensaios laboratoriais. Neste mesmo capítulo, apresentam-se os cálculos efectuados com vista à transformação dos dados laboratoriais nos resultados fundamentais para o cumprimento dos objectivos propostos. Uma vez que nos ensaios de combustão e nos ensaios aerodinâmicos foram usados os mesmos equipamentos e seguida uma metodologia de cálculo idêntica, optou-se por criar este capítulo comum aos dois tipos de estudos.

As partículas foram sujeitas a diversos ensaios que tiveram como objectivo o estudo da velocidade de combustão associada a cada uma. Os parâmetros de análise foram o coeficiente de decaimento de massa, que representa a velocidade com que a partícula é consumida pelo processo de queima, e o tempo de combustão. Foi feita uma análise à influência das características físicas das partículas, da sua orientação e da velocidade de escoamento na velocidade de combustão. Foram criados modelos empíricos que reflectem os resultados obtidos. Foram ainda realizados ensaios que permitiram compreender a influência da rotação de uma casca de eucalipto tubular em

torno do seu eixo longitudinal na velocidade de combustão. O Capítulo 4 apresenta os desenvolvimentos deste estudo.

Na análise aerodinâmica, desenvolvida no Capítulo 5, foi feito o estudo da velocidade terminal de queda das pinhas e das cascas de eucalipto e dos coeficientes aerodinâmicos das cascas de eucalipto. Estes parâmetros foram analisados, não apenas para partículas inteiras, mas também para partículas parcialmente queimadas tentando simular-se o que sucede quando uma partícula é consumida ao longo do seu transporte. Os ensaios foram realizados tendo em vista uma análise bidimensional do problema, num plano que compreende o eixo longitudinal das partículas e a direcção do escoamento. Foi criado um modelo empírico que permite determinar os coeficientes de resistência, sustentação e de momento (perpendicular ao plano definido pela direcção do escoamento e o eixo principal do combustível), em função das características físicas da partícula, da velocidade relativa de escoamento e da orientação da partícula relativamente à direcção do escoamento.

Agregando os resultados dos ensaios e os modelos desenvolvidos, foi criado um programa que permite determinar o movimento descendente de uma partícula incandescente num terreno horizontal. Para além da trajectória, é possível analisar, se no momento em que a partícula atinge o solo está em estado de incandescência, ou se a combustão se extinguiu durante o transporte. Esta ferramenta, desenvolvida no Capítulo 6, assume-se de grande importância nos processos de decisão e combate num incêndio, uma vez que permite determinar o local de queda das partículas, ao mesmo tempo que esclarece do seu potencial para iniciar uma nova ignição na altura de contacto com o solo.

Apesar da sua grande perigosidade ainda não há um conhecimento consistente acerca dos focos secundários. Os modelos que têm sido desenvolvidos referem-se normalmente ao estudo de formas regulares que se aproximam das partículas combustíveis naturais com potencialidade para causar focos secundários. A adequação destes modelos teóricos a episódios reais ainda não foi devidamente comprovada (Ellis, 2000). Muraszew *et al.* (1976) e Chase (1981) verificaram que os modelos obtidos para formas regulares subestimam a capacidade real das distâncias de projecção em incandescência, nomeadamente para cascas do tronco de *Pinus ponderosa* e das diversas subespécies de eucalipto.

Os estudos de modelação dedicados ao *Pinus pinaster* e ao *Eucalyptus globulus*, enquanto espécie potencialmente causadoras de focos secundários, foi até ao momento diminuta ou mesmo inexistente. A carência de informação nesta área de conhecimento, tem feito diminuir a eficácia dos bombeiros, aumentando a área ardida, causando a perda de bens e a morte de pessoas. Pelo exposto torna-se evidente a grande importância deste estudo no âmbito

dos focos secundários aplicado directamente às espécies que compõem metade da floresta nacional portuguesa.

2. Caracterização dos combustíveis

Os combustíveis utilizados ao longo do estudo foram as pinhas de *Pinus pinaster*, as escamas de pinhas de *Pinus pinaster* e as cascas de eucalipto de *Eucalyptus globulus*. Os parâmetros desenvolvidos ao longo deste capítulo foram determinados tendo como objectivo uma melhor compreensão destes combustíveis e a obtenção de resultados que irão ser utilizadas em capítulos posteriores.

A determinação das dimensões métricas que abaixo se descrevem foi realizada por medições directas ou por medições indirectas, utilizando um programa de desenho para medir as dimensões em fotografias.

A massa foi obtida directamente por pesagem numa balança. Todas as massas que se apresentam neste capítulo referem-se a base seca. A humidade foi obtida através de uma balança de humidades da marca *AND MX-50* com precisão até 0,01%. Os valores de humidade foram validados por ensaios gravimétricos efectuados com o auxílio de uma estufa aquecida a uma temperatura entre 103°C e 105°C.

Por questões de organização, dividiu-se este capítulo em três subcapítulos que se referem a cada um dos combustíveis analisados: pinhas, escamas de pinhas e cascas de eucalipto.

2.1. Pinhas

Os parâmetros estudados, descritos de seguida, reportam valores médios obtidos para um universo de pinhas de origens, tamanhos, massa e coloração diferentes. Embora uma pinha possa apresentar algumas heterogeneidades morfológicas, principalmente desvios do seu eixo longitudinal, considerou-se o seu formato como sendo regular e constante para todas as pinhas estudadas.

Caracterização da pinha

Com vista à caracterização morfológica da pinha, considerou-se a pinha como sendo constituída por três secções cónicas, sendo a secção intermédia representada por um cone incompleto (Figura 3).

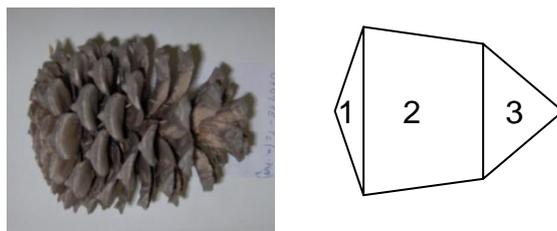


Figura 3 – Formato normal de uma pinha

Utilizando uma amostra de 10 pinhas com diferentes características físicas (Anexo 1), estabeleceu-se uma relação entre os dois diâmetros e as três alturas de cada uma das secções cónicas. Os valores médios obtidos são os que constam da Tabela 1. Os valores percentuais constantes desta tabela referem-se à relação entre valores da mesma linha. Por exemplo, na primeira linha, o diâmetro do corte entre as secções 1 e 2 ($\varnothing_{1|2}$) corresponde a 52,4% do somatório dos dois diâmetros ($\varnothing_{1|2}$ e $\varnothing_{2|3}$) pelo que $\varnothing_{2|3} = 0,909 \times \varnothing_{1|2}$.

Tabela 1 – Relação entre as diferentes dimensões das pinhas

RELAÇÃO ENTRE DIÂMETROS (\varnothing)	$\varnothing_{1 2}$ 52,4% (100%) (σ : 1,4%)	$\varnothing_{2 3}$ 47,6% (90,9%) (σ : 1,4%)		
RELAÇÃO ENTRE ALTURAS (h)	h_1 – BASE 19,5 % (σ : 4,4%)	h_2 – MEIO 45,3 % (σ : 9,7%)	h_3 – TOPO 35,2 % (σ : 7,2%)	
QUOCIENTE (h/\varnothing) ENTRE ALTURAS E DIÂMETROS	$h_1/\varnothing_{1 2}$ 0,26 (σ : 0,04)	$h_2/\varnothing_{2 3}$ 0,62 (σ : 0,17)	$h_3/\varnothing_{1 2}$ 0,48 (σ : 0,10)	$(\sum h)/\varnothing_{2 3}$ 1,36 (σ : 0,13)

Considerou-se ainda que uma pinha é constituída pela sua parte central, a que se chamou “coração da pinha”, da qual partem diversos apêndices, aos quais foi dado o nome de “escamas”.

Ensaio realizados com três pinhas com diferentes características físicas permitiram verificar que a massa do coração da pinha corresponde a 34,0% da sua massa total ($\sigma = 1,5\%$).

Centro de massa

Por vezes uma pinha não apresenta um eixo perfeitamente central em virtude de deformações na sua formação. Poderá no entanto assumir-se que, em termos médios, o centro de gravidade se situa no eixo longitudinal da pinha que

passa entre o pecíolo e a extremidade oposta, interceptando o centro de cada uma das secções transversais.

Na determinação da localização do centro de massa ao longo do seu eixo longitudinal, foram observadas nove pinhas (Anexo 2), tendo sido calculado o ponto médio da sua localização. A metodologia utilizada para este fim consistiu em suspender cada pinha num fio mole e fino, de massa e dureza desprezáveis, e verificar a direcção do fio, considerando que a mesma passa pelo centro de massa da pinha (Figura 4). O ponto de intersecção das várias direcções permitiu definir o centro de massa que, tal como o esperado, se situava invariavelmente no eixo longitudinal.



Figura 4 – Exemplo de ensaio para determinação do centro massa

Com base nos resultados obtidos, obtém-se um valor médio da distância entre a base da pinha (pecíolo) e o centro de massa de 38% da altura total ($\sigma=2,6\%$)

Volume aparente

O volume aparente de uma pinha (V_{apar}) considera o espaço ocupado pela fracção sólida da pinha acrescentado pelo volume vazio do espaçamento entre as escamas. Pretendeu-se, com este estudo, determinar uma fórmula que conduzisse a um valor aproximado do volume aparente de uma pinha, em função da altura total (h) e do diâmetro (D) da sua maior secção transversal, facilitando assim a determinação deste parâmetro.

Numa primeira abordagem, utilizando-se as relações das dimensões anteriormente descritas na Tabela 1, determinou-se o volume aparente de uma pinha somando o volume dos três cones que a constituem (Equação 1).

$$V_{apar} = \frac{0,352 \times h \times \pi \times D^2}{12} + \left(\frac{6,8D \times \pi \times D^2}{12} - \frac{6,2D \times \pi \times 0,909^2 D^2}{12} \right) + \frac{0,195 \times h \times \pi \times 0,909^2 D^2}{12} \quad [1]$$

Considerando as relações entre a altura e o diâmetro, apresentadas na mesma tabela, obtêm-se as Equações 2a, 2b e 2c

$$V_{apar} = 0,2\pi D^3 \quad [2a]$$

$$V_{apar} = 0,08\pi h^3 \quad [2b]$$

$$V_{apar} = \pi D^2 \times (0,04h + 0,14D) \quad [2c]$$

Com o intuito de validar as fórmulas obtidas, determinou-se o volume real aparente recorrendo à medição de distâncias e áreas de diferentes pinhas previamente fotografadas (ver características das pinhas no Anexo 1). Verificou-se que as Equações 2a e 2c foram as que conduziram a resultados mais próximos dos reais. No entanto, uma vez que a Equação 2c inclui a altura e o diâmetro da pinha, considerou-se ser esta a equação que melhor definia o volume aparente. Verificou-se contudo que todos os resultados se apresentavam majorados por um factor sensivelmente constante de “2,54”, em virtude do facto de a pinha não ser rigorosamente constituída por três secções cónicas. Desta forma o volume aparente de uma pinha poderá ser aproximadamente definido pela Equação 3. O quociente entre o volume real e o volume através do cálculo conduziu a um valor médio de 1,01 (σ : 0,09).

$$V_{apar} = \frac{\pi \times D^2}{2,54} \times (0,04h + 0,14D) \Leftrightarrow V_{apar} = 0,05hD^2 + 0,17D^3 \quad [3]$$

Volume efectivo, densidade efectiva e densidade aparente

Para além do volume aparente, desenvolvido no capítulo anterior, calculou-se o volume efectivo da pinha. Este parâmetro refere-se ao volume sólido da pinha, não sendo considerado o espaçamento existente entre as escamas. A metodologia utilizada na determinação baseou-se no método da deslocação de um líquido (água) por submersão da amostra em estudo.

Através da massa seca (m_{BS}), determinada por pesagem directa da pinha, e do volume efectivo (V_{effect}) determinou-se a densidade efectiva da pinha (Equação 4). A média deste valor, em base seca, é de $0,73 \text{ g cm}^{-3}$ (σ : $0,03 \text{ g cm}^{-3}$).

$$\rho_{effect} = \frac{m_{BS}}{V_{effect}} \quad [4]$$

Através da massa seca e do volume aparente, descrito no capítulo anterior, poderá determinar-se a densidade aparente através da Equação 5.

$$\rho_{apar} = \frac{m_{BS}}{V_{apar}} = \frac{m_{BS}}{0,05hD^2 + 0,17D^3} \quad [5]$$

Tanto a densidade efectiva, como a densidade aparente, são expressas como valores de densidade absoluta.

Grau de abertura

Existem pinhas que apresentam as escamas mais separadas do que outras, o que tem como consequência uma combustibilidade diferente. Também a aerodinâmica da pinha é influenciada por esta propriedade uma vez que, mantendo o valor da sua massa, é alterado o seu volume, com pequenas variações na área transversal ao deslocamento.

O grau de abertura (G_A) de uma pinha, traduz a separação entre as escamas, podendo ser determinado pelo quociente entre a sua densidade efectiva e a sua densidade aparente (Equação 6). Uma pinha que esteja completamente fechada apresenta um grau de abertura igual a um, o que conduz a uma menor velocidade de combustão e uma maior velocidade terminal de queda. À medida que a mesma pinha se vai apresentando mais aberta, vai aumentando o valor do seu grau de abertura, o que tem como consequência uma maior facilidade de ignição, maior velocidade de combustão e menor velocidade terminal de queda.

$$G_A = \frac{\rho_{efect}}{\rho_{apar}} = \frac{0,73 \times V_{apar}}{m_{BS}} = \frac{0,037hD^2 + 0,124D^3}{m_{BS}} \quad [6]$$

A Figura 5 pretende ajudar a compreender melhor o conceito de grau de abertura através dos exemplos apresentados.



Figura 5 – Exemplo de pinhas e respectivos graus de abertura

Cor

Das pinhas utilizadas ao longo do presente trabalho, apresentavam três tipos de coloração diferentes (castanha, cinza e castanha-acizentada). A cor cinza poderá levar a pensar tratar-se de uma pinha mais envelhecida ou que esteve sujeita a condições atmosféricas mais intensas, enquanto a cor castanha está associada a uma pinha mais nova.

Tendo sido analisadas todas as características anteriormente desenvolvidas para os três grupos de coloração diferentes, concluiu-se que a cor não interfere de forma significativa nas propriedades da pinha.

2.2. Escamas de pinhas

Tendo em consideração a importância deste tipo de partículas na propagação de incêndios por focos secundários a curtas distâncias, analisou-se as características das escamas de seis pinhas com características físicas distintas (ver Anexo 3).

As escamas foram arrancadas dos corações das pinhas com o auxílio de um alicate tendo o cuidado de não provocar danos evidentes na escama. A Figura 6 permite verificar a grande heterogeneidade do formato das escamas recolhidas. O agrupamento e classificação foram efectuados com base na largura máxima de cada escama.



Figura 6 – Exemplo de escamas arrancadas das pinhas

Número de escamas

Tendo-se contabilizado as escamas de várias pinhas de diversas dimensões, verificou-se que o seu número é de 139 escamas por pinha, independentemente do seu tamanho, grau de abertura, etc. Considera-se que poderá haver alguma incerteza, por defeito, neste resultado em virtude da maior dificuldade na diferenciação e contagem de escamas junto ao pecíolo.

Distribuição das escamas

Na análise da distribuição das escamas nas pinhas, apenas se considerou as escamas que apresentavam uma largura máxima superior a 5 mm uma vez que o controlo das escamas de menores dimensões se tornava bastante difícil. Por outro lado, escamas muito pequenas representam uma perigosidade muito reduzida na propagação de incêndios por focos secundários.

As Figura 7 e Figura 8 permitem observar a distribuição das escamas de acordo com a massa das pinhas de onde foram retiradas. Destes gráficos conclui-se que o aumento da massa das pinhas leva ao aumento do número e massa de escamas de maior dimensão. A largura máxima das escamas recolhidas não ultrapassou os 25 mm.

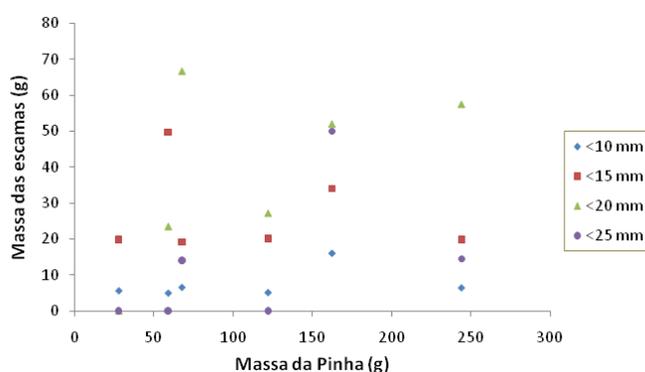


Figura 7 – Distribuição mássica das escamas em função da massa da pinha

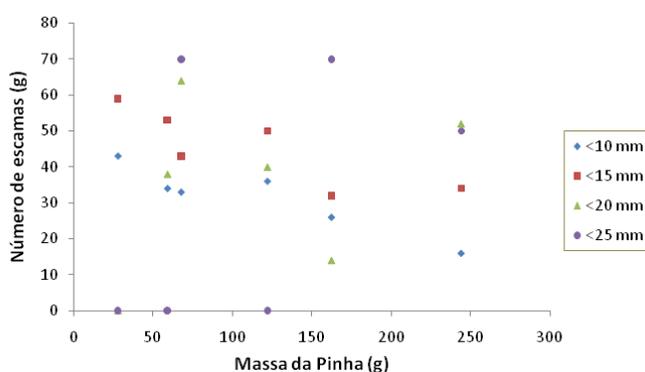


Figura 8 – Distribuição numérica das escamas em função da massa da pinha

Densidade das escamas em base seca

Após o agrupamento das escamas de acordo com a sua largura, determinou-se a massa em base seca de cada grupo e mediu-se o seu volume total pela deslocação do volume de água após imersão das escamas. Os resultados obtidos são os que constam na Tabela 2. A densidade média das escamas é de $30,9 \text{ kg m}^{-3}$ ($\sigma: 1,1 \text{ kg m}^{-3}$).

Tabela 2 – Densidade das escamas em base seca

Escamas	$5 < m \leq 10 \text{ mm}$	$10 < m \leq 15 \text{ mm}$	$15 < m \leq 20 \text{ mm}$	$20 < m \leq 25 \text{ mm}$
Densidade (kg m^{-3})	11,0 (σ : 1,1)	7,7 (σ : 0,5)	9,2 (σ : 1,8)	2,9 (σ : 1,2)

Os resultados obtidos parecem indicar que as escamas de maiores dimensões apresentam uma densidade menor do que as escamas mais pequenas. Esta conclusão apresenta alguma lógica uma vez que se observa que as escamas menores, que se fixam junto ao pecíolo, têm mais resina do que as escamas maiores.

2.3. Cascas de eucalipto

Conforme foi anteriormente referido, as cascas de eucalipto estudadas apresentavam uma forma tubular. O nível de enrolamento da casca sobre si própria, altera significativamente as características físicas da casca, uma vez que o acréscimo de massa é acompanhado por um aumento do volume muito ténue.

Densidade

Com vista à determinação da densidade das cascas de eucalipto foram analisadas onze peças com diferentes características físicas (ver Anexo 4). A massa, em base seca, foi determinada por medição numa balança com precisão de $0,01 \text{ g}$, tendo a humidade sido determinada numa balança de humidades. O volume das cascas foi determinado por medição das suas dimensões principais (comprimento, largura e espessura). O valor médio de densidade em base seca das cascas de eucalipto obtido foi de $0,42 \text{ g.cm}^{-3}$ (σ : $0,04 \text{ g.cm}^{-3}$). Salienta-se que este valor se refere à densidade da parte sólida da casca de eucalipto, não se considerando o volume de ar do interior da casca tubular.

Grau de enrolamento

Conforme foi referido anteriormente, as cascas de eucalipto analisadas apresentam uma forma comum. O formato tubular normalmente referido, consiste na realidade num formato em cornucópia resultante de diversas voltas que a casca apresenta quando se enrola em torno de si própria.

O grau de enrolamento (G_E) pretende descrever este fenómeno de enrolamento, consistindo no número de voltas completas que a casca apresenta. A importância deste parâmetro surge pelo facto de as cascas de eucalipto poderem apresentar dimensões comuns (diâmetro e altura), apresentando comportamentos aerodinâmicos diferentes, em virtude da maior massa que uma casca com maior grau de enrolamento naturalmente possui. A Figura 9 permite compreender melhor a definição deste parâmetro.



Figura 9 – Imagens de topo de cascas de eucalipto

O cálculo do grau de enrolamento foi efectuado por recurso à Equação 7. Nesta expressão, a variável “ b_1 ” representa a largura do topo da casca desenrolada. As variáveis “ P ” e “ b_0 ” correspondem respectivamente ao perímetro e ao diâmetro do topo da casca, considerando que define aproximadamente uma circunferência. O valor médio do diâmetro do topo da casca foi obtido pela medição com um paquímetro em 4 posições diferentes.

$$G_E = \frac{b_1}{P} = \frac{b_1}{\pi \times b_0} \quad [7]$$

Rasgo longitudinal

Uma característica comum a todas as cascas de eucalipto ensaiadas prende-se com a existência de um rasgo longitudinal (Figura 10) que tem uma grande influência no comportamento aerodinâmico da casca.



Figura 10 – Rasgo longitudinal nas cascas de eucalipto ensaiadas

Esta irregularidade foi tida em conta nos ensaios aerodinâmicos analisando-se se o escoamento era feito contra o rasgo da casca ou no sentido contrário.

3. Metodologia experimental

A metodologia experimental que de seguida se desenvolve aplica-se aos procedimentos seguidos para os estudos de combustão e para a determinação das características aerodinâmicas das partículas analisadas. Uma vez que os equipamentos, os procedimentos e os cálculos são comuns a ambos os estudos, apresenta-se neste capítulo um único desenvolvimento das tarefas que foram seguidas até à obtenção dos resultados finais. A Figura 11 esquematiza os ensaios realizados.

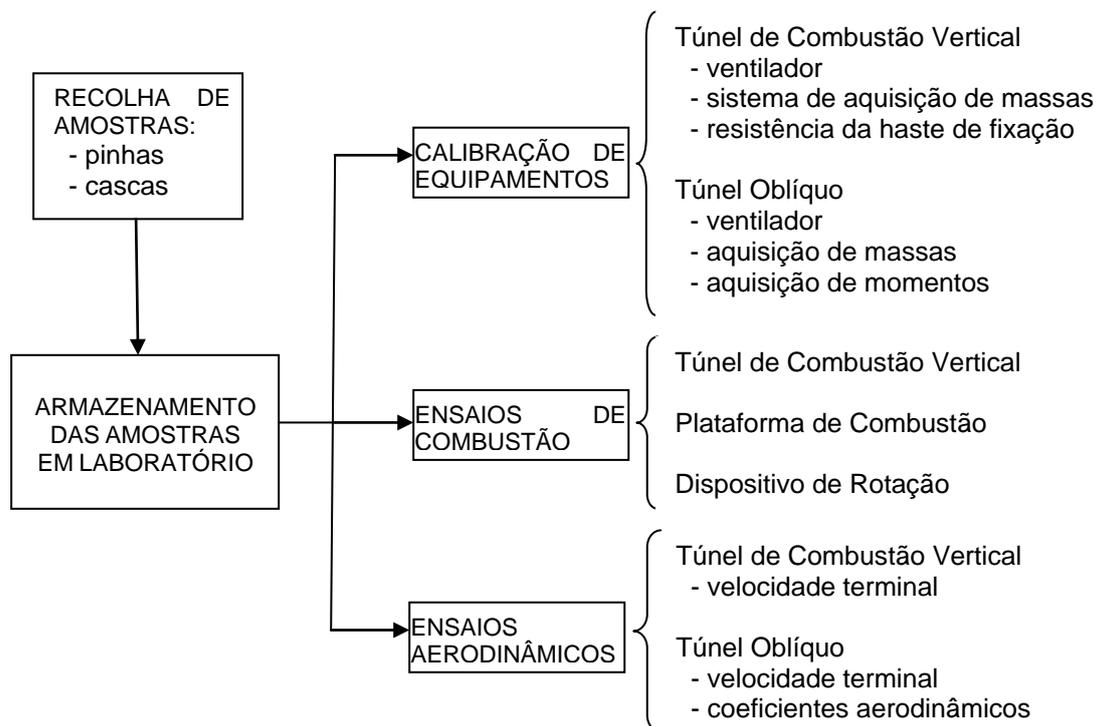


Figura 11 – Esquema dos ensaios laboratoriais realizados

Todos os ensaios foram agrupados de acordo com os objectivos que se pretendia atingir. A realização dos ensaios pertencentes a cada grupo seguiu uma sequência aleatória tanto no que respeita às características das partículas, como na velocidade de escoamento ou ainda na orientação das partículas. Por uma questão de exequibilidade técnica, apenas os ensaios aerodinâmicos de determinação dos coeficientes, para cada velocidade de escoamento, seguiram uma sequência crescente ou decrescente do ângulo de orientação da partícula em relação ao escoamento. A eventualidade de acumulação de erro foi corrigida de acordo com os cálculos que se apresentam neste capítulo.

3.1. Recolha e Armazenamento de Amostras

A primeira etapa que antecedeu a realização dos ensaios em laboratório consistiu na recolha das partículas que foram analisadas. As pinhas utilizadas nos ensaios foram recolhidas na base dos pinheiros que lhes deram origem. As cascas de eucalipto foram retiradas do tronco da árvore. Teve-se o cuidado de recolher amostras que não apresentassem vestígios de deterioração ou deformações visíveis. A colheita foi feita em dias com sol, precedidos de dias em que não houve pluviosidade, evitando desta forma a recolha de material excessivamente húmido.

Depois de colhidas, as amostras foram armazenadas no laboratório, pelo menos durante 5 dias, protegidas de chuva e da incidência directa do sol. A temperatura média do local de armazenagem foi sensivelmente de 15°C.

3.2. Equipamento

Os principais equipamentos usados foram o Túnel de Combustão Vertical (TCV) e o Túnel Oblíquo (TO). Estes equipamentos foram utilizados pela primeira vez na realização dos ensaios que originaram a presente tese de dissertação. Neste sentido foram inicialmente realizados ensaios de calibração com o objectivo de analisar a correspondência entre a rotação dos ventiladores e a velocidade do escoamento na secção de ensaio.

Conforme foi referido, o transporte da partícula em combustão conhece dois momentos distintos que consiste na elevação da partícula na pluma térmica e o movimento da partícula em que a componente horizontal assume uma maior preponderância. A utilização do TCV permite simular a primeira fase do transporte com grande aproximação da realidade. A combustão na segunda fase do transporte pode igualmente ser simulada, desde que a componente da convecção natural seja negligenciável relativamente à componente da convecção forçada.

A principal característica do TO consiste na possibilidade de se alterar a direcção do escoamento (Figura 12), enquanto no túnel de combustão vertical apenas se consegue submeter a partícula a um escoamento vertical ascendente. Nesta perspectiva, o TO permite simular o transporte de uma partícula incandescente em qualquer fase da sua trajectória.



Figura 12– Imagens do túnel oblíquo com diversas direcções de incidência do escoamento.

O *TCV* foi o primeiro equipamento a ser concebido, tendo sido principalmente utilizado nos ensaios de combustão que foram os primeiros ensaios a ser realizados. Posteriormente, após concepção do *TO*, foram realizados os ensaios aerodinâmicos pelo que neste tipo de estudos o *TO* foi o túnel que teve maior utilização.

Para além destes dois equipamentos, foram ainda utilizados outros dois dispositivos: Plataforma de Combustão (*PtC*) e Dispositivo de Rotação (*DR*). Para a determinação de parâmetros indirectos², foram utilizados outros equipamento como balança electrónica, estufas de secagem, balanças de humidades, etc..

Todos os equipamentos e materiais utilizados encontram-se no Laboratório de Estudos sobre Incêndios Florestais (*LEIF*), na Lousã, pertencendo ao Centro de Estudos sobre Incêndios Florestais (*CEIF*) da Associação para o Desenvolvimento da Aerodinâmica Industrial (*ADAI*) da Universidade de Coimbra (Portugal).

3.2.1. Túnel de Combustão Vertical

O túnel de combustão vertical encontra-se instalado desde 2006, tendo a sua concepção tido como principal finalidade o estudo do fenómeno de focos secundários. As suas características e tamanho permitem que no seu interior sejam queimadas grandes quantidades de combustível (fogueiras) no sentido de serem geradas partículas incandescentes. Em virtude dos objectivos da presente tese, os ensaios realizados não utilizaram esta potencialidade. A sua utilização restringiu-se à combustão individual das partículas em análise e à determinação da sua velocidade terminal.

² Ensaios para determinação de parâmetros como por exemplo a massa ou o volume que, sendo essenciais à análise dos resultados, não fazem parte do objectivo principal do estudo.

3.2.1.1. Características

A Figura 13 apresenta uma imagem e um esquema do túnel de combustão vertical.

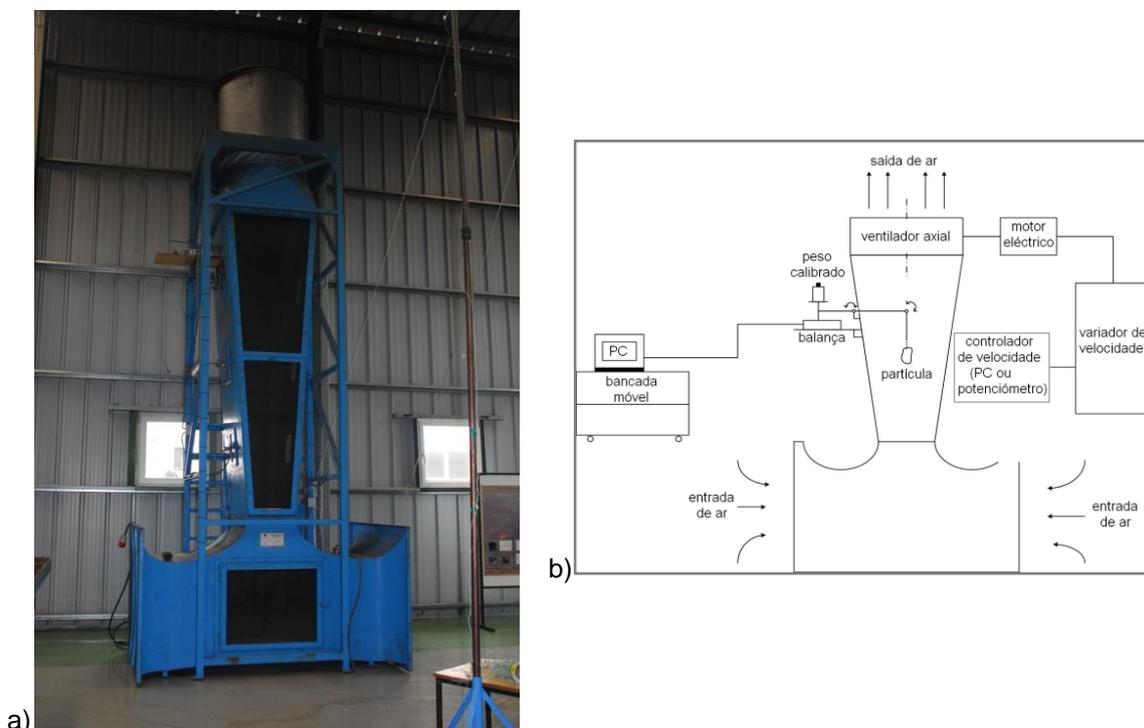


Figura 13 - Túnel vertical de vento: a) imagem completa; b) esquema dos dispositivos de aquisição de dados

Esta estrutura tem uma altura máxima de $6,5\text{ m}$. A sua parte inferior consiste num túnel horizontal com um comprimento de $2,6\text{ m}$, uma secção máxima de $1,7 \times 1,7\text{ m}^2$ e secção mínima de $1,0 \times 1,2\text{ m}^2$, variando da forma que pode ser observada na figura. O ar entra pelas duas extremidades deste túnel horizontal, sendo conduzido para a componente vertical do TCV que fica sobre o túnel horizontal.

A componente vertical do TCV apresenta na sua parte inferior uma secção quadrada com $0,5 \times 1,0\text{ m}^2$ que vai aumentando continuamente de área, ao longo de $3,5\text{ m}$, até atingir uma secção de $1,0 \times 1,0\text{ m}^2$. Acima da secção quadrada existe uma secção circular que suporta um ventilador axial.

O ventilador axial permite atingir uma velocidade máxima de escoamento de 30 m.s^{-1} na menor secção de escoamento do TCV. A velocidade de rotação do ventilador é controlada por um variador de velocidade ligado a um potenciômetro. O operador pode controlar a velocidade de escoamento através do potenciômetro, podendo verificar a velocidade de rotação na caixa do variador de velocidade.

A partícula a analisar é fixa a uma altura da secção rectangular vertical do TCV a que corresponde uma área de $0,88\text{ m}^2$. O dispositivo de fixação depende do

tipo de combustível a ensaiar. As pinhas foram fixas com um parafuso enroscado no pecíolo (Figura 14a). As cascas de eucalipto foram fixas com uma braçadeira apertando uma das suas extremidades (Figura 14b). O mecanismo de fixação é prolongado por um braço com um cotovelo que permite a alteração do ângulo de posicionamento do combustível face ao escoamento vertical.

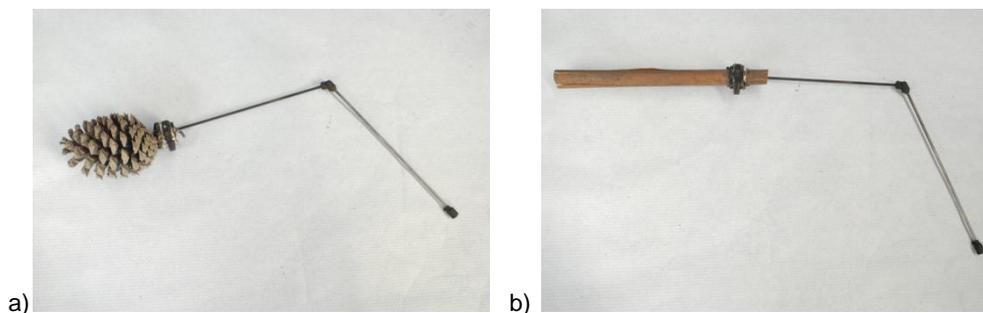


Figura 14– Mecanismos de fixação das partículas: a) pinhas; b) cascas de eucalipto

A aquisição da massa da partícula (Figura 15) é feita por um mecanismo de aquisição de massas que está ligado ao braço descrito no parágrafo anterior. Este mecanismo consiste num sistema de alavanca com uma extremidade ligada ao combustível (através do braço) e a outra extremidade ligada a uma balança electrónica (Marca *AND GX-2000*, com precisão de *0,01g*).



Figura 15 – Mecanismo de aquisição de massas do TCV

O braço da balança unida ao braço electrónico tem um comprimento que pode ser variado de acordo com a precisão que o operador pretender. A ligação da balança electrónica a um computador permite a digitalização do peso do combustível a qualquer instante, num intervalo de tempo definido pelo operador. O sistema de aquisição de massa encontra-se numa plataforma independente do túnel de circulação de ar e do ventilador. Esta característica evita que as oscilações do ventilador perturbem a aquisição de massas provocando oscilações nos dados.

3.2.1.2. Calibração

Para garantir a qualidade dos dados de ensaios foram realizados três tipos de calibração: (1) calibração do ventilador; (2) calibração do sistema de massas e (3) calibração da resistência da haste de fixação.

A primeira calibração feita ao TCV, consistiu na determinação da relação entre a rotação do ventilador e a velocidade de escoamento em determinada secção do túnel. A determinação da velocidade de escoamento foi medida por utilização de um anemómetro de filme quente. No quadro do variador de velocidade leu-se o valor da rotação do ventilador que deu origem ao escoamento. Foram efectuadas três séries de calibrações semelhantes, cujos resultados se apresentam na Figura 16.

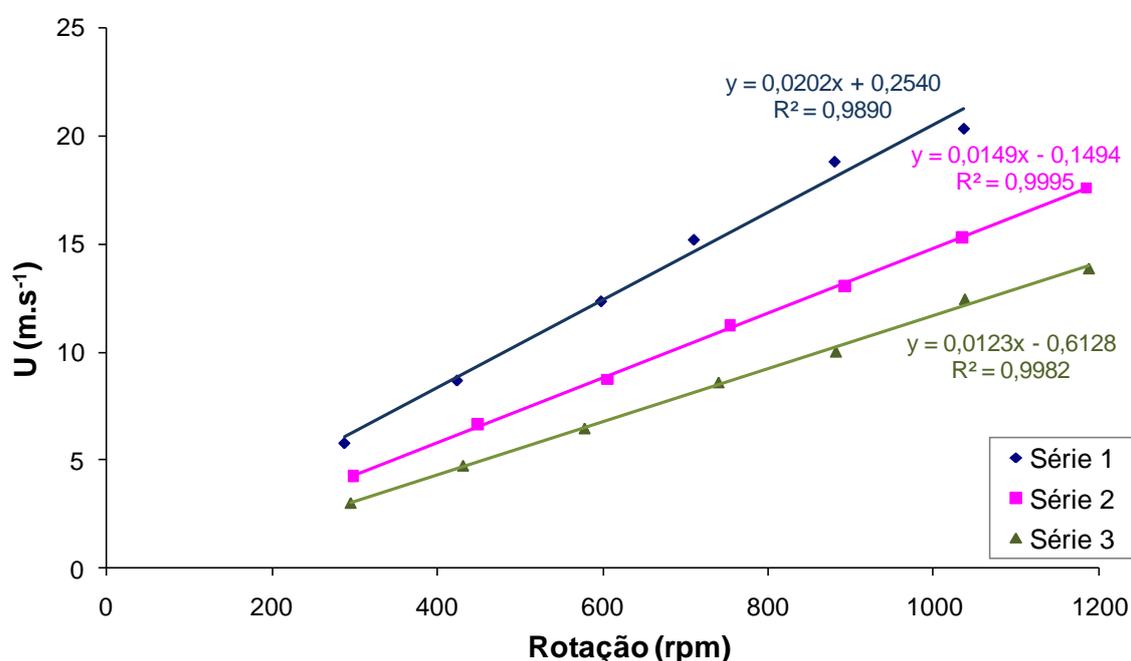


Figura 16 – Resultados da calibração da velocidade de escoamento provocada pela rotação do ventilador

Considerou-se a “Série 2” como sendo a série de calibração que melhor representa a realidade, não apenas porque apresenta valores mais próximos da média das três sequências de medição, mas também porque é aquela que exhibe um coeficiente de correlação linear mais próximo da unidade. A determinação da velocidade de escoamento à altura do combustível (U_{ens}) com base na rotação do ventilador (rot), foi determinada pela Equação 8. Esta expressão resulta não apenas da fórmula encontrada pelos ensaios da Série 2, mas também pelo ajustamento das secções do túnel de combustão. Enquanto as medições de calibração foram efectuadas numa secção com área (A_{cal}) de $0,73 m^2$, nos ensaios realizados o combustível foi fixo a uma altura cuja secção tem $0,88 m^2$ de área (A_{ens}).

$$U_{ens} = U_{cal} \times \frac{A_{cal}}{A_{ens}} = (0,0149 \times rot - 0,1494) \times \frac{0,73}{0,88} = 0,1224 \times rot - 0,1239$$

[8]

A calibração do sistema de aquisição de massas teve como principal objectivo a aferição do factor multiplicativo de resposta da alavanca ($f_{alav.}$) às variações do peso do combustível. Para tal, suspenderam-se objectos de massa conhecida na extremidade normalmente ligada ao combustível e registou-se o valor fornecido pela balança electrónica. O quociente entre o valor da massa conhecida (m_c) e o valor registado na balança (m_b) equivale ao factor multiplicativo de resposta da alavanca (Equação 9). O factor multiplicativo depende do comprimento dos braços da alavanca e do atrito existente no seu eixo. Esta calibração foi realizada sempre que foram realizados ensaios.

$$f_{alav} = \frac{m_c}{m_b} \quad [9]$$

Tendo em conta que o escoamento ascendente encontra uma resistência na haste de fixação do combustível (que está no interior do túnel), efectuou-se ainda uma calibração da influência desta peça nos resultados. A resistência da haste foi determinada realizando os mesmos ensaios que se descrevem no capítulo seguinte, mas sem qualquer combustível fixo. A calibração foi efectuada para diferentes velocidades de escoamento e para diversos ângulos de dobragem da haste pelo cotovelo. Em virtude de esta determinação exigir cálculos que são desenvolvidos posteriormente, os resultados da calibração da resistência da haste são apresentados mais adiante.

3.2.1.3. Metodologia dos ensaios e cálculos efectuados

No túnel de combustão vertical foram realizados dois tipos de ensaios: (1) ensaios aerodinâmicos para determinação da velocidade terminal do combustível e (2) ensaios de combustão.

Qualquer dos ensaios no TCV resultou num conjunto de dados que foram sendo fornecidos pela balança electrónica. De seguida descrevem-se os cálculos que foram efectuados para converter os dados da balança no peso do combustível. Nestes cálculos consideram-se as calibrações anteriormente descritas.

Uma vez que antes de cada ensaio, após a fixação da partícula, a balança foi levada a $0,00g$, os dados obtidos (m_{bal}) são negativos. Nesta perspectiva, à diminuição do peso (valor negativo) provocada pelo escoamento ascendente ou pela combustão da partícula, deverá ser somada a massa inicial da partícula (m_0). Deverá ter-se em atenção que a massa fornecida pela balança deverá ser

corrigida uma vez que poderá estar ampliada ou reduzida pela influência da alavanca (f_{alav}). Deverá ainda considerar-se a interferência da resistência da haste ao escoamento, que provoca um menor valor do peso da partícula (m_{haste}). A Equação 10 foi utilizada para determinar o peso real do combustível (m) a partir dos dados fornecidos pela balança.

$$m = m_0 + f_{alav} \times m_{bal} + m_{haste} \quad [10]$$

O factor multiplicativo de resposta da alavanca foi determinado em cada dia de realização de ensaios de acordo com o descrito anteriormente. A interferência da haste (m_{haste}) foi determinada para cada velocidade de escoamento e para cada ângulo que o braço de fixação descreve em torno do seu cotovelo. O gráfico da Figura 17 apresenta os resultados obtidos na determinação da interferência da haste no escoamento. Os valores obtidos para cada ângulo deverão ser somados aos valores do conjunto “partícula + haste” obtido em cada ensaio.

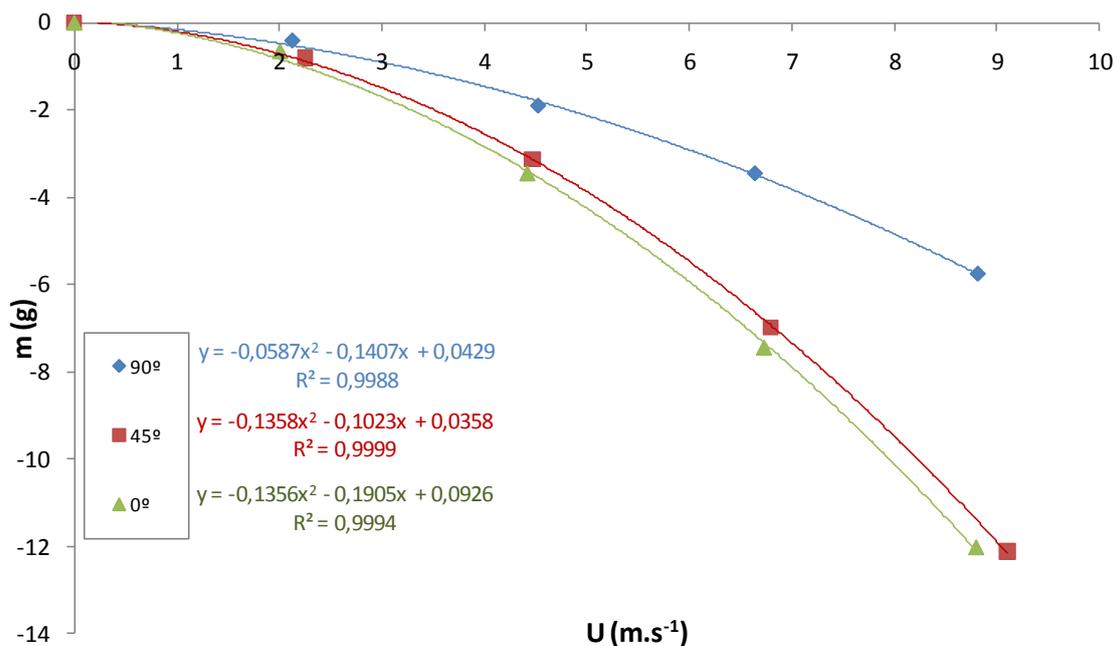


Figura 17 – Resistência da haste do mecanismo de fixação ao escoamento

Nos ensaios para determinação da velocidade terminal, após a fixação da partícula com a orientação pretendida relativamente ao escoamento, colocou-se o valor da balança electrónica a 0,00g. Sujeitou-se então a partícula a um escoamento ascendente com uma velocidade baixa (normalmente a posição 2 do potenciómetro) e registaram-se os novos valores fornecidos pela balança (valores negativos) para a rotação do ventilador correspondente. Seguidamente aumentou-se a velocidade de ventilação voltando-se a registar os novos valores fornecidos pela balança e a rotação do ventilador. Estas medições

foram repetidas consecutivamente até um número mínimo de cinco velocidades. Os dados resultantes foram convertidos em valores de peso da partícula por aplicação da Equação 10. A Figura 18 apresenta o exemplo de um gráfico que resultou deste procedimento para a determinação da velocidade terminal de uma pinha. A velocidade terminal corresponde à velocidade de escoamento para a qual a partícula apresenta um peso nulo ($\approx 15,3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, no exemplo apresentado).

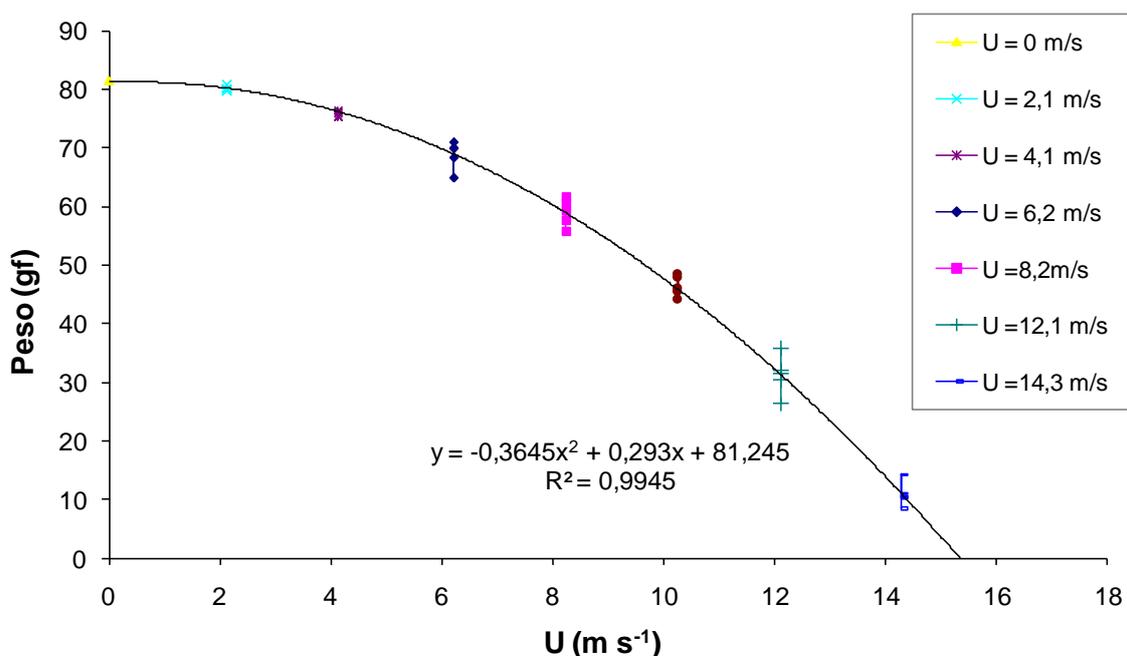


Figura 18 – Exemplo de gráfico resultante da determinação da velocidade terminal de uma pinha

Os ensaios de combustão tiveram como principal objectivo a determinação da velocidade de perda de massa do combustível provocada pela sua queima. Após a fixação da partícula com o ângulo pretendido, levou-se o valor da balança a $0,00 \text{ g}$. Fez-se ignição do combustível com um pedaço de algodão de massa desprezável embebido em gasóleo. Quando a partícula estava a arder de forma homogénea e estável, ligou-se a ventilação e passou-se ao registo dos valores fornecidos pela balança com um intervalo de tempo previamente definido (normalmente 1 s). A aquisição destes valores foi feita de forma automática através de um programa informático. A aquisição de valores foi finalizada sempre que a combustão se extinguiu ou algum pedaço relevante de material se soltou da partícula combustível. O ensaio apenas foi considerado válido se uma parte substancial ($\approx 70\%$) da partícula tivesse sido consumida pela combustão.

Ao longo da queima individual de cada um dos combustíveis ensaiados verificou-se um decréscimo da sua massa equivalente ao apresentado na Figura 19.

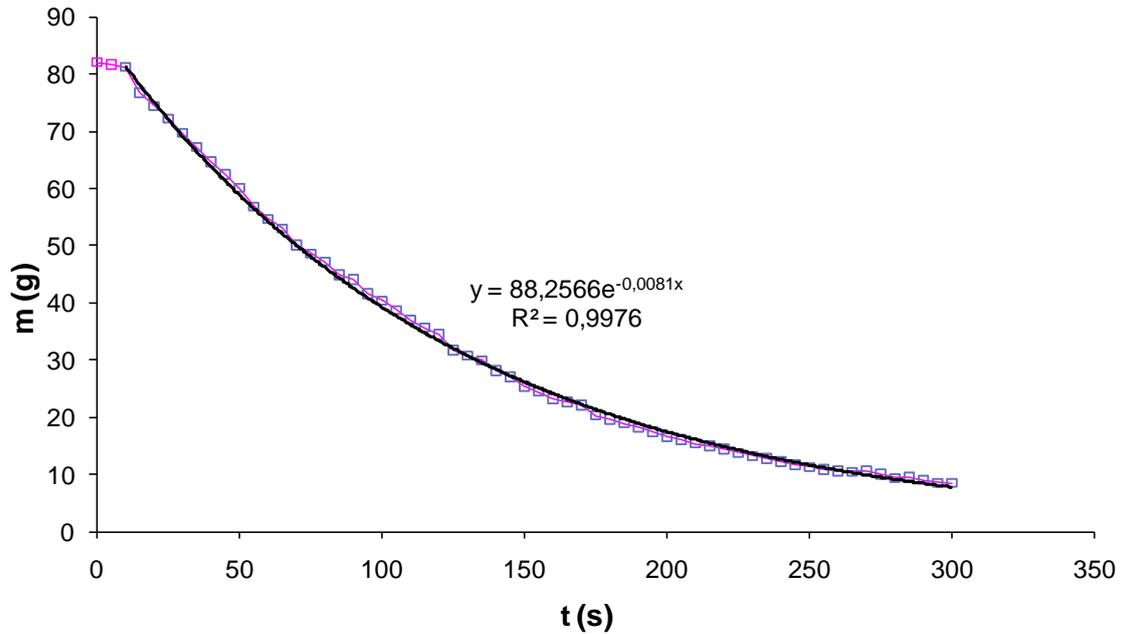


Figura 19 – Exemplo de gráfico resultante da determinação da constante de decaimento de massa de uma pinha

Constatou-se que o decaimento da massa da partícula ao longo da combustão descreve uma equação exponencial representada pela Equação 11.

$$m = m_0 \times e^{-k \times t} \quad [11]$$

em que “ m_0 ” se refere à massa inicial da partícula, “ m ” representa a massa da partícula no instante “ t ”. O termo “ k ” corresponde ao coeficiente de decaimento de massa e a sua determinação constitui-se como o principal objectivo do ensaio.

3.2.2. Túnel Oblíquo

O túnel oblíquo foi instalado no *LEIF* no ano de 2009. As suas menores dimensões permitem realizar ensaios mais precisos e com partículas mais pequenas do que o *TCV*. Este equipamento permite realizar ensaios de combustão, no entanto a quase totalidade dos ensaios realizados foram ensaios aerodinâmicos, sem que a partícula testada estivesse em combustão.

3.2.2.1. Características

A Figura 20 apresenta uma imagem do túnel oblíquo. Este equipamento consiste num túnel de vento com 3,1 m de altura total. O ar entra para uma fracção do túnel com 2,3 m de comprimento, com uma secção rectangular com

dimensões de $0,4 \times 0,4 \text{ m}^2$. A saída do ar é feita pela parte cilíndrica do *TO* onde se encontra o ventilador axial de sucção.



Figura 20 – Imagem do túnel oblíquo.

O ventilador axial permite uma velocidade de escoamento até 35 m.s^{-1} na secção rectangular do túnel. A velocidade de rotação do ventilador é controlada através de um potenciómetro manual. Este potenciómetro fornece um valor de frequência (*Hz*) que é proporcional à sua rotação.

A parede do túnel entre $1,4 \text{ m}$ e $1,9 \text{ m}$ de altura é de vidro, permitindo assim a visualização dos ensaios que decorrem no interior na secção a $1,7 \text{ m}$ de altura. Nesta mesma secção existe uma célula de carga que permite a aquisição de dados de seis componentes (3 forças e 3 momentos).

O mecanismo de aquisição de forças (Figura 21) é constituído pela célula de carga e por um dispositivo que permite fixar a partícula a analisar. Este mecanismo encontra-se fisicamente separado da restante estrutura do túnel oblíquo, evitando assim interferências causadas pelas vibrações causadas pela rotação do ventilador.



Figura 21 – Imagens da célula de carga do TO.

A partícula pode ser fixa com qualquer inclinação pretendida, relativamente ao eixo horizontal de referência. Os dados da célula de carga são registados informaticamente, num intervalo de tempo desejado pelo operador. Estes valores da célula de carga são fornecidos enquanto sinais de força e sinais de momento, que são respectivamente proporcionais às forças e aos momentos aplicados, segundo os eixos intrínsecos às células de carga, que não coincidem com os eixos vertical e horizontal, normalmente tidos como referencial.

3.2.2.2. Calibração

Na fase inicial de utilização do TO para os ensaios em causa, foi feita uma análise à relação entre a velocidade de rotação do ventilador e a velocidade de escoamento na secção rectangular onde são realizados os ensaios. Neste intuito, utilizando um anemómetro de filme quente, mediu-se a velocidade de escoamento (U) para diversas velocidades de rotação do ventilador (frequência – $freq$) e para vários ângulos de inclinação do escoamento. A Figura 22 apresenta os resultados obtidos nestes ensaios de calibração.

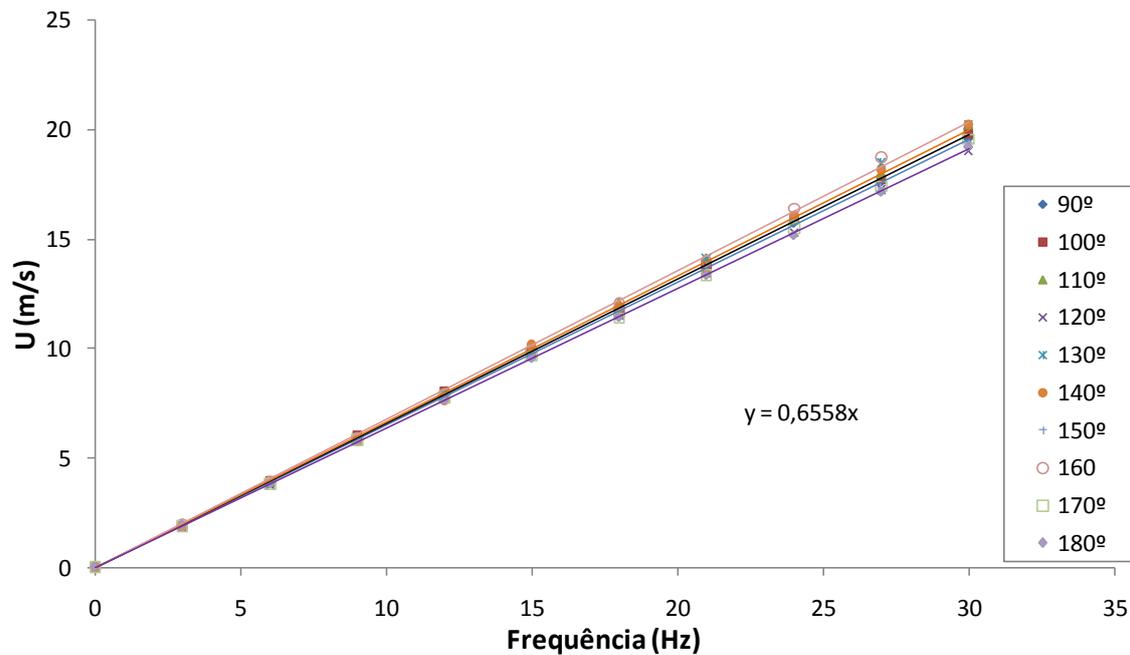


Figura 22 – Relação entre a frequência para rotação e a velocidade de escoamento na secção rectangular do TO

Conforme se pode verificar, para a gama de velocidades a que os ensaios foram realizados (abaixo de 20 m.s^{-1}), a inclinação do TO não provoca alterações significativas da relação entre a velocidade de escoamento e a velocidade de rotação. Nesta perspectiva, considera-se que a velocidade de escoamento pode ser determinada por aplicação da Equação 12, resultante da linearização da média dos valores constantes do gráfico da Figura 22, para cada ângulo de inclinação do túnel oblíquo.

$$U = 0,6558 \times Freq \quad [12]$$

Uma vez que a célula de carga transmite sinais de força, proporcionais às forças aplicadas foi necessário determinar o factor de conversão dos sinais de força em forças reais. Por outro lado, em virtude de os eixos da célula de carga não coincidirem com os eixos de referência, tornou-se fundamental determinar o ângulo de rotação dos eixos da célula de carga relativamente a um sistema de eixos de referência. Para determinar estas duas correcções aos dados fornecidos pela célula de carga efectuou-se uma calibração em que se suspenderam no dispositivo de fixação da partícula a analisar, objectos com massa conhecida (Figura 23). A simples suspensão destes objectos deveria transmitir à célula de carga uma determinada força vertical negativa, que mediante os cálculos abaixo descritos poderá ser usada para determinar o factor de conversão dos sinais eléctricos em força e o ângulo de rotação dos eixos da célula de carga. Esta metodologia foi usada em virtude de o presente estudo ser efectuado numa base bidimensional, pelo que apenas a força vertical (Fz_0) e a força horizontal paralela ao túnel oblíquo (Fx_0) se assumem de interesse.



Figura 23 – Objecto de massa conhecida suspenso no TO para calibração

Os cálculos efectuados para determinação destes parâmetros de calibração são os que se descrevem de seguida.

- i. O módulo do sinal da força (Mod_s) foi calculado através dos sinais eléctricos da força S_x (horizontal paralelo ao TO) e S_z (vertical) através da Equação 13.

$$Mod_s = \sqrt{S_x^2 + S_z^2} \quad [13]$$

- ii. O factor de conversão " f_F " do sinal foi calculado a partir do valor do declive da recta definida pelo gráfico módulo do sinal da força em função da massa real (m_{real}). A Figura 24 apresenta um exemplo desta determinação em que $f_F=2,6095$.

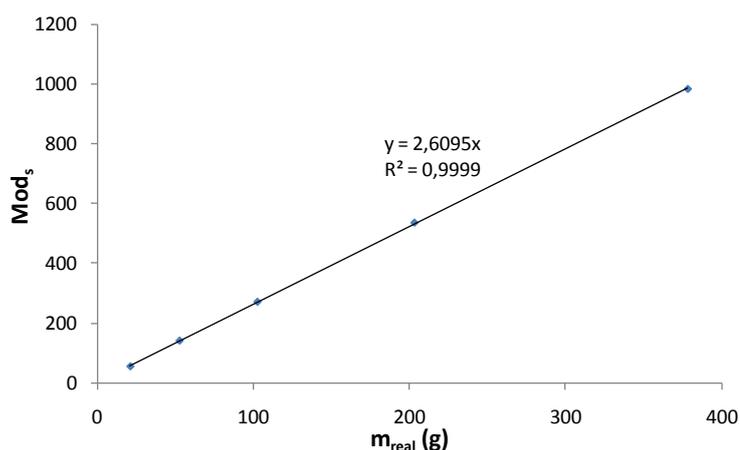


Figura 24 – Gráfico resultante da determinação do factor de conversão f_F

- iii. O ângulo θ , representado na Figura 25, definido pelo ângulo entre o eixo horizontal de referência (XX) e o eixo definido por S_z (ZZ_s) foi calculado através da Equação 14.

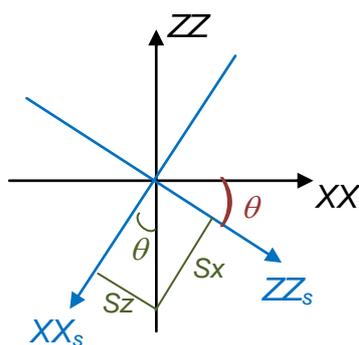


Figura 25 – Denominação dos eixos e do ângulo θ

$$\theta = \text{média} \left[\text{atan} \left(\frac{S_z}{S_x} \right) \right] \quad [14]$$

Tornou-se igualmente necessário determinar um factor de conversão do sinal de momento da célula de carga na força de momento realmente aplicada. Pelos mesmos motivos expostos anteriormente, apenas se considerou de interesse o estudo do momento exercido segundo o eixo horizontal perpendicular ao túnel oblíquo (M_y). Esta determinação foi levada a cabo suspendendo objectos de massa conhecida (m_{real}) no dispositivo de fixação de partículas colocado na horizontal, em que o braço perpendicular ao eixo YY tem um comprimento de 6,8 cm. Considera-se que os momentos positivos apresentam uma rotação no mesmo sentido dos ponteiros do relógio. O factor de conversão (f_M) do sinal eléctrico SM_y no momento aplicado foi determinado pelo declive do gráfico do momento real (m_{real}) em função do sinal SM_y da célula de carga. A Figura 26 apresenta o exemplo de um gráfico de calibração de momentos. A determinação do momento real foi feita através da Equação 15.

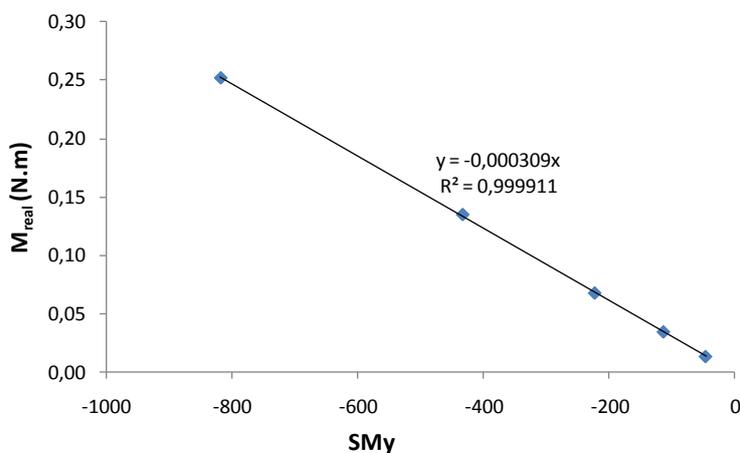


Figura 26 - Gráfico resultante da determinação do factor de conversão f_M

$$M_{real} = m_{real} \times 6,8 \times 9,81 * 10^{-5} \quad [15]$$

A influência do dispositivo de fixação na determinação das forças e do momento aplicado à casca de eucalipto também foi analisado. Num primeira abordagem realizaram-se ensaios sem qualquer partícula suspensa tendo-se verificado que os valores de resistência obtidos eram demasiado altos comparativamente àqueles obtidos tendo a casca ligada ao dispositivo de fixação. Concluiu-se que a presença da casca altera a linearidade do escoamento, criando linhas de corrente que contornam o dispositivo de fixação, minorando a influência deste nos resultados obtidos. Nesta perspectiva, nos cálculos efectuados não se considerou a interferência do dispositivo de fixação nos dados de força e de momento fornecidos pela célula de carga.

3.2.2.3. Metodologia dos ensaios e cálculos efectuados

Os ensaios realizados no túnel oblíquo consistiram na determinação da velocidade terminal das partículas ensaiadas e na determinação dos coeficientes de resistência das partículas ao escoamento. As cascas de eucalipto de forma tubular foram o único tipo de partícula combustível ensaiado no túnel oblíquo.

A metodologia usada nos ensaios aerodinâmicos iniciou-se com a fixação da partícula a analisar no dispositivo de fixação, com a orientação desejada. A denominação do ângulo de orientação da partícula e do ângulo de incidência do escoamento foi definida de acordo com a Figura 27.

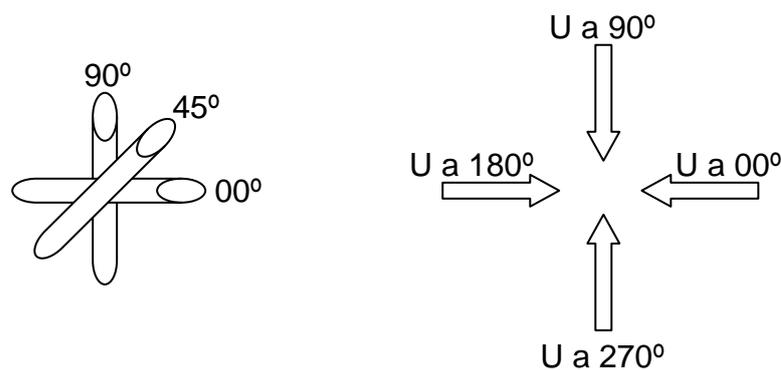


Figura 27 – Denominação do ângulo α

Nos ensaios para determinação da velocidade terminal de cada partícula, após fixar a casca de eucalipto no ângulo desejado e depois de orientar o túnel de forma a obter um escoamento de 270° , levou-se os valores dos sinais eléctricos da célula de carga a zero. Tal como para o *TCV*, sujeitou-se a partícula a diversas velocidades de escoamento vertical ascendente no sentido

de obter um gráfico semelhante ao apresentado na Figura 18, que permita determinar a velocidade de escoamento ascensional que anula o peso da partícula. Uma vez que a célula de carga apenas mede sinais eléctricos, foi necessário efectuar uma sequência de cálculos que permitiram transformar estes dados em forças verticais que correspondem ao peso da partícula em análise. A sequência de cálculos aplicada foi a que se descreve seguidamente.

- i. A conversão dos sinais eléctricos S_x e S_z medidos pela célula de carga na força vertical Fz_{0z} foi obtida por recurso ao ângulo χ entre a direcção da força aplicada e o eixo horizontal (XX).

$$\text{se } S_z < 0 \Rightarrow \chi = 180^\circ - \theta - \tan^{-1}\left(\frac{S_x}{S_z}\right) \quad [16]$$

$$\text{se } S_z \geq 0 \Rightarrow \chi = -\theta - \tan^{-1}\left(\frac{S_x}{S_z}\right) \quad [17]$$

- ii. A força vertical, em Newton, foi obtida por aplicação da Equação 18.

$$Fz_0 = \text{sen } \chi \times \frac{Mod_s}{f_F} \times \frac{9,81}{1000} \quad [18]$$

Sendo “ Mod_s ” o módulo dos sinais S_x e S_z calculado pela Equação 19 e “ f_F ” o factor de conversão obtido da forma descrita anteriormente.

$$Mod_s = \sqrt{S_x^2 + S_z^2} \quad [19]$$

Na determinação dos coeficientes aerodinâmicos a casca foi fixa na posição horizontal (0°) com o rasgo longitudinal voltado para cima, alterando-se a direcção do escoamento de acordo com os objectivos do ensaio. Nesta perspectiva, o ângulo α entre a direcção principal da casca e a direcção do escoamento coincide com a denominação dada para a direcção do escoamento. A braçadeira de fixação foi apertada na casca a 10 cm da sua extremidade esquerda (Figura 28) com o rasgo longitudinal voltado para cima. Após fixar a partícula e levar os sinais eléctricos da célula de carga a zero, ligava-se a ventilação na velocidade pretendida. O primeiro ensaio de cada sequência foi invariavelmente iniciado para um $\alpha=270^\circ$. Após a primeira aquisição dos sinais, alterava-se o ângulo de incidência do escoamento (α) para o valor pretendido (normalmente em intervalos de 5°) até perfazer uma volta completa de 360° , voltando novamente ao ângulo de 270° , para uma velocidade de escoamento (U) constante. Na segunda leitura, para $\alpha=270^\circ$, verificou-se que os valores dos sinais eléctricos da célula de carga eram diferentes dos valores da primeira leitura para o mesmo ângulo de incidência. Uma vez que teoricamente estes valores deveriam ser iguais, concluiu-se que a célula de carga acumulava um erro residual ao longo da sequência de

medições. Nesta perspectiva efectuou-se uma correcção dos sinais eléctricos com vista à eliminação desse erro, para todas as medições da sequência de ensaios, considerando que o erro se foi acumulando de forma constante. A conversão dos sinais eléctricos nas forças aplicadas F_{x_0} e F_{y_0} foi feita através da sequência de cálculos apresentados de seguida.

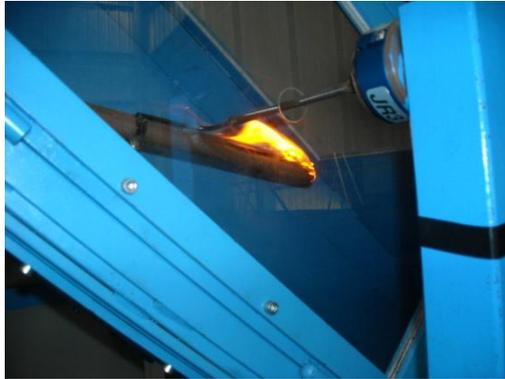


Figura 28 – Exemplo de fixação de uma casca de eucalipto no TO

- i. A eliminação do erro residual foi realizada tendo em conta a segunda leitura de S'_x e S'_z (final) para 270° . Considerando que S' (x ou z) corresponde ao sinal antes da correcção, “seq” corresponde à sequência de leitura e “ n ” ao número de leituras efectuadas (considerando a leitura final), o valor de “ S ” (sinal após a correcção) foi determinado por:

$$S = S' - \left[\frac{S'_{2^{\text{a}} \text{ leitura}} - S'_{1^{\text{a}} \text{ leitura}}}{n-1} \times (\text{seq} - 1) \right] \quad [20]$$

- ii. A conversão do sinal em força referida aos eixos de referência vertical e horizontal foi realizada com recurso ao ângulo χ entre o módulo da força aplicada e o eixo horizontal XX .

$$\text{se } S_z < 0 \Rightarrow \chi = 180^\circ - \theta - \tan^{-1} \left(\frac{S_x}{S_z} \right) \quad [21]$$

$$\text{se } S_z \geq 0 \Rightarrow \chi = -\theta - \tan^{-1} \left(\frac{S_x}{S_z} \right) \quad [22]$$

As componentes em XX e em ZZ da força em Newton, foram calculadas pelas Equações 23 e 24.

$$F_{x_0} = \cos \chi \times \frac{Mód_S}{f_F} \times \frac{9,81}{1000} \quad [23]$$

$$F_{z_0} = \sin \chi \times \frac{Mód_S}{f_F} \times \frac{9,81}{1000} \quad [24]$$

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. Neste sentido considerou-se que o vector da velocidade de escoamento era coincidente com a componente F_x da força aplicada na casca. A componente F_z da força foi considerada como sendo perpendicular ao escoamento, incluída no plano perpendicular ao eixo da célula de carga. A Figura 29 apresenta um esquema que ajuda a compreender a definição dos eixos.

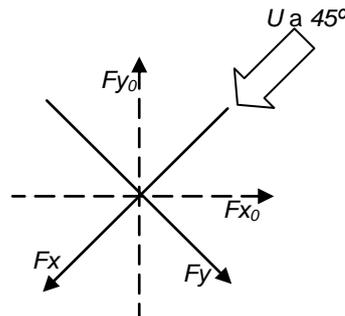


Figura 29 – Definição dos eixos de aplicação das forças

As componentes F_x e F_y das forças aplicadas pelo escoamento à casca de eucalipto foram determinadas através das Equações 25 e 26, em que χ representa o ângulo da direcção do escoamento com o eixo horizontal. Estando a casca posicionada horizontalmente (0°), o ângulo χ é equivalente ao ângulo α .

$$F_x = -F_{z_0} \times \text{sen}\chi - F_{x_0} \times \text{cos}\chi \quad [25]$$

$$F_z = F_{x_0} \times \text{sen}\chi - F_{z_0} \times \text{cos}\chi \quad [26]$$

Os coeficientes aerodinâmicos (C_{x_0} e C_{z_0}) das forças aplicadas referidos aos eixos verticais e horizontais foram determinados por intermédio das Equações 27 e 28, em que " ρ_{ar} " representa a massa volúmica do ar de escoamento, " U " representa a velocidade do escoamento e " A " a área representativa da casca de eucalipto calculada pelo produto do comprimento (L) da casca pelo seu diâmetro (b_0).

$$C_{x_0} = \frac{2 \times F_{x_0}}{\rho_{ar} \times U^2 \times A} \quad [27]$$

$$C_{z_0} = \frac{2 \times F_{z_0}}{\rho_{ar} \times U^2 \times A} \quad [28]$$

A determinação dos coeficientes de resistência (C_x) e de sustentação (C_z) foi efectuada com base nas forças referidas à direcção do escoamento. As Equações 29 e 30 permitem os cálculos de C_x e C_z , respectivamente.

$$C_x = \frac{2 \times F_x}{\rho_{ar} \times U^2 \times A} \quad [29]$$

$$C_z = \frac{2 \times F_z}{\rho_{ar} \times U^2 \times A} \quad [30]$$

Na determinação do momento no eixo YY , aplicado à casca de eucalipto, considerou-se o momento relativo ao centro de gravidade (M_{yCG}) e o momento relativo ao ponto de aplicação (M_{yPA}). Considera-se que o centro de gravidade da casca de eucalipto se encontra a metade do seu comprimento ($L/2$). O ponto de aplicação da força foi determinado tendo em consideração o comprimento do braço perpendicular a YY ($6,8\text{cm}$), o comprimento da casca (L) e o local de fixação da casca à braçadeira (a 10 cm da extremidade esquerda), conforme consta da Figura 30.

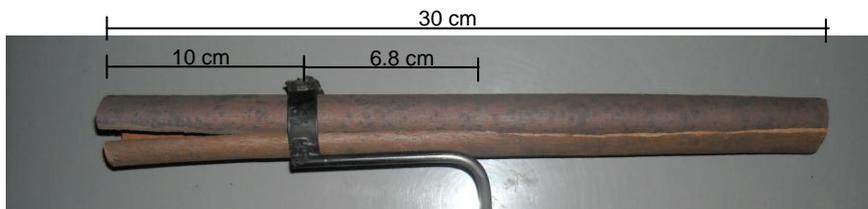


Figura 30 – Fixação de uma casca de eucalipto

O cálculo para determinação do momento M_{yPA} , relativo ao ponto de aplicação do momento, perpendicular ao plano XZ foi realizado por intermédio da Equação 31, em que f_M representa o factor de conversão do sinal SM_z no momento M_z , desenvolvido na calibração de momento. Tal como para o cálculo das forças, o sinal SM_y da Equação 31, resultou do sinal $S'M_y$ da célula de carga, após a eliminação do erro residual.

$$M_{yPA} = f_M \times SM_z \quad [31]$$

A determinação do momento aplicado ao centro de gravidade foi efectuada por aplicação da Equação 32.

$$M_{yCG} = M_{yPA} + \left(\frac{L}{2} - 15,9\right) \times F_{z_0} \quad [32]$$

O coeficiente de momento CM_y foi determinado de acordo com a Equação 33.

$$CM_y = \frac{2 \times M_y}{\rho_{ar} \times U^2 \times A \times L} \quad [33]$$

Sendo “A” a área representativa da casca de eucalipto calculada pelo produto do comprimento (L) da casca pelo seu diâmetro (D).

3.2.2.4. Verificação da metodologia aplicada

Antes da utilização efectiva do equipamento, da execução da metodologia experimental e da realização dos cálculos, foram efectuados alguns ensaios no sentido de verificar a correcção dos procedimentos de obtenção e tratamento de dados. Nesta perspectiva, realizaram-se ensaios em tudo idênticos aos ensaios com os combustíveis em análise mas, em vez das formas irregulares típicas destas partículas, utilizaram-se objectos com formas regulares. Foram realizados ensaios dois tubos de PVC com espessura de 0,2 cm, diâmetro externo de 3,2 cm e comprimentos de 30 cm e 40 cm. A orientação destes objectos no TO poderão ser vistas na Figura 31. Os ensaios foram realizados com uma velocidade de escoamento de $13,2 \text{ m.s}^{-1}$, fazendo-se variar o ângulo de incidência do escoamento ao longo de 360° , com um intervalo angular variável.

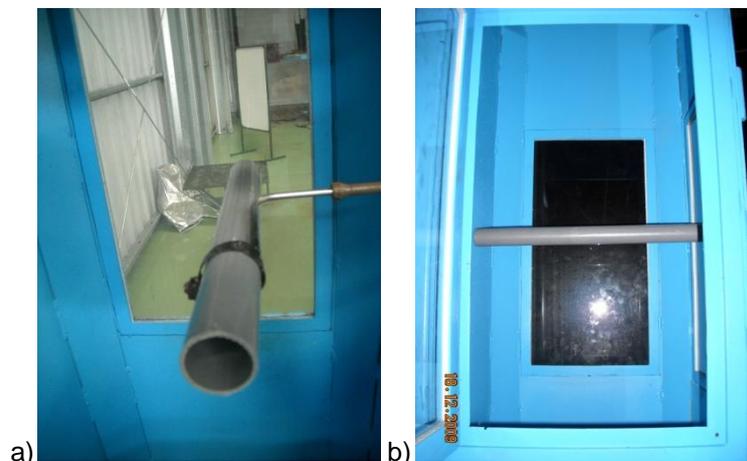


Figura 31 – Ensaio no TO com formas regulares

O tubo 1 (Figura 31a) foi colocado da mesma forma que foram colocadas as cascas de eucalipto, com a braçadeira de fixação colocada a 10 cm da sua extremidade. Os resultados obtidos são apresentados nos gráficos da Figura 32. Tritton (1988) apresenta valores típicos do coeficiente de resistência de um cilindro entre 0,8 e 1,1 (Número de Reynolds entre 10^2 e 10^5) para uma orientação perpendicular a $\alpha=90^\circ$. O intervalo de valores de α obtidos para CM_{yCG} apresenta algumas anormalidades que deverão ser tidas em consideração. Seria espectacular que este coeficiente apresentasse valores iguais para $\alpha=45^\circ$ e $\alpha=225^\circ$, teoricamente simétricos dos valores de CM_{yCG} de

$\alpha=135^\circ$ e $\alpha=315^\circ$, no entanto tal não se verifica. A discrepância destes resultados poderá dever-se influência do mecanismo de fixação nos resultados finais. Na determinação dos coeficientes aerodinâmicos das cascas de eucalipto, esta perturbação deverá ser ponderada.

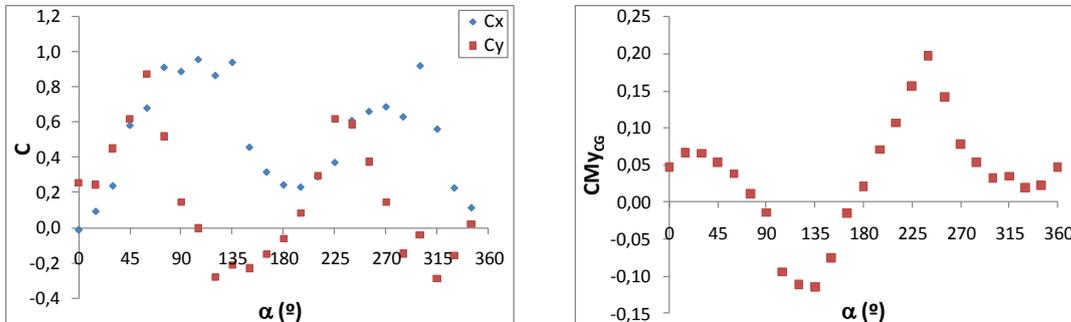


Figura 32 - Resultados obtidos no ensaio com o Tubo1

A colocação do *tubo 2* foi feita para que não se fizesse sentir o efeito do dispositivo de fixação (Figura 31b). Este mecanismo foi ligado ao tubo de PVC embutindo-o numa rolha que foi colocada sobre pressão no interior do tubo. Este tubo foi colocado no TO para que preenchesse todo o comprimento do túnel, minimizando a entrada de ar de escoamento no interior do tubo. A Figura 33 apresenta os resultados que se obtiveram nesta sequência de ensaios. A simetria radial do cilindro faria esperar um coeficiente de momento nulo. Embora o gráfico CMY_{CG} vs α da Figura 33 apresente valores diferentes de zero, considera-se que estes valores têm um valor absoluto tão baixo, que os resultados obtidos se podem considerar aceitáveis.

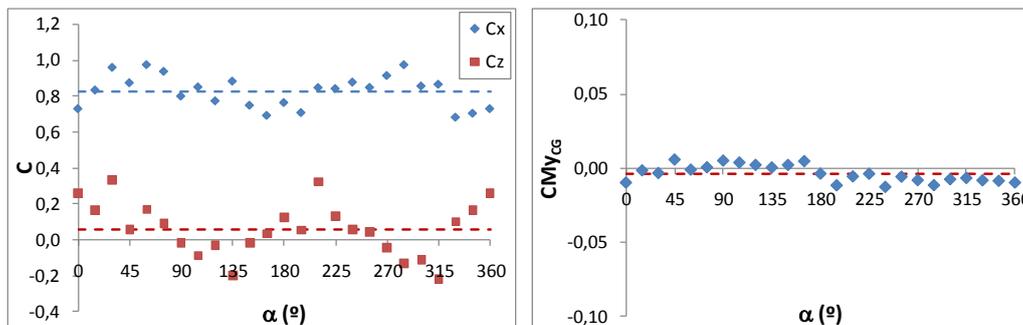


Figura 33 - Resultados obtidos no ensaio com o Tubo2

Qualquer dos gráficos obtidos apresenta um comportamento dos seus valores coincidente com os resultados espectáveis, exceptuando CMY_{CG} para o tubo 1. No terceiro ensaio verifica-se algumas oscilações das forças e do momento embora se esperasse uma linha perfeitamente horizontal em virtude de se tratar de uma forma regular. Tanto o coeficiente de sustentação (C_z) como o coeficiente de momento deveria ser sempre zero, independentemente do valor de α , uma vez que se trata de um cilindro regular. Considera-se no entanto que a variação dos resultados é aceitável para o rigor admitido.

3.2.3. Outros Equipamentos

Para além do *TCV*, os ensaios de combustão foram realizados com o auxílio de outros dois equipamentos: a “Plataforma de Combustão” e o “Dispositivo de Rotação”.

Na *PtC* fizeram-se os mesmos ensaios de combustão descritos para o *TCV*, na ausência de escoamento. Os cálculos inerentes aos ensaios efectuados na *PtC* são mais simples uma vez que os resultados da balança electrónica fornecem directamente o valor da perda de massa em virtude de não existir um dispositivo de alavanca ou de ventilação.

O DR foi utilizado para estudar a influência de rotação da partícula na sua perda de massa por combustão. Tal como para a Plataforma de Combustão, a balança electrónica fornece directamente os valores da perda de massa uma vez que não tem qualquer sistema de alavanca ou de ventilação.

3.2.3.1. Plataforma de Combustão

Foram realizados alguns ensaios de combustão na ausência de vento, em que os combustíveis usados foram escamas de pinhas. Devido à massa reduzida que estas partículas apresentam, foi usado um equipamento a que se deu o nome “Plataforma de Combustão”. Em virtude do fácil manuseamento da *PtC*, alguns ensaios com pinhas e cascas de eucalipto, sem necessidade de ventilação, foram igualmente realizados neste equipamento. A Figura 34 apresenta uma imagem deste dispositivo.

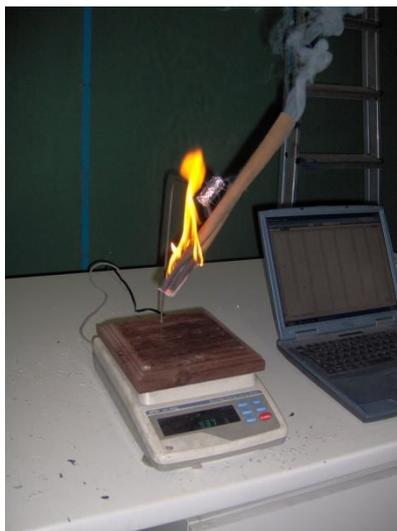


Figura 34 – Imagem da Plataforma de Combustão

A plataforma de combustão (*PtC*) consiste numa base de madeira com dimensões de $20 \times 20 \text{ cm}^2$, que é colocada sobre uma balança electrónica da

marca AND GX-2000, com precisão $0,01g$. Sobre a base de madeira fixou-se uma haste com um dispositivo que permite a fixação da partícula em estudo com a orientação desejada pelo operador. Os dados de massa do combustível medidos pela balança são registados digitalmente. O principal objectivo destes ensaios consistiu na determinação do coeficiente de decaimento de massa (k) ao longo da combustão, em que a metodologia e os cálculos se assemelham àqueles desenvolvidos anteriormente.

3.2.3.2. Dispositivo de Rotação

Ao longo do estudo das cascas de eucalipto enquanto combustível que potencialmente pode provocar o aparecimento de novos focos secundários de incêndio, verificou-se que durante o transporte aerodinâmico estas partículas apresentam uma rotação em torno do seu eixo longitudinal. Tentou perceber-se qual a influência desta rotação na combustão da partícula, nomeadamente no coeficiente de decaimento de massa. Nestes ensaios utilizou-se um dispositivo que se denominou “Dispositivo de Rotação”. A Figura 35 apresenta uma imagem deste equipamento.



Figura 35 – Imagem do Dispositivo de Rotação

O Dispositivo de Rotação (*DR*) consiste numa estrutura metálica que é colocada sobre uma balança digital (Marca *AND GX-2000*, com precisão de $0,01g$). À estrutura metálica poderá prender-se um berbequim com rotação variável, no qual se pode fixar a partícula em estudo. A velocidade de rotação da casca de eucalipto foi obtida através de um estroboscópio. Os dados de massa obtidos pela balança são registados electronicamente. A determinação dos coeficientes de decaimento de massa foi realizada da forma desenvolvida anteriormente.

4. Estudos de Combustão

Na previsão da trajectória de uma partícula incandescente deve ter-se em consideração a variação das suas características físicas associada à combustão. Nesta perspectiva foram realizados diversos ensaios com vista ao estudo do decaimento de massa (k) em função das diversas variáveis que podem determinar a velocidade de queima da partícula. Algumas determinações foram feitas para os três combustíveis. Alguns ensaios foram realizados apenas para as cascas de eucalipto devido à grande perigosidade na propagação de incêndios por focos secundários que apresentam e por questões técnicas que adiante serão desenvolvidas. A Figura 36 resume os diversos ensaios de combustão efectuados.

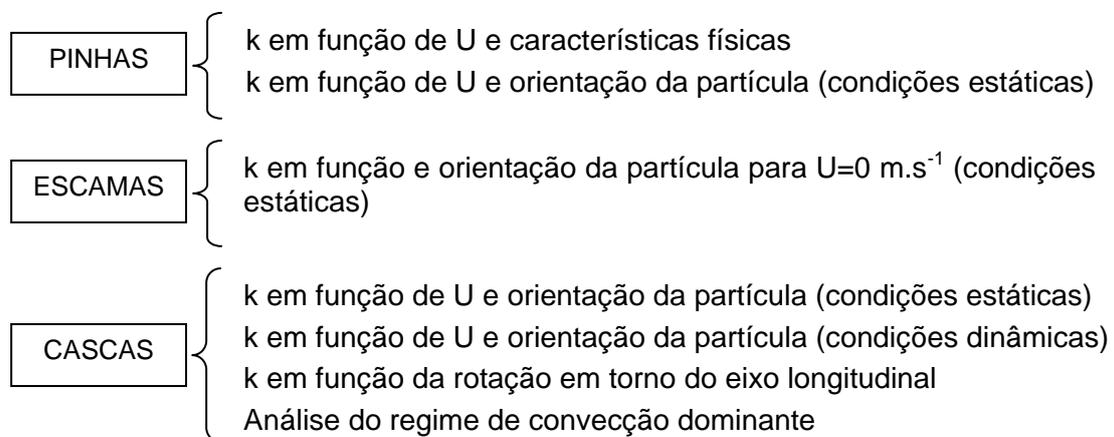


Figura 36– Resumo dos ensaios de combustão realizados

Os primeiros ensaios de combustão foram realizados com pinhas e tiveram como objectivo a determinação da influência das características físicas deste combustível na sua velocidade de combustão.

Posteriormente foram realizados outros estudos de combustão em que se pretendeu analisar a velocidade de combustão em função da velocidade de escoamento e da orientação da partícula relativamente à propagação da chama. Estes ensaios foram divididos em dois tipos: ensaios estáticos e ensaios dinâmicos. Nos primeiros, realizados para as pinhas, escamas e cascas, a velocidade de escoamento e a orientação da partícula mantiveram-se constantes ao longo da combustão. Nos ensaios dinâmicos, realizados apenas para as cascas de eucalipto, a ventilação e a orientação da partícula foram alterados ao longo do ensaio.

A influência da rotação das cascas de eucalipto, em torno do seu eixo longitudinal, na combustão da partícula foi também objecto de análise

laboratorial. Foram ainda realizados alguns ensaios que permitiram perceber o regime de convecção dominante nos ensaios anteriormente descritos.

4.1. Influência dos parâmetros físicos

Efectuaram-se trinta e quatro ensaios de combustão com pinhas com diferentes características físicas com o objectivo de relacionar a influência de cada parâmetro físico na velocidade de combustão de uma pinha. Ao longo dos ensaios variou-se também a velocidade de escoamento a que as pinhas foram sujeitas. Todos estes ensaios foram realizados no túnel de combustão vertical. As características das pinhas e as condições ambientais do ensaio encontram-se descritas no Anexo 5. O presente subcapítulo apresenta os estudos efectuados, relacionando os resultados obtidos com as propriedades físicas desenvolvidas no capítulo em que foi feita a caracterização dos combustíveis.

Os ensaios foram realizados para velocidades de escoamento vertical ascendente num intervalo entre 0 m.s^{-1} e $10,3 \text{ m.s}^{-1}$. Embora se tenha consciência de que a velocidade terminal das pinhas é superior à velocidade máxima testada, não foi tecnicamente possível realizar ensaios com $U > 10,3 \text{ m.s}^{-1}$. A partir deste valor de velocidade de escoamento, a trepidação provocada pelo vento na partícula dificultava a análise de dados com o rigor pretendido.

Grande parte dos ensaios (28) foi realizada para uma velocidade fixa de ventilação. Seis das pinhas testadas foram sujeitas a ventilações que foram sendo alteradas durante o ensaio (Anexo 5). Aos ensaios em que a variação do vento foi feita de forma crescente, chamou-se “ensaio ascendentes” (*U ascendente*). Aos ensaios em que a velocidade de escoamento foi diminuindo durante a combustão da pinha, deu-se o nome de ensaios descendentes (*U descendente*).

O registo contínuo da massa das partículas em análise ao longo da combustão resulta num gráfico semelhante ao apresentado na Figura 37 que apresenta um exemplo da variação da massa de uma pinha ao longo da sua combustão.

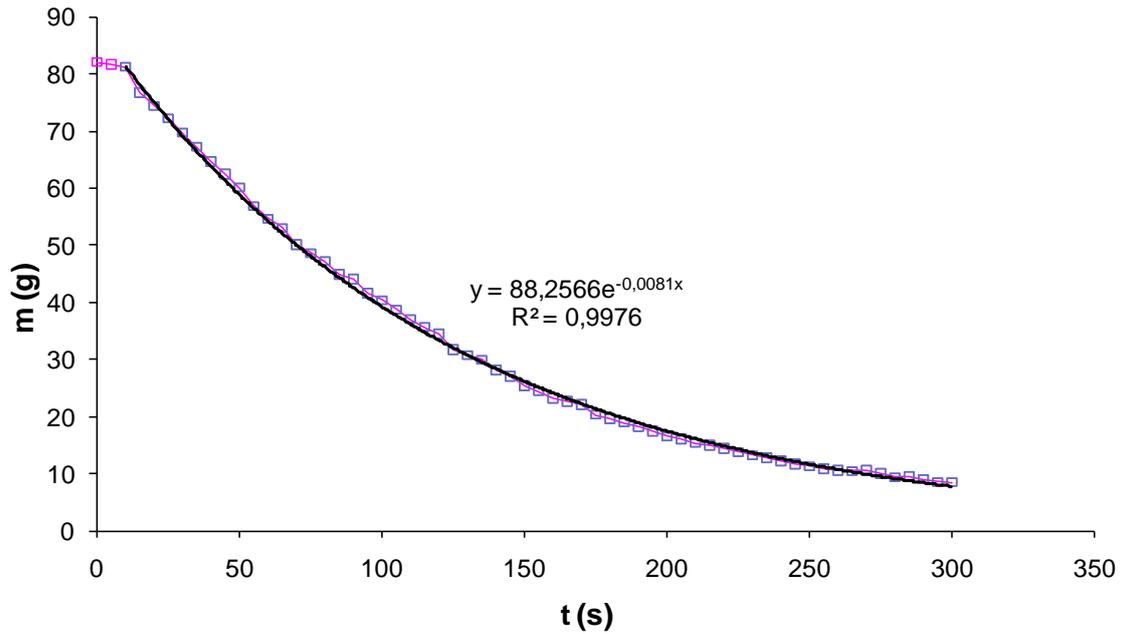


Figura 37 – Exemplo do decaimento de massa verificado num ensaios de combustão de uma pinha.

O decaimento da massa (m) em função do tempo de combustão (t) é representado pela Equação 34 em que m_i corresponde à massa da partícula no momento em que é iniciada a aquisição de dados ($t=0$ s) e k representa o coeficiente de decaimento de massa.

$$m = m_i \cdot e^{-kt} \quad [34]$$

As características físicas consideradas de maior interesse na análise do parâmetro k , foram a massa inicial da pinha em base seca (m_0), o grau de abertura (G_A), e a velocidade de escoamento (U). As características do escoamento, nomeadamente a temperatura, pressão e humidade, pouco variaram ao longo dos ensaios, tal como se pode constatar no Anexo 5.

As Figura 38 a Figura 40 relacionam as três variáveis de controlo com a variável dependente k . Embora se verifique alguma dispersão nos resultados, pode constatar-se uma proporcionalidade directa entre o coeficiente de decaimento de massa e as variáveis analisadas.

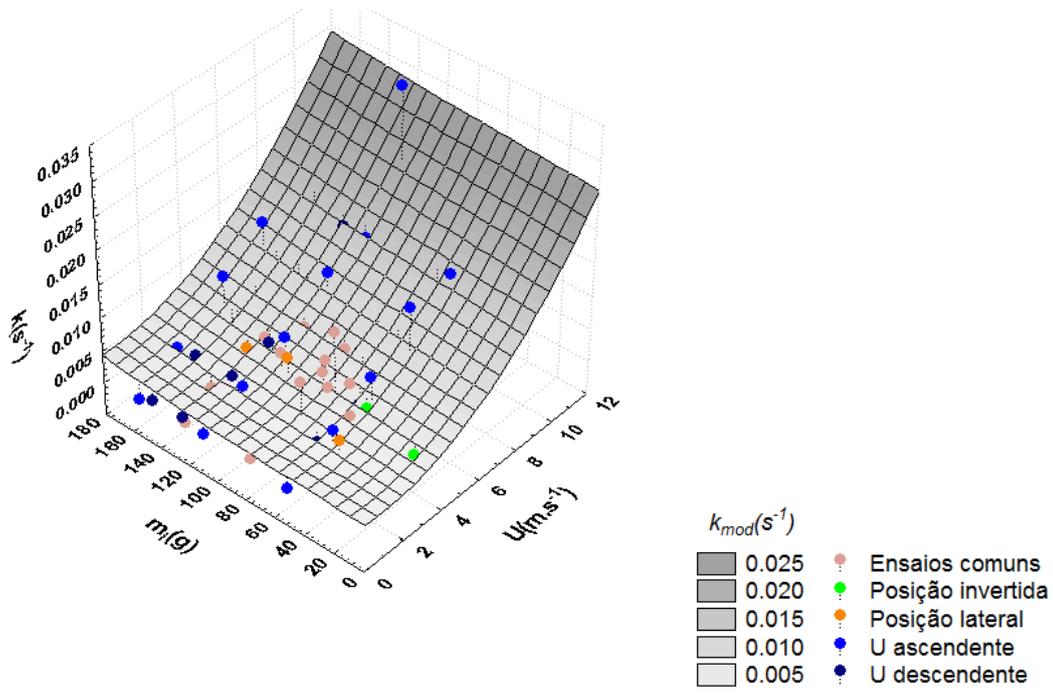


Figura 38 – Coeficiente de decaimento de massa em função da massa inicial das pinhas e da velocidade de escoamento. A superfície é representada pelo modelo da Equação 35 que será desenvolvido de seguida.

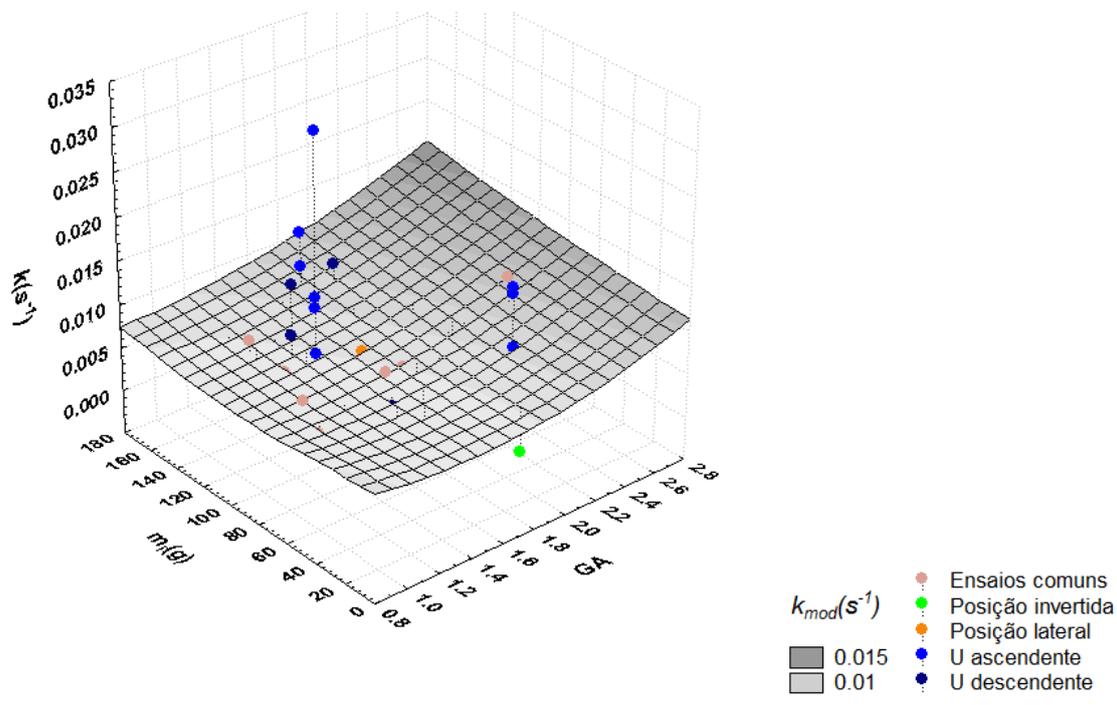


Figura 39 - Coeficiente de decaimento de massa em função da massa inicial das pinhas e do grau de abertura. A superfície é representada pelo modelo da Equação 35 que será desenvolvido de seguida.

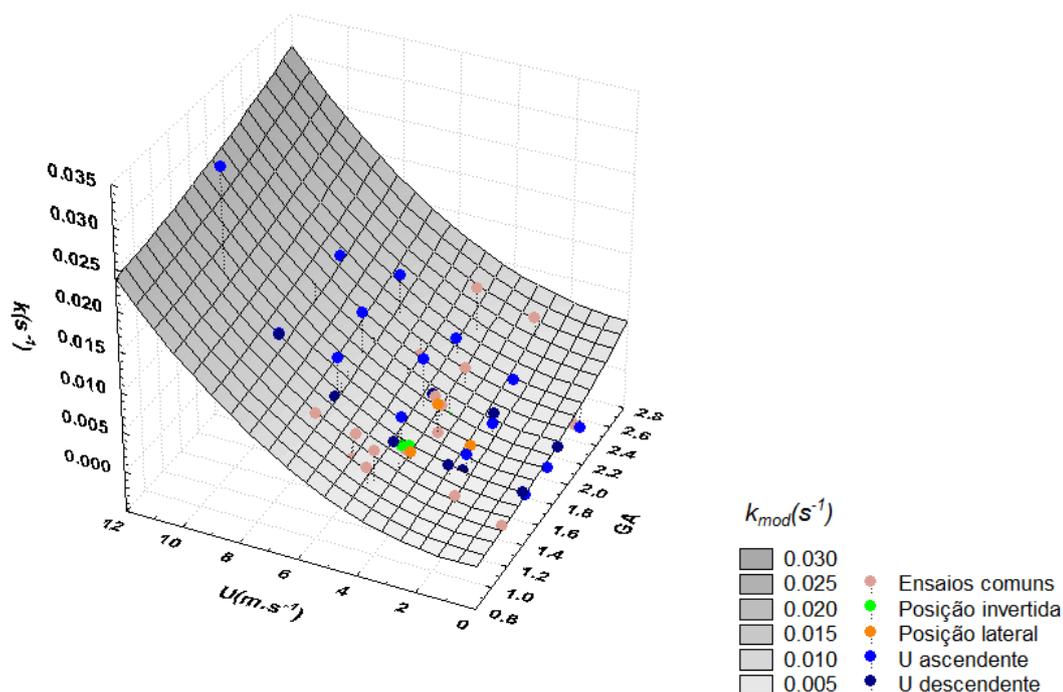


Figura 40 - Coeficiente de decaimento de massa em função do grau de abertura das pinhas e da velocidade de escoamento. A superfície é representada pelo modelo da Equação 35 que será desenvolvido de seguida.

Para melhor se compreender os resultados laboratoriais obtidos, e porque a sua representação gráfica não permite chegar a conclusões concretas acerca da influência de cada parâmetro, efectuou-se um estudo utilizando um programa estatístico de análise multi-variável, usando um intervalo de confiança de 95%. Este estudo permitiu analisar a preponderância das diversas variáveis anteriormente referidas no coeficiente de decaimento de massa. A Equação 35 traduz o resultado obtido no estudo, permitindo calcular os valores de “k” com base nos parâmetros com validade estatística na sua determinação: massa inicial em base seca (m_0), velocidade de escoamento (U) e grau de abertura (G_A).

$$k = 0,00001861 \times m_i + 0,0001699 \times U^2 + 0,00097504 \times G_A^2 - 0,00261 \quad [35]$$

Este modelo é representado nas Figura 38 a Figura 40, apresentados em cima. Embora o coeficiente de correlação obtido não seja totalmente satisfatório ($r^2=0,62$), considera-se que este modelo permite determinar o valor aproximado do coeficiente de decaimento de massa com base nas características das pinhas. O gráfico apresentado na Figura 41, referente à totalidade dos ensaios, permite verificar a baixa dispersão existente entre os valores de k obtidos laboratorialmente e aqueles calculados através das Equação 35. Nesta figura distingue-se os diferentes tipos de ensaios. Nos ensaios comuns a velocidade de escoamento manteve-se constante e a pinha foi fixa na posição vertical com o pecíolo voltado para cima. Denominou-se “Posição invertida” aos ensaios

com escoamento constante em que a pinha foi fixa com o pecíolo voltado para baixo, enquanto aos ensaios em que a pinha se apresentava na horizontal deu-se o nome de “Posição lateral”. Os ensaios em que a velocidade de escoamento foi alterada ao longo da combustão também foram discriminados no gráfico.

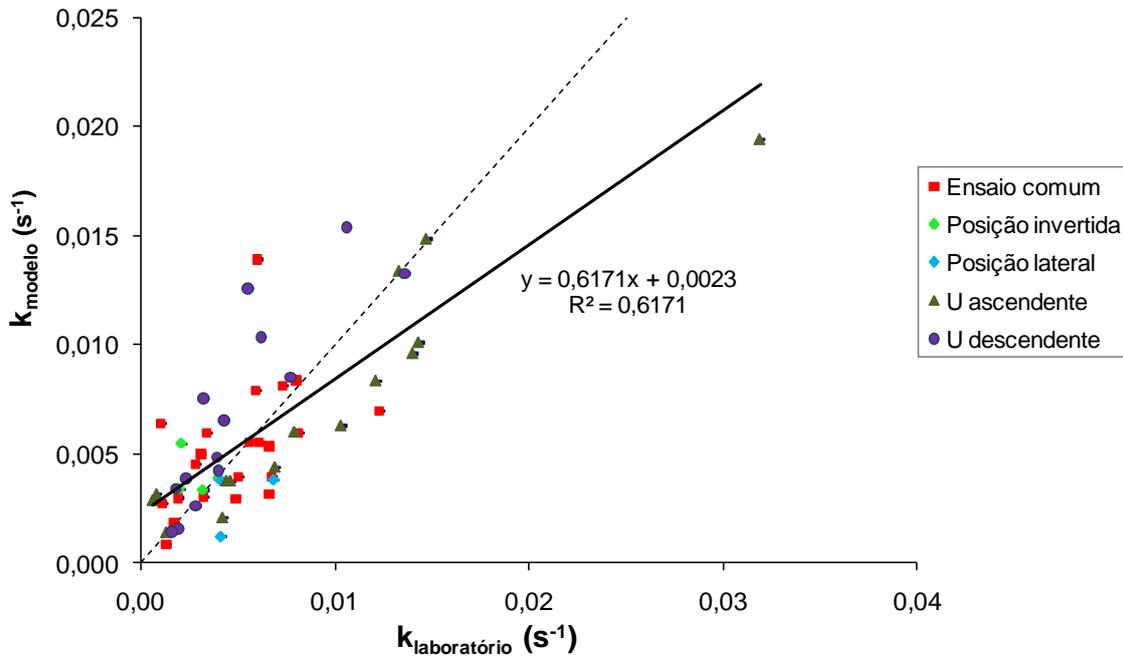


Figura 41 - Comparação dos valores do coeficiente de decaimento de massa obtidos em laboratório e obtidos por aplicação da Equação 35. A linha a tracejado corresponde à recta $y=x$.

Constata-se que o aumento da velocidade de escoamento, durante o ensaio, (asc.) conduziu a valores relativamente próximos dos ensaios em que a velocidade U foi mantida constante. Os ensaios em que a ventilação foi diminuída durante a combustão originaram valores de k superiores. Nestes ensaios conclui-se que há um efeito residual na passagem de velocidades de escoamento maiores (maiores valores de k) para velocidades de escoamento menores. Este facto poderá dever-se ao aquecimento prévio do combustível quando este é sujeito a uma velocidade de escoamento inferior à que tinha anteriormente.

Verifica-se uma boa aplicação do modelo para os ensaios em que a pinha foi fixa com o pecíolo voltado para baixo. Nos casos em que a pinha foi posicionada lateralmente, o decaimento de massa obtido laboratorialmente foi ligeiramente superior àquele obtido por aplicação do modelo. Este desvio do modelo poderá dever-se ao facto da frente de chama ser maior quando a pinha se encontra na horizontal, tendo como consequência uma perda de massa maior.

4.2. Influência da orientação da partícula e da velocidade do escoamento

Durante o seu transporte, uma partícula é sujeita a várias velocidades e direcções de escoamento, em virtude das condições variáveis da envolvente a que é sujeita. Segundo *Tarifa et al. (1967)*, a velocidade de uma partícula relativamente ao vento assume valores em torno da sua velocidade terminal. Observa-se, no entanto, que durante o seu transporte, uma partícula sofre constantes acelerações resultantes da grande complexidade das correntes convectivas que uma situação de incêndio provoca. Para além das variações de velocidade da partícula, estas acelerações associadas à forma irregular dos combustíveis, provocam um momento de força na partícula que a faz alterar a sua orientação relativamente ao escoamento. A realização destes ensaios teve como principal objectivo a compreensão deste fenómeno.

Foram realizados diversos ensaios com pinhas, escamas de pinhas e cascas de eucalipto em que se variaram as condições de escoamento e do posicionamento da ignição da partícula em cada ensaio. A estes ensaios, com um valor único de velocidade e orientação, deu-se o nome de “ensaios estáticos”.

Tentando aproximar os ensaios laboratoriais à realidade a que uma partícula é sujeita durante o seu transporte, tanto em termos de velocidade de escoamento como de orientação relativamente ao escoamento, realizaram-se ensaios em que estas duas variáveis de controlo foram alteradas durante a combustão. A estes ensaios deu-se o nome de “ensaios dinâmicos”, tendo sido realizados apenas para as cascas de eucalipto uma vez que este tipo de partículas assume uma maior importância na temática dos focos secundários.

A velocidade de combustão foi analisada através da variação da massa da partícula incandescente e do tempo de combustão. Foi feita uma distinção entre a fase em que a partícula ardia com chama e a fase em que a combustão era feita sem chama. Foram realizados ensaios com vento no *TCV* e ensaios sem vento na *PtC*. Da análise dos dados obtidos resultou um modelo empírico de previsão da velocidade de combustão e dos tempos de combustão de uma partícula, em função da velocidade relativa do vento e da orientação da partícula relativamente ao escoamento.

4.2.1. Metodologia da análise dos ensaios

A definição do ângulo θ , descrito pela direcção do eixo longitudinal da partícula e o eixo horizontal de referência, é apresentada na Figura 43. Este ângulo assume valores entre “-90°” e “+90°”, considerando-se positivo se a ignição é

feita como é representado na Figura 42, e negativo se a ignição é feita na extremidade oposta.

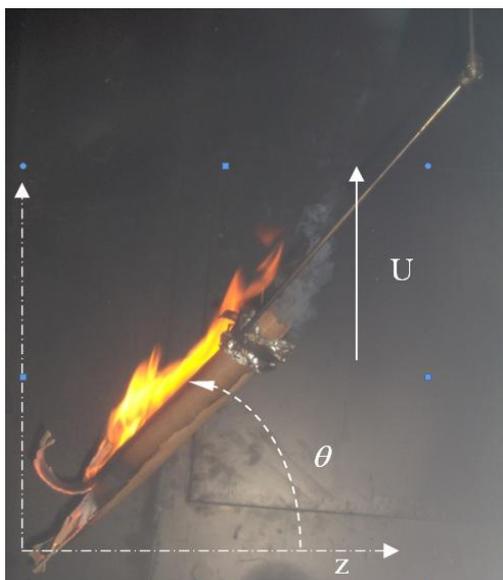


Figura 42 – Exemplo de ensaio de combustão com $\theta=45^\circ$

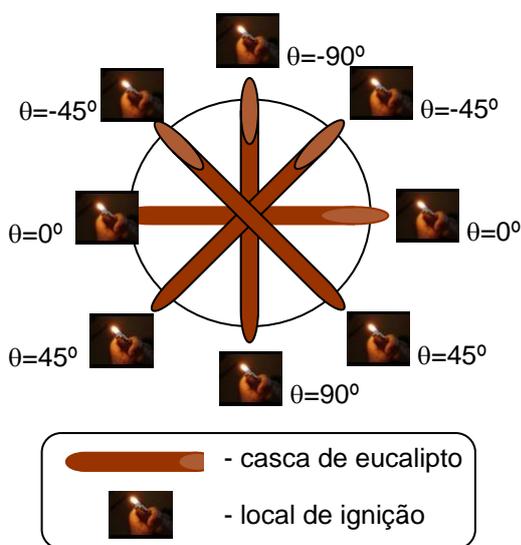


Figura 43 – Definição do ângulo θ

Qualquer dos ensaios realizados, iniciou-se em combustão com chama (FC) numa determinada duração temporal t_f . Após a extinção da chama, a combustão poderia finalizar-se (p.e. para $\theta=90^\circ$) ou poderia entrar numa fase de combustão sem chama (SC) até que toda a partícula fosse consumida ou até que a combustão se extinguísse completamente (CE). O tempo total de combustão da partícula (t_b) assume grande importância, uma vez que traduz a capacidade da partícula potencialmente provocar uma nova ignição no caso de t_b ser superior ao tempo de transporte pelo vento da partícula. Quando a combustão está generalizada a toda a partícula, verifica-se que frequentemente há uma coexistência das fases de combustão com e sem chama. Nestes casos considerou-se esta fase mista como sendo de combustão com chama, excepto quando a chama era muito instável ou praticamente inexistente.

Nos ensaios dinâmicos verificou-se frequentemente o reacendimento da chama, no entanto a análise foi feita tendo em consideração a totalidade da combustão (TC). O reacendimento notava-se sobretudo quando se impunha uma diminuição drástica da velocidade de escoamento. Nos ensaios estáticos não foi observado este comportamento de reacendimento.

Tal como foi referido anteriormente, a análise das curvas resultantes da combustão de uma partícula (Figura 37) determina uma curva que pode ser definida pela Equação 36 em que m representa a massa da partícula no instante t , m_i representa a massa da partícula no início da aquisição de dados e

k representa o coeficiente de decaimento de massa que determina a velocidade de combustão da partícula.

$$m = m_i \cdot e^{-kt} \quad [36]$$

A Figura 44 apresenta os diferentes regimes de combustão que podem ser observados na combustão de uma partícula. Pela análise da mesma figura pode compreender-se a denominação das variáveis de massa do combustível (m) e do tempo de combustão (t) que são apresentadas na dedução das equações que são apresentadas de seguida.

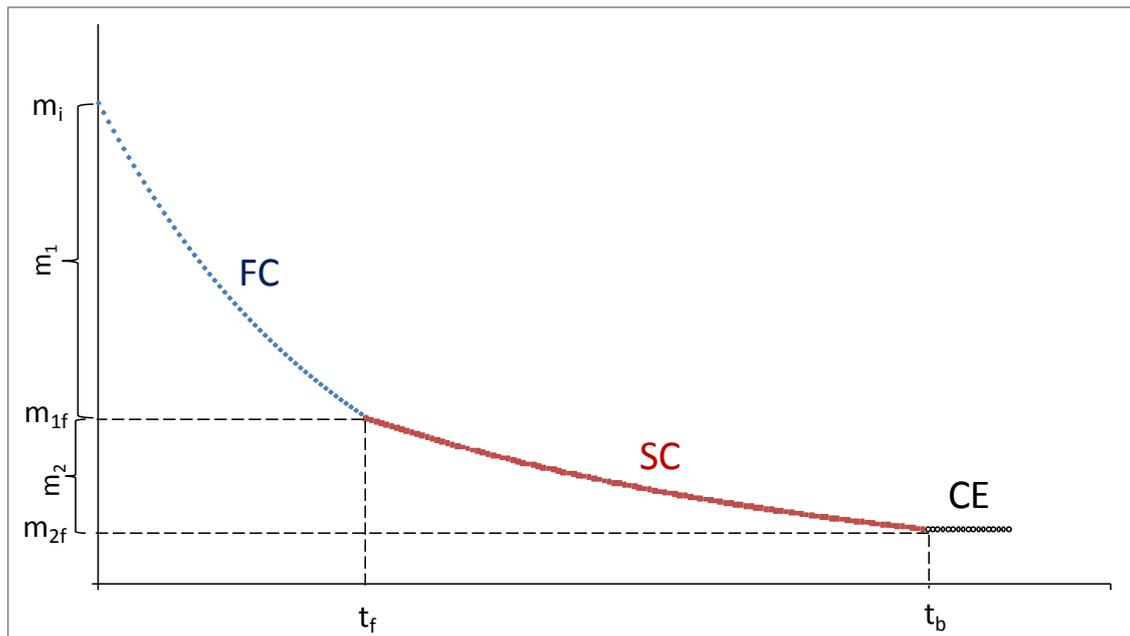


Figura 44 – Regimes de combustão de uma partícula

1. Fase de combustão com chama (FC):

Na fase *FC*, a massa da partícula diminui rapidamente para uma massa m_{1f} no final desta fase. Nalguns casos, esta fase termina com o consumo total da partícula e como tal $m_{1f}=0$ g.

Tal como para a globalidade da combustão, a curva da perda de massa descrita na fase *FC* pode ser representada pela seguinte lei exponencial de decaimento:

$$m = m_i \cdot e^{-k_1 t} \quad t \leq t_f \quad [37]$$

E então o coeficiente de decaimento da partícula nesta fase é dado por:

$$\dot{m}_1 = -m_i \cdot k_1 \cdot e^{-k_1 t} \quad [38]$$

Uma vez que o coeficiente de decaimento de massa não é constante, poderá estimar-se os seus valores inicial m'_{1i} e final m'_{1f} para $t=0$ s e $t=t_f$:

$$\dot{m}_{1i} = -m_i \cdot k_1 \quad [39]$$

$$\dot{m}_{1f} = -m_i \cdot k_1 \cdot e^{-k_1 t_1} \quad [40]$$

2. Fase de combustão sem chama (SC):

Também na fase SC o decaimento de massa pode ser determinado por um decaimento exponencial definido por:

$$m = m_1 \cdot e^{-k_2(t-t_f)} \quad t_f < t < t_b \quad [41]$$

$$\dot{m}_2 = -m_1 \cdot k_2 \cdot e^{-k_2(t-t_f)} \quad [42]$$

Normalmente o decaimento da massa nesta fase é tão lento e constante que pode igualmente ser aproximado a um decaimento linear, definido por:

$$m = m_1 - m'_2 \cdot (t - t_f) \quad t_f < t < t_b \quad [43]$$

E conseqüentemente:

$$\dot{m}_2 = -m'_2 \quad [44]$$

3. Extinção da combustão (CE):

Quando a combustão se extingue não há perda de massa, mantendo a partícula uma massa constante igual a m_{2f} . Nos testes em que $\theta > 0^\circ$, a massa residual é praticamente nula.

Nos casos em que não há combustão sem chama, a fase FC é seguida directamente da fase de extinção (CE) e sendo assim $t_f = t_b$.

Combustão total (TC):

Há casos em que se torna bastante difícil distinguir as diferentes fases de combustão em virtude de fenómenos de reacendimento ou porque uma chama residual permanece numa parte da pinha enquanto a fracção restante arde em SC. Nestas situações o decaimento total da massa da partícula poderá ser analisado como um processo global usando a seguinte equação:

$$m = m_o \cdot e^{-k_o t} \quad [45]$$

Análise do avanço da frente de combustão

Nos ensaios com as cascas de eucalipto, em que o comprimento é muito superior à sua largura, é possível analisar o avanço da frente de combustão desde a extremidade onde foi feita a ignição até à extremidade oposta. O avanço da frente de combustão poderá ser determinado com base na diminuição do comprimento da peça de combustível, ao longo do seu eixo longitudinal, de acordo com a seguinte equação.

$$R = \frac{d\ell}{dt} \quad [46]$$

Em que L corresponde ao comprimento da partícula. Considerando que a secção transversal da partícula é constante, tal como se assumiu para as cascas de eucalipto, poderá definir-se a densidade linear λ da partícula por:

$$\lambda = \frac{m_o}{\ell_o} \quad [47]$$

Relacionando as duas expressões anteriores obtêm-se:

$$R = \frac{d\ell}{dt} = \frac{1}{\lambda} \cdot \frac{dm}{dt} \quad [48]$$

Esta dedução assume particular interesse na previsão do tempo de combustão de partículas muito compridas que seriam dificilmente estudadas em laboratório. Considerando o exemplo de uma casca de eucalipto ardendo em combustão sem chama, a redução do seu comprimento poderá ser obtida através da equação:

$$R = -\frac{m'_{z}}{\lambda} \quad [49]$$

Sendo possível, através da Equação 50, determinar o tempo máximo de combustão ($t_{m\acute{a}x}$), comparando-o com o tempo decorrido desde a ignição da partícula até à sua chegada ao solo e avaliando a possibilidade de a partícula iniciar um novo foco de incêndio.

$$t_{max} = \frac{\ell_o}{R} \quad [50]$$

4.2.2. Ensaios estáticos

Os ensaios estáticos foram realizados para os combustíveis pinhas, escamas de pinhas e cascas de eucalipto de forma tubular com as características constantes no Anexo 6. Os parâmetros de controlo dos ensaios foram a velocidade do escoamento vertical ascendente (U) e o posicionamento do ponto de ignição (θ) de acordo com a Figura 43. As variáveis analisadas foram

a velocidade de combustão da partícula e os tempos de combustão, com e sem chama.

A velocidade de combustão das partículas foi controlada através do coeficiente de decaimento de massa para cada situação de ensaio. A perda de massa poderá dever-se não só à combustão propriamente dita, mas também ao desprendimento de pedaços de combustível como resultado da acção do escoamento. Apenas se consideraram como válidos, os ensaios em que a perda de massa, resultante da desagregação da peça de combustível, foi nula ou imperceptível. Os tempos de combustão foram medidos por observação da duração da chama durante a combustão (t_f) e da duração total da combustão (t_b).

Foram realizados ensaios com velocidades de escoamento desde 0 m.s^{-1} até $6,5 \text{ m.s}^{-1}$. A análise das escamas das pinhas foi feita apenas para $U=0 \text{ m.s}^{-1}$. A velocidade máxima atingida nos restantes ensaios ficou além do inicialmente pretendido porque uma ventilação maior fazia trepidar o combustível impossibilitando uma correcta aquisição do seu peso. Desta forma, apenas para o caso das cascas de eucalipto se atingiu uma velocidade de escoamento da mesma ordem de grandeza a que estes combustíveis estão sujeitos durante o seu transporte. O valor máximo de U atingido para as pinhas foi de $6,5 \text{ m.s}^{-1}$ sendo a sua velocidade terminal superior. A velocidade terminal das cascas de eucalipto é de cerca de 6 m.s^{-1} , enquanto a velocidade máxima de ensaio para este combustível foi de $5,5 \text{ m.s}^{-1}$. Considera-se no entanto que a tendência apresentada para as velocidades de ensaio poderá ser extrapolada para as velocidades terminais a que as partículas são transportadas pelo vento. Durante a tentativa de realizar ensaios com maiores velocidades de escoamento, constatou-se que para estes valores de U , a fase de combustão com chama é praticamente inexistente.

Embora os ensaios sem ventilação tivessem sido realizados como sendo uma situação extrema do conjunto de ensaios, verificou-se que os dados resultantes assumem uma tendência distinta dos dados obtidos nos ensaios com vento e como tal foram analisados separadamente.

Para além de permitir compreender o contributo de U e θ na velocidade de combustão das partículas analisadas, este estudo permitiu a criação de um modelo empírico com vista à determinação do coeficiente de decaimento de massa em função das variáveis U e θ .

4.2.2.1. Apresentação de resultados e discussão

Nas figuras constituintes deste subcapítulo apresentam-se os resultados dos ensaios laboratoriais efectuados. As figuras referentes aos ensaios com

escamas de pinhas, apresentam unicamente resultados para $U=0 \text{ m.s}^{-1}$, uma vez que não foram realizados com ventilação para este tipo de combustível. Nos gráficos que apresentam as variáveis t_f , t_b , m'_2 e k_0 em função de θ , é representada uma linha denominada "model" que congrega os valores calculados através do modelo para $U=0 \text{ m.s}^{-1}$ que será desenvolvido no subcapítulo seguinte. Nestas figuras, os pontos representam os dados obtidos nos ensaios enquanto as linhas correspondem à média desses valores.

Os gráficos das Figura 45 a Figura 47 apresentam o quociente entre a massa dos combustíveis no final do ensaio e a sua massa inicial, em função da orientação da partícula.

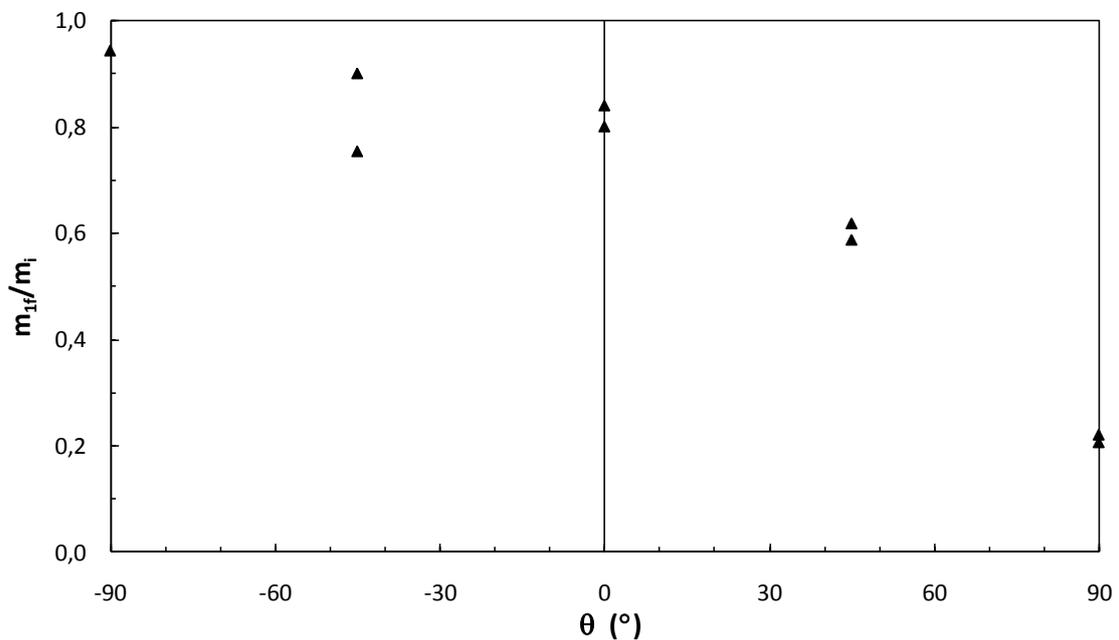


Figura 45 – Variação da massa residual da combustão de escamas em função do ângulo de ignição.

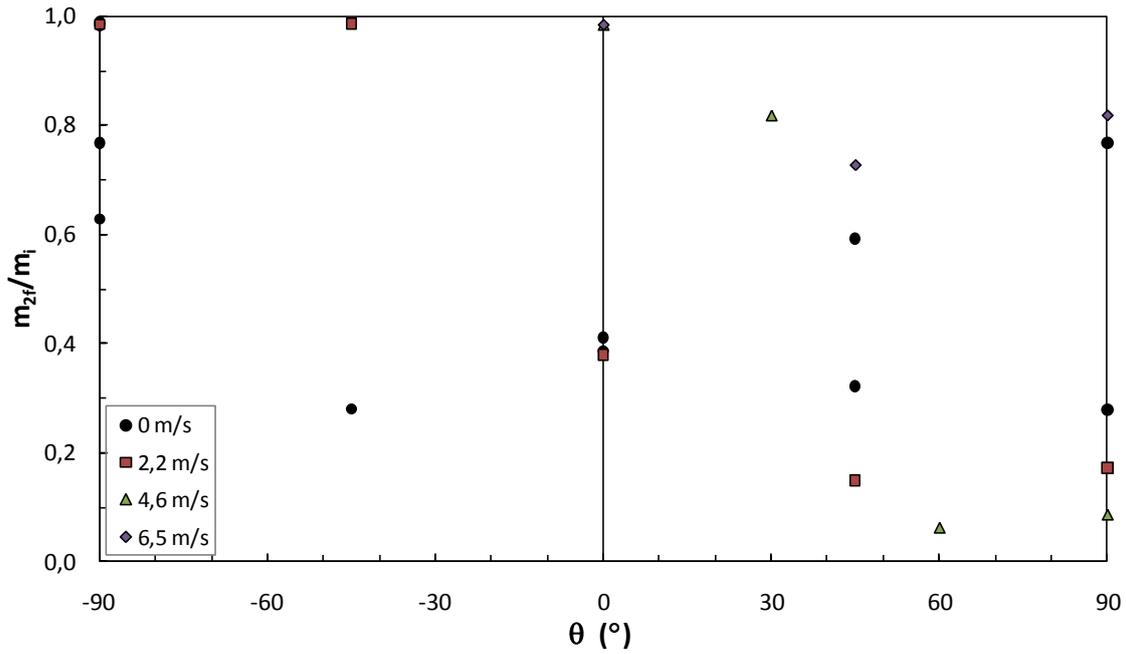


Figura 46 - Variação da massa residual da combustão de pinhas em função do ângulo de ignição.

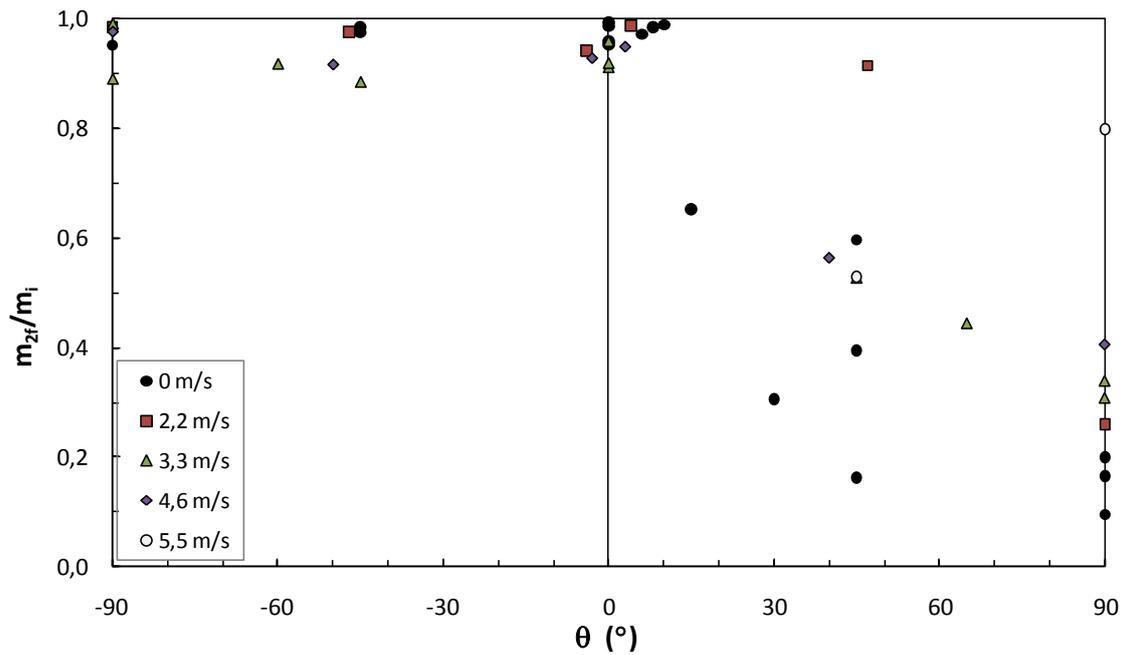


Figura 47 - Variação da massa residual da combustão de cascas de eucalipto em função do ângulo de ignição.

Naturalmente que os valores de m_f/m_i se aproximam de um quando a ignição é feita para $\theta \leq 0^\circ$, assumindo valores mais próximos de zero, quando a ignição é feita de modo favorável para o avanço da frente de combustão.

As Figura 48 a Figura 50 apresentam os resultados do tempo de combustão com chama em função do ângulo θ .

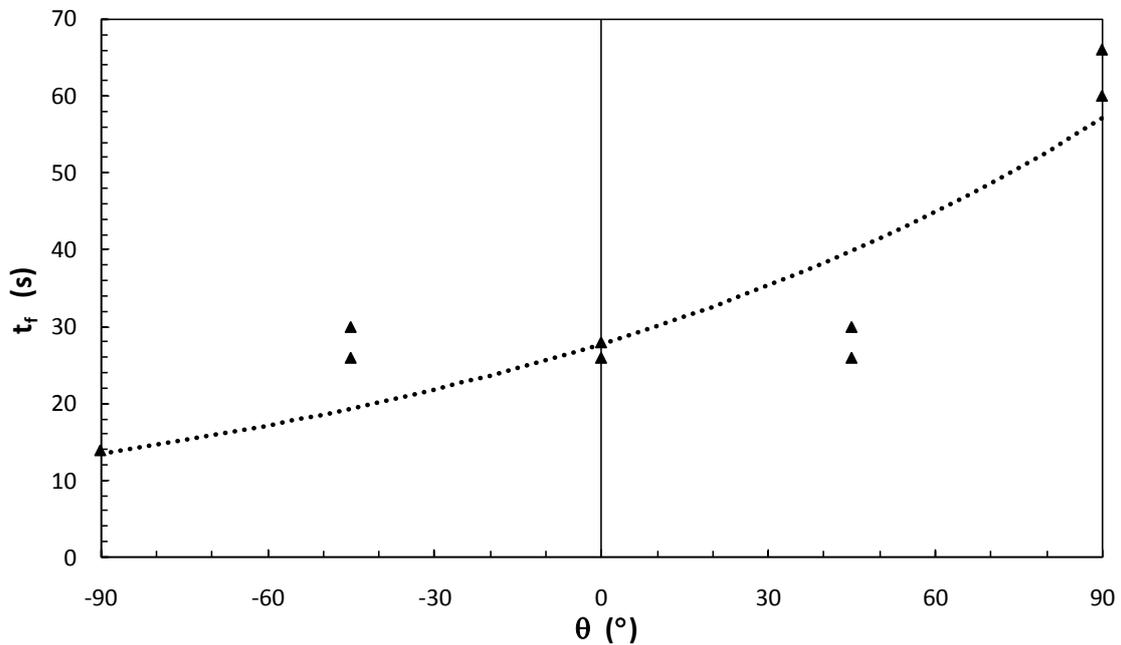


Figura 48 – Variação do tempo de combustão com chama em função do ângulo de ignição (escamas). A linha “Model”, a ponteadado, corresponde à aplicação do modelo definido pela Equação 52, que será desenvolvido de seguida.

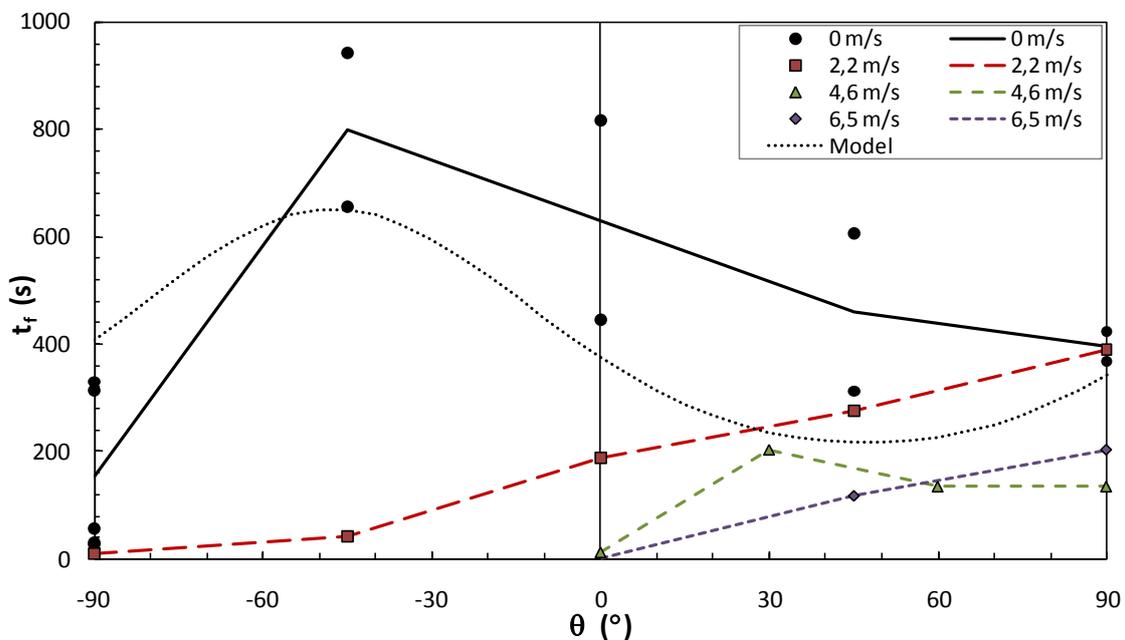


Figura 49- Variação do tempo de combustão com chama em função do ângulo de ignição (pinhas). A linha “Model”, a ponteadado, corresponde à aplicação do modelo definido pela Equação 52, que será desenvolvido de seguida.

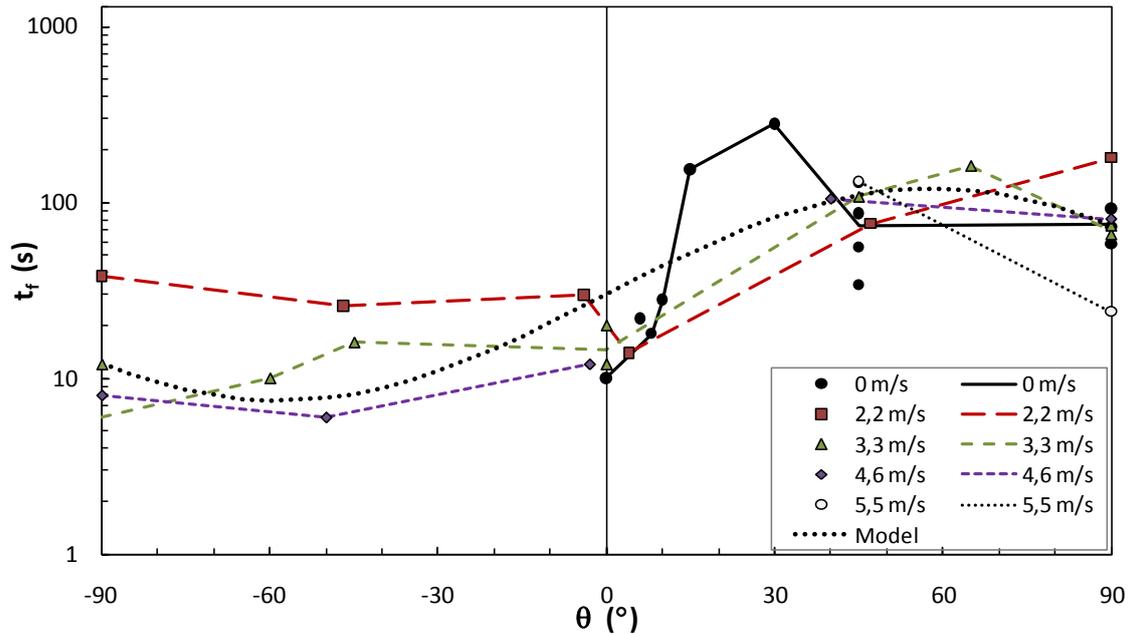


Figura 50 - Variação do tempo de combustão com chama em função do ângulo de ignição (cascas de eucalipto). A linha “Model”, a pontead, corresponde à aplicação do modelo definido pela Equação 52, que será desenvolvido de seguida.

O valor de t_f é mais baixo na combustão de escamas, aumentando na queima de cascas de eucalipto (Figura 50), apresentando o seu valor mais alto na combustão de pinhas (Figura 49). Nos ensaios com cascas de eucalipto, para $U=0 \text{ m.s}^{-1}$, não houve combustão sem chama. Nestes casos, assim que se cessava a fonte de ignição, apagava-se a chama na casca, passando a combustão a ser efectuada sem chama. Nos ensaios com pinhas, para $U=4,6 \text{ m.s}^{-1}$ assim que se ligava a ventilação a chama apagava-se. Enquanto nos ensaios com escamas e com cascas de eucalipto, o tempo de combustão aumentou com o aumento do valor de θ , nos ensaios com pinhas este comportamento apenas se verificou para os ensaios com ventilação. Nos ensaios com pinhas, em que $U=0 \text{ m.s}^{-1}$ e valores de θ de -45° e 0° , a chama conseguia manter-se estável durante bastante tempo e com uma visível progressão da frente de combustão ao longo do comprimento da pinha. Os baixos valores de t_f que se verificam para este combustível para $\theta > 0^\circ$, devem-se ao rápido consumo das escamas que compõem as pinhas e que são responsáveis pelo regime de combustão com chama. Quando a maior parte das escamas das pinhas é consumida, verifica-se que a chama se atenua ou apaga, passando a um regime de combustão sem chama. Nos ensaios com ventilação, verifica-se que este efeito assume maior preponderância na queima das pinhas do que na queima das cascas de eucalipto. No caso das pinhas constata-se que uma velocidade de escoamento superior, leva a um consumo mais rápido das suas escamas e consequentemente a um menor valor de t_f .

O tempo de combustão t_b pode ser decidido por dois factores: (1) a queima total da partícula e (2) a extinção da combustão. Para valores negativos de θ , o

tempo de combustão é normalmente determinado pela extinção da combustão. O valor de t_b é regulado pela queima total da partícula para ângulos positivos de θ . Nestes casos, o tempo de combustão de uma partícula é determinado pelo seu comprimento e pela velocidade de progressão da frente de combustão.

As Figura 51 e Figura 52 apresentam o tempo de combustão sem chama em função de θ . Uma vez que a combustão das escamas ocorreu exclusivamente no regime de combustão com chama, os valores de t_b para este combustível coincidem com os valores de t_f apresentados anteriormente. Mais uma vez se verifica que o tempo total de combustão é maior para as pinhas, seguido das cascas de eucalipto e das escamas.

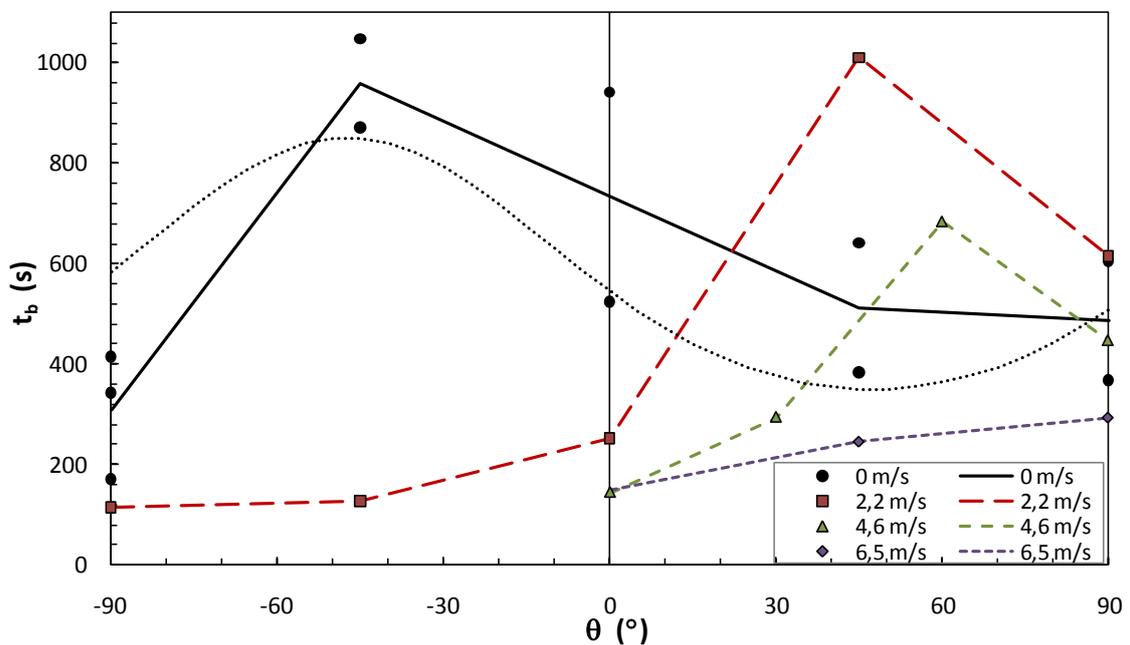


Figura 51 - Variação do tempo total de combustão em função do ângulo de ignição (pinhas). A linha a ponteados corresponde à aplicação do modelo definido pela Equação 52, que será desenvolvido de seguida.

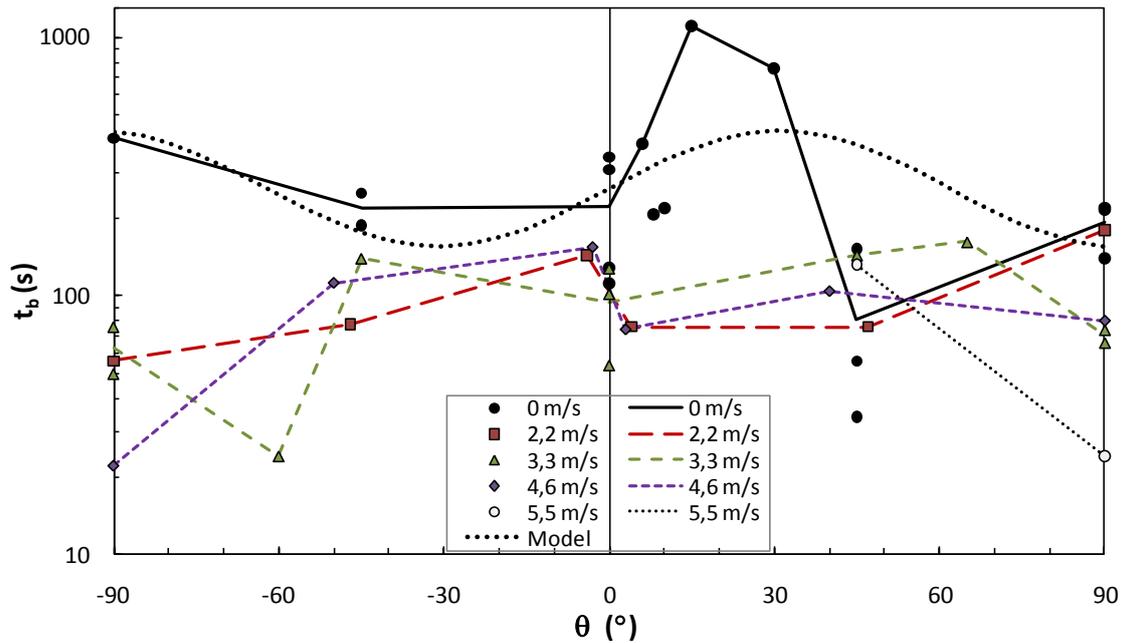


Figura 52 - Variação do tempo total de combustão em função do ângulo de ignição (cascas de eucalipto). A linha “Model”, a ponteadado, corresponde à aplicação do modelo definido pela Equação 52, que será desenvolvido de seguida.

Comparando estas figuras com os gráficos referentes a t_f (Figura 49 e Figura 50), constata-se que para as cascas de eucalipto os valores de t_b , para $\theta > 0^\circ$, são praticamente coincidentes com os valores de t_f , permitindo concluir que, para este combustível, o regime de combustão sem chama se assume relativamente pouco importante. Nos ensaios com pinhas, os valores de t_b são claramente superiores aos ensaios de t_f em virtude da combustão do coração da pinha ocorrer praticamente no regime de combustão sem chama. Nos ensaios em que $\theta < 0^\circ$, para ambos os combustíveis, o valor de t_b é claramente maior que o valor de t_f , em virtude de o tempo de combustão se regular pela extinção da combustão em vez do consumo total da partícula (como acontece para $\theta > 0^\circ$). Verifica-se ainda que, para as cascas de eucalipto, para $U = 0 \text{ m.s}^{-1}$, os maiores valores de t_b se manifestam para $0^\circ < \theta < 45^\circ$. Neste regime a casca arde quase na sua totalidade sem que haja um avanço da frente de combustão tão evidente como nos casos em que $\theta \geq 45^\circ$, levando ao maior tempo de combustão e a uma maior probabilidade de surgimento de um foco secundário a uma distância mais longa da sua origem.

As Figura 53 a Figura 55 apresentam o coeficiente de decaimento de massa, no regime FC, em função da orientação da partícula combustível.

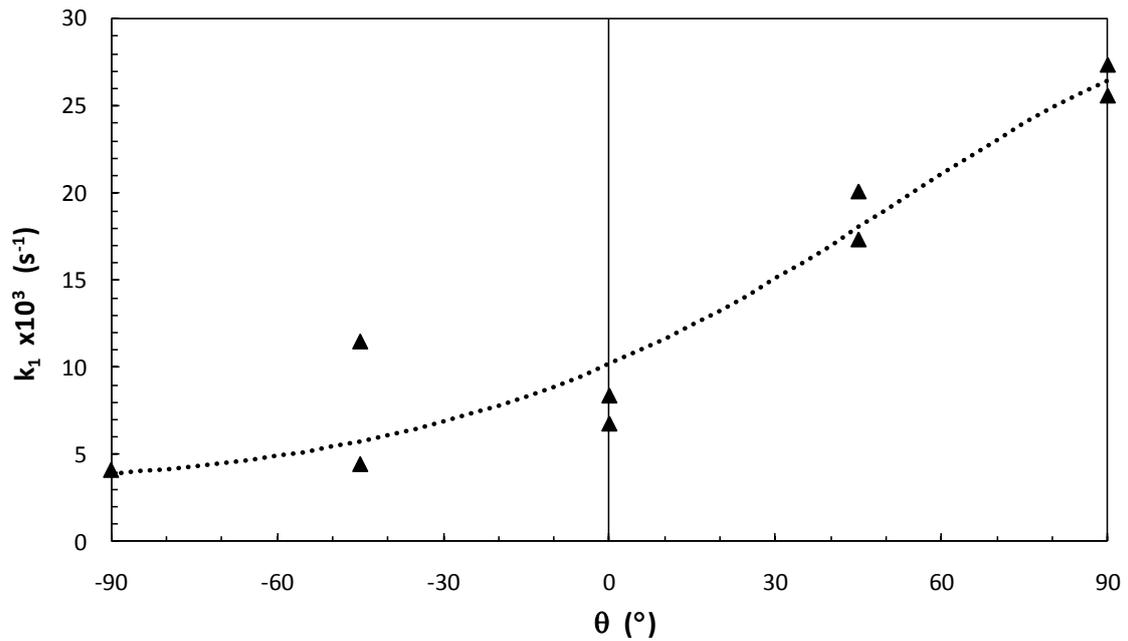


Figura 53 - Variação do coeficiente de decaimento de massa no regime de combustão com chama em função do ângulo de ignição (escamas). A linha "Model", a ponteadado, corresponde à aplicação do modelo definido pela Equação 52, que será desenvolvido de seguida.

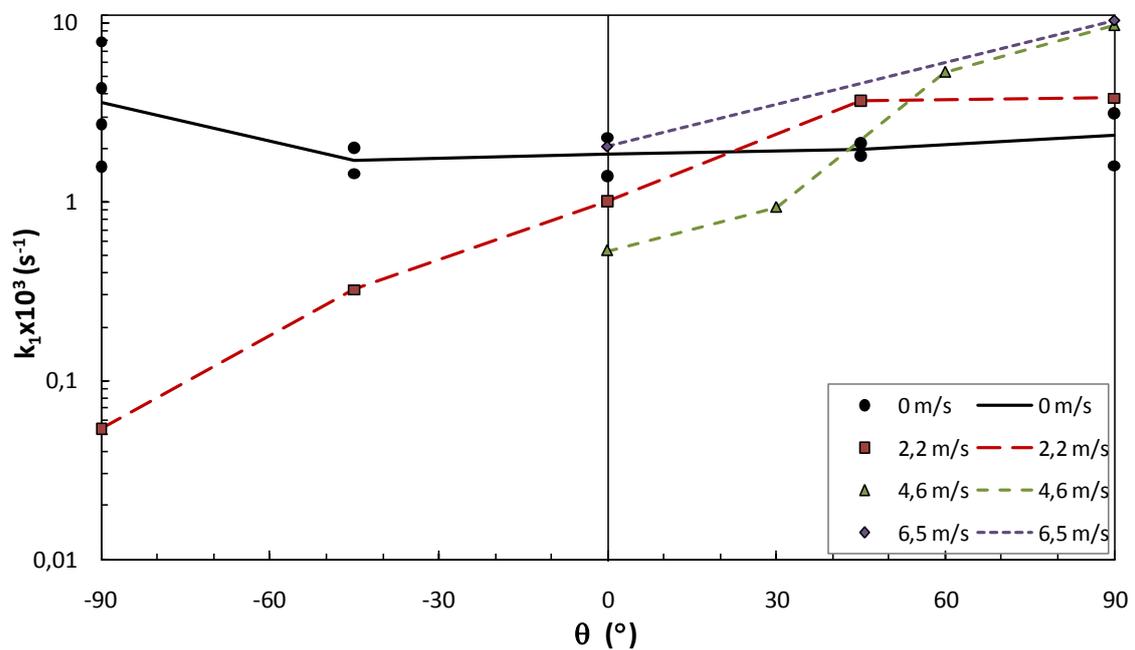


Figura 54 - Variação do coeficiente de decaimento de massa no regime de combustão com chama em função do ângulo de ignição (pinhas).

Nos ensaios sem ventilação com pinhas (Figura 54), verifica-se que o valor de k_1 pouco se modifica com a alteração de θ . Saliente-se no entanto o facto de que para ângulos negativos apenas cerca de 80% da massa da pinha é

consumida, enquanto para valores próximos de 90° a pinha é consumida quase na sua totalidade. Nos ensaios com escoamento forçado, o coeficiente de decaimento de massa em regime FC é muito baixo para $\theta < 0^\circ$. Isto acontece porque nesta gama o escoamento apaga a chama ou torna-a praticamente inexistente. À medida que o ângulo de ignição se torna mais próximo de 90° , o valor de k_1 cresce exponencialmente.

A combustão com chama nos ensaios com cascas de eucalipto originou valores crescentes de k_1 com o crescimento de θ . Verifica-se que para $\theta \geq 45^\circ$, em que a queima das partículas é feita quase exclusivamente em FC, o valor de k_1 é maior para $U=0 \text{ m.s}^{-1}$. Na mesma gama de θ , para ensaios com ventilação, o valor de k_1 cresce à medida que se aumenta a velocidade de escoamento. Este antagonismo de comportamentos leva a considerar que os dados dos ensaios com e sem ventilação carecem de uma análise diferenciada. Para valores negativos de θ e para velocidades maiores do que $2,2 \text{ m.s}^{-1}$, a chama não se manteve estável.

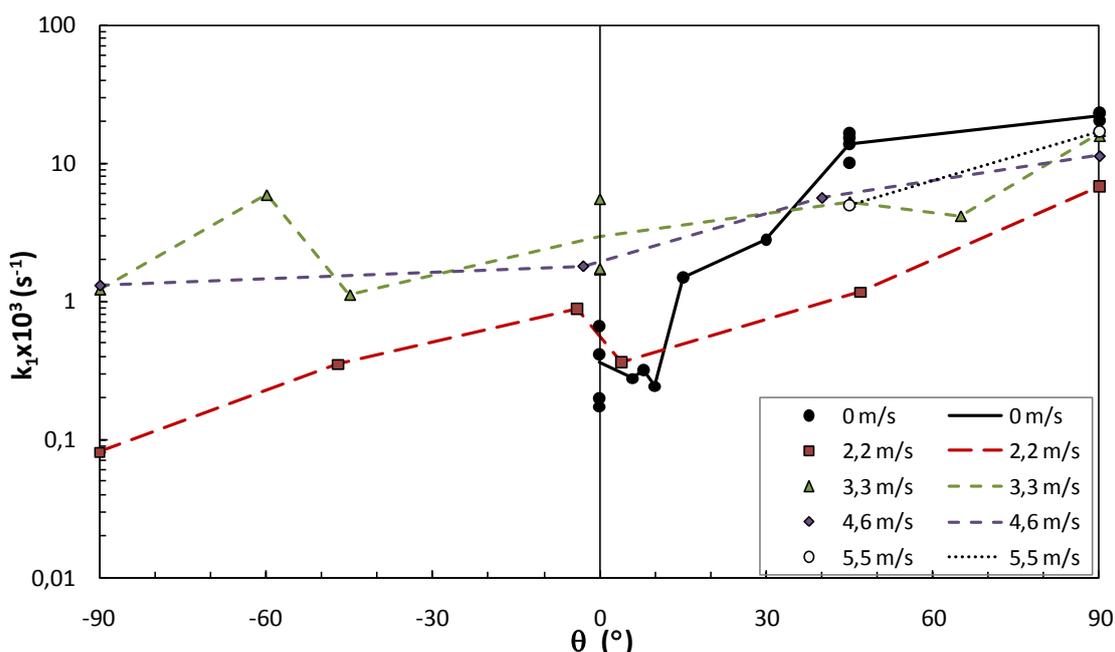


Figura 55 - Variação do coeficiente de decaimento de massa no regime de combustão com chama em função do ângulo de ignição (cascas de eucalipto).

Tal como na análise de t_i , as escamas das pinhas apresentam um crescimento dos valores de k_1 na passagem gradual de θ de -90° para $+90^\circ$. Consta-se igualmente a grande velocidade de combustão que este combustível apresenta quando comparado com os outros dois combustíveis.

Apresentam-se nas Figura 56 e Figura 57 os coeficientes de decaimento de massa no regime SC em função de θ . Como foi referido anteriormente, nos

ensaios com escamas a combustão ocorreu apenas na sua fase com chama. Por este motivo não são apresentados valores de k_2 para este combustível.

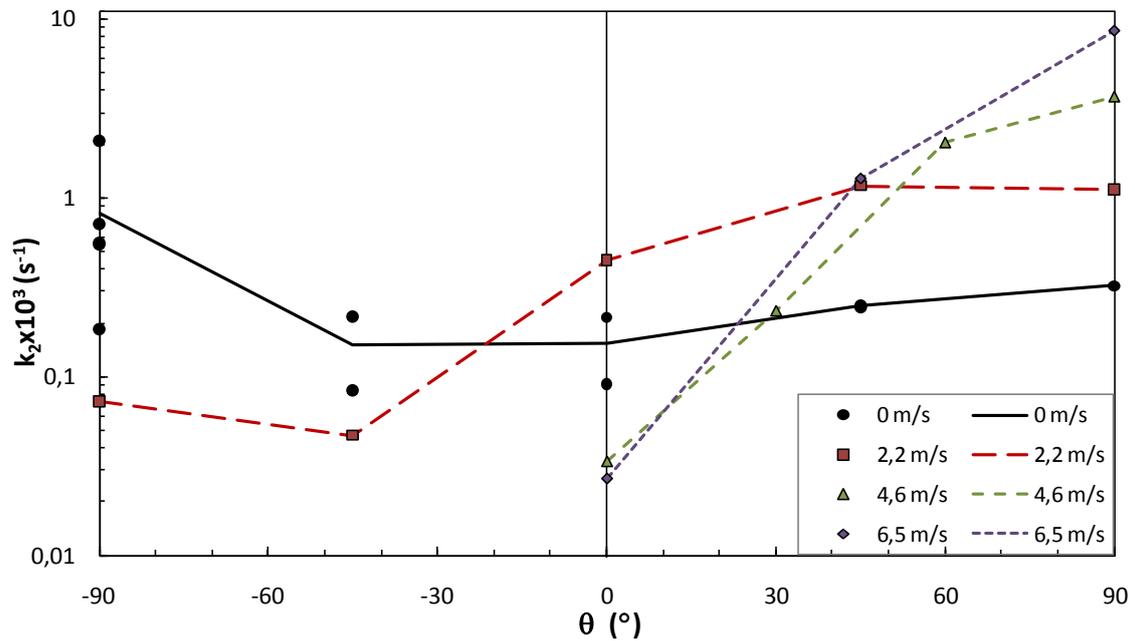


Figura 56 - Variação do coeficiente de decaimento de massa no regime de combustão sem chama em função do ângulo de ignição (pinhas).

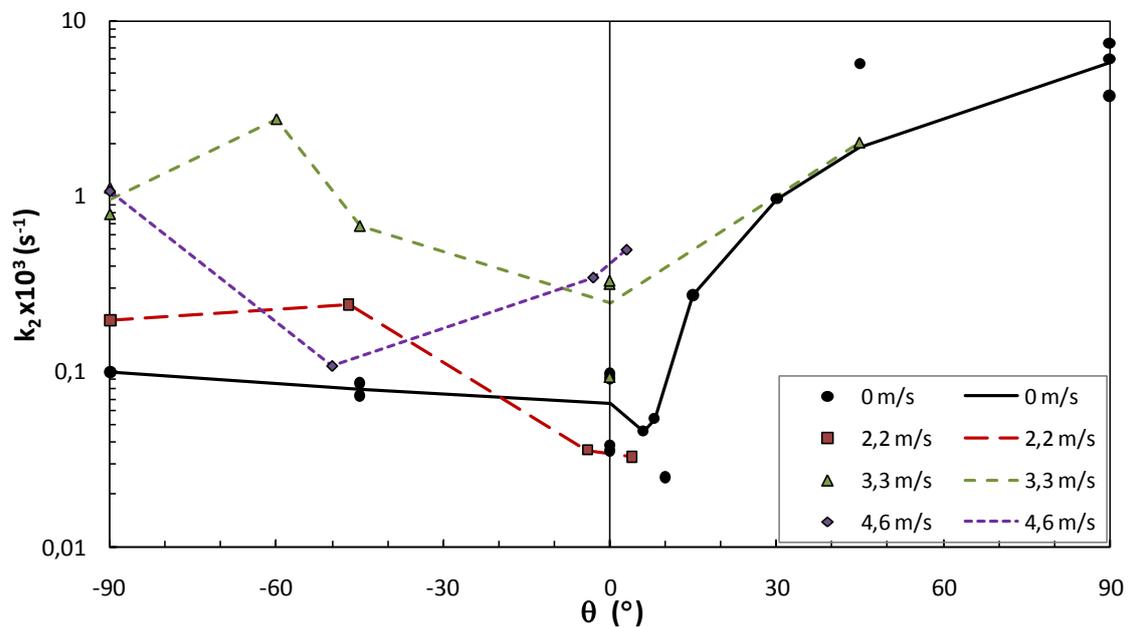


Figura 57 - Variação do coeficiente de decaimento de massa no regime de combustão sem chama em função do ângulo de ignição (cascas de eucalipto).

Uma vez que, para $\theta \leq 0^\circ$ e $U > 0 \text{ m.s}^{-1}$, a combustão das cascas de eucalipto foi quase exclusivamente efectuada no regime de combustão com chama, não

foram determinados valores de k_2 para estas gamas de θ e U . Para os mesmo intervalo de valores de ângulo de ignição e velocidade de escoamento, nos ensaios com pinhas, os valores de k_2 obtidos devem-se substancialmente à combustão do coração das pinhas. Neste caso, verifica-se que o aumento de U e de θ levam ao aumento do coeficiente de decaimento de massa em regime de combustão sem chama. Chama-se ainda a atenção de que para ângulos próximo de 90° , os ensaios com ventilação em iguais condições de U e θ , apresentam valores de k_2 próximos dos valores de k_1 , para ambos os combustíveis.

Devido à tendência linear dos dados de massa das cascas de eucalipto durante a combustão sem chama determinou-se o declive segundo a Equação 43, referente a estes casos. A Figura 58 apresenta os valores de m'_2 em função do ângulo θ . Os resultados foram bastante semelhantes àqueles obtidos na determinação de k_2 , tendo a sua análise uma interpretação idêntica.

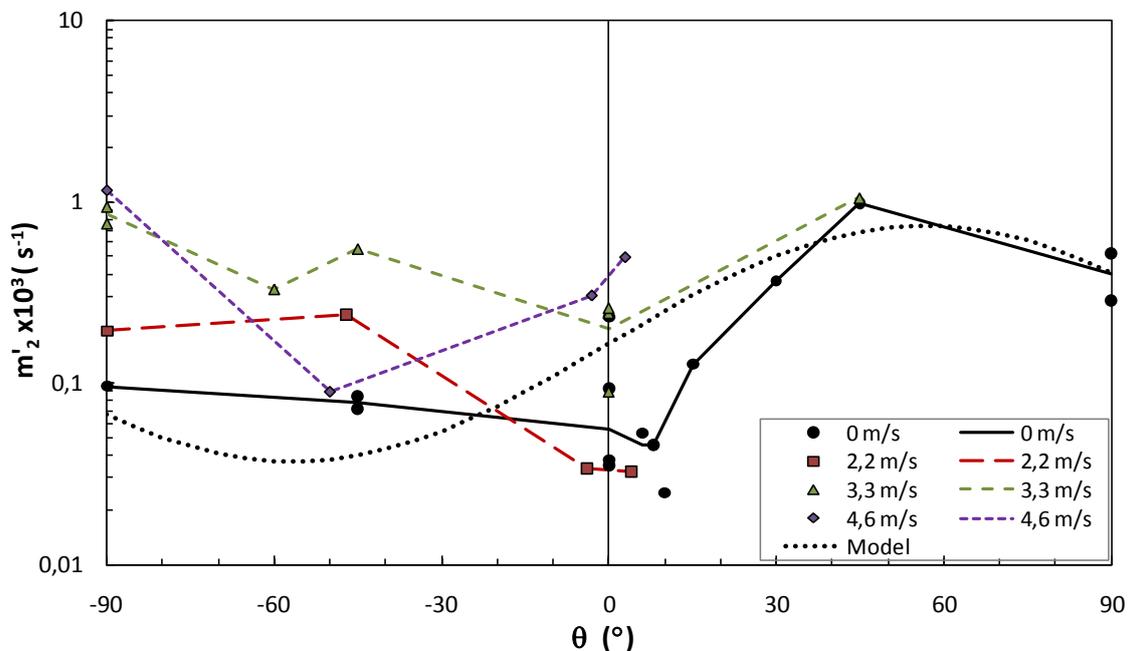


Figura 58 - Variação do coeficiente linear de decaimento de massa no regime de combustão sem chama em função do ângulo de ignição (cascas de eucalipto). A linha “Model”, a pontead, corresponde à aplicação do modelo definido pela Equação 52, que será desenvolvido de seguida.

Os coeficientes totais de decaimento de massa (k_0) em função de θ são apresentados nas Figura 59 e Figura 60 para as pinhas e para as cascas de eucalipto, respectivamente. Para as escamas, os valores de k_0 coincidem com os valores de k_1 , entretanto apresentados na Figura 53.

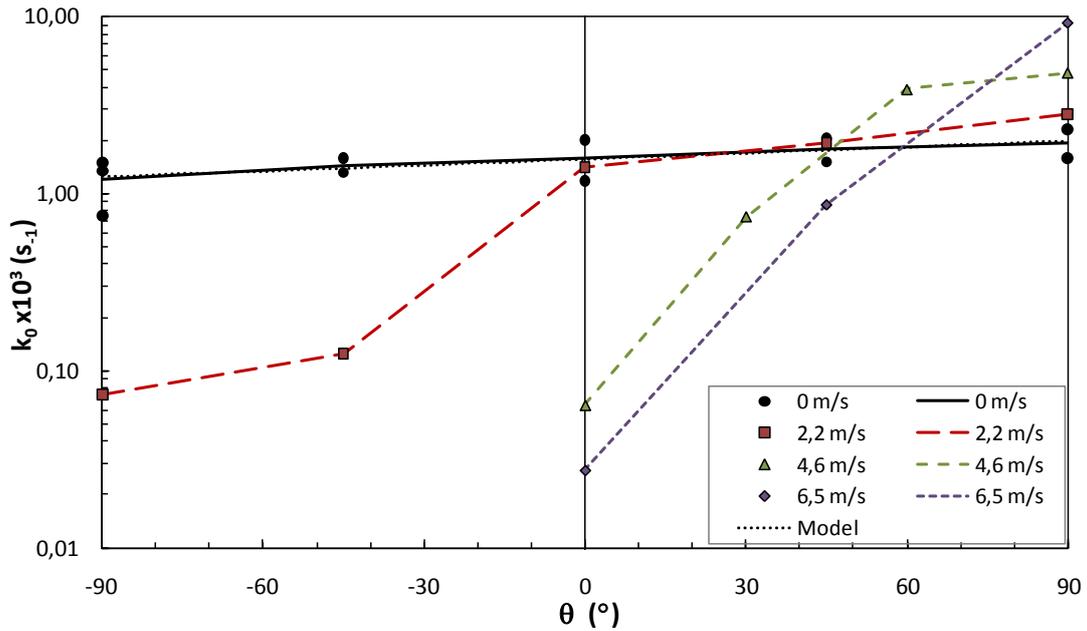


Figura 59 - Variação do coeficiente de decaimento de massa em todo o processo de combustão em função do ângulo de ignição (pinhas). A linha “Model”, a pontilhada, corresponde à aplicação do modelo definido pela Equação 52, que será desenvolvido de seguida.

Os ensaios com pinhas, sem ventilação, apresentam valores k_0 muito semelhantes aos valores de k_1 , uma vez que as pinhas ardem quase exclusivamente com chama quando $U=0 \text{ m.s}^{-1}$. Nos ensaios com ventilação, as curvas obtidas assemelham-se mais às curvas dos gráficos de k_2 , em virtude de a combustão sem chama assumir uma maior relevância quando sujeita à acção do escoamento.

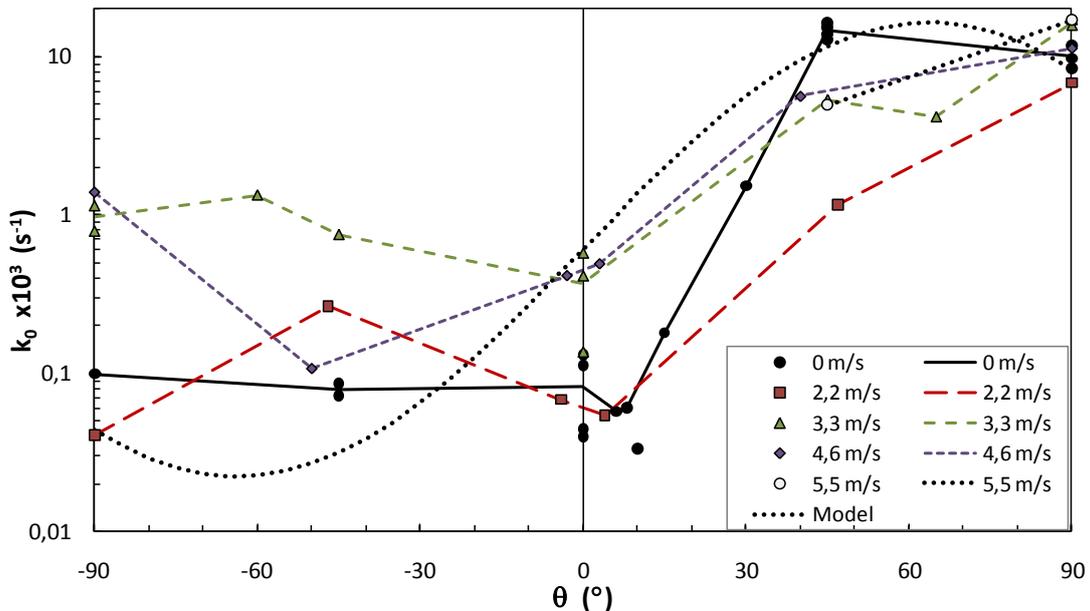


Figura 60 - Variação do coeficiente de decaimento de massa em todo o processo de combustão em função do ângulo de ignição (cascas de eucalipto). A linha “Model”, a pontilhada, corresponde à aplicação do modelo definido pela Equação 52, que será desenvolvido de seguida.

Nos ensaios com cascas de eucalipto, o efeito do ângulo θ faz-se sentir com maior preponderância no traçado de k_0 . Nos ensaios sem ventilação, não houve resultados de k_1 para valores negativos de θ , porque a chama não se mantinha para estes ângulos. Para $0 \leq \theta < 45^\circ$, os valores de k_0 assumem-se próximos dos valores de k_2 . Para $45^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$, k_0 é mais influenciado pelo coeficiente de decaimento de massa no regime *FC*. Nos ensaios com ventilação não houve geralmente combustão em SC quando para valores positivos de θ , pelo que k_0 é determinado pelos valores de k_1 . Para $-90^\circ \leq \theta \leq 0^\circ$ a combustão é essencialmente feita na ausência de chama pelo que os valores de k_0 se aproximam dos valores de k_2 .

Referiu-se anteriormente que o tempo de combustão t_b se poderia dever à extinção da combustão ou à queima total da partícula. Enquanto para valores negativos de θ se poderá considerar que uma partícula com comprimento superior ao comprimento das partículas ensaiadas apresenta o mesmo valor de t_b , o mesmo não se pode considerar para os casos em que θ assume um valor positivo. Se uma partícula arde totalmente, com avanço da frente de combustão ao longo do seu comprimento, o tempo de combustão é determinado pelo comprimento da partícula. Nestes casos o tempo da partícula deverá ser calculado de acordo com as Equações [46] a [50], deduzidas anteriormente. Tendo em consideração que durante o seu transporte pelo vento, as partículas ardem praticamente no regime de combustão sem chama, determinou-se o valor de R_2 em função de θ , representando-se na Figura 61.

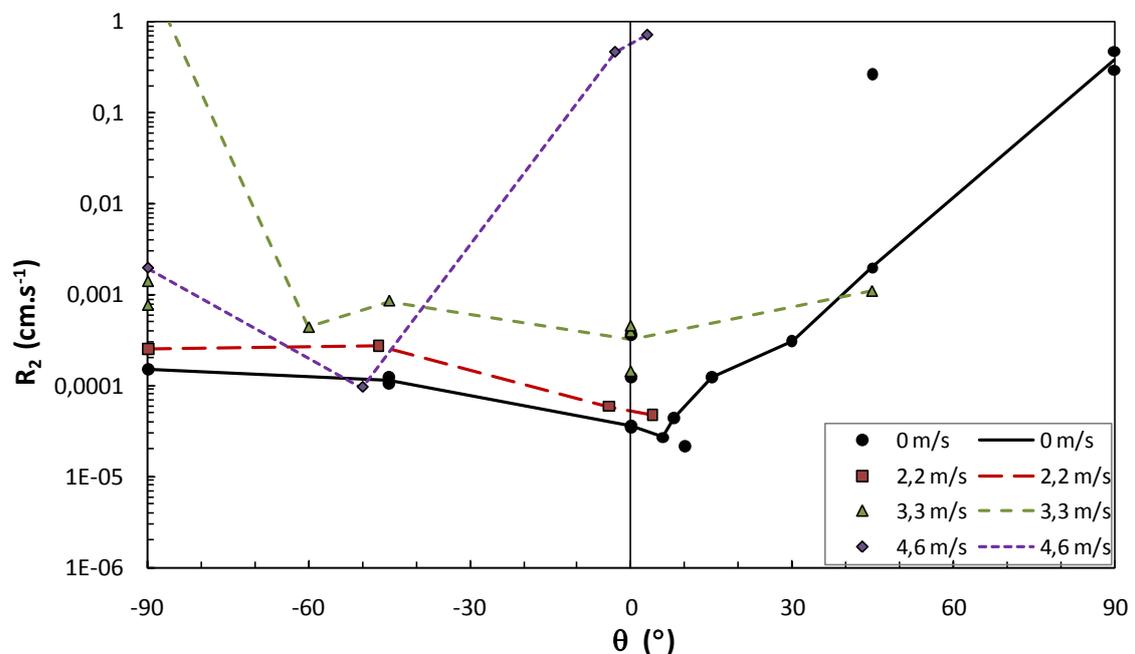


Figura 61 - Variação da velocidade de propagação da frente de combustão durante o regime de combustão sem chama em função do ângulo de ignição (cascas de eucalipto)

Os resultados obtidos evidenciam que a propagação da frente de combustão é muito maior para valores positivos de θ do que para valores negativos. Refere-se, uma vez mais, que este tipo de análise apenas tem uma importância efectiva para $\theta > 0^\circ$.

4.2.2.2. Modelo Empírico

Embora se considere que as velocidades de escoamento praticadas nos ensaios devessem apresentar valores mais altos, é proposto um modelo empírico, baseado nos resultados dos ensaios, que pretende avaliar o contributo dos parâmetros U e θ na determinação de k_0 , m'_2 , t_f e t_b . O modelo é representado pelo produto de duas funções distintas referidas a cada uma das variáveis. Uma vez que os dados de análise assumem valores obrigatoriamente positivos, com variações de magnitude, assumiu-se que a melhor adaptação do modelo seria feita por intermédio de uma equação exponencial. Designando por “ z ” o parâmetro característico da partícula em combustão, o modelo poderá ser formulado da forma seguinte:

$$z = f_1(\theta) \times f_2(U) \quad [51]$$

A determinação da função $f_1(\theta)$ que melhor se ajusta aos resultados obtidos foi determinada através do programa informático *Lab Fit* (Silva e Silva, 2009). De acordo com este programa, a equação que melhor desempenho estatístico apresenta é aquela definida pela Equação 52.

$$f_1 = \exp(a_{1_\theta} + a_2 \cdot \sin(a_3 \theta)) \quad [52]$$

Verificou-se a tendência de uma equação quadrática nos resultados do termo $f_2(U)$ pelo que se determinou a Equação 53.

$$f_2 = \exp(a_{1_U} + a_4 U + a_5 U^2) \quad [53]$$

Considerando que:

$$a_1 = a_{1_U} + a_{1_\theta} \quad [54]$$

A Equação 51 pode ser escrita da forma apresentada na Equação 55.

$$z = \exp(a_1 + a_2 \cdot \sin(a_3 \theta) + a_4 U + a_5 U^2) \quad [55]$$

A utilização de um polinómio de segunda ordem para explicar a dependência da velocidade de escoamento considerou aquilo que teoricamente seria expectável. Em alguns regimes de menor velocidade de escoamento, os parâmetros de combustão podem variar de forma linear em função de U . Noutros regimes, associados a escoamento turbulento, os parâmetros de

combustão apresentam uma dependência quadrática em relação a U . Devido à natureza cíclica e angular dos dados de θ , a função $f_1(\theta)$ foi definida com base numa função de seno.

A análise dos dados e a determinação dos coeficientes a_1 , a_2 , a_3 , a_4 e a_5 foi realizada através dos programas informáticos *Lab Fit* (Silva e Silva, 2009) e *STATISTICA*. O ajuste da curva foi feito por intermédio do algoritmo de *Levenberg-Marquardt*. Na avaliação da qualidade de ajuste do modelo aos dados laboratoriais foram usados o coeficiente de correlação (r^2), a média absoluta do erro (*MAE*), a raiz quadrada média do erro (*RMSE*) e o valor p de *Shapiro-Wilk* (*S-W*).

A Tabela 3 apresenta os coeficientes a_1 , a_2 , a_3 , obtidos para cada parâmetro de combustão, referentes às escamas (*PS*), pinhas (*PC*) e às cascas de eucalipto (*EB*), relativos aos ensaios sem ventilação. Da mesma tabela constam os valores estatísticos de avaliação da qualidade do ajuste do modelo definido na Equação 52.

Tabela 3 – Coeficientes da Equação 52 para determinação dos parâmetros de combustão para $U=0\text{m.s}^{-1}$.

Part.	Param.	r^2	MAE	RMSE	S-W	Coeficientes		
						a_1	a_2	a_3
PS	t_f	0,88	6,11	7,72	0,58	3,32	14,81	0,03
PS	$k_1 * 10^3$	0,96	1,88	2,49	0,42	2,32	1,04	0,74
PC	t_f	0,35	206,44	260,21	0,35	5,93	-0,55	1,90
PC	t_b	0,52	184,38	228,04	1,00	6,30	-0,45	1,90
PC	$k_0 * 10^3$	0,65	0,29	0,32	0,27	0,45	1,31	0,11
EB	t_f	0,52	38,02	60,31	0,00	3,40	1,39	1,55
EB	t_b	0,35	163,35	238,73	0,02	5,56	0,51	2,90
EB	$k_0 * 10^3$	0,97	1,48	2,06	0,26	-0,50	3,30	1,41
EB	$m'_2 * 10^3$	0,85	0,12	0,15	0,07	-1,80	1,50	1,59

Verifica-se uma boa adequação do modelo para os parâmetros de decaimento de massa. A adequação do modelo aos tempos de combustão t_f e t_b , para as pinhas e para as cascas de eucalipto, não foi satisfatória (exceptuando para as escamas). Decidiu-se no entanto manter o mesmo modelo, ao invés de criar um outro para estes casos, evitando-se criar excepções.

Nas Figura 48 a Figura 60, apresentadas anteriormente, que relacionam os parâmetros k_0 , m'_2 , t_f e t_b com θ , foi incluída uma linha denominada “*model*”. Esta linha representa os valores referentes aos ensaios sem ventilação, obtidos por aplicação do modelo. A comparação dos dados laboratoriais ($U=0 \text{ m.s}^{-1}$) com a linha “*model*” permitem chegar às mesmas conclusões que foram anteriormente mencionadas na análise aos parâmetros estatísticos.

A Tabela 4 apresenta os coeficientes a_1 , a_2 , a_3 , a_4 e a_5 , obtidos para cada parâmetro de combustão, referentes às pinhas (PC) e às cascas de eucalipto (EB), relativos aos ensaios em que $U>0 \text{ m.s}^{-1}$. Verifica-se uma boa aplicação do modelo definido na Equação 55, exceptuando para o tempo total de combustão das cascas de eucalipto. Uma vez que para valores de $\theta>0^\circ$, o tempo de combustão deste combustível é altamente dependente do seu comprimento, decidiu-se uma vez mais, não criar excepções ao modelo.

Tabela 4 – Coeficientes da Equação 55 para determinação dos parâmetros de combustão

Part	Param.	Ryy(x)	MAE	RMSE	S-W	Coeficientes				
						a_1	a_2	a_3	a_4	a_5
PC	t_f	0,92	35,21	44,16	0,10	6,53	1,09	1,08	-0,94	0,09
PC	t_b	0,97	57,38	66,13	0,04	5,81	-1,48	-1,51	-0,10	-0,02
PC	$k_0 \cdot 10^3$	0,98	0,39	0,64	0,01	-9,13	-10,53	-1,17	-0,02	0,03
EB	t_f	0,87	18,59	25,97	0,17	4,21	2,10	1,40	-0,67	0,07
EB	t_b	0,37	36,17	41,10	0,10	4,80	0,23	1,42	-0,07	-0,003
EB	$k_0 \cdot 10^3$	0,95	1,28	1,70	0,59	-1,74	13,32	0,13	0,73	-0,08
EB	$m'_2 \cdot 10^3$	0,91	0,11	0,16	0,03	-7,84	1,44	2,55	3,28	-0,39

As Figura 62 a Figura 65 permitem analisar a aplicação do modelo na determinação dos parâmetros de combustão e compará-lo com os resultados dos ensaios em que $U>0 \text{ m.s}^{-1}$.

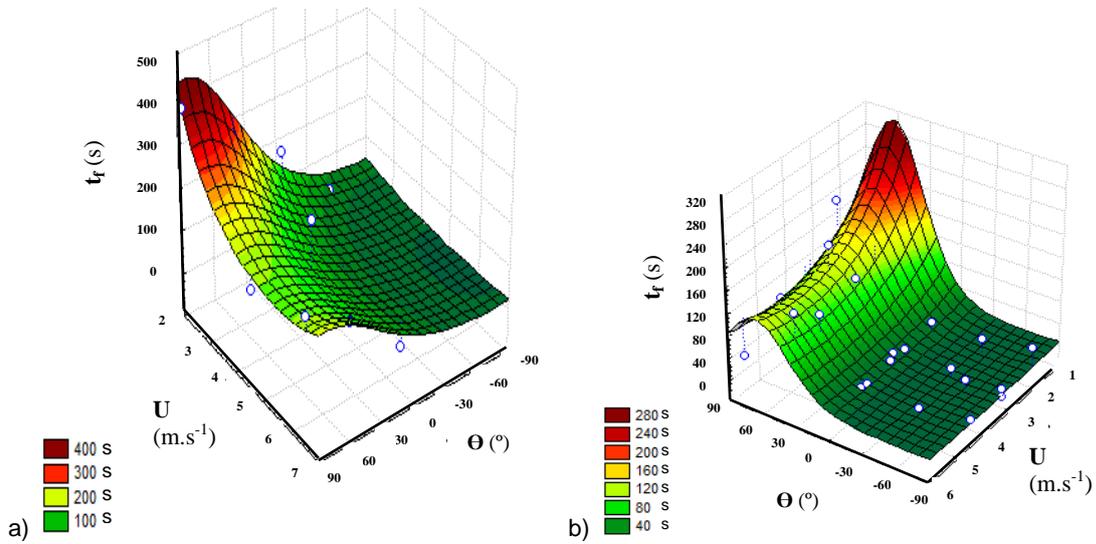


Figura 62 – Variação do tempo de combustão com chama em função de U e θ para as pinhas (a) e para as cascas de eucalipto (b). A superfície representa a aplicação do modelo definido na Equação 55.

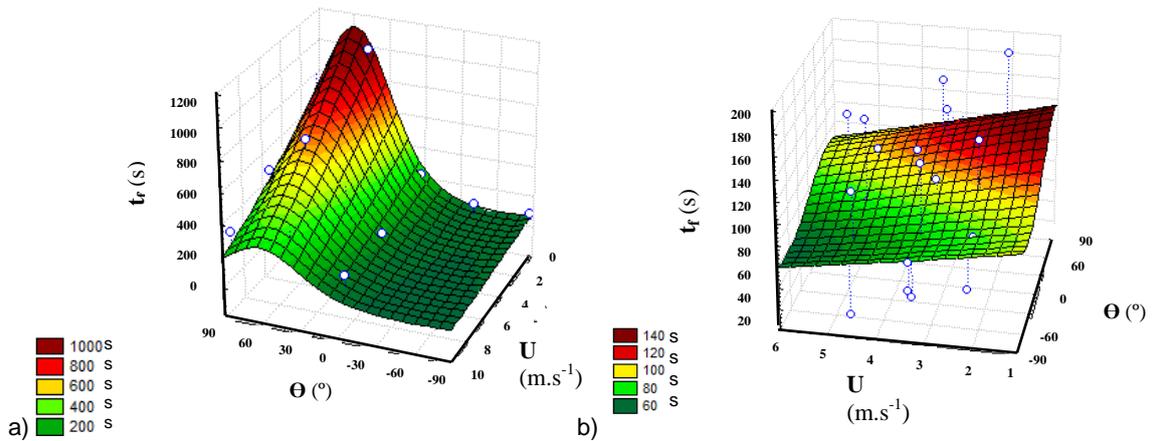


Figura 63 – Variação do tempo total de combustão em função de U e θ para as pinhas (a) e para as cascas de eucalipto (b). A superfície representa a aplicação do modelo definido na Equação 55.

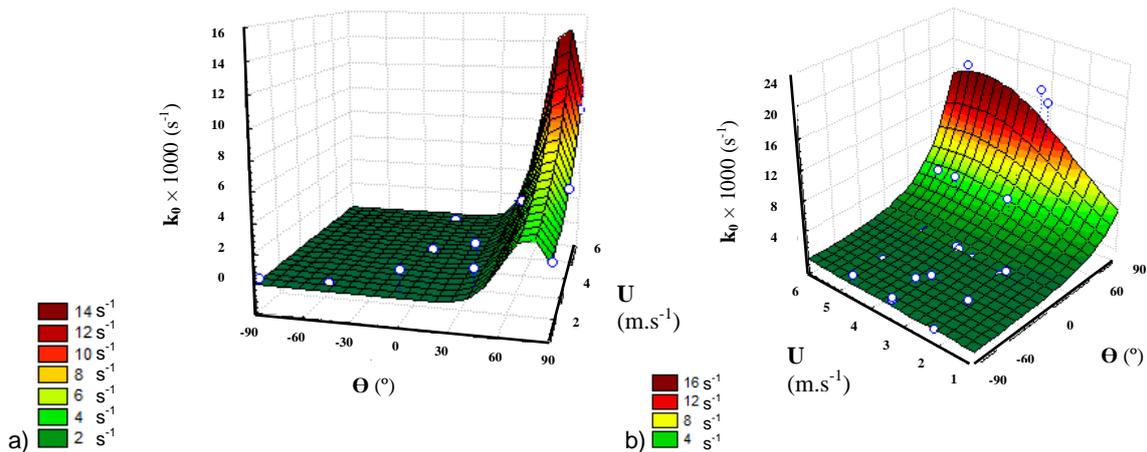


Figura 64 – Variação do coeficiente de decaimento de massa em função de U e θ para as pinhas (a) e para as cascas de eucalipto (b). A superfície representa a aplicação do modelo definido na Equação 55

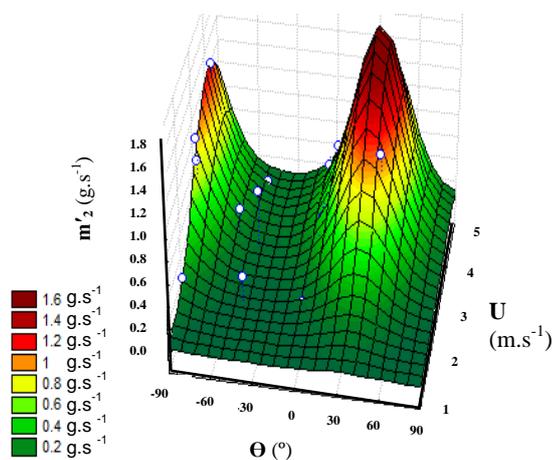


Figura 65 - Variação do coeficiente linear de decaimento de massa em função de U e θ para as cascas de eucalipto. A superfície representa a aplicação do modelo definido na Equação 55.

A análise das figuras permite obter as mesmas conclusões desenvolvidas para os parâmetros estatísticos da Tabela 4. Exceptuando a tendência de t_b para as cascas de eucalipto, todos os ajustes do modelo conduziram a resultados semelhantes àqueles obtidos em laboratório. Para valores positivos de θ , em que a partícula arde na sua totalidade, o tempo de combustão t_b deve ser determinado em função do comprimento da partícula e de k_0 , de acordo com a Equação 50 desenvolvida para a velocidade de propagação da frente de chama na partícula.

4.2.3. Ensaio dinâmicos

Os resultados descritos no subcapítulo anterior foram obtidos em ensaios em que a orientação da propagação da frente de combustão e a velocidade de escoamento se mantiveram constantes ao longo da combustão. No entanto, numa situação de transporte pelo vento, uma partícula experimenta vários valores de θ e de U , que se alteram continuamente em torno de uma orientação preferencial da partícula e de uma velocidade de escoamento próxima da velocidade terminal.

O principal objectivo na realização dos ensaios dinâmicos foi o de perceber até que ponto os resultados obtidos nos ensaios estáticos poderão representar uma situação real em que as condições ambientais são permanentemente alteradas. Por uma questão de simplificação, apenas se realizou este estudo com cascas de eucalipto com características físicas semelhantes às cascas que foram usadas nos ensaios estáticos. O equipamento usado e as instalações foram os mesmos daqueles usados para os ensaios estáticos. As condições dos ensaios realizados poderão encontrar-se no Anexo 7. Estes ensaios podem ser divididos em três sequências distintas. Na *Sequência 1* foi alterado o ângulo de inclinação da casca de eucalipto na ausência de ventilação. Nas *Sequência 2* e *Sequência 3* de ensaios manteve-se a inclinação constante a 45° , para garantir a combustão total da casca, fazendo-se variar a velocidade de ventilação ao longo de cada ensaio. Na segunda sequência a alteração da velocidade foi gradual e lenta. Na terceira sequência de ensaios a variação da velocidade de ventilação ocorreu de forma brusca podendo, por exemplo, passar-se rapidamente de velocidade nulas para valores relativamente elevados (*p.e.* 7 m.s^{-1}) e vice-versa.

A transição entre as condições de ensaio levou à interrupção da aquisição de dados que foi tão rápida quanto possível, embora se mantivesse a combustão das partículas. Verificou-se que a variação das condições de combustão faziam alterar o regime de combustão entre *FC* e *SC*. Nesta perspectiva o único parâmetro analisado foi o coeficiente de decaimento de massa k_0 , uma vez que os tempos de combustão foram adulterados pelas interrupções e porque a variação dos regimes de combustão dificultaram a análise de k_1 e k_2 .

Sequência 1 – variação de θ para $U=0 \text{ m.s}^{-1}$

Na *sequência 1*, os ensaios foram realizados apenas para uma situação de ventilação, pelo que se usou a Plataforma de Combustão. A razão desta escolha, deve-se unicamente à grande dificuldade de se fazer variar a orientação da partícula relativamente ao escoamento no Túnel de Combustão Vertical.

A Figura 66 apresenta a evolução de k_0 perante a alteração do ângulo de inclinação da casca de eucalipto.

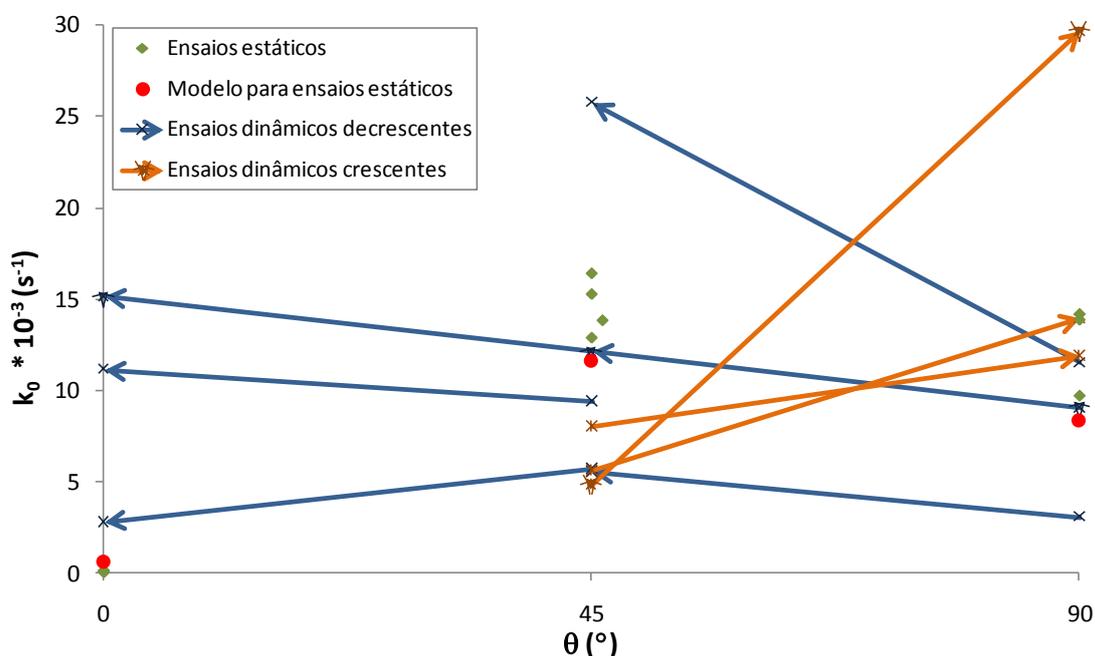


Figura 66 - Comparação dos resultados obtidos nos ensaios dinâmicos e nos ensaios estáticos com diminuição de θ . No modelo estático aplicou-se a equação 55.

Verifica-se que a passagem de $\theta=90^\circ$ para $\theta=45^\circ$ não conduz a uma diferença significativa dos valores que se obtêm nos ensaios estáticos. O mesmo gráfico sugere que a passagem da inclinação da casca de eucalipto de 45° para 0° leva a um aumento do valor de k_0 , em relação aos valores que se obtiveram para os ensaios com inclinação constante.

Nos ensaios estáticos, os valores de k_0 obtidos para 45° são ligeiramente superiores àqueles obtidos para 90° . O gráfico da Figura 66 evidencia que, num ensaio dinâmico, a passagem de 45° para 90° leva a um aumento do valor de k_0 para esta última inclinação, contrariando o que acontece nos ensaios em que não há variação de θ .

A alteração de valores na passagem de 45° para 0° e de 45° para 90° deve-se à existência de um efeito residual que se verifica quando se passa de uma inclinação em que o valor de k_0 é maior para outra posição de menor k_0 . Na passagem de 90° para 45° , este efeito residual não se fez sentir uma vez que o valor de k_0 para 90° é inferior ao valor para 45° .

Sequência 2 – variação gradual de U para $\theta=45^\circ$

Os ensaios realizados na 2ª sequência caracterizam-se por ter uma inclinação constante de 45° relativamente à direcção do escoamento e por ter uma variação lenta da ventilação ao longo da queima de cada casca de eucalipto. A Figura 67 apresenta dois exemplos típicos da variação de massa ao longo do ensaio, comparando essa variação com os resultados obtidos por aplicação do modelo de variação de massa para condições estáticas.

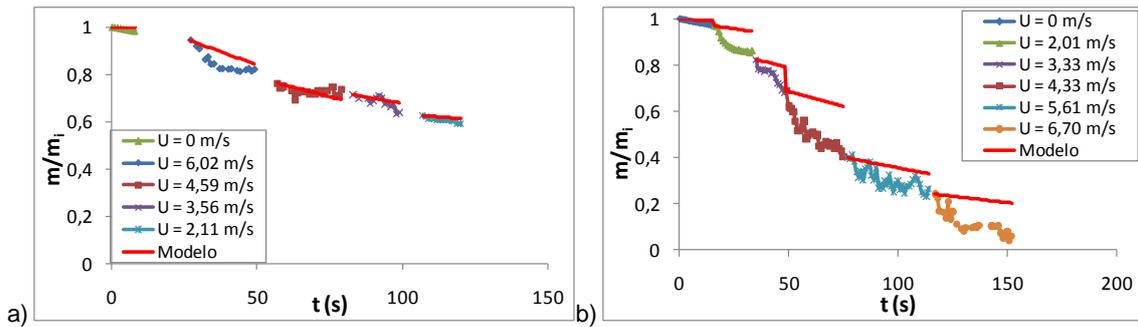


Figura 67 – Exemplos da variação de massa num ensaio com variação decrescente da ventilação (a) num ensaio com variação crescente de U (b). Comparação dos resultados com os valores do modelo da equação 55.

Comparando os resultados obtidos laboratorialmente com aqueles alcançados matematicamente, verifica-se que o modelo desenvolvido para condições estáticas se aproxima bastante melhor dos ensaios em que há uma variação decrescente da velocidade de ventilação. Nos ensaios com variação crescente de U (Figura 67b) o decaimento de massa da partícula é mais rápido do que nos ensaios para condições estáticas.

Embora o decaimento de massa de uma partícula em combustão apresente um comportamento tendencialmente exponencial, nesta análise, a variação da massa irá ser estudada através do declive linear. Neste sentido, para cada conjunto de dados entre duas transições das condições de ensaio, resulta um declive (m'_{lab}) referente aos dados laboratoriais e um declive (m'_{mod}) relativo aos resultados da aplicação do modelo para condições estáticas. O desvio do decaimento de massa dos ensaios dinâmicos relativamente às condições estáticas poderá ser traduzido pelo ângulo $m'_{mod} \wedge m'_{lab}$. Os ângulos com valores positivos indicam que o declive do modelo é inferior ao declive dos resultados laboratoriais. A Figura 68 traduz a variação do ângulo $m'_{mod} \wedge m'_{lab}$ em função da velocidade de ventilação para todas as transições dos ensaios efectuados na Sequência 2.

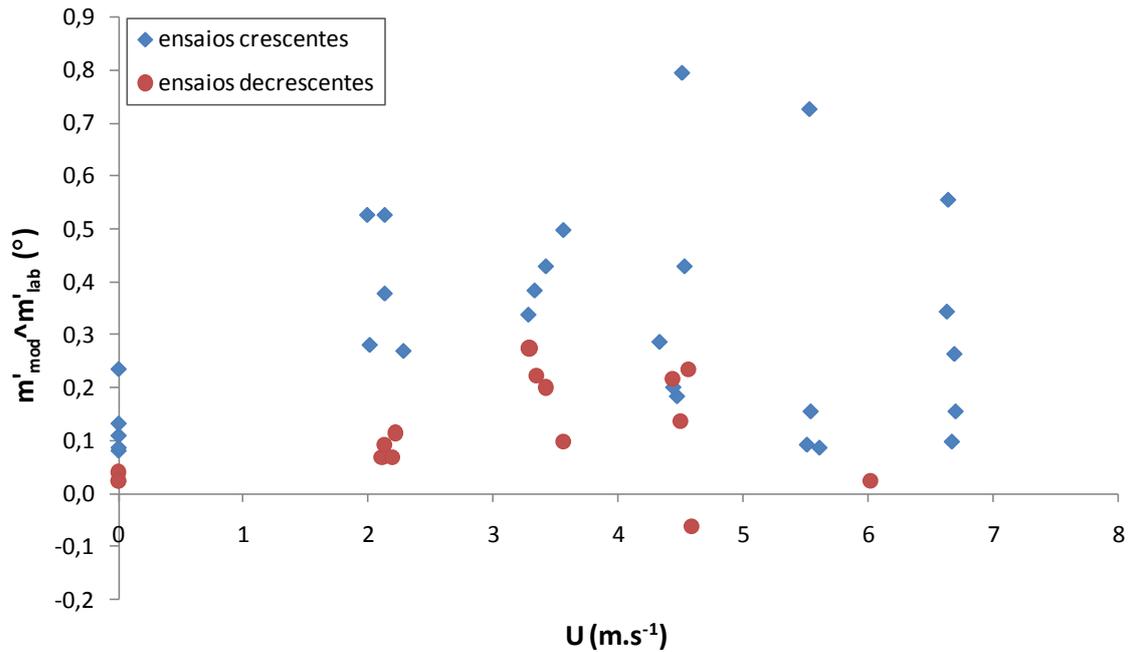


Figura 68 – Variação do ângulo definido pelos declives obtidos pelo modelo e pelos valores laboratoriais em função da velocidade de ventilação (Seq. 2).

Verifica-se que o decaimento de massa obtido para condições em que há variação da ventilação é superior ao decaimento sugerido pelo modelo. Tal como nos exemplos da Figura 67, o gráfico da Figura 68 permite concluir que a aplicação do modelo subestima o valor de k_0 , sendo esta conclusão mais evidente para os ensaios em que a variação crescente da velocidade.

A Figura 69 permite analisar globalmente a aplicação do modelo proposto para condições estáticas de ventilação nos resultados obtidos para os ensaios com variação de velocidade decrescente e com variação crescente. Esta análise é em comum à da Figura 68, permitindo no entanto outra perspectiva da visualização dos resultados.

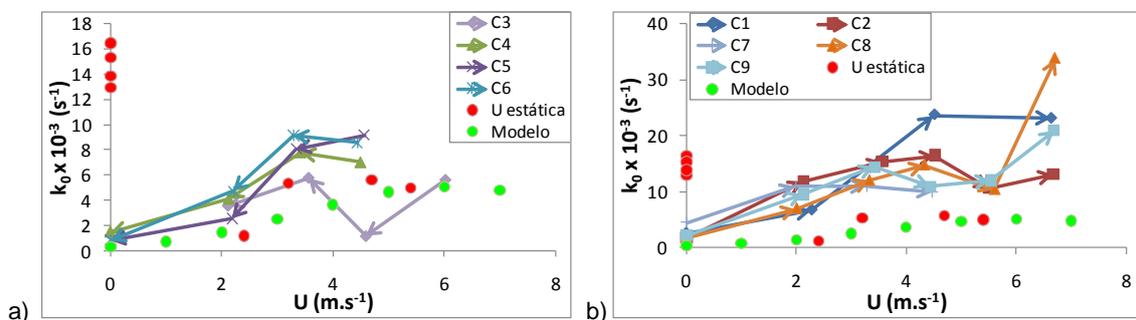


Figura 69 – Variação de k_0 em função da velocidade para os ensaios de variação de ventilação decrescente (a) e crescente (b).

Conclui-se que a variação da velocidade de ventilação conduz a maiores valores de k_0 . Verifica-se que os resultados obtidos pelo modelo se aproximam

mais dos resultados obtidos para variação de velocidade decrescente. Apenas os valores obtidos nos ensaios de ventilação constante para $U=0$ m/s, se apresentam claramente maiores do que os valores dos ensaios em que há variação de velocidade. Saliente-se no entanto o modelo matemático se aplica apenas para $U>0$ m.s⁻¹.

Sequência 3 – variação brusca de U para $\theta=45^\circ$

Tal como para os ensaios da *Sequência 2*, foi analisado a variação do ângulo definido pelos declives das rectas tendentes derivadas da aplicação do modelo e resultantes dos valores de decaimento de massa obtidos laboratorialmente, em função da velocidade de ventilação (Figura 70). Esclarecesse-se que a primeira transição dos ensaios decrescentes (0_2, 0_4 e 0_6) não foi incluída no gráfico.

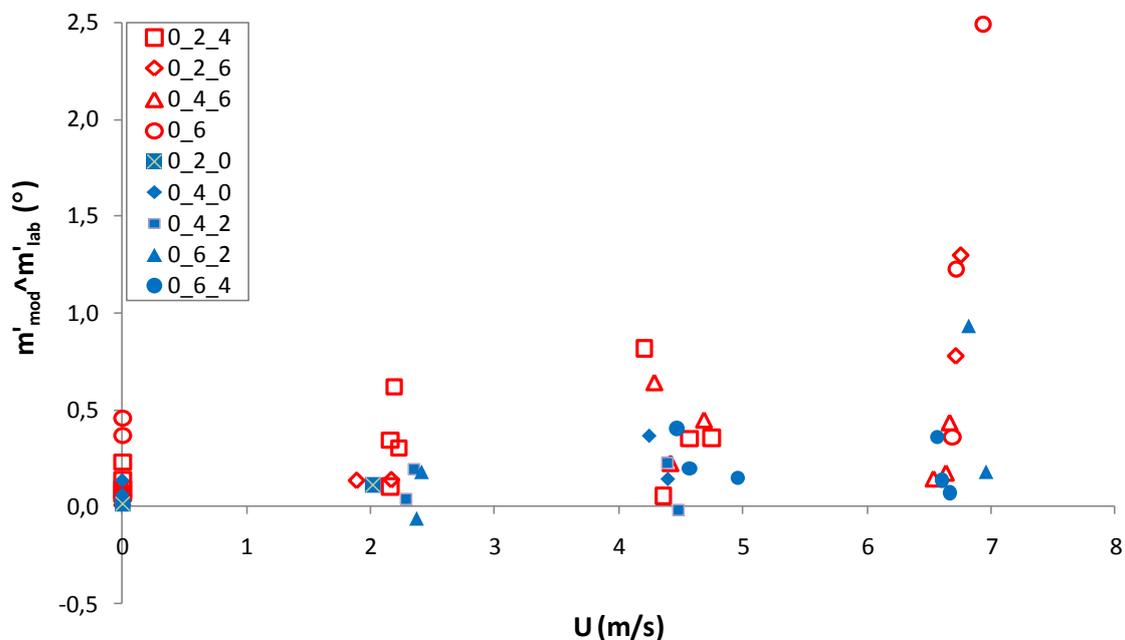


Figura 70 – Variação do ângulo definido pelos declives obtidos pelo modelo e pelos valores laboratoriais em função da velocidade de ventilação (Seq. 3).

Reforçando as conclusões obtidas anteriormente, verifica-se que o modelo conduz a valores inferiores àqueles obtidos laboratorialmente mediante alteração da velocidade de ventilação e que a variação decrescente apresenta um comportamento mais próximo do que a variação crescente.

A Figura 71 permite comparar as diferenças entre os ensaios em que as variações da velocidade de escoamento foram graduais (*Sequência 2*) e os ensaios em que as variações foram mais bruscas (*Sequência 3*).

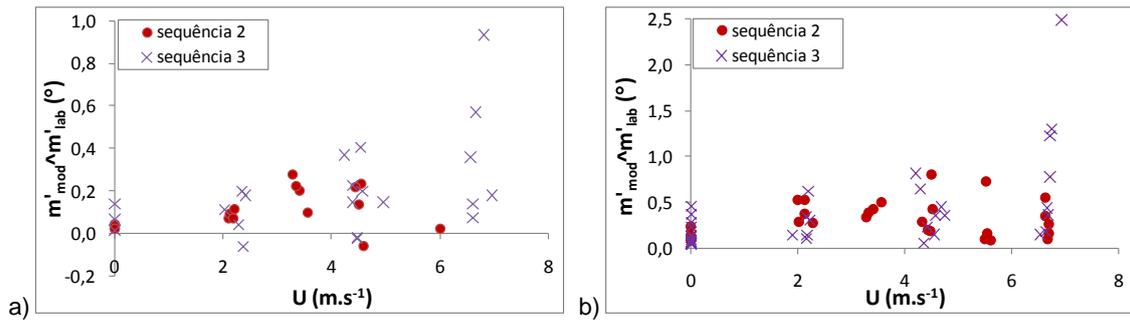


Figura 71 – Comparação dos ângulos $m'_{mod} \wedge m'_{lab}$ obtidos para a *sequência 2* e para a *sequência 3* nos ensaios com variação decrescente (a) e crescente de U .

A análise dos gráficos permite verificar que o tipo de transição entre as velocidades de escoamento não implica uma diferença evidente nos valores de $m'_{mod} \wedge m'_{lab}$ resultantes, para $U < 5 \text{ m.s}^{-1}$. Para velocidades de ventilação superiores a 5 m.s^{-1} há um claro aumento do valor deste ângulo, causado pelo facto de as variações de velocidade serem também mais elevadas.

Nas Figura 72 e Figura 73 poderá analisar-se a variação de k_0 em função da variação de velocidade durante o ensaio. As linhas a tracejado representam a média dos valores de k_0 para cada gama de alteração de velocidades.

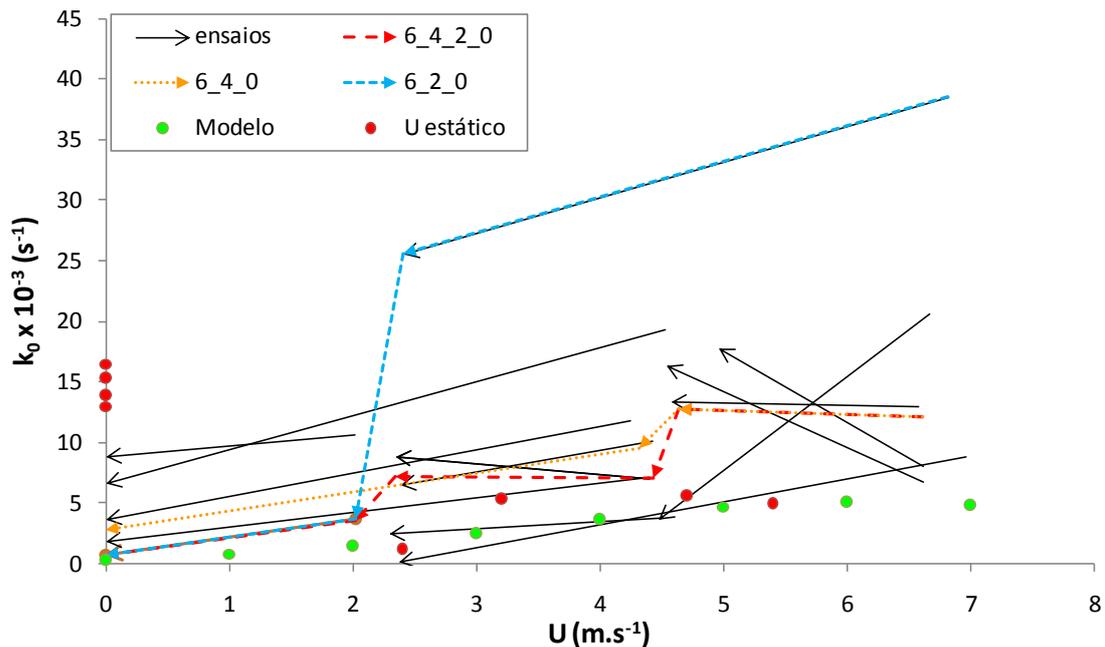


Figura 72 - Variação de k_0 em função da diminuição da velocidade de escoamento durante o ensaio.

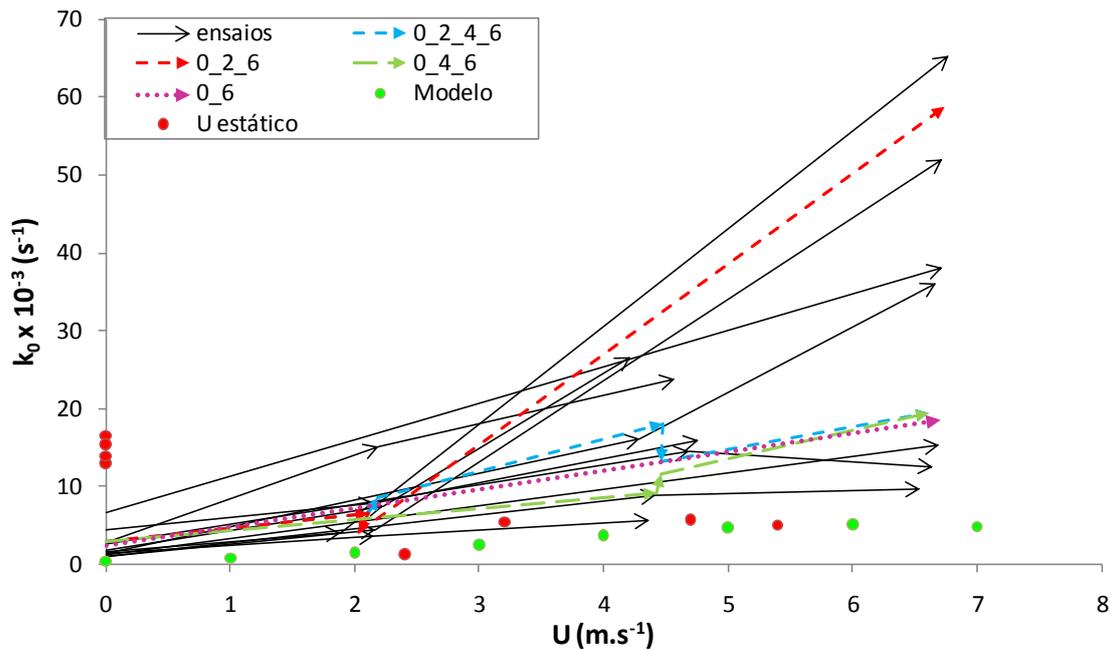


Figura 73 - Variação de k_0 em função do aumento da velocidade de escoamento durante o ensaio.

Como se pode observar, quanto mais brusca for a alteração de velocidade, mais o valor de k_0 se afasta do valor obtido para uma velocidade constante. Esta variação de k_0 para transições a velocidades mais altas, representa apenas as variações devidas a combustão. Tal como já foi referido, não se validaram os ensaios em a perda de massa devida à desintegração das partículas foi significativa.

4.2.3.1. Verificação do modelo para condições dinâmicas

Tendo em conta que numa situação real, uma partícula em combustão é transportada em condições mais próximas dos ensaios dinâmicos do que nas condições dos ensaios estáticos, pretendeu-se nesta fase definir um intervalo que incluía os diversos valores de k_0 que a combustão de uma casca de eucalipto, orientada a $\theta=45^\circ$, possa apresentar, independentemente das variações de ventilação a que se encontra sujeita. A análise dos ensaios dinâmicos permitiram concluir que o modelo proposto para os ensaios estáticos limitam na parte inferior a variação de k_0 mediante a mudança de velocidade. O limite superior irá ser definido com base nos resultados dos ensaios que obtiveram maiores valores de k_0 .

A Equação 56 define o limite superior da variação de k_0 associado às cascas de eucalipto utilizadas, para uma inclinação de 45° e na gama de velocidades ensaiadas, à temperatura e humidade ambiente. A opção por uma equação

quadrática não teve em consideração qualquer fundamento teórico mas apenas uma tendência manifestada pelos resultados.

$$k_0 = 1.7916 \times U^2 - 4.8178 \times U + 16.526 \quad [56]$$

A Figura 74 apresenta os resultados obtidos laboratorialmente incluídos nos limites anteriormente explicados.

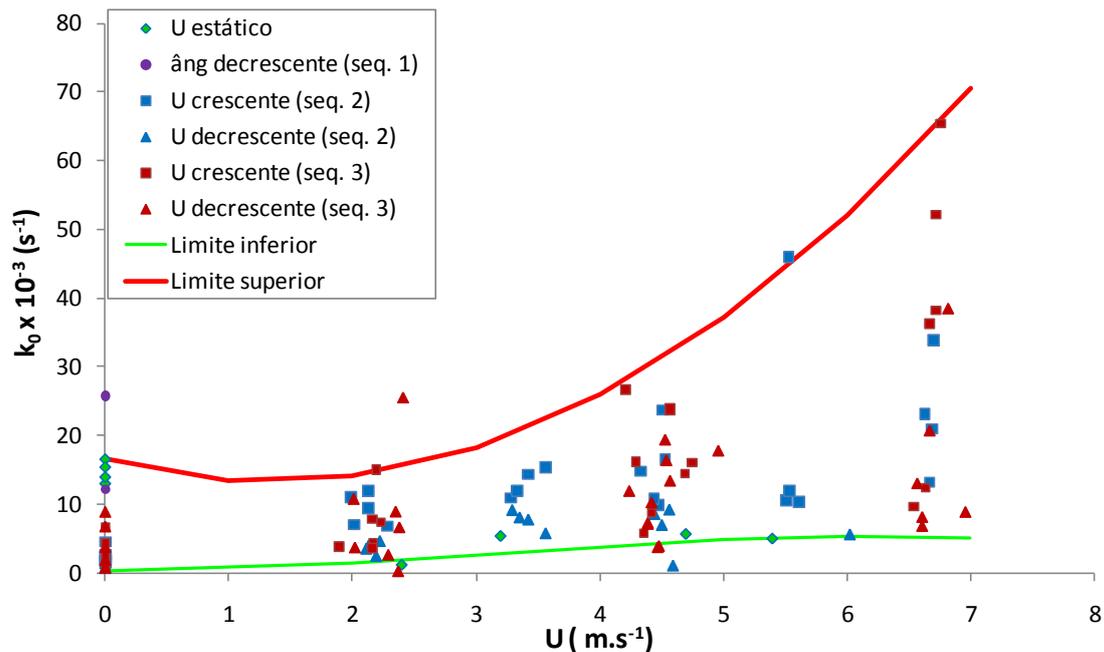


Figura 74 – Comparação dos valores obtidos com os limites propostos no estudo dinâmico.

É possível verificar que a quase totalidade dos valores obtidos laboratorialmente se encontram dentro dos limites definidos. Neste gráfico estão contemplados os resultados das três seqüências.

Numa situação real, o transporte de uma partícula em combustão conhece uma situação bastante mais próxima das condições dinâmicas do que das condições estáticas. Durante o transporte pelo vento, as velocidades de escoamento a que as cascas de eucalipto ensaiadas poderiam estar sujeitas, variam entre 0 m.s^{-1} (no caso de energia potencial máxima) e uma velocidade próxima da velocidade terminal de queda ($\approx 6 \text{ m.s}^{-1}$ para estas cascas). A posição preferencial destas cascas durante o transporte é a de $\theta=0^\circ$, podendo considerar-se que irá variar entre $-45^\circ < \theta < 45^\circ$. Neste intervalo, a orientação que conduz a um maior valor de k_0 é a de $\theta=45^\circ$. Nesta perspectiva pode concluir-se que a variação de k_0 durante o transporte de uma casca se situa entre os intervalos considerados.

No seguimento do estudo da presente dissertação, no cálculo de k_0 para uma situação real do transporte em combustão, irá usar-se o modelo relativo aos ensaios estáticos. Uma vez que o modelo limita inferiormente os valores de k_0 , inclui-se desta forma um factor de segurança na determinação deste parâmetro. Um dos objectivos finais do estudo é a verificação do estado de combustão da partícula (incandescente ou extinta) na altura da aterragem no solo. Se na utilização do modelo, que leva a menores valores de k_0 e portanto a uma combustão mais lenta, se concluir que a partícula se extinguiu durante o transporte, esta informação é provida de uma maior fiabilidade. Se a aplicação do modelo levar à conclusão de que a partícula aterrou em incandescência, pode acontecer que na realidade a partícula se tenha consumido durante o trajecto, não apresentando neste caso perigo de uma nova ignição.

Por outro lado, a aplicação de um modelo que indica uma queima mais lenta da partícula pode levar a uma subvalorização da distância percorrida, uma vez que indica massas maiores da partícula durante o transporte.

4.3. Influência da rotação da partícula em torno do eixo longitudinal

Nas diversas observações realizadas a cascas de eucalipto tubulares sujeitas a ventilação verificou-se que, para além da rotação transversal desenvolvida no subcapítulo anterior, há por vezes uma rotação da casca em torno do seu eixo longitudinal. Este tipo de rotação é bastante variável, dependendo sobretudo do grau de enrolamento (G_E) e da configuração do rasgo longitudinal. Observou-se que uma casca com $G_E < 1$ tende a não apresentar rotação em torno do eixo longitudinal, sendo o seu transporte normalmente feito com a superfície convexa voltada para o escoamento. Uma casca de eucalipto com um maior grau de enrolamento tende a rodar em torno do seu eixo longitudinal. Uma casca de eucalipto também apresenta uma maior tendência para ter este comportamento, se o seu rasgo longitudinal for mais irregular e mais diferenciado / separado da restante fracção da casca. Verifica-se também que este tipo de rotação surge por vezes como reacção à rotação da partícula em torno do seu eixo transversal. Os factores que levam a partícula a apresentar momento em torno do eixo longitudinal não foram objecto de estudo da presente dissertação no entanto, analisou-se a influência que este comportamento pode ter na determinação de k_0 .

Utilizando-se o Dispositivo de Rotação (*DR*), queimaram-se diversas cascas de eucalipto com características semelhantes (Anexo 8), sujeitando-as a diferentes velocidades de rotação em torno do seu eixo longitudinal. Estes ensaios foram realizados sem qualquer tipo de ventilação que não aquela provocada pela rotação da casca. A velocidade de combustão foi analisada

pela perda de massa da partícula em função do tempo de combustão. A casca foi orientada para que a ignição fosse realizada a $\theta=45^\circ$. A Figura 75 apresenta os resultados obtidos.

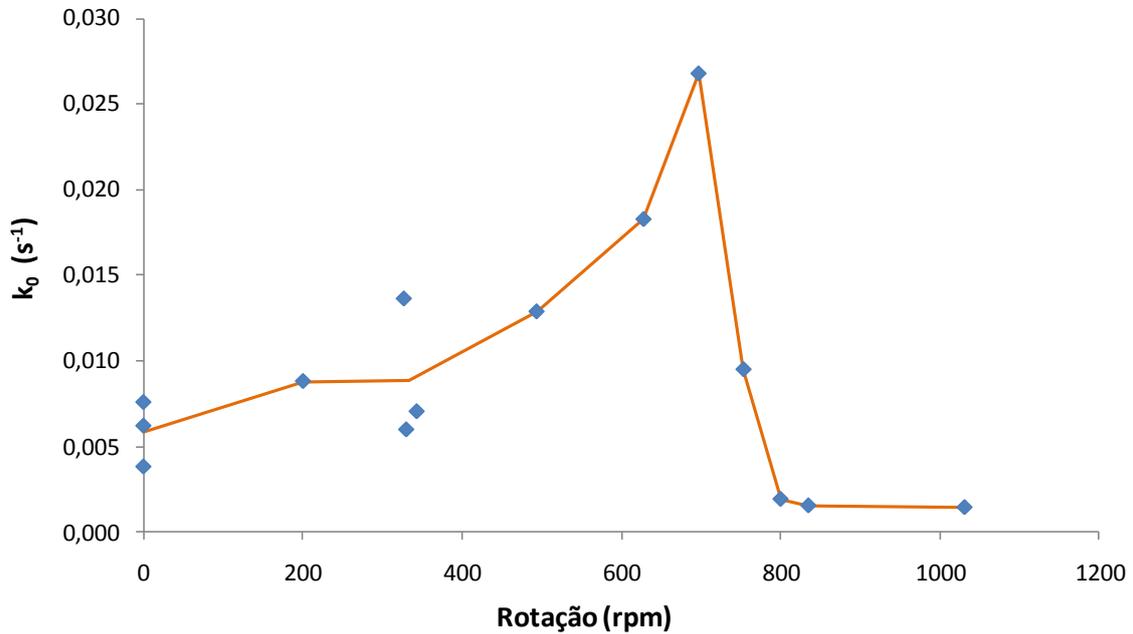


Figura 75 – Variação do coeficiente de decaimento de massa em função da rotação da partícula em torno do eixo longitudinal (cascas de eucalipto).

Verifica-se um crescimento do coeficiente de decaimento de massa até uma rotação em torno de 700 rpm . A partir desta rotação dá-se um decréscimo abrupto de k_0 . Analisando estes resultados com base nas observações dos ensaios, refere-se que esta diminuição repentina na velocidade de combustão se deve à transição da combustão com chama para uma fase de combustão sem chama.

Uma vez que para velocidades mais altas de rotação a combustão das cascas de eucalipto passa a efectuar-se num regime de combustão sem chama, efectuou-se uma análise do coeficiente de decaimento de massa em função da velocidade linear (U_L) da periferia da casca de eucalipto. Na Figura 76 pode verificar-se que a diminuição repentina de k_0 se manifesta para valores de U_L em torno de $0,77 \text{ m.s}^{-1}$.

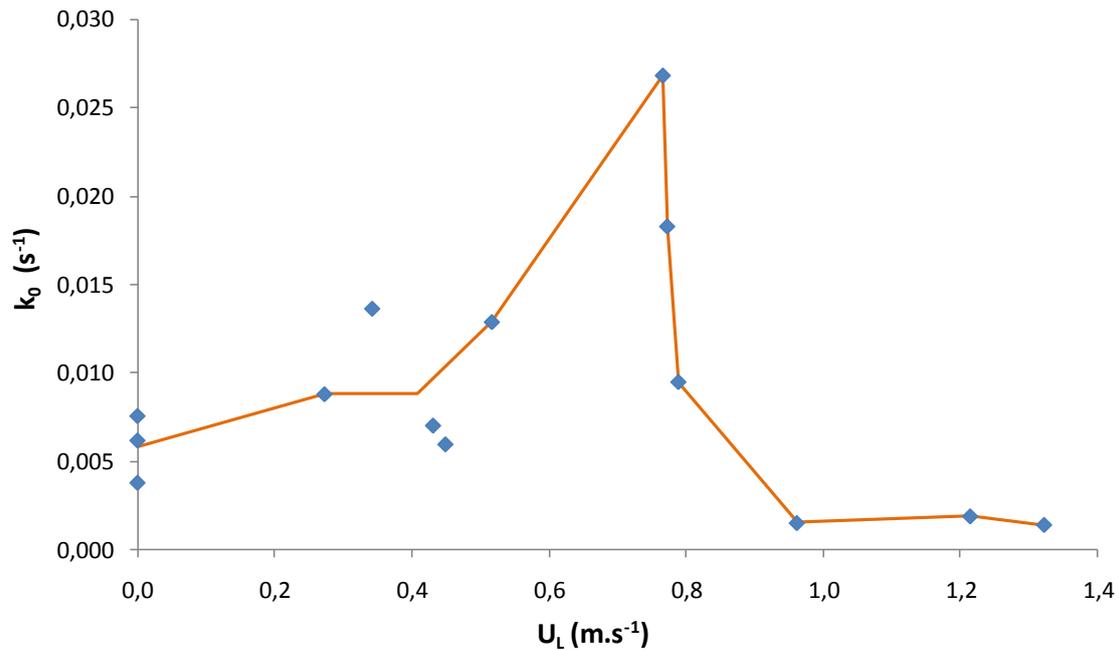


Figura 76 - Variação do coeficiente de decaimento de massa em função da velocidade linear da rotação da partícula em torno do eixo longitudinal (cascas de eucalipto).

Os resultados obtidos para velocidades de rotação mais baixas ($< 0,5 m.s^{-1}$) são bastante próximos daqueles que foram obtidos nos ensaios estáticos com a partícula imóvel, para qualquer valor de U analisado. Aumentando a velocidade de rotação, verifica-se um crescimento de k_0 , a que se segue a queda abrupta do valor deste parâmetro. Considera-se que este comportamento aerodinâmico pode ter uma importância significativa na determinação de k_0 e, apesar de tal não ser feito na presente tese, sugere-se a rotação real de uma casca sob diversas condições de transporte seja analisada mais detalhadamente.

Embora se assumia a importância da rotação das partículas em torno do eixo longitudinal, este parâmetro não foi tido em consideração no prosseguimento do estudo, nomeadamente na definição do modelo final.

4.4. Análise do regime de convecção

Nos ensaios realizados no TCV, o escoamento vertical ascendente foi feito no sentido contrário ao da força da gravidade. A frente de combustão apresenta uma propagação mais facilitada no sentido anti-gravítico em virtude da corrente de convecção natural ascendente que se cria pela elevada temperatura da combustão. Nos ensaios com ventilação realizados, para além da corrente de convecção natural, existe ainda a corrente de convecção forçada provocada pelo ventilador. Nestes ensaios, os dois tipos de convecção actuam no mesmo sentido. No entanto, quando nos ensaios de combustão, se refere que o

escoamento foi realizado a determinada velocidade, apenas se está a considerar a convecção forçada.

Considere-se os dois tipos de transporte de uma partícula incandescente: (1) elevação e (2) transporte horizontal. O sentido das correntes convectivas a que uma partícula em elevação é sujeita é semelhante ao sentido vertical ascendente que foi testado em laboratório no *TCV*. Quando uma partícula é transportada pelo vento horizontal (\approx paralelo ao terreno) é sujeita a uma corrente convectiva natural (U_n) com sentido vertical ascendente e a uma corrente convectiva (U_f) contrária ao seu deslocamento (convecção forçada). Esta última componente do escoamento sentido pela partícula apresenta, numa fase inicial, uma direcção aproximadamente horizontal que é gradualmente alterada até à fase final em que o escoamento relativo é praticamente vertical de sentido ascendente (Figura 77). Nesta perspectiva, o sentido da soma das correntes a que as partículas foram sujeitas nos ensaios no *TCV* não coincidem exactamente com a soma das correntes que as mesmas partículas experimentariam num transporte horizontal pelo vento.

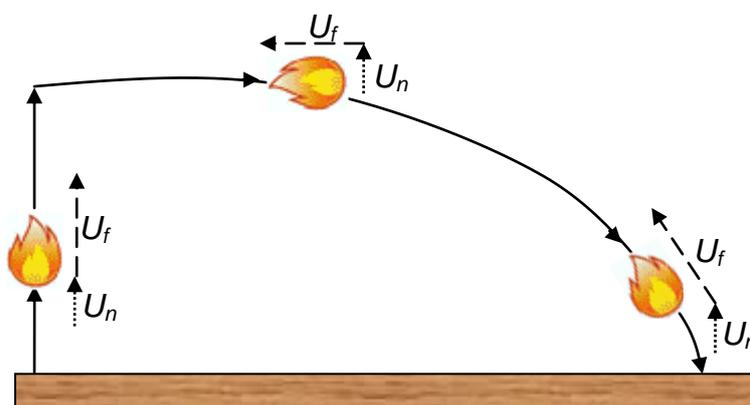


Figura 77 – Esquema dos escoamentos associados ao movimento de uma partícula

Nos ensaios de combustão com ventilação anteriormente descritos, apenas se controlou a convecção forçada, tendo-se negligenciado a convecção natural. Os ensaios que se apresentam neste subcapítulo tiveram como objectivo analisar a efectiva importância da convecção natural relativamente à convecção forçada. Usando o túnel oblíquo foram realizados três ensaios em que as correntes natural e forçada apresentavam sentidos contrários. Comparando os resultados obtidos nos ensaios em que as duas correntes actuavam no mesmo sentido com os ensaios com correntes contrárias, poderá concluir-se quanto ao regime de convecção predominante na propagação da frente de combustão.

Os três ensaios foram realizados com cascas de eucalipto na vertical. Num dos ensaios a ignição foi feita com $\theta=90^\circ$ e o vento com $6,2 \text{ m.s}^{-1}$ foi direccionado de cima para baixo (Figura 78). Nos outros dois ensaios a ignição foi feita para

$\theta=-90^\circ$ e o vento igualmente descendente com $U=6,2 \text{ m.s}^{-1}$. Nestas situações, a corrente convectiva natural apresenta um sentido contrário à corrente forçada, pelo que os seus efeitos diminuem. A perda de massa da partícula foi usada como parâmetro de controlo, permitindo calcular o valor de k_0 para cada situação de ensaio.



Figura 78 – Exemplo de ensaio em com ventilação descendente e $\theta=-90^\circ$

Na Tabela 5 apresentam-se os valores de k_0 obtidos laboratorialmente. Os resultados obtidos indicam uma maior predominância da convecção forçada do que da convecção natural.

Tabela 5 – Valores do coeficiente de decaimento de massa obtidos nos ensaios laboratoriais

Ref. do ensaio	θ ($^\circ$)	U (m.s^{-1})	$k_{0 \text{ lab}} \times 10^3$ (s^{-1})	$k_{0 \text{ mod}} \times 10^3$ (s^{-1})
C21	-90	6,2	12	14,9
C23	-90	6,2	47	
C22	90	6,2	0	0,06

Nos ensaios C21 e C23 obtiveram-se valores próximos daquele que se obteria se se aplicasse o modelo para $\theta=90^\circ$ e $U=6,2 \text{ m.s}^{-1}$ ($k_{0 \text{ mod.}}=14,9 \times 10^3 \text{ s}^{-1}$). No ensaio C22 verificou-se uma extinção quase imediata da combustão ($k_0 \approx 0 \text{ s}^{-1}$) que se aproxima do valor que se obtém por aplicação do modelo em condições de $\theta=-90^\circ$ e $U=6,2 \text{ m.s}^{-1}$ ($k_{0 \text{ mod.}}=0,00006 \text{ s}^{-1}$).

Poderá igualmente fazer-se uma análise do regime de convecção dominante através da Equação 57, em que g corresponde à aceleração da gravidade ($9,81 \text{ m.s}^{-2}$), β representa o coeficiente de dilatação térmica [K^{-1}], L é o comprimento característico da partícula [m], T_{rel} [K] é a diferença da temperatura de combustão da partícula e a temperatura de referência (do ar) e ν [$\text{m}^2.\text{s}^{-1}$] se refere à viscosidade cinemática do ar. Esta fórmula relaciona o número adimensional de *Grashof* (Gr) com o quadrado do número de *Reynolds*

(Re). O primeiro termo representa a convecção natural estando relacionado com o conceito de calor. O segundo termo traduz a noção do movimento associado à convecção forçada. Se o quociente de Gr sobre Re^2 resulta num número bastante inferior à unidade, é indicativo de que o regime de convecção forçada é dominante. Se $Gr/Re^2 \gg 1$ então domina o regime de convecção natural. Caso esta relação seja igual a um, ou próximo deste valor, a convecção é mista.

$$\frac{Gr}{Re^2} = \frac{\frac{g \times \beta \times L^3 \times T_{rel}}{\nu^2}}{\left(\frac{U \times L}{\nu}\right)^2} \quad [57]$$

Considerando uma casca de eucalipto com 30 cm e uma temperatura de combustão de 700 K , verifica-se que o regime de convecção é misto para uma velocidade de escoamento de $0,55 \text{ m.s}^{-1}$. Uma vez que a velocidade terminal desta partícula é de cerca de 6 m.s^{-1} , para a qual $Gr/Re^2 = 0,009$, pode concluir-se que predomina o regime de convecção forçada. Para o caso de uma pinha com $L = 15 \text{ cm}$, ardendo a uma temperatura de 700 K , com uma velocidade de transporte de 18 m.s^{-1} , o valor do quociente Gr/Re^2 é de $0,0005$, pelo que a convecção forçada é claramente o regime dominante.

Pelo exposto, poderá considerar-se negligenciável o efeito da convecção natural, considerando que o controlo único da velocidade da ventilação usado nos ensaios no TCV é uma aproximação perfeitamente aceitável. Durante o transporte deste tipo de partículas poderá igualmente considerar-se que a corrente forçada é o único tipo de corrente convectiva de efectivo relevo.

4.5. Síntese dos ensaios de combustão

Devido à extensão deste capítulo, faz-se agora uma compilação e conclusão dos resultados obtidos, facilitando ao leitor a compreensão da sequência dos estudos efectuados.

O primeiro estudo de combustão consistiu na análise da velocidade de decaimento de massa das pinhas em combustão em função das suas características físicas e da velocidade de escoamento a que eram sujeitas. Foi desenvolvido um modelo que permite determinar este parâmetro através da massa inicial da pinha, do seu grau de abertura e da velocidade de escoamento. Nestes ensaios foi ainda possível constatar que a orientação da pinha não assume um grande relevo na determinação de k , desde que a ignição seja efectuada a montante da pinha relativamente ao sentido do escoamento.

Tendo em consideração que durante o transporte pelo vento, as partículas podem ser sujeitas a diversos tipos de escoamento, tanto em direcção (θ), como em velocidade (U), efectuou-se um estudo para compreender este fenómeno. Os ensaios foram realizados para escamas das pinhas, para pinhas e para cascas de eucalipto. Foram analisados os tempos de combustão e os coeficientes de decaimento de massa, distinguindo-se os regimes de combustão das partículas – com chama ou sem chama. Desenvolveu-se um modelo que permite de terminar os parâmetros analisados em função de U e de θ . Verificou-se a combustão em situações de ausência de escoamento assume um comportamento distinto da combustão quando a partícula está sujeita a um escoamento pelo que, neste estudo, se distinguiu os ensaios em que $U=0 \text{ m.s}^{-1}$ dos ensaios em que $U>0 \text{ m.s}^{-1}$.

Os ensaios com escamas apenas foram realizados apenas para $U=0 \text{ m.s}^{-1}$, uma vez que as grandes dimensões do TCV dificultavam o manuseamento de combustíveis tão pequenos. Na altura da realização destes ensaios, o TO ainda não se encontrava disponível. Tendo em consideração que a velocidade típica de transporte de um combustível ronda a sua velocidade terminal de queda (15 a 20 m.s^{-1} para as pinhas e aproximadamente 6 m.s^{-1} para as cascas ensaiadas), tentou realizar-se ensaios que atingissem estes valores de velocidade para cada combustível. No entanto, o dispositivo de aquisição de massas tornou-se bastante instável para valores de $U>6,5 \text{ m.s}^{-1}$, pelo que este foi o valor máximo da velocidade de escoamento atingido. Nesta perspectiva, apenas os ensaios com as cascas de eucalipto apresentaram uma efectiva correspondência com a realidade. Desta forma, no prosseguimento dos estudos apenas se analisaram as cascas de eucalipto, afastando-se as pinhas e as escamas.

Nos ensaios referidos anteriormente, as condições de θ e de U foram mantidas constantes ao longo do ensaio, pelo que se chamaram “ensaio estáticos”. Considerando que, durante a combustão em voo, uma partícula experimenta uma alternância de valores de U e θ , efectuaram-se ensaios em que estes parâmetros foram variados durante o decorrer da combustão. A estes ensaios deu-se o nome “ensaio dinâmicos”. Constatou-se que os ensaios estáticos conduzem ao limite inferior do valores de decaimento de massa que uma casca de eucalipto incandescente pode ter durante o seu transporte. Uma vez que a subvalorização de k_0 pode ser encarada como uma questão de segurança na determinação do estado de combustão na altura de queda de uma partícula, decidiu-se optar pela aplicação do modelo obtido nos ensaios estáticos na prossecução dos estudos da presente dissertação.

Durante o decorrer dos ensaios, verificou-se que as cascas apresentavam por vezes uma rotação em torno do seu eixo longitudinal pelo que se decidiu verificar se este comportamento tinha ou não relevância na velocidade de combustão da partícula. Efectuaram-se vários ensaios no sentido de analisar

este fenómeno concluindo-se que a rotação da partícula interfere na determinação do valor de k_0 . O aparecimento deste tipo de rotação carece de estudos profundos uma vez que é bastante variável e dependente de diversos factores que não foram controlados nos ensaios. Neste sentido, a influência deste parâmetro aerodinâmico contemplado no modelo de combustão – $f(U, \theta)$ – servindo apenas para se ter consciência desta limitação no estudo.

Os ensaios realizados no *TCV* tiveram sempre um escoamento vertical ascendente, no mesmo sentido que a corrente de convecção natural da combustão. No entanto durante o transporte da partícula pelo vento, estas duas componentes do escoamento são por vezes perpendiculares ou podem mesmo ter sentidos contrários. Para analisar a importância desta aproximação, foram realizados ensaios no túnel oblíquo que permitiram verificar que o contributo da convecção natural é negligenciável quando comparado com o escoamento a que os ensaios foram realizados. A análise teórica deste problema conduziu a um resultado idêntico.

5. Estudos Aerodinâmicos

Os estudos aerodinâmicos realizados tiveram como objectivo a percepção do comportamento aerodinâmico das pinhas e das cascas de eucalipto durante o seu transporte pelo vento.

O comportamento aerodinâmico das pinhas e das cascas de eucalipto foi analisado, no sentido de determinar a velocidade terminal ao longo do seu transporte em combustão e a velocidade terminal em função da orientação do combustível relativamente à direcção do escoamento. Foram ainda realizados ensaios que visaram a determinação dos coeficientes aerodinâmicos das cascas de eucalipto e as posições preferenciais destes combustíveis ao longo do transporte.

5.1. Velocidades Terminais

À velocidade máxima que uma partícula atinge na queda vertical, sem estar sujeita a forças exteriores, dá-se o nome de velocidade terminal. Este conceito pode igualmente ser definido como a velocidade de um escoamento vertical ascendente necessária para manter a partícula em flutuação, parada no escoamento.

Durante o transporte, uma partícula tende a assumir uma posição preferencial, à qual corresponde uma determinada velocidade terminal. No entanto, tal como foi anteriormente referido, a mesma partícula é sujeita a vários tipos de escoamento, tanto em direcção como em velocidade, devido ao ambiente atmosférico revolto em que está imersa. Embora a partícula não chegue a atingir uma posição e velocidade de equilíbrio durante longos períodos, considera-se que o transporte de uma partícula pode caracterizar-se por uma velocidade equivalente à sua velocidade terminal na sua orientação aerodinâmica mais favorável (*Cheney e Bary, 1969*).

Deve ainda considerar-se o facto de que a combustão da partícula, que ocorre durante o seu transporte, faz variar a sua massa e as suas dimensões, o que tem como consequência uma alteração das suas características aerodinâmicas, nomeadamente a sua velocidade terminal.

A determinação da velocidade terminal de queda foi realizada para as pinhas e para as cascas de eucalipto. Este parâmetro foi analisado para diferentes orientações dos combustíveis relativamente ao escoamento. Foi também estudada a variação da velocidade terminal destas partículas ao longo da sua queima.

5.1.1. Pinhas

5.1.1.1. Pinhas Inteiras

Foram realizados diversos ensaios com pinhas de diferentes características físicas (Anexo 5). A determinação da velocidade terminal (U_T) foi efectuada na mesma altura e usando as mesmas pinhas especificadas para os ensaios de combustão. Foram realizados ensaios com pinhas direccionadas horizontalmente, na posição vertical com o pecíolo (base) voltada para cima e na posição vertical com o pecíolo voltado para baixo (voltado para o escoamento ascendente).

A Equação 58 relaciona a velocidade terminal com a massa da pinha (m_0), a massa volúmica do ar do escoamento (ρ_{ar}), a sua área representativa (A_r) e o coeficiente aerodinâmico de resistência (Cx).

$$Cx = \frac{2 \times m_0 \times 9,81}{\rho_{ar} \times U_T^2 \times A_r} \Leftrightarrow U_T^2 = \frac{2 \times m_0 \times 9,81}{\rho_{ar} \times A_r} \times Cx \quad [58]$$

A Figura 79 apresenta vários gráficos que relacionam o quadrado da velocidade terminal com m_0 , A_r (calculada pelo produto do diâmetro principal pelo comprimento), ρ_{ar} e a relação entre estes parâmetros. Embora a variação de ρ_{ar} seja pouco significativa, decidiu-se incluir esta variável uma vez que as propriedades termodinâmicas do fluido de escoamento, foram controladas em laboratório.

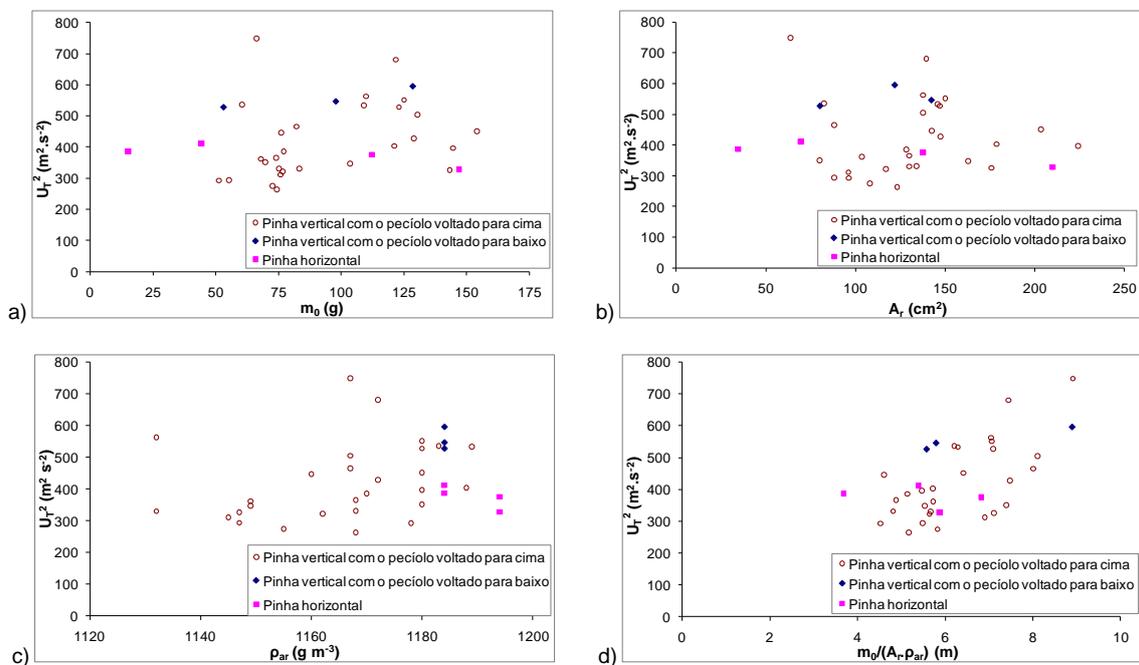


Figura 79 – Variação da velocidade terminal de uma pinha em função da: (a) massa inicial, (b) área representativa, (c) da densidade do ar de escoamento e (d) relação entre os parâmetros mencionados.

Verifica-se que nenhum destes parâmetros, actuando isoladamente, parece ter uma influência evidente na determinação da velocidade terminal. O gráfico da Figura 79d, relaciona estes parâmetros actuando de acordo com a Equação 58, mostrando uma maior dependência destas variáveis.

Os valores do coeficiente de resistência (C_x) constantes na Figura 80a, foram calculados por aplicação da Equação 58 que pode ser descrita como uma equação linear de coordenada na origem nula ($y=m.x$) em que a variável dependente (y) representa o quadrado da velocidade terminal, a variável independente (x) refere-se ao coeficiente de resistência e o declive (m) traduz o quociente da referida equação. Verifica-se que este gráfico apresenta uma tendência decrescente, quando seria de esperar um comportamento contrário, e uma grande dispersão dos dados ($r^2=0,37$). Este resultado poderá dever-se à não consideração do grau de abertura das pinhas na relação entre C_{xT} e U_T^2 . A Figura 80b apresenta o quadrado da velocidade terminal em função do grau de abertura das pinhas. Este gráfico evidencia a grande importância deste parâmetro na definição da velocidade terminal e consequentemente no coeficiente de resistência de uma pinha ao escoamento de ar. Efectivamente pode perceber-se este efeito considerando uma pinha em duas situações distintas com diferentes graus de abertura. Nas duas situações a pinha tem a mesma massa e uma área característica semelhante, uma vez que o comprimento e o maior diâmetro não são alterados. Para um mesmo escoamento, com igual densidade do ar e para a mesma velocidade, a pinha com maior grau de abertura apresentará uma maior resistência ao escoamento do que a pinha com as escamas mais fechadas.

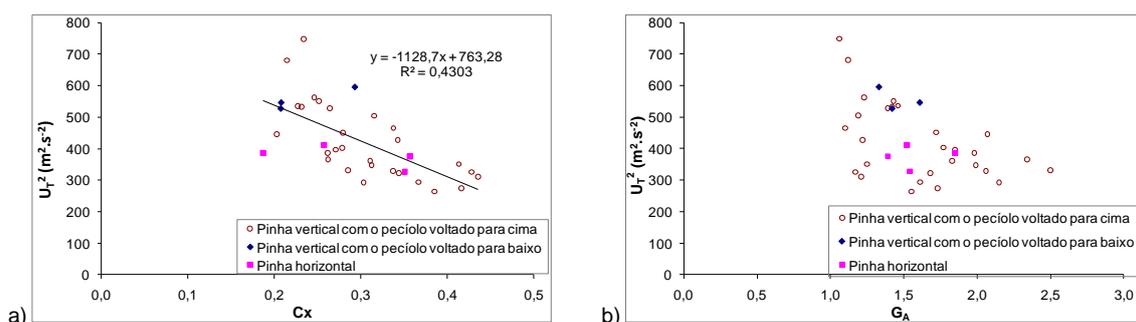


Figura 80 – Variação do quadrado da velocidade terminal com (a) o coeficiente de resistência de pinhas e (b) o grau de abertura.

Uma outra conclusão que poderá ser retirada dos resultados obtidos é que a orientação das pinhas relativamente ao escoamento não parece assumir grande relevo. Pelos gráficos pode verificar-se que as velocidades terminais não variam significativamente consoante a pinha se encontra perpendicular ao escoamento (horizontal) ou paralela ao escoamento (vertical) com o pecíolo voltado para baixo ou para cima. Este resultado deve-se ao facto de o

espaçamento das escamas facilitar o escoamento de ar quando a pinha se posiciona perpendicularmente ao escoamento, compensando deste modo a maior área transversal ao escoamento. Efectivamente esta conclusão apenas poderá ser considerada válida para os intervalos de grau de abertura ensaiados. Naturalmente que uma pinha completamente fechada ($G_A=1$) apresentará uma maior resistência posicionada perpendicularmente ao escoamento do que se estiver posicionada paralelamente.

5.1.1.2. Pinhas parcialmente queimadas

Uma pinha em combustão quando transportada pelo vento, varia as suas características físicas ao longo do transporte e conseqüentemente, as suas propriedades aerodinâmicas também se vai alterando. Nesta perspectiva, determinaram-se as características aerodinâmicas, nomeadamente o coeficiente de resistência e a velocidade terminal, para diversas pinhas em diferentes estados de combustão. As propriedades das pinhas utilizadas constam no Anexo 9. A Figura 81 apresenta imagens das pinhas parcialmente queimadas.



Figura 81 – Imagem de algumas pinhas parcialmente queimadas (a altura média final destas pinhas é 12 cm)

A metodologia usada nestes ensaios consistiu nos passos que seguidamente se descrevem:

1. Determinação das propriedades físicas iniciais da pinha;
2. Determinação da velocidade terminal inicial da pinha;
3. Queima parcial da pinha até esta atingir a massa desejada. As pinhas foram previamente suspensas na vertical com o pecíolo voltado para cima. A ignição foi feita através de um fósforo aceso na extremidade mais distante do pecíolo. A combustão foi terminada mergulhando a pinha em água;
4. Desidratação da pinha numa estufa a 103°C durante 24 horas;
5. Re-hidratação da pinha, deixando-se ao ar (em laboratório) durante 24 horas;
6. Determinação das propriedades físicas da pinha parcialmente queimada;
7. Determinação da velocidade terminal da pinha parcialmente queimada.

A Figura 82 apresenta a variação das velocidades terminais das pinhas ao longo da sua queima. Uma vez que as pinhas apresentavam naturalmente diferenças físicas entre si, os parâmetros da velocidade terminal (U_{Tf}) e da massa (m_f) das pinhas parcialmente queimadas foram analisados relativamente aos mesmos parâmetros (U_{T0} e m_0) que as pinhas apresentavam antes de serem queimadas.

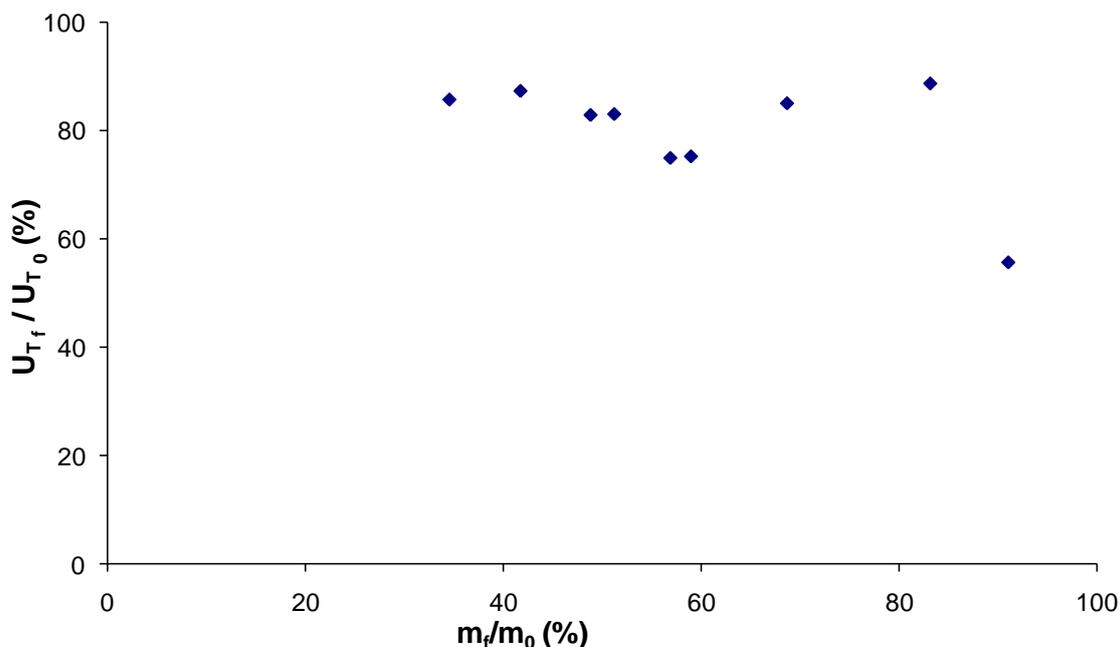


Figura 82 – Variação da velocidade terminal de queda de uma pinha ao longo da sua combustão.

Neste gráfico poderá verificar-se que na fase inicial da queima há uma diminuição média de aproximadamente 17% da velocidade terminal. Justifica-se este resultado pelo facto de haver uma libertação inicial dos gases voláteis da pinha fazendo diminuir a sua massa sem que haja uma variação do volume. Após a libertação dos gases voláteis, a diminuição da massa da pinha é acompanhada proporcionalmente pela diminuição do seu volume fazendo com que a velocidade terminal se mantenha sensivelmente constante a aproximadamente 83% do seu valor inicial. Quando cerca de 83% a 90% da massa da pinha foi consumida pela combustão, dá-se uma descida acentuada da velocidade terminal da pinha. Nesta fase, as escamas foram praticamente consumidas pelo que a diminuição de massa se deve à combustão do coração da pinha que, até se desintegrar, arde sem que haja uma variação significativa do seu volume.

No gráfico da Figura 83 é feita uma análise à variação do coeficiente de resistência da pinha após a queima parcial (Cx_f) relativamente ao seu coeficiente de resistência inicial (Cx_0).

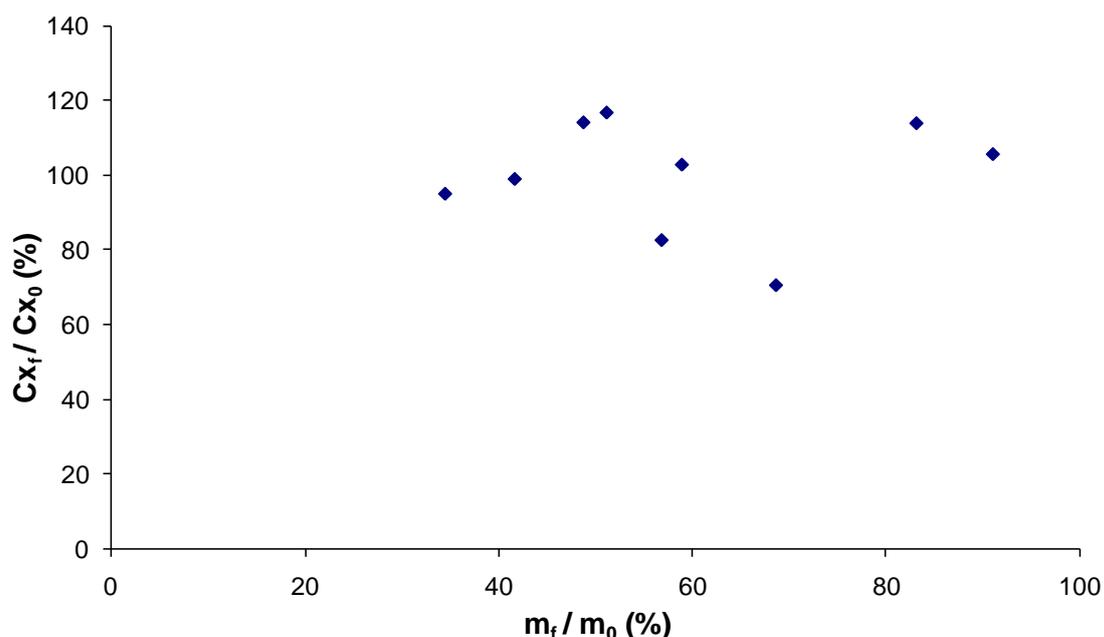


Figura 83 - Variação do coeficiente de resistência de uma pinha ao longo da sua combustão

Os resultados obtidos apresentam alguma flutuação em torno dos 100% com variações de $\pm 20\%$. Neste sentido, com alguma aproximação, pode considerar-se que, ao longo da combustão, o coeficiente de resistência de uma pinha assume valores constantes, sensivelmente iguais ao seu valor inicial.

5.1.2. Cascas de Eucalipto

A análise da velocidade terminal das cascas de eucalipto foi feita de forma bastante semelhante ao método utilizado na determinação das velocidades

terminais das pinhas, analisando as variações deste parâmetro ao longo da combustão e para diferentes posições da casca relativamente ao escoamento incidente.

5.1.2.1. Orientação da casca de eucalipto

Foram realizados 7 ensaios com o objectivo de analisar a velocidade terminal da queda de uma casca de eucalipto com forma tubular em função da orientação do seu eixo longitudinal. As características das cascas usadas são apresentadas no Anexo 10. Na Figura 84 constam os resultados obtidos.

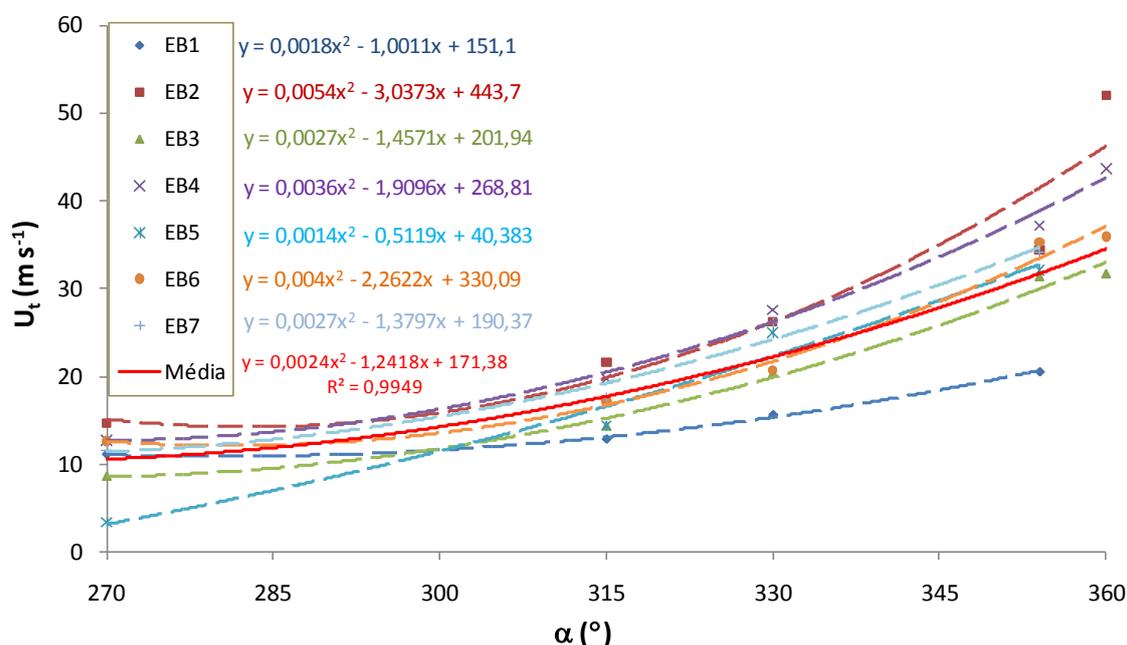


Figura 84 - Variação da velocidade terminal de queda de uma casca de eucalipto em função da sua orientação relativamente ao escoamento ($\alpha=270^\circ$ refere que o eixo principal da partícula se encontra paralela ao escoamento).

Verifica-se uma clara variação da velocidade terminal com a orientação da partícula. Naturalmente uma casca tubular orientada de topo para o escoamento ($\alpha=360^\circ$) apresenta uma resistência muito menor, e consequentemente uma maior velocidade terminal, do que se essa casca estiver orientada perpendicularmente ao escoamento ($\alpha=270^\circ$).

Os valores de U_T , obtidos para $\alpha=270^\circ$ são bastante superiores do que aqueles obtidos por Ellis (2000) para troços de cascas de eucalipto com igual comprimento (30 cm) e diâmetro semelhante ($b_0 \approx 2,2$ cm), em torno de 6 m.s^{-1} . Não obstante de que a espécie de eucalipto usada por Ellis (*Eucalyptus bicostata*) foi diferente da espécie usada no presente trabalho (*Eucalyptus globulus*) reconhece-se que o valor médio de $U_T > 10 \text{ m.s}^{-1}$ é elevado, tendo em conta as observações feitas em laboratório que indicavam uma velocidade

terminal mais próxima de 6 m.s^{-1} . Estas observações foram efectuadas no TCV, deixando a casca flutuar no escoamento ascensional e verificando qual a secção média do túnel em que a partícula se mantinha mais estável. Embora possa ser indicativo, este método apresenta diversas dificuldades uma vez que a casca de eucalipto tem tendência para embater nas paredes do TCV (onde a velocidade de escoamento é menor) retirando o rigor às medições.

Considerando que as medidas da velocidade terminal para as cascas de eucalipto possam ter sobrevalorizado o seu valor, estas medições não foram consideradas na prossecução dos estudos da presente dissertação.

5.2. Coeficientes Aerodinâmicos

Os coeficientes aerodinâmicos assumem especial importância no presente estudo, no sentido em que irão possibilitar a previsão do transporte das partículas em função das suas características físicas e do perfil do escoamento. Os coeficientes aerodinâmicos estudados foram o coeficiente de resistência (C_x), o coeficiente de sustentação (C_z) e o coeficiente de momento (CM_y).

Uma vez que os ensaios de combustão das pinhas e das escamas foram limitados por questões técnicas relacionadas com o TCV, a determinação dos coeficientes aerodinâmicos apenas foi feita para as cascas de eucalipto. Neste estudo foi tida em consideração a orientação do rasgo longitudinal da casca de eucalipto relativamente ao escoamento incidente. Verificando-se que há forte influência desta irregularidade no comportamento aerodinâmico, os resultados obtidos foram divididos consoante o escoamento era feito contra o rasgo na casca (de 0° a 180°) ou na situação contrária (180° a 360°), tal como se pode ver na Figura 85.

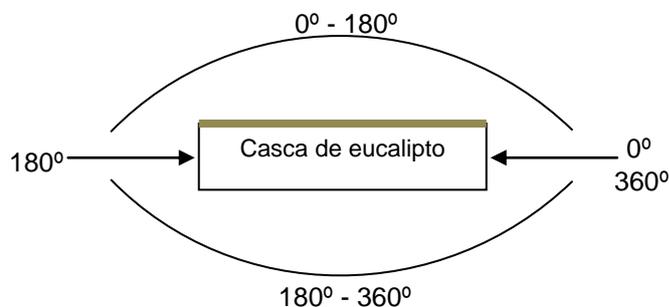


Figura 85– Incidência do escoamento no rasgo da casca de eucalipto tubular (o rasgo é apresentado na parte superior da figura da casca).

5.2.1. Ensaio realizados e metodologia associada

Na determinação dos coeficientes aerodinâmicos usaram-se 4 cascas diferentes, cujas características constam no Anexo 11, tendo sido utilizado o túnel oblíquo para a realização dos ensaios. Foram analisadas várias velocidades de ventilação, diversas orientações da incidência da ventilação em relação à casca e diferentes comprimentos da casca de eucalipto.

As cascas foram posicionadas com o seu eixo principal na horizontal, tendo invariavelmente o rasgo longitudinal voltado para cima. Foram realizados ensaios em intervalos de 5° , desde 0° até 360° , segundo a convenção estipulada na Figura 86.

Durante a realização de cada ensaio foram medidas as principais dimensões da casca, as características termodinâmicas do ar de escoamento e as forças (F_x , F_z e M_y) aplicadas na célula de carga.

Conforme foi anteriormente referido, o presente estudo incidiu nas forças do plano vertical paralelo à direcção do escoamento (forças F_{x_0} e F_{z_0}) e o momento perpendicular a esse plano (momento M_{y_0}).

Após os cálculos de conversão dos sinais eléctricos da célula de carga e de ajustes dos eixos, os valores das forças foram analisados segundo duas perspectivas: (1) coincidindo o eixo das abcissas com o eixo horizontal paralelo ao escoamento; (2) considerando o eixo das abcissas coincidente com a direcção e sentido do escoamento. Ao primeiro caso atribuiu-se o índice "0", resultando nas forças " F_{x_0} " e " F_{z_0} ". Do segundo caso resultaram as forças denominadas " F_x " e " F_z ". O momento " M_y " apenas teve uma designação uma vez que é independente da variação bidimensional dos eixos. Considerou-se que o momento assume valores positivos quando provoca uma rotação no sentido dos ponteiros do relógio.

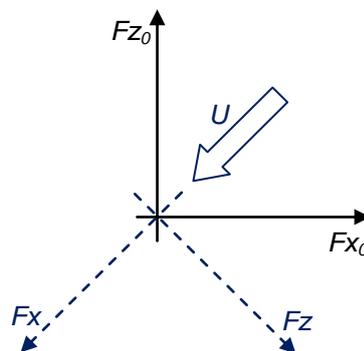


Figura 86 – Definição dos eixos relativamente à direcção do escoamento.

A conversão das forças e do momento nos coeficientes aerodinâmicos foi realizada por intermédio das Equações 59 e 60, respectivamente.

$$C = \frac{2 \times F}{\rho_{ar} \times U^2 \times A_r} \quad [59]$$

$$CM_z = \frac{2 \times M_z}{\rho_{ar} \times U^2 \times A_r \times L} \quad [60]$$

Nas equações anteriores, as forças (F) de resistência e de sustentação, assim como o momento (M), foram determinados por conversão do sinal da célula de carga. As dimensões de área característica ($A_r=L \cdot b_0$) e do comprimento (L) foram medidos directamente em cada ensaio. A rotação do ventilador foi variada de acordo com a velocidade de ventilação (U) desejada. A massa volúmica do ar de escoamento foi determinada através dos valores termodinâmicos do ar de escoamento, que foram medidos no laboratório na altura em que os ensaios foram realizados.

5.2.2. Resultados obtidos

Apresentam-se neste subcapítulo os coeficientes aerodinâmicos determinados, relativos aos diferentes ensaios realizados para as quatro cascas de eucalipto ($C18$, $C19$, $C20$ e $C26$), para os vários comprimentos de cada casca (L) e para as diferentes velocidades (U) e ângulos de incidência (α) do escoamento aplicado.

A análise de cada coeficiente é feita em função do ângulo de incidência do escoamento relativamente à casca de eucalipto. Teoricamente, para cada orientação α de uma partícula, corresponde um único valor de cada coeficiente aerodinâmico, uma vez que a variação das forças aplicadas na casca são proporcionais à variação do produto " $\rho_{ar} \cdot U^2 \cdot A_r$ ", para cada forma da partícula (que neste caso é sempre tubular) e para cada orientação α . Nesta perspectiva, a análise dos coeficientes aerodinâmicos foi efectuada apenas em função da direcção da partícula relativamente ao escoamento

A Figura 87 apresenta os resultados obtidos na determinação do coeficiente C_{x_0} , referido ao eixo horizontal, em função do ângulo de incidência do escoamento relativamente à casca de eucalipto que está posicionada na horizontal, com o rasgo voltado para cima.

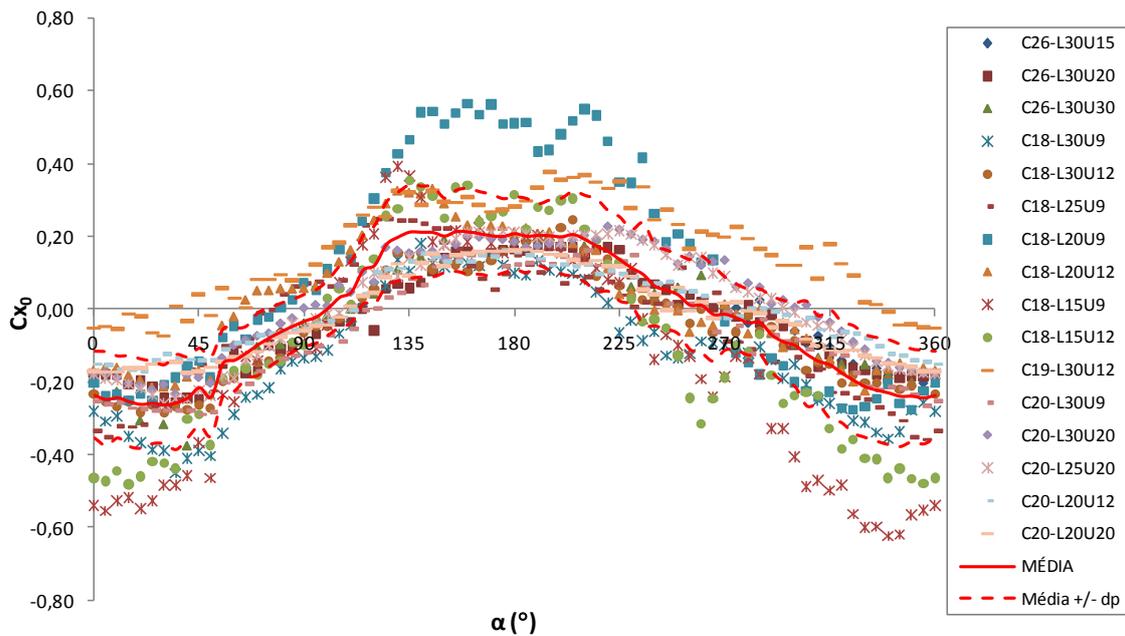


Figura 87 – Variação do coeficiente Cx_0 em função do ângulo de incidência do escoamento

Para ângulos de incidência entre $0^\circ < \alpha < 90^\circ$ e entre $270^\circ < \alpha < 360^\circ$ obtiveram-se valores negativos em virtude de o escoamento ser dirigido contrariamente ao sentido positivo do eixo dos XX (Figura 86). O baixo valor em módulo verificado para $0^\circ (=360^\circ)$ é justificável pelo facto de a área transversal ao escoamento ser muito reduzida (topo da casca aproximadamente tubular). Os valores praticamente nulos obtidos para $\alpha=90^\circ$ e para $\alpha=270^\circ$ são expectáveis, uma vez que nestes casos a direcção do escoamento é perpendicular ao eixo das abcissas. O pequeno desvio verificado poderá dever-se a irregularidades das cascas usadas. Entre $90^\circ < \alpha < 270^\circ$, os valores de Cx_0 assumem-se positivos uma vez que o escoamento é feito no sentido positivo do eixo das abcissas. Salienta-se ainda que os valores obtidos para os ângulos de 180° e de 0° são semelhantes em valor absoluto uma vez que a área transversal ao escoamento é a mesma. É apresentada ainda uma linha (*MÉDIA*) referente à média de Cx_0 , para cada valor de α , ladeada por duas linhas a tracejado (*Média +/- dp*) que correspondem aos valores da *MÉDIA* somados ou subtraídos do desvio padrão (*dp*).

O gráfico representado na Figura 88 apresenta os valores do coeficiente aerodinâmico Cz_0 (vertical) em função do ângulo α de incidência do escoamento.

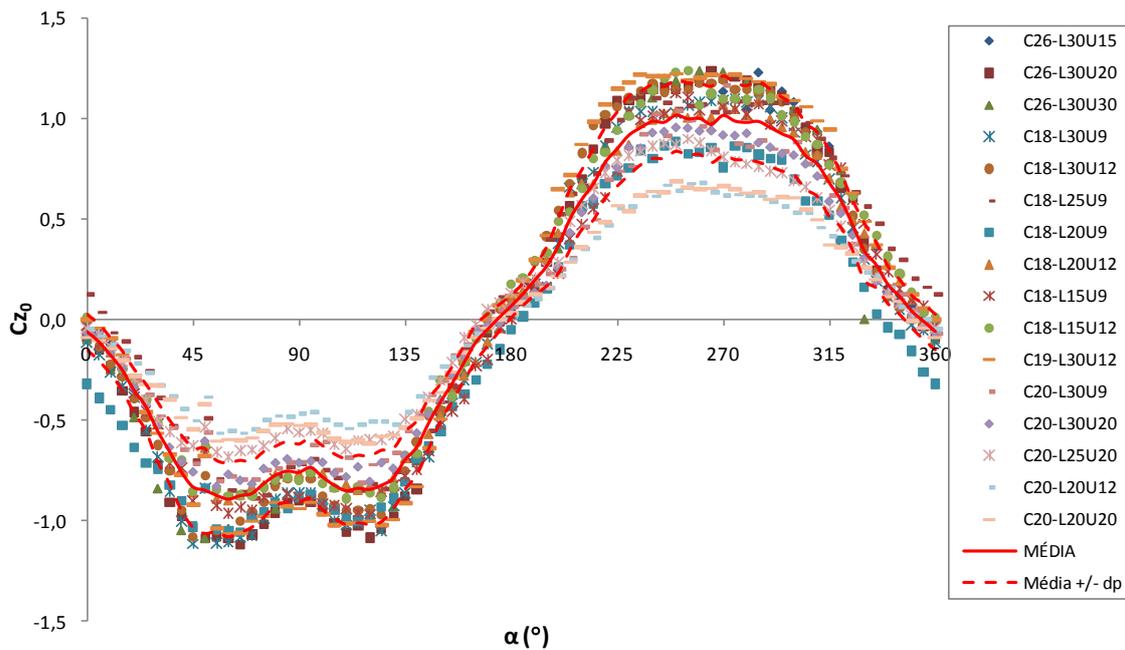


Figura 88 – Variação do coeficiente Cz_0 em função do ângulo de incidência do escoamento

Para $\alpha=0^\circ$ ($=360^\circ$) e para $\alpha=180^\circ$ o valor de Cz_0 é praticamente nulo porque o escoamento é horizontal (perpendicular ao eixo das ordenadas). O ligeiro desvio que se verifica resulta das irregularidades das cascas, como por exemplo o rasgo longitudinal. Naturalmente, entre 0° e aproximadamente 180° , o valor de α assume-se negativo, sendo que de forma inesperada o pico mais baixo não se apresenta nos 90° . Este desvio poderá resultar de erros de medição provocados pelo sistema de fixação da casca à célula de carga. Para $180^\circ < \alpha < 360^\circ$, Cz_0 toma valores positivos em virtude de a ventilação ser feita no sentido do eixo Fy_0 . O valor máximo obtido para $\alpha=270^\circ$ corresponde à média dos ensaios com maior área transversal ao escoamento a que corresponde uma maior força de resistência.

Os resultados obtidos para o coeficiente de resistência Cx em função do ângulo de incidência α , são apresentados na Figura 89.

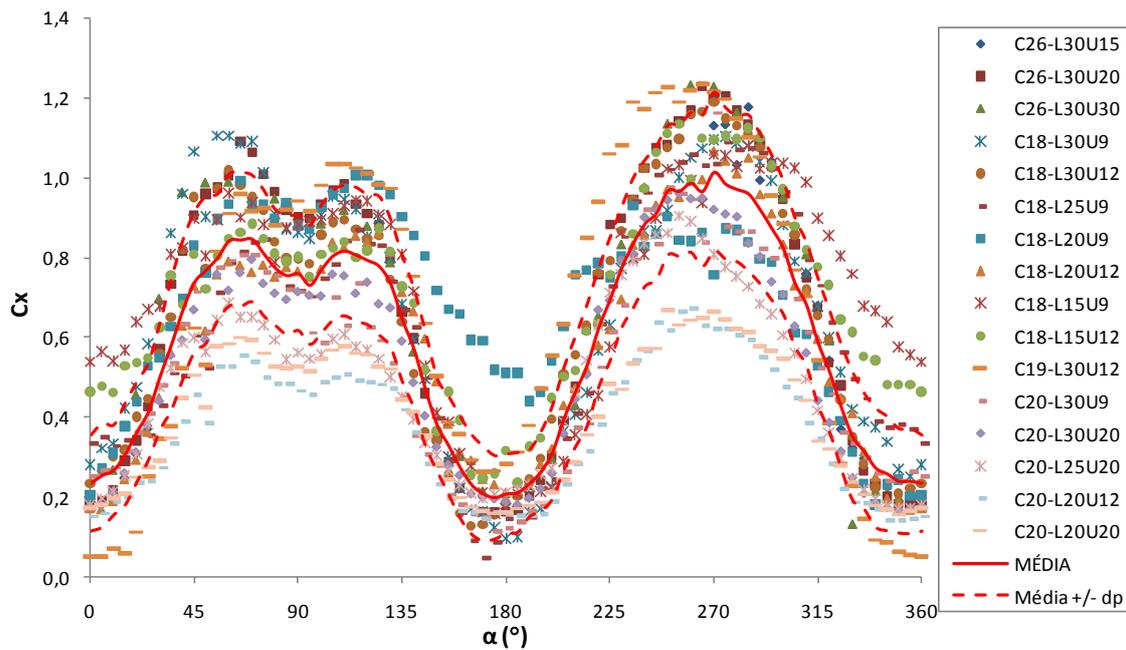


Figura 89 – Variação do coeficiente de resistência em função do ângulo de incidência do escoamento

Como seria de esperar, todos os seus valores são positivos uma vez que o eixo F_x está sempre orientado de acordo com o escoamento. Naturalmente os valores mais baixos de C_x correspondem aos ângulos em que o escoamento é perpendicular aos topos das cascas ($\alpha=0^\circ$, 180° e 360°). No mesmo sentido poderia esperar-se que os maiores valores de C_x se tivessem obtido para os ângulos de 90° e 180° . No entanto verifica-se que em torno de 90° há um comportamento inesperado o qual poderá dever-se a interferências causadas pelo sistema de fixação da casca.

A variação do coeficiente de sustentação em função do ângulo de incidência do escoamento é apresentada na Figura 90.

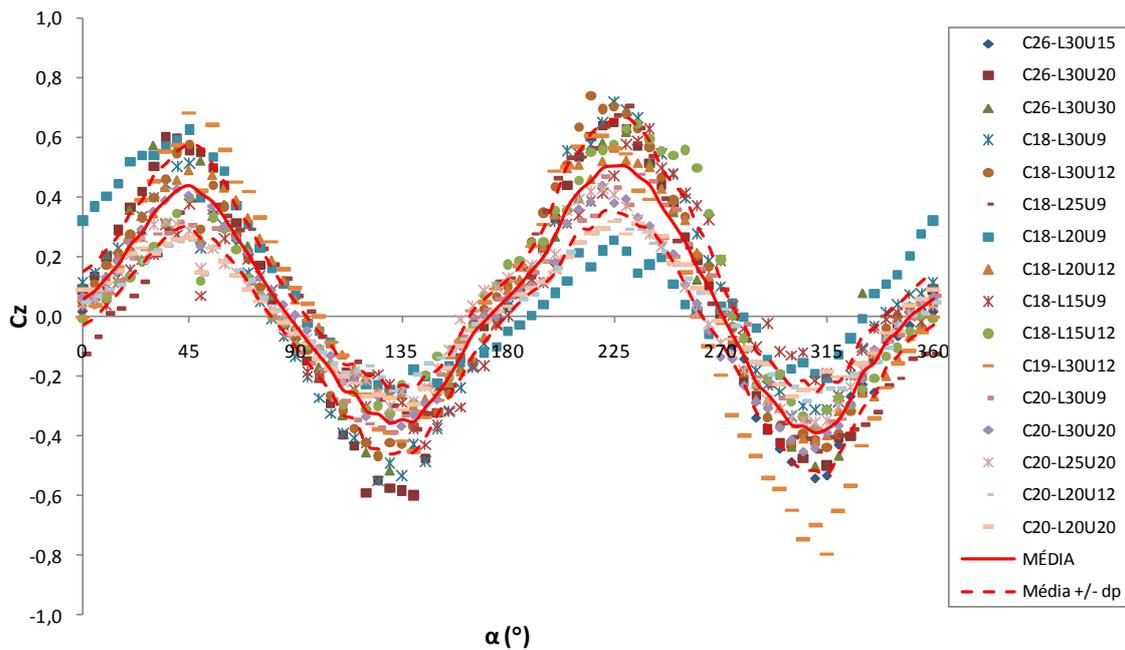


Figura 90 – Variação do coeficiente de sustentação em função do ângulo de incidência do escoamento

Neste gráfico poderá verificar-se que as forças de sustentação actuam de forma mais evidente nos ângulos intermédios 45° e 225° (valores positivos) e para os ângulos α de 135° e 315° (valores negativos). Para os casos em que o escoamento é paralelo à casca ($\alpha=0^\circ$, 180° e 360°) verifica-se que C_z se assume como ligeiramente positivo. Este facto é justificado pela existência do rasgo longitudinal que facilita o escape do ar de escoamento que circula no interior da casca tubular. É igualmente possível verificar que os picos atingidos entre 180° e 360° são em valor absoluto superiores àqueles obtidos para $0^\circ < \alpha < 180^\circ$. Este facto deve-se sobretudo à influência do rasgo longitudinal da casca de eucalipto.

A Figura 91 apresenta a variação do coeficiente de momento em função do ângulo de incidência α .

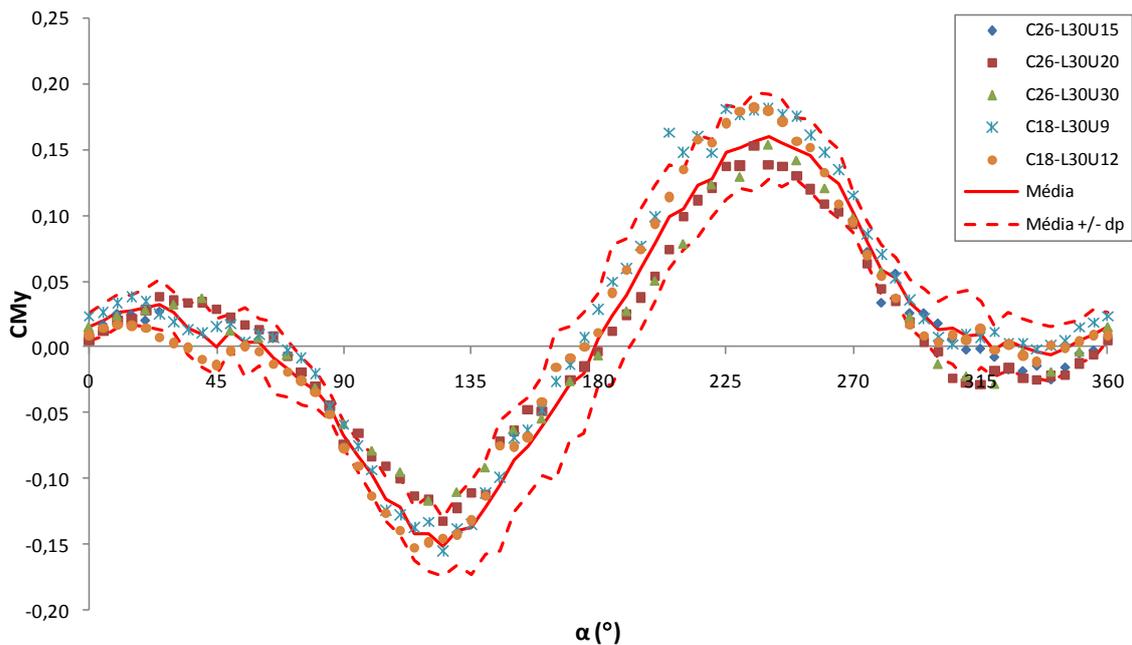


Figura 91 – Variação do coeficiente de momento em função do ângulo de incidência do escoamento.

Seria de esperar que o coeficiente de momento fosse próximo de zero para valores de α de 0° , 90° , 180° , 270° e 360° , o que com maior ou menor aproximação acontece. Seria igualmente expectável que os valores máximos de CM_y ocorressem para ângulos de incidência próximos de 45° e 225° , tal como os valores mínimos deveriam rondar $\alpha=135^\circ$ e $\alpha=315^\circ$. O gráfico da mesma figura apresenta uma grande heterogeneidade dos valores absolutos para $0^\circ \leq \alpha < 90^\circ$ e para $90^\circ \leq \alpha < 180^\circ$, quando o escoamento incide directamente no rasgo longitudinal. O mesmo acontece para os intervalos $]180^\circ - 270^\circ]$ e $]270^\circ - 360^\circ]$, em que o escoamento não incide directamente na casca de eucalipto. Nos intervalos referidos, o coeficiente de momento deveria apresentar valores sensivelmente simétricos mas com valor absoluto similar. O facto de não se notar este comportamento poder-se-á dever ao efeito do dispositivo de fixação da casca de eucalipto que provoca um momento maior do que aquele que a casca teria isoladamente. A existência do rasgo longitudinal poderia provocar alguma assimetria nos resultados, mas que seria bastante menor àquela verificada no gráfico.

5.2.3. Modelação dos resultados obtidos

Com base na linha média obtida para cada coeficiente aerodinâmico determinou-se um modelo de previsão dos coeficientes em função do ângulo de incidência do escoamento. A determinação do modelo foi feita com o auxílio do software *LAB Fit* (Silva e Silva, 2009), sendo o ajuste da equação aos dados laboratoriais feito pelo Algoritmo de *Levenberg - Marquardt*.

O modelo que melhor se ajustou aos resultados apresentados no subcapítulo anterior é o que se apresenta na Equação 62.

$$Z = a_1 * \sin(a_2 \times \theta + a_3) + a_4 \quad [61]$$

Na Tabela 6 são apresentados os parâmetros a_1 , a_2 , a_3 e a_4 que deverão ser aplicados na previsão de cada coeficiente aerodinâmico. A análise das figuras desenvolvidas no subcapítulo anterior permitiu verificar que o comportamento aerodinâmico é diferente para a situação em que o escoamento incide directamente no rasgo longitudinal (0° a 180°) e para a situação oposta (180° a 360°). Nesta perspectiva, os coeficientes do modelo foram determinados para os três intervalos de α para cada um dos coeficientes aerodinâmicos.

Tabela 6 – Coeficientes do modelo definido pela equação 62

Variável independente	a_1	a_2	a_3	a_4	r^2
$Cx_0 (0-360^\circ)$	0,2360	1,003	-3,156	-0,01352	0,98
$Cx_0 (0-180^\circ)$	-0,2385	1,241	-6,667	-0,01489	0,99
$Cx_0 (180^\circ-360^\circ)$	0,2368	0,8491	-2,472	-0,02098	0,99
$Cz_0 (0-360^\circ)$	0,9799	1,011	-4,664	-0,03177	0,99
$Cz_0 (0-180^\circ)$	-20,39	0,1894	-0,2864	19,50	0,94
$Cz_0 (180^\circ-360^\circ)$	0,8307	1,190	-5,501	0,2255	0,99
$Cx (0-360^\circ)$	0,3900	1,932	-9,100	0,5700	0,93
$Cx (0-180^\circ)$	0,3616	1,562	-2,372	0,4970	0,93
$Cx (180^\circ-360^\circ)$	0,4079	2,009	-9,354	0,6247	0,99
$Cz (0-360^\circ)$	0,3866	2,021	-7,817	0,04035	0,97
$Cz (0-180^\circ)$	0,3683	2,019	-1,481	0,02104	0,99
$Cz (180^\circ-360^\circ)$	0,4100	2,018	-7,884	0,04971	0,98
$C_{My} (0-360^\circ)$	0,07384	2,000	-7,885	0,003682	0,40
$C_{My} (0-180^\circ)$	-0,0865	1,949	-4,074	-0,04030	0,94
$C_{My} (180^\circ-360^\circ)$	0,0874	2,035	-8,593	0,0629	0,96

Os coeficientes de correlação permitem constatar a boa adequação dos modelos aos resultados obtidos laboratorialmente, exceptuando o coeficiente de momento C_{My} ($r^2=0,40$). Efectivamente, já antes tinha sido referido que os resultados obtidos originaram um gráfico (Figura 91) com pouca fiabilidade em virtude da elevada assimetria dos seus valores. Este problema pode dever-se ao efeito do dispositivo de fixação da casca que pode ter adulterado os resultados finais.

Os gráficos da Figura 92 à Figura 95 permitem constatar a boa adequação dos modelos determinados à linha média dos respectivos coeficientes

aerodinâmicos. Verifica-se que não há uma vantagem significativa na inclusão do rasgo longitudinal da casca uma vez que os modelos aplicados para o intervalo $0^\circ \leq \alpha \leq 360^\circ$ oferecem uma boa aproximação aos resultados obtidos laboratorialmente para o mesmo intervalo de valores. Esta constatação já tinha sido atingida pela análise da Tabela 6.

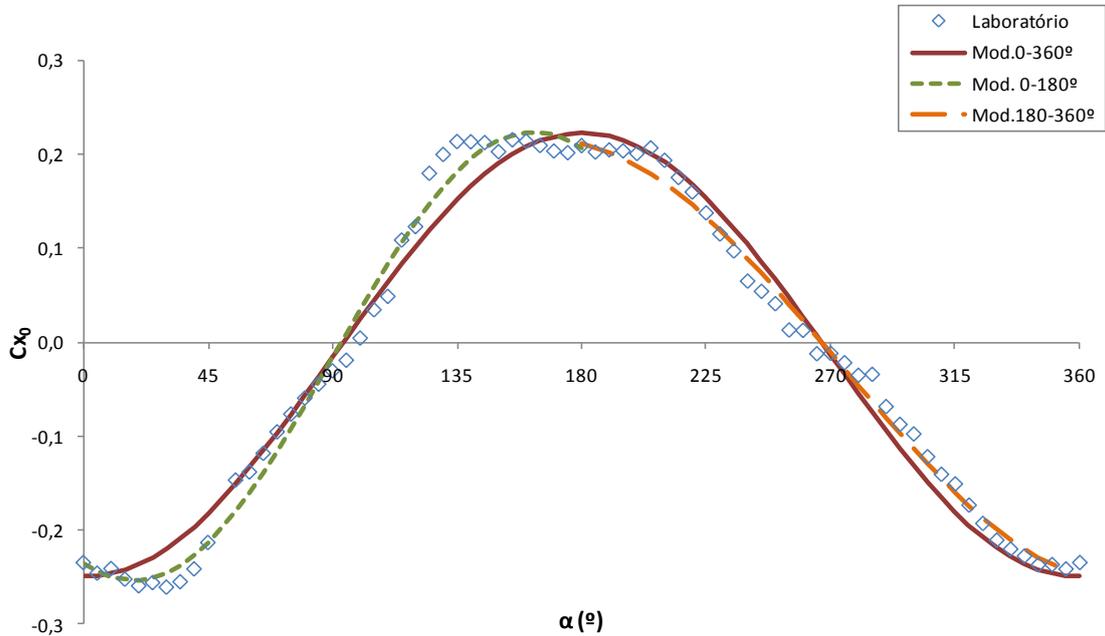


Figura 92 – Comparação entre a média dos dados de C_{x_0} obtidos em laboratório e os resultados determinados por aplicação dos modelos de previsão para o mesmo coeficiente aerodinâmico.

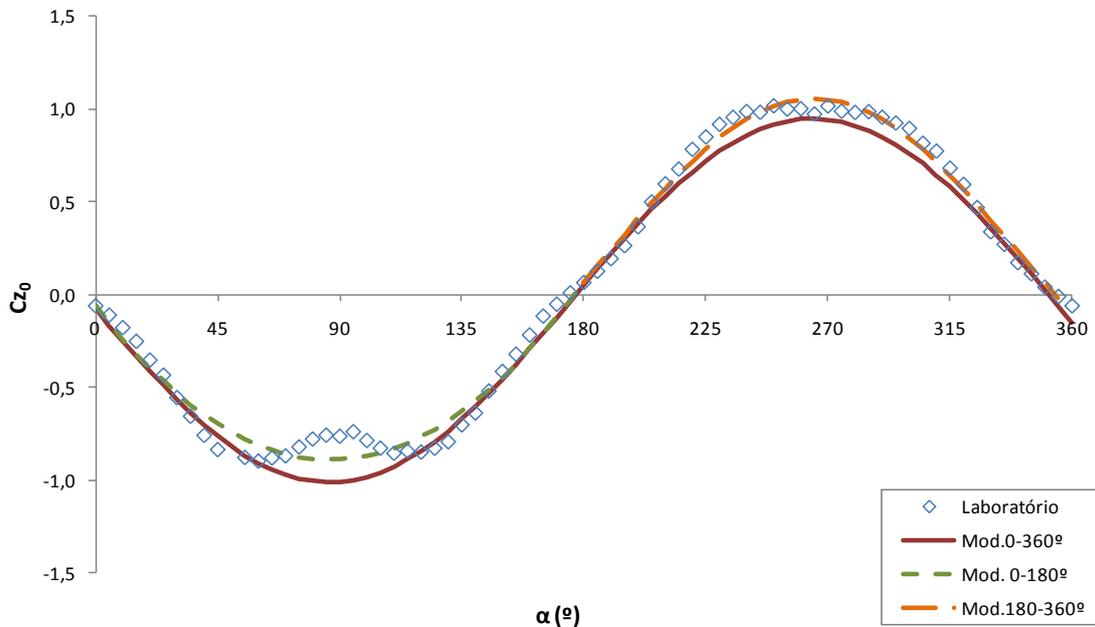


Figura 93 – Comparação entre a média dos dados de C_{y_0} obtidos em laboratório e os resultados determinados por aplicação dos modelos de previsão para o mesmo coeficiente aerodinâmico.

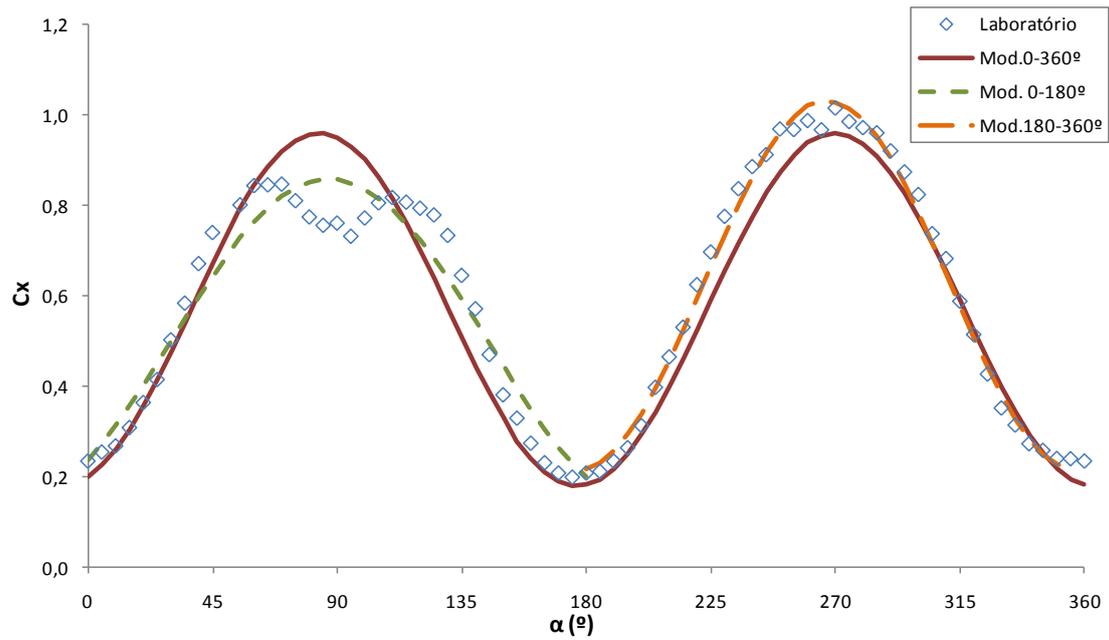


Figura 94 – Comparação entre a média dos dados do coeficiente de resistência C_x obtidos em laboratório e os resultados determinados por aplicação dos modelos de previsão para o mesmo coeficiente aerodinâmico.

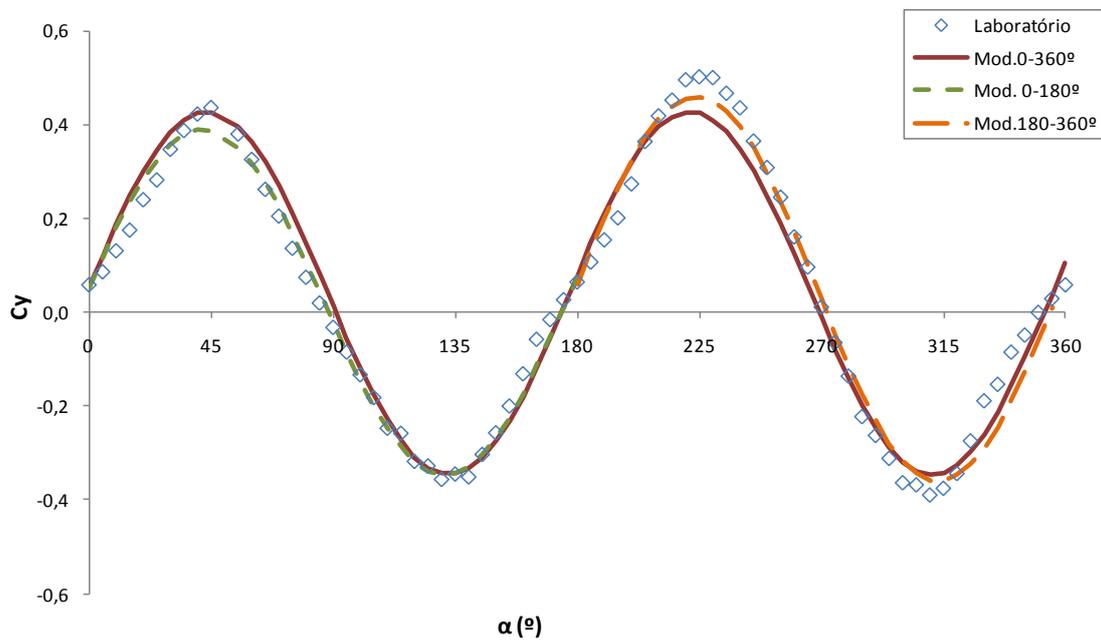


Figura 95 – Comparação entre a média dos dados do coeficiente de sustentação C_y obtidos em laboratório e os resultados determinados por aplicação dos modelos de previsão para o mesmo coeficiente aerodinâmico.

A Figura 96 apresenta os valores médios de CM_y em função de α , permitindo comparar estes valores laboratoriais com os resultados obtidos por aplicação do modelo de previsão.

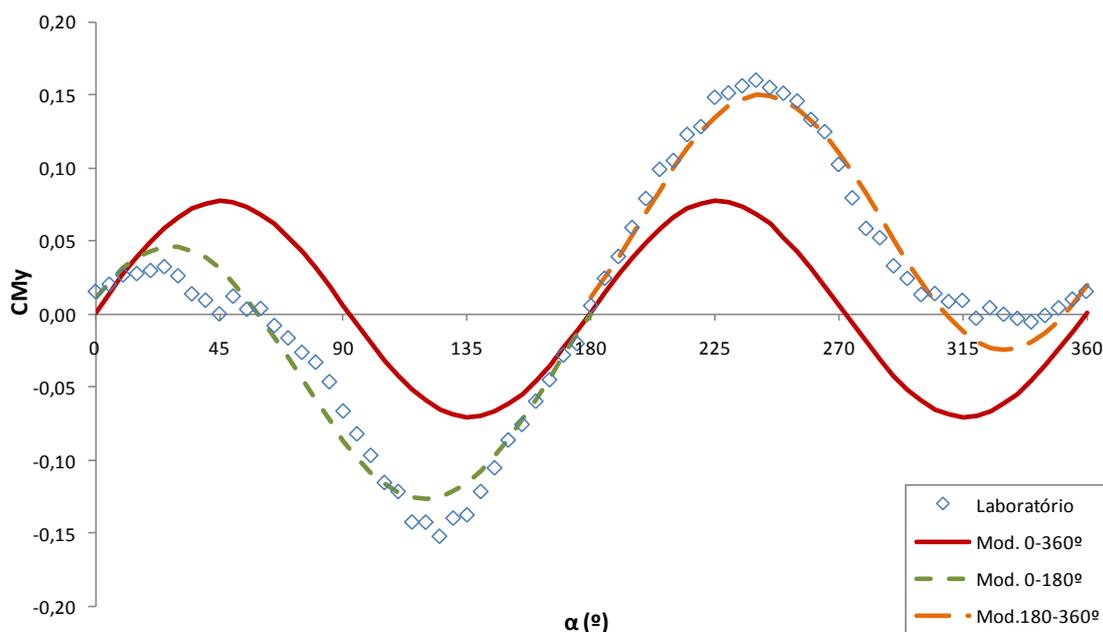


Figura 96 – Comparação entre a média dos dados do coeficiente de momento CM_y obtidos em laboratório e os resultados determinados por aplicação dos modelos de previsão para o mesmo coeficiente aerodinâmico.

Verifica-se uma boa adequação dos modelos que distinguem os intervalos $0^\circ \leq \alpha < 180^\circ$ e $180^\circ \leq \alpha < 360^\circ$ porém, tal como foi explicado anteriormente, estes resultados apresentaram uma assimetria que os tornou pouco fiáveis. O modelo encontrado para a previsão do coeficiente de momento CM_y , entre 0° e 360° , apresenta desvios consideráveis em relação aos resultados laboratoriais. No entanto, este modelo apresenta uma curva muito mais próxima daquilo que seria de esperar, tanto no que respeita à simetria, como no que diz respeito à localização dos seus extremos e valores para os quais $CM_y = 0$. Nesta perspectiva, para a prossecução do estudo, irá ser usado o modelo de previsão do coeficiente de momento CM_y correspondente ao intervalo de 0° a 360° .

Refira-se ainda que há uma grande dificuldade na definição da posição do rasgo longitudinal da casca de eucalipto no seu transporte pelo vento uma vez que, para além dos movimentos em torno do eixo transversal, também se verifica uma rotação em torno do seu eixo longitudinal que é altamente dependente de pequenas alterações das propriedades físicas da casca e do escoamento. Este facto reforça a vantagem da aplicação do modelo de previsão de CM_y encontrado para $0^\circ \leq \alpha < 360^\circ$.

5.3. Síntese dos ensaios aerodinâmicos

Este capítulo foi fundamentalmente dividido em 2 partes: (1) a análise das velocidades terminais de queda das pinhas e das cascas de eucalipto e (2) o estudo das características aerodinâmicas das cascas de eucalipto.

Na análise das velocidades terminais das pinhas em função das suas características físicas, verificou-se que para além dos parâmetros C_x , ρ_{ar} , U_2 , m_0 e A_r , normalmente considerados para outras partículas, também o grau de abertura G_A da pinha assume uma grande importância na determinação de U_T .

Foi analisada variação da velocidade terminal de várias pinhas ao longo do seu processo de combustão. Verificou-se que existe uma diminuição inicial de U_T de cerca de 17% do seu valor inicial, mantendo-se valor de U_T/U_{T0} sensivelmente constante até que cerca de 85% da massa da pinha seja consumida.

No estudo da velocidade terminal das cascas de eucalipto pode verificar-se a variação da velocidade terminal destas partículas em função da sua orientação α relativamente ao escoamento incidente. No entanto, estes ensaios levaram a valores de U_T , que se suspeita ser demasiadamente altos, tendo em conta os resultados obtidos por *Ellis (2000)* e pela observação que se pôde efectuar da flutuação das cascas de eucalipto no *TCV*.

A determinação dos coeficientes aerodinâmicos foi realizada apenas para as cascas de eucalipto uma vez que são os combustíveis que apresentam maior perigosidade na proliferação de um incêndio por focos secundários. Para além desta razão, os ensaios de combustão das pinhas foram limitados na velocidade do escoamento que ficou aquém da velocidade terminal de queda das pinhas. Nesta perspectiva, todos os estudos que se seguiram, tal como a determinação dos coeficientes aerodinâmicos, foram realizados apenas para as cascas de eucalipto. Salienta-se que a determinação de U_T para as pinhas foi realizada em simultâneo com os ensaios de combustão.

A análise dos coeficientes aerodinâmicos teve em consideração a existência do corte longitudinal característico das cascas tubulares utilizadas. Verificou-se que a influência desta irregularidade não assume uma relevância tão evidente que exija uma análise diferenciada de acordo com a sua localização face ao escoamento a que a casca é sujeita.

Desenvolveu-se um modelo de previsão dos coeficientes aerodinâmicos em função da orientação α da partícula relativamente ao escoamento incidente. Este modelo denotou algumas dificuldades de ajuste do coeficiente de momento CM_y em virtude dos resultados obtidos laboratorialmente para este parâmetro terem apresentado valores pouco consentâneos com aquilo que seria expectável. Este é um aspecto que deve ser tido em consideração na prossecução do estudo.

6. Simulação do transporte de uma partícula incandescente

Os resultados obtidos, e desenvolvidos nos capítulos anteriores, permitiram conceber um programa de cálculo que simula o transporte de uma partícula pelo vento. Este programa estima o trajecto bidimensional da partícula e determina a distância horizontal do seu percurso. Mediante dados de entrada, como a velocidade horizontal do vento, as características da partícula e a sua posição e orientação iniciais, este programa calcula e representa a trajectória que a partícula irá seguir ao longo do seu transporte. Determina igualmente o tempo que a partícula demora a cair possibilitando analisar o estado de incandescência da partícula no momento em que esta atinge o solo.

Este programa foi desenvolvido apenas para cascas de eucalipto semelhantes às que foram testadas em laboratório em virtude de ser o único combustível analisado para o qual foram determinados todos os modelos necessários.

6.1. Pressupostos e explicação do programa

Conforme foi referido anteriormente, a fase de transporte de uma partícula conhece duas etapas distintas: (1) a ascensão da partícula na pluma térmica e (2) o transporte da partícula pelo vento horizontal. A transição entre estas duas fases é feita de forma gradual.

A fase de elevação da partícula é caracterizada por uma proximidade à frente de chama original que confere uma temperatura muito elevada ao ar de escoamento com um menor valor do teor em oxigénio relativamente ao seu valor normal ($\approx 21\%$). Nos ensaios laboratoriais, o ar de escoamento provinha da atmosfera do laboratório com temperaturas em torno dos 15°C e um teor de oxigénio por volta dos 21% . Uma menor temperatura conduz naturalmente a menores coeficientes de decaimento de massa da partícula, enquanto maiores valores do teor de oxigénio produzem um efeito contrário. Uma vez que estes parâmetros não foram sujeitos a qualquer tipo de análise, considerou-se que a aplicação dos modelos de combustão numa localização muito próxima do fogo original, como por exemplo no transporte na pluma térmica, poderá levar a resultados desviados da realidade. Desta forma, o programa foi desenvolvido para uma localização em que não é sentida a influência do incêndio. Nesta perspectiva, o programa considera que a determinado momento, a partícula é largada a uma determinada altura, com uma certa velocidade e direcção, estando a sua temperatura em equilíbrio com a temperatura ambiente. Estes valores são definidos pelo utilizador do programa, que os poderá introduzir como dados de entrada. Também as características da casca de eucalipto de forma tubular e as condições atmosféricas são definidas pelo utilizador.

Considere-se que a partícula se encontra elevada a uma altura Z com todas as componentes iniciais de velocidade iguais a 0 m.s^{-1} . Tenha-se igualmente que a posição inicial da casca de eucalipto corresponde ao seu eixo longitudinal paralelamente ao eixo dos YY (Figura 97). Uma vez que a análise efectuada é bidimensional, assume-se que a rotação da casca se dá no plano definido pelo eixo YY e pela direcção do escoamento. Tem-se, para efeitos de cálculo, a força segundo o eixo dos XX_0 , paralela ao vento meteorológico horizontal, e a força no eixo XX , paralela à direcção do escoamento resultante do vento meteorológico e do movimento da partícula. O eixo ZZ_0 , coincide com o eixo vertical de referência, enquanto o eixo ZZ corresponde ao eixo perpendicular a YY e a XX . O ângulo α , descrito pela direcção da maior dimensão da partícula e pela direcção do vento, definido para este sistema, é definido da mesma forma descrita para os ensaios aerodinâmicos. Por exemplo na Figura 97, para a posição 1, o valor de α é 270° , se considerarmos que o rasgo longitudinal se encontra voltado para os valores positivos do eixo XX_0 .

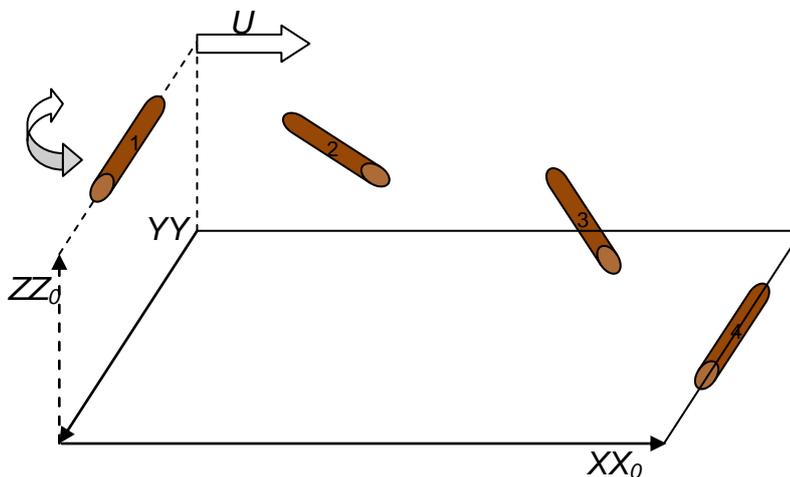


Figura 97 – Esquema do transporte de uma casca de eucalipto

A Figura 98 apresenta um exemplo das forças actuantes na partícula durante um instante do transporte em que a partícula se encontra com um movimento descendente. No primeiro esquema a partícula inicia o seu movimento em que as forças aplicadas resultam do vento meteorológico (U) e da força da aceleração da gravidade (g) das quais resulta o movimento da partícula ($-F_R$) apresentado na segunda figura. A este movimento opõe-se uma resistência (F_R) da partícula que, somada com o vector U , resulta num vector (v_x) que corresponde à velocidade de escoamento a que a partícula é efectivamente sujeita. A força de escoamento resultante (v_x) é a força de escoamento à qual todos os cálculos (aerodinâmicos e de combustão) devem ser referidos, tanto em direcção como em intensidade, porque é aquele escoamento a que efectivamente a partícula está sujeita.

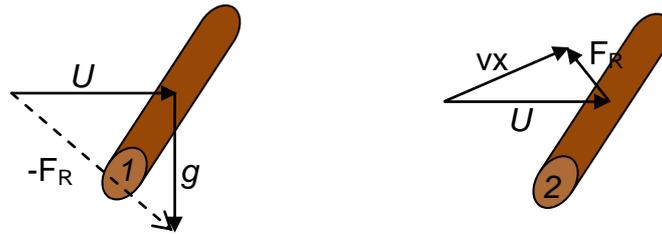


Figura 98 – Esquema das forças do escoamento aplicadas numa casca de eucalipto

Caso a partícula não apresentasse perda de massa por combustão, haveria um momento em que a aceleração da partícula era nula, deslocando-se com uma velocidade (v_x) relativa ao vento (U) idêntica à sua velocidade terminal. Também a velocidade angular de rotação da partícula tenderia para se anular na posição mais estável da partícula.

A Figura 99 apresenta um esquema sucinto do algoritmo do programa de simulação.

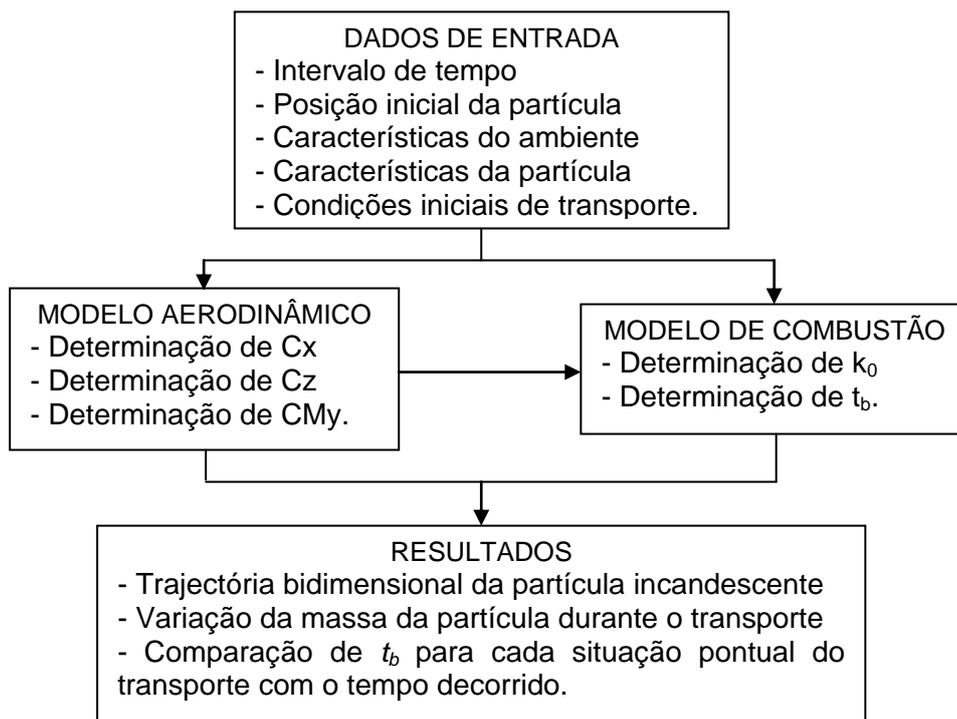


Figura 99 – Algoritmo do programa de simulação

Os dados de entrada são introduzidos pelo utilizador de acordo com o problema em questão. A definição do intervalo de tempo (Δt) é de grande importância, uma vez que define a qualidade dos gráficos pretendidos. A escolha de um valor de Δt demasiadamente baixo, fará com que o gráfico não contemple todos os resultados do percurso da partícula, enquanto um valor alto conduz a uma simulação com menos pontos calculados. O valor ideal de Δt é

aquele que leva a que a partícula atinja o solo no último ponto do gráfico. Uma vez que existe um máximo de 441 pontos, o utilizador poderá fazer uma primeira simulação verificando o tempo de transporte. O valor ideal de corresponde ao tempo de transporte dividido por 441.

No instante inicial da simulação a partícula pode já encontrar-se em movimento devendo o utilizador inserir os respectivos dados no campo das condições iniciais de transporte.

Os cálculos que utilizam os modelos aerodinâmicos permitem determinar a velocidade e a orientação da partícula relativamente ao escoamento incidente em qualquer instante. Estes valores são utilizados nos modelos de combustão.

O principal resultado do programa é um gráfico que apresenta a trajetória da partícula num plano vertical paralelo à direcção do vento meteorológico. Também é possível analisar o estado de incandescência da partícula quando esta atinge o solo, através do decaimento de massa da partícula ou através da comparação do tempo de combustão t_b e da sua comparação com o tempo decorrido.

No seu actual modelo de concepção, este programa, apenas tem aplicação num terreno horizontal em que não se verificam forças verticais do vento, tanto meteorológico, como das correntes de convecção do incêndio. Este programa aplica-se unicamente para casca de eucalipto da espécie utilizada, com forma tubular, podendo variar-se a massa e as dimensões. Não foram realizados cálculos para determinação do limite máximo de aplicação do programa relativo à massa e dimensões da partícula, sendo as características das partículas ensaiadas, o valor de referência ($15 < L[cm] < 30$; $2,3 < b_0[cm] < 2,8$; $0,8 < e[mm] < 3,0$; $9 < m[g] < 29$).

6.2. Definição e Explicação do programa

No início da utilização do programa, deverão ser introduzidos dados de entrada necessários para a aplicação dos cálculos. Os dados de entrada foram divididos em quatro grupos que são desenvolvidos de seguida.

Dados de entrada

- Intervalo de tempo.
 - $\Delta_t [s]$ - intervalo de tempo entre dois cálculos;
- Posição inicial da partícula
 - $Z_i [m]$ - altura inicial da partícula;

- X_i [m]- posição inicial da partícula segundo o ponto referência horizontal.
- Características ambientais
 - T [°C]- temperatura média ambiente;
 - ρ_{ar} [kg.m⁻³]- massa volúmica do ar para as condições médias de temperatura considerando o valor normal da pressão atmosférica.
 - $U_{x_{0,10}}$ [m.s⁻¹]- componente horizontal da velocidade do vento a 10 m de altura;
 - p - coeficiente de rugosidade do coberto do solo para a estabilidade atmosférica definida.
- Propriedades da casca de eucalipto
 - m_0 [g]- massa inicial da casca;
 - L_0 [cm]- comprimento inicial da casca;
 - b_0 [cm]- diâmetro médio da secção da casca;
 - e [mm]- espessura da casca;
 - b_1 [cm]- largura média dos topos da casca desenrolada.
 - G_E - grau de enrolamento da casca; não é dado de entrada, sendo calculado pela fórmula:

$$G_E = \frac{b_1}{P} = \frac{b_1}{\pi \times b_0} \quad [62]$$

- Condições iniciais do transporte
 - $v_{x_{0,0}}$ [m.s⁻¹]- componente horizontal da velocidade inicial da partícula;
 - $v_{z_{0,0}}$ [m.s⁻¹]- componente vertical da velocidade inicial da partícula;
 - α_0 [°]- ângulo descrito pelo eixo longitudinal da partícula e a direcção horizontal;
 - ω_0 [°.s⁻¹]- velocidade angular inicial da partícula;
 - θ_0 [°]- ângulo original de propagação da combustão na partícula, sendo que “0°” corresponde a uma progressão horizontal da direita para a esquerda e 90° corresponde a um avanço vertical da chama, de baixo para cima.

Perante os dados introduzidos e definidos pelo utilizador, o programa desenvolve uma sequência de cálculos que são seguidamente detalhados.

Sequência de cálculos

- a) t [s] – tempo decorrido no instante n ;

$$t_n = t_{n-1} + \Delta t \quad [63]$$

- b) Ux_{0n} [m.s⁻¹] – componente horizontal da velocidade do vento à altura Z_n , relativamente a um ponto parado;

$$Ux_{0n} = \left(\frac{z_{0n}}{10}\right)^p \times Ux_{010} \quad [64]$$

- c) Ux_{0reln} [m.s⁻¹] – Componente horizontal da velocidade do vento relativamente à partícula;

$$Ux_{0reln} = Ux_{0n} - vx_{0n-1} \quad [65]$$

- d) Uz_{0reln} [m.s⁻¹] – Componente vertical da velocidade do vento relativamente à partícula;

$$Uz_{0reln} = vz_{0n-1} \quad [66]$$

- e) ψ [°] – ângulo descrito por F_x e F_{x0} .

$$\psi_n = \begin{cases} 90, \text{ se } Ux_{0reln} = 0 \\ 180 + \text{atan}\left(\frac{Uz_{0reln}}{Ux_{0reln}}\right), \text{ se } Uz_{0reln} \leq 0 \text{ e } Ux_{0reln} \neq 0 \\ \text{atan}\left(\frac{Uz_{0reln}}{Ux_{0reln}}\right), \text{ se } Uz_{0reln} > 0 \text{ e } Ux_{0reln} \neq 0 \end{cases} \quad [67]$$

- f) Cz_n – Coeficiente de sustentação resultante do escoamento relativo actuante na partícula;

$$Cz_{0n} = 0,3866 \times \cos(2,021 \times \alpha_n - 7,817) - 0,04035 \quad [68]$$

- g) Fz_n [N] – Força de sustentação resultante do escoamento relativo actuante na partícula;

$$Fz_n = \frac{1}{2} \times \rho_{ar} \times b_0 \times L_n \times vx_n^2 \times Cz_{0n} \quad [69]$$

- h) Fz_{0n} [N] – Componente vertical da força do escoamento relativo actuante na partícula;

$$Fz_{0n} = Fx_n \times \text{sen}(\psi) + Fz_n \times \text{cos}(\psi) \quad [70]$$

i) **$az_{0n} [m.s^{-2}]$** – componente vertical da aceleração da partícula;

$$az_{0n} = 9,81 - \frac{Fz_{0n}}{m_n} \quad [71]$$

j) **$vz_{0n} [m.s^{-1}]$** – componente vertical da velocidade da partícula ;

$$vz_{0n} = vz_{0n-1} + az_{0n} \times \Delta t \quad [72]$$

k) **$Z_{0n} [m]$** – altura da partícula no instante de tempo t_n ;

$$Z_{0n} = Z_{0n-1} - vz_{0n-1} \times \Delta t \quad [73]$$

l) **Cx_n** – Coeficiente de resistência resultante do escoamento relativo actuante na partícula;

$$Cx_{0n} = 0,3900 \times \text{cos}(1,932 \times \alpha_n - 9,100) + 0,5700 \quad [74]$$

m) **$Fx_n [N]$** – Força de resistência resultante do escoamento relativo actuante na partícula;

$$Fx_n = \frac{1}{2} \times \rho_{ar} \times b_0 \times L_n \times vx_n^2 \times Cx_{0n} \quad [75]$$

n) **$Fx_{0n} [N]$** – Componente horizontal da força do escoamento relativo actuante na partícula;

$$Fz_{0n} = Fx_n \times \text{cos}(\psi) - Fz_n \times \text{sen}(\psi) \quad [76]$$

o) **$ax_{0n} [m.s^{-2}]$** – componente horizontal da aceleração da partícula;

$$ax_{0n} = \frac{Fx_{0n}}{m_n} \quad [77]$$

p) **$vx_{0n} [m.s^{-1}]$** – componente horizontal da velocidade da partícula ;

$$vx_{0n} = vx_{0n-1} + ax_{0n} \times \Delta t \quad [78]$$

q) **$X_{0n} [m]$** – posição inicial da partícula segundo a referência horizontal no instante de tempo t_n ;

$$X_{0n} = X_{0n-1} - vx_{0n-1} \times \Delta t \quad [79]$$

- r) α_n [°] – ângulo descrito pelo eixo longitudinal da partícula, com o rasgo longitudinal voltado para cima, e a direcção do escoamento resultante do movimento da partícula e do vento;

$$\alpha_n = \begin{cases} \alpha_{2n-1} - \text{atan}\left(\frac{vx_{0reln}}{vz_{0reln}}\right), \text{ se } vz_{0reln} \neq 0 \\ \alpha_{2n-1} - 90, \text{ se } vz_{0reln} = 0 \text{ e } vx_{0reln} \neq 0 \\ \alpha_{2n-1}, \text{ se } vz_{0reln} = 0 \text{ e } vx_{0reln} = 0 \end{cases} \quad [80]$$

- s) vx_n [m.s⁻¹] – módulo da velocidade relativa do escoamento na partícula;

$$vx_n = \sqrt{vz_{0reln}^2 + vx_{0reln}^2} \quad [81]$$

- t) CMz_n – Coeficiente de momento em torno do eixo perpendicular ao plano XZ.

$$CMz_n = 0,07384 \times \cos(2 \times \alpha_n - 7,885) + 0,003682 \quad [82]$$

- u) Mz_n [N.m] – Momento em torno do eixo perpendicular ao plano XZ.

$$Mz_n = \frac{1}{2} \times \rho_{ar} \times b_0 \times L_n \times L_n \times vx_n^2 \times CMz_n \quad [83]$$

- v) Mr_n [N.m] – Resistência ao momento em torno do eixo perpendicular ao plano XZ.

$$Mr_n = Cx_{90^\circ} \times \rho_{ar} \times \omega_{n-1}^2 \times b_0 \times \frac{\left(\frac{L_n}{2}\right)^4}{4} \times -\text{sinal}(\omega_{n-1}) \quad [84]$$

O valor de Cx_{90° foi determinado através da Equação 62 [ver modelo Cx] para o ângulo de 90°. O valor obtido foi de 0,951.

- w) α_{1n} [°] – ângulo descrito pelo eixo longitudinal da partícula com o eixo horizontal;

$$\alpha_{1n} = \alpha_{1n-1} + \omega_n \times \Delta t \quad [85]$$

- x) α_{2n} [°] – ângulo α_{1n} [°] reduzido ao intervalo de [0°,360°]

- y) ω_n [°.s⁻¹] – velocidade angular do eixo longitudinal da partícula;

$$\omega_n = \omega_{n-1} + \varpi_n \times \Delta t \quad [86]$$

z) ω_n [$^\circ \cdot s^{-2}$] – aceleração angular do eixo longitudinal da partícula;

$$\omega_n = \frac{Mz_n + Mr_n}{I_{casca\ n}} \quad [87]$$

aa) θ'_n [$^\circ$] – ângulo da direcção de propagação da combustão na partícula, segundo a Figura 43;

$$\theta'_n = \theta'_{n-1} - (\alpha_n - \alpha_{n-1}) \quad [88]$$

bb) θ''_n [$^\circ$] – ângulo θ'_n [$^\circ$] reduzido ao intervalo de $[0^\circ, 360^\circ]$;

cc) θ_n [$^\circ$] – transformação de θ'_n [$^\circ$] ao sistema de eixos definido no modelo da Equação 55, para determinação de k_0 ;

dd) $k_{0\ n}$ [s^{-1}] – coeficiente de decaimento de massa no intervalo de tempo $[t_n, t_{n-1}]$

$$\begin{cases} k_{0\ n} = \frac{\exp[-1,74 + 13,32 \times \sin(0,13 \times \theta_n) + 0,73 \times vx_n - 0,08 \times vx_n^2]}{1000}; \text{ se } Z_{0\ n} \neq 0 \\ k_{0\ n} = \frac{\exp[-0,50 + 3,30 \times \sin(1,41 \times \theta_n)]}{1000}; \text{ se } Z_{0\ n} = 0 \text{ (atingiu o solo)} \end{cases}$$

[89]

ee) m_n [kg] – massa da partícula no instante t_n ;

$$m_n = m_{n-1} \times \exp[-k_{0\ n-1} \times (t_n - t_{n-1})] \quad [90]$$

ff) L_n [m] – comprimento da partícula no instante t_n ;

$$L_n = m_n \times \frac{L_0}{m_0} \quad [91]$$

gg) $I_{casca\ n}$ – momento de inércia da partícula no instante t_n ;

$$I_{casca} = \frac{1}{12} \times (m_n \times L_n^2) + \frac{1}{4} \times m_n \times \left[\left(\frac{b_0}{2} \right)^2 + \left(\frac{b_0 - e \times G_E}{2} \right)^2 \right] \quad [92]$$

hh) $t_{b\ n}$ [s] – tempo restante de combustão da partícula nas condições do intervalo de tempo $[t_n, t_{n-1}]$

$$\begin{cases} t_{bn} = \frac{\exp[4,80 + 0,23 \times \sin(1,42 \times \theta_n) - 0,07 \times vx_n - 0,003 \times vx_n^2]}{1000}; \text{ se } Z_{0n} \neq 0 \\ t_{bn} = \frac{\exp[5,56 + 0,51 \times \sin(2,90 \times \theta_n)]}{1000}; \text{ se } Z_{0n} = 0 \text{ (atingiu o solo)} \end{cases}$$

[93]

A Figura 100 apresenta de forma esquematizada a seqüência de cálculos do programa, dando uma perspectiva diferente da ligação entre as diversas variáveis.

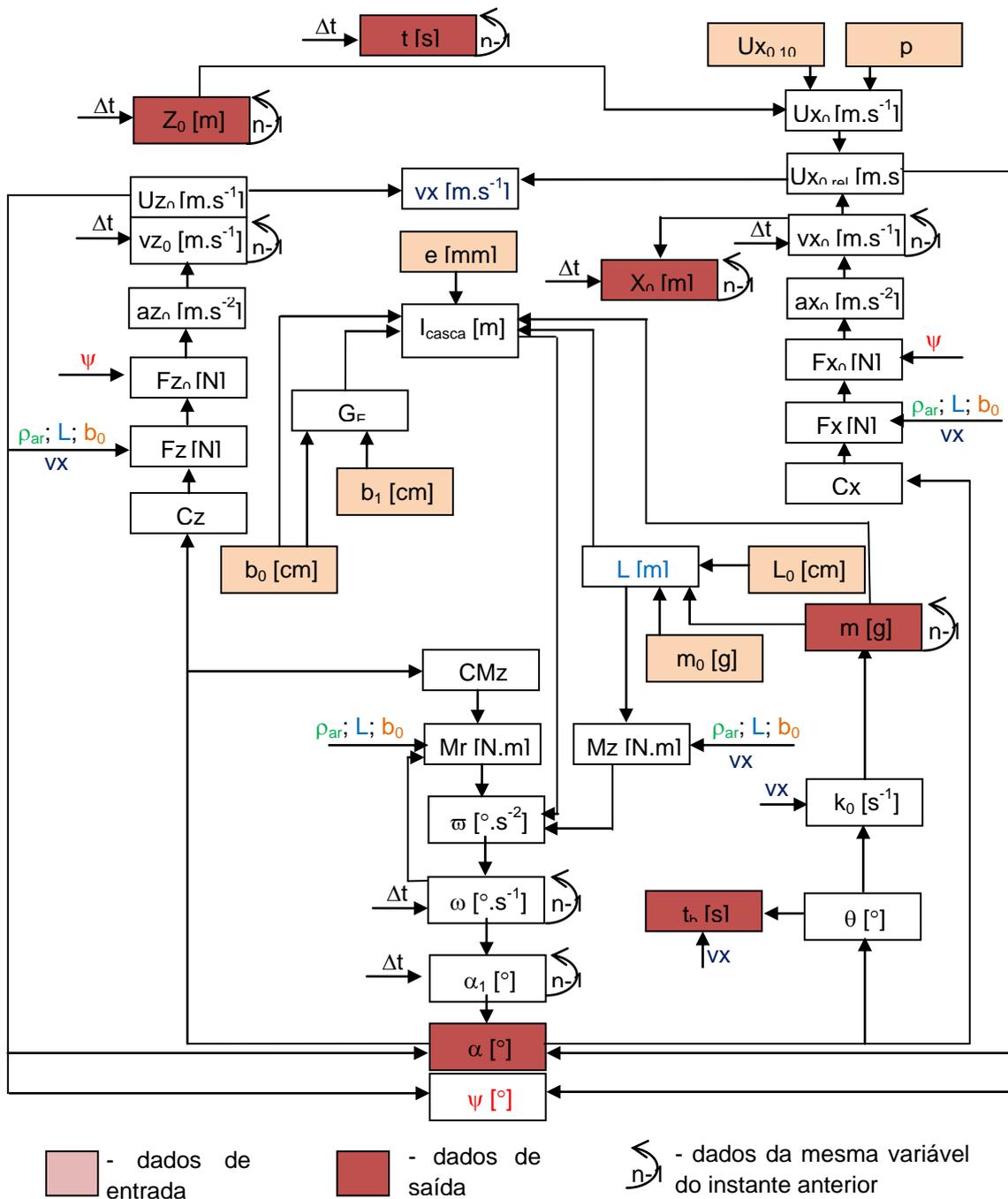


Figura 100 – Esquema da seqüência de cálculos.

Esta figura permite perceber tanto os dados de entrada necessários para o cálculo de cada variável, como a utilização de cada parâmetro na sequência de cálculo. Salientam-se, com preenchimento a cores, os principais dados de entrada introduzidos pelo utilizador e os resultados mais importantes que originam os gráficos finais. Os parâmetros assinalados, que utilizam os dados da mesma variável no instante anterior, usam no instante inicial os dados de entrada definidos pelo utilizador (por exemplo no instante $t=0s$, o valor de m corresponde à massa inicial m_0 introduzida pelo utilizador).

Saída de resultados

Após a introdução dos dados pelo utilizador e perante os cálculos anteriormente especificados, são apresentados os gráficos de saída que traduzem o transporte de uma partícula incandescente. Na Tabela 7 apresentam-se os dados de entrada de uma partícula sujeita às condições ambientais definidas.

Tabela 7 – dados de entrada do exemplo de simulação

Ambiente		Partícula		Condições iniciais	
T_a (°C)	30	m_0 (g)	10	Z_i (m)	120
p	0,2	L_0 (cm)	30	X_i (m)	0
$U_{x_{0,10}}$ (m.s ⁻¹)	10	b_0 (cm)	2,5	vx_0 (m.s ⁻¹)	0
		e (mm)	1	vz_0 (m.s ⁻¹)	0
		b_1 (cm)	12	α_0 (°)	90
				ω_0 (°.s ⁻¹)	0
Δt (s)	0,02			θ_0 (°)	0

A escolha dos resultados de entrada teve em consideração um dia ventoso, com calor ($T=30^{\circ}C$), uma atmosfera com ligeira instabilidade num terreno com vegetação rasteira ($p=0,2$). A inicial da partícula ($Z_i=120\ m$) corresponde a uma altura de chama contínua de $9,8\ m$ (Albini, 1981b).

A Figura 101 representa a trajetória da partícula, podendo ver-se que quando a partícula se aproxima do solo (aproximadamente para $Z < 10\ m$), em que a velocidade do vento diminui drasticamente, a trajetória assume uma maior componente vertical.

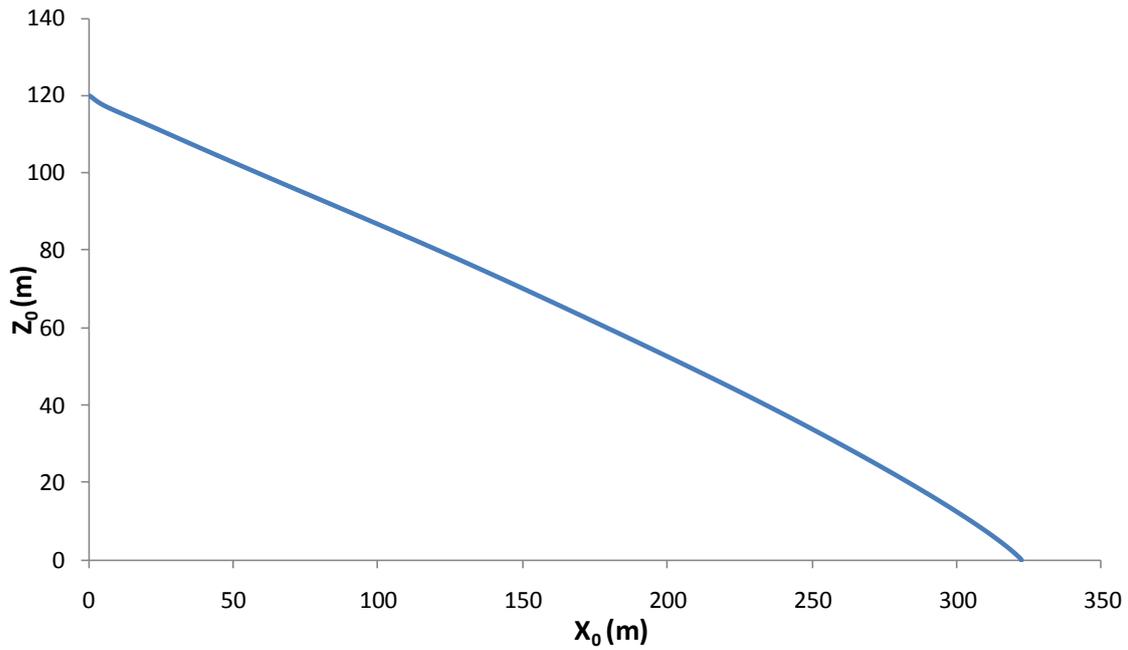


Figura 101 – Trajectória da casca do exemplo nas condições definidas.

Na Figura 102 são apresentadas a curva que relaciona o tempo total de combustão da partícula com o tempo decorrido e a curva de decaimento da massa da partícula.

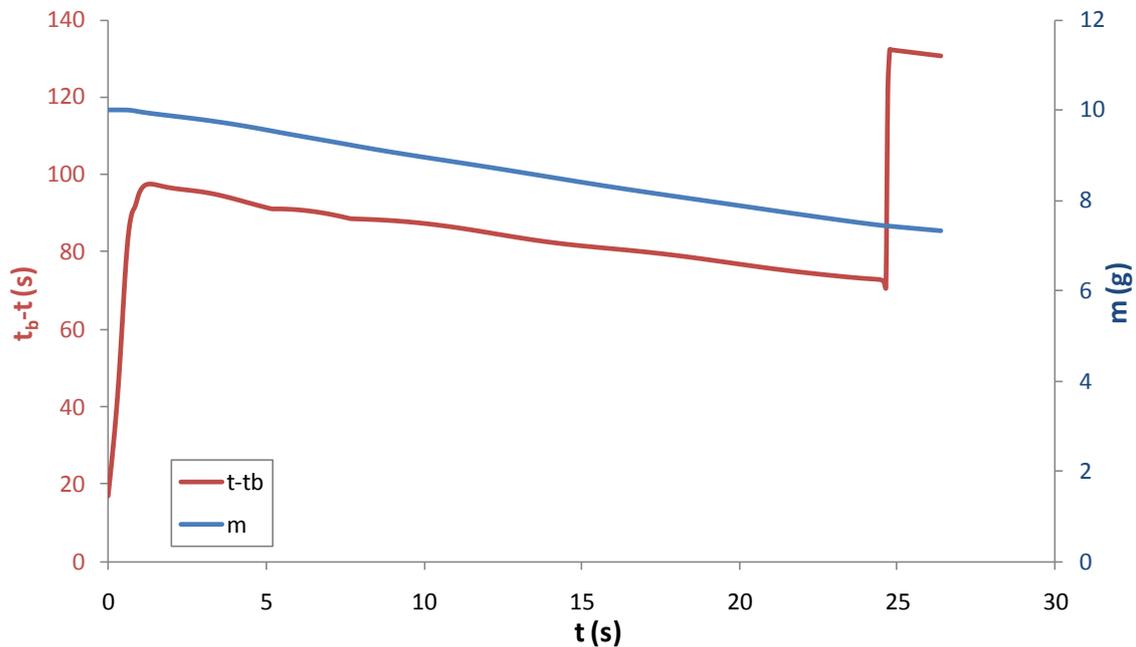


Figura 102 – Variação da perda de massa e da diferença entre o tempo total de combustão e o tempo decorrido da casca do exemplo nas condições definidas.

A determinação do tempo total de combustão foi efectuada para duas situações distintas: (1) durante o transporte da partícula e (2) após a partícula ter atingido o solo. No gráfico anterior é possível verificar o momento em que a partícula atinge o solo (≈ 24 s). A partir deste momento, o programa aplica o modelo de

combustão em $U=0 \text{ m.s}^{-1}$ que aumenta o valor de t_b , tal como pode ser observado. Considera-se que a combustão da partícula foi extinta quando a diferença entre t_b e o tempo decorrido (t) for nula ou negativa.

Caso o tempo de combustão da partícula seja definido pelo seu comprimento (para $\theta > 0^\circ$) a extinção da combustão é definida pela curva da massa em função do tempo. Também neste caso houve uma separação entre a fase de transporte da partícula e a fase em após o contacto com o solo. No gráfico é possível notar uma ligeira inflexão da curva para $t \approx 24\text{s}$.

O gráfico da Figura 103 permite visualizar as posições que a partícula vai assumindo ao longo do trajecto. Nesta mesma figura foi incluída variação da velocidade angular e da aceleração angular, que permitem compreender melhor os valores de α .

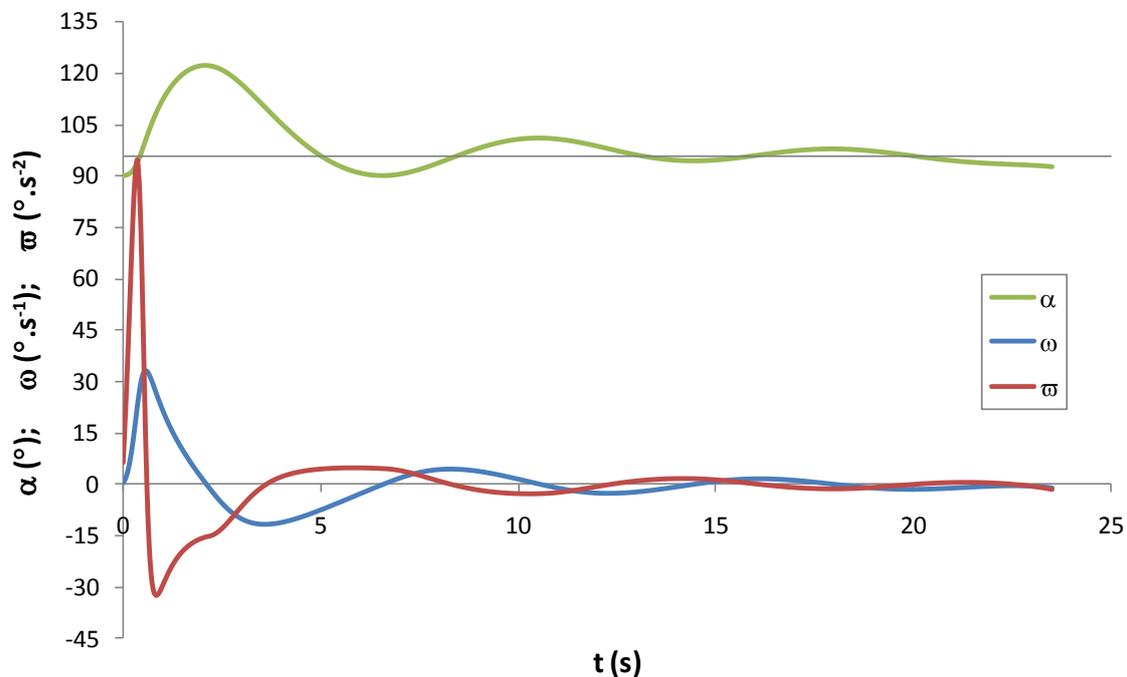


Figura 103 – Variação da orientação, da velocidade angular e da aceleração angular da casca do exemplo, nas condições definidas, ao longo do seu transporte.

Tendo a partícula sido lançada com uma orientação inicial de 90° , verifica-se que tende a assumir uma posição preferencial em torno de 96° , para a qual os valores de ϖ e ω são nulas. Numa fase inicial, a casca experimenta oscilações maiores que se vão atenuando mas que não chegam a desaparecer durante a trajetória definida para estas condições. Para determinadas orientações iniciais ou para certas condições que provoquem oscilações com maior amplitude, a posição de equilíbrio pode ser assumida para $\alpha \approx 276^\circ$.

As maiores oscilações sentidas na fase inicial podem igualmente ser observadas nos gráficos da Figura 101 e da Figura 102, em que se verifica que as curvas assumem um comportamento distinto no início do seu traçado.

6.3. Simulação de casos teóricos

Com o objectivo testar a resposta do programa a diferentes situações, foram simulados diversos casos em que as características das cascas, as condições iniciais do transporte e as condições ambientais foram alteradas. Nestas simulações foram incluídas as perdas de massa devidas à presumida combustão das partículas. A Tabela 8 apresenta as condições impostas para nove simulações, tendo considerado uma altura inicial Z_i única de 50 m a que corresponde uma elevação por uma chama contínua de $4,1\text{ m}$.

Tabela 8 – Dados de entrada das simulações efectuadas.

Parâmetro	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9
Δt (s)	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,03	0,02	0,03	0,03
Z_i (m)	50	50	50	50	50	50	50	50	50
X_i (m)	0	0	0	0	0	0	0	0	0
T_a (°C)	30	30	30	30	30	30	30	30	30
ρ	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
$U_{x_{0,10}}$ (m.s ⁻¹)	0	5	10	15	10	10	10	10	10
m_0 (g)	15	15	15	15	15	10	20	15	15
L_0 (cm)	30	30	30	30	30	30	30	30	30
b_0 (cm)	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5
e (mm)	1	1	1	1	1	1	1	1	1
b_1 (cm)	12	12	12	12	12	8	16	12	12
v_{x_0} (m.s ⁻¹)	0	0	0	0	3,6	0	0	0	0
v_{z_0} (m.s ⁻¹)	0	0	0	0	3,6	0	0	0	0
α_0 (°)	90	90	90	90	90	90	90	0	45
ω_0 (°.s ⁻¹)	0	0	0	0	60	0	0	0	0
θ_0 (°)	0	0	0	0	0	0	0	45	90

Nas simulações de S1 a S5 apenas se variaram as condições da velocidade do vento e, no caso S5, foi introduzida uma velocidade inicial à partícula, pelo que se pode considerar que a casca usada nas diferentes simulações foi a mesma. A Figura 104 apresenta os diferentes trajectos seguidos pela casca nas diferentes condições.

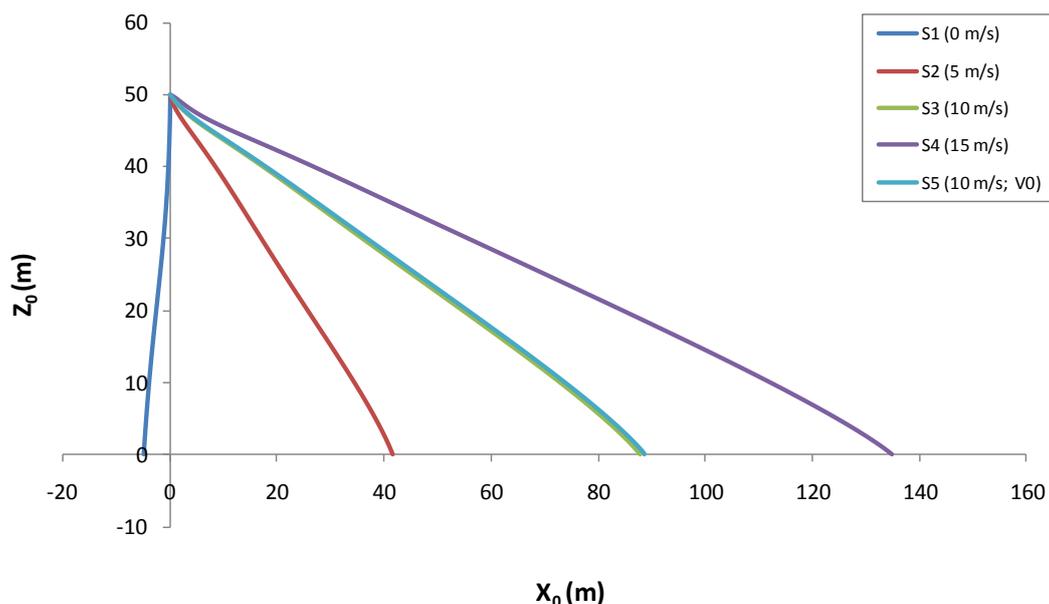


Figura 104 – Trajecto seguidos pelas cascas no programa de simulação (variação de U).

Este gráfico demonstra a influência do vento horizontal na distância de projecção das partículas. Como seria de esperar, um maior valor de U_x leva a uma maior distância percorrida. Verifica-se que na ausência de vento, as cascas de eucalipto tendem a assumir uma ténue deslocação no sentido negativo de X_0 devido ao ligeiro valor negativo do coeficiente de sustentação para a posição aerodinâmica de 90° ($C_{z_{90^\circ}} = -0,067$).

A simulação feita para S5 considera que no início da simulação, a casca apresenta uma velocidade relativa ao escoamento, próxima da sua velocidade terminal ($\approx 5,0 \text{ m.s}^{-1}$). A similaridade verificada entre S3 e S5, permite concluir que a velocidade inicial da partícula, desde que abaixo de U_t , tem pouca relevância na determinação do trajecto da partícula. A explicação deste facto deve-se a que este tipo de partículas, apresenta uma inércia de tal forma baixa, que rapidamente adquire a sua velocidade terminal, mesmo estando inicialmente parada. Esta conclusão vem reforçar os resultados de *Tarifa (1965)* que referem a velocidade terminal da partícula é atingida num intervalo de tempo de tal forma pequeno que pode ser desprezado. Sendo assim, a determinação da componente horizontal da velocidade de uma partícula, quando esta abandona a pluma térmica, tem pouca relevância na determinação da distância percorrida. Nesta perspectiva, nos cálculos aerodinâmicos relativos à elevação de uma partícula na pluma térmica, interessa sobretudo analisar a altura máxima atingida pela partícula e a distância horizontal percorrida durante a elevação, podendo negligenciar-se os valores de U_{z_0} e U_{x_0} .

A Figura 105 apresenta os trajectos seguidos pelas cascas das simulações S3, S6 e S7. Estas cascas apresentam massas e dimensões (b_1) diferentes, sendo sujeitas a iguais condições de escoamento.

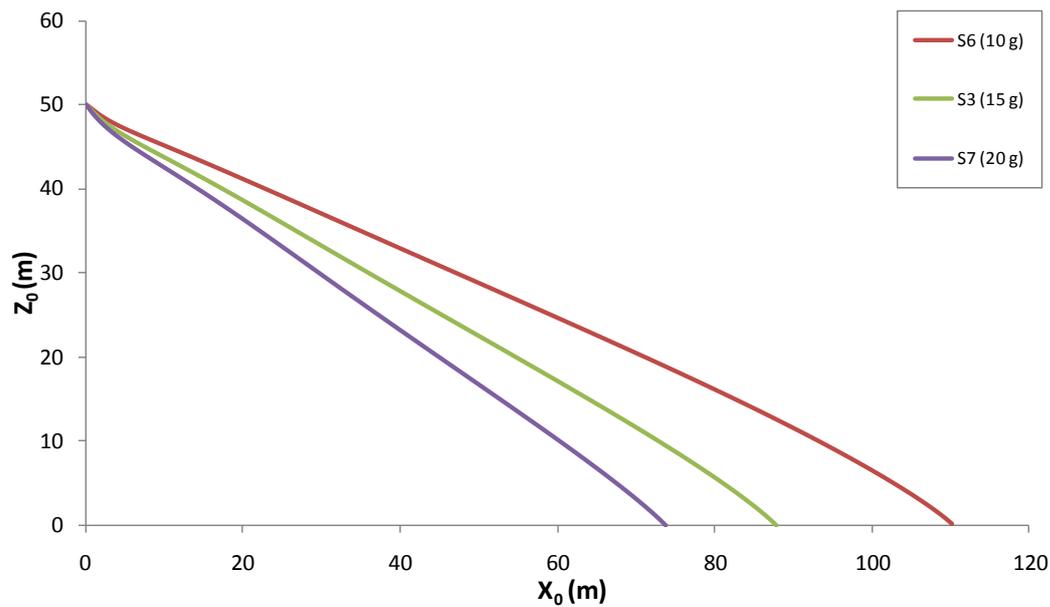


Figura 105 – Trajecto seguidos pelas cascas no programa de simulação (variação de m_0).

Como seria de esperar, as partículas com menor massa percorreram uma distância superior relativamente à partícula de S7 que tinha uma maior massa. Naturalmente que uma partícula mais pesada assume um trajecto com uma componente vertical maior e, neste sentido, atinge mais rapidamente o solo.

A relevância da orientação inicial da partícula é evidenciada na Figura 109. Nesta figura, são apresentados os trajectos para as simulações S3, S8 e S9. Pode considerar-se que se trata da mesma casca, sujeita às mesmas condições, variando apenas a sua orientação inicial, relativamente ao escoamento incidente.

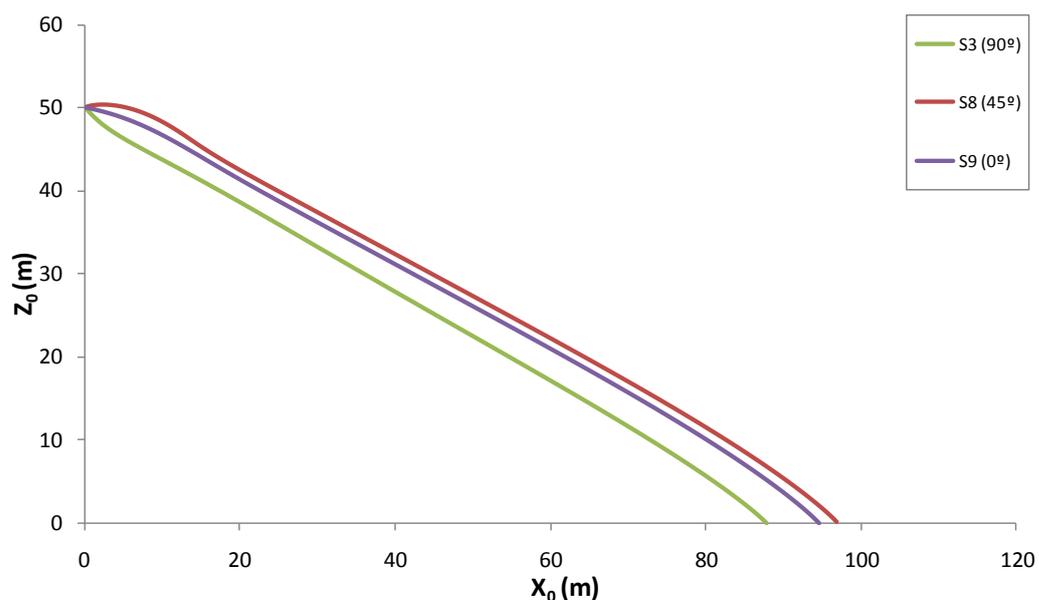


Figura 106 – Trajecto seguidos pelas cascas no programa de simulação (variação de α).

A diferença das distâncias percorridas nas três situações deve-se ao tempo em que a partícula demorou a atingir a sua posição aerodinâmica preferencial ($\approx 96^\circ$). O trajecto da simulação de S3 foi feito com oscilações muito ténues quando comparadas com as oscilações das outras cascas, pelo que o seu percurso foi mais curto. A orientação a 45° (S8) é aquela que apresenta um maior coeficiente de sustentação pelo que naturalmente foi aquela que atingiu uma distância maior.

6.4. Validação do programa

Embora os cálculos efectuados apresentem uma fundamentação teórica e se baseiem em resultados laboratoriais, foram realizados estudos com o objectivo de validar o programa desenvolvido.

Várias cascas de eucalipto foram lançadas da varanda do último piso do Edifício da Segurança Social de Viseu (Figura 107). A escolha deste edifício deveu-se ao facto de ser a construção mais alta da Zona Centro de Portugal e porque, encontrando-se no centro da cidade está mais protegido de ventos que poderiam afectar decisivamente os ensaios. O objectivo destes ensaios foi o de permitir uma comparação entre os trajectos reais percorridos pelas partículas e os trajectos obtidos por simulação dessas mesmas partículas.



Figura 107 – Fotografia do edifício da Segurança Social em Viseu.

Foram utilizadas cascas de eucalipto com características semelhantes, apresentando uma massa média de $14,1\text{ g}$ ($\sigma= 0,5\text{g}$) e um diâmetro aparente de $2,5\text{ cm}$ ($\sigma= 0,3$). Estas cascas foram lançadas de uma altura de 38 m tendo o cuidado de as lançar de forma a distanciarem-se de pelo menos $1,5\text{ m}$ da parede do edifício para mitigar eventuais interferências. Antes dos ensaios mediram-se as características físicas das 13 cascas de eucalipto ensaiadas (Anexo 12) assim como dos principais constituintes do prédio (janelas, grades, etc.). Os ensaios foram filmados por uma câmara frontal à trajectória da partícula à altura do solo, uma segunda câmara filmando na vertical colocada no local onde a partícula foi lançada e uma terceira câmara filmando na vertical colocada junto ao solo por baixo do local de lançamento da casca de eucalipto. Na análise dos resultados apenas foram usadas as filmagens da primeira câmara frontal à trajectória da partícula. As outras duas filmagens tornaram-se inválidas uma vez que os equipamentos não tinham rapidez de focagem suficiente para acompanhar a velocidade de queda da partícula. Os cálculos foram realizados através das imagens paradas (*frames*) das filmagens, por comparação das dimensões da casca com as dimensões das janelas e outros constituintes do edifício, utilizando um programa de desenho.

O dia do lançamento das cascas apresentava-se solarengo sem vento. Por questões técnicas, a velocidade do vento não foi medida. Apenas se pode descrever que sentia uma ligeira brisa inconstante na varanda do edifício a 38m de altura. Na base do edifício não se sentia qualquer aragem. A temperatura exterior foi medida através de uma estação meteorológica portátil, obtendo-se um valor médio de $12,0^{\circ}\text{C}$. Uma vez que os ensaios foram realizados no meio da cidade, as cascas foram largadas sem estarem em combustão.

Durante os ensaios, verificou-se que a orientação das partículas, relativamente ao eixo vertical da deslocação, oscilavam com amplitudes maiores na fase inicial, que se atenuavam à medida que as cascas se aproximavam do solo. A determinação das várias posições da partícula tornou-se impossível pelo facto de apenas se terem considerado válidas as gravações de uma câmara de filmagem.

Outro aspecto que foi, por vezes, verificado *in loco* foi a rotação da partícula em torno do seu eixo longitudinal. A ampliação das filmagens não permitiu quantificar este comportamento, no entanto visualmente constatou-se que este tipo de rotação é fortemente influenciado pelas irregularidades da casca, nomeadamente pelo seu grau de enrolamento e pelo rasgo longitudinal.

Utilizando os dados referentes aos ensaios, cuja média consta nos dados de entrada da Tabela 9, efectuou-se uma simulação no programa anteriormente descrito.

Tabela 9 – dados médios dos ensaios de validação

Ambiente		Partícula		Condições iniciais	
T_a (°C)	12	m_0 (g)	14	Z_i (m)	38
$U_{X_{0,10}}$ (m.s ⁻¹)	0	L_0 (cm)	30	X_i (m)	0
		b_0 (cm)	2,5	vx_0 (m.s ⁻¹)	0
		e (mm)	1,1	vz_0 (m.s ⁻¹)	0
		b_1 (cm)	13,5	α_0 (°)	90
				ω_0 (°.s ⁻¹)	0
Δt (s)	0,02			θ_0 (°)	0

A Figura 108 apresenta o trajecto descrito pelas cascas lançadas do alto do edifício e o trajecto obtido pela simulação. Chama-se a atenção para o facto de que a escala dos eixos vertical e horizontal não ser semelhante pelo que os desvios podem parecer maiores do que efectivamente são.

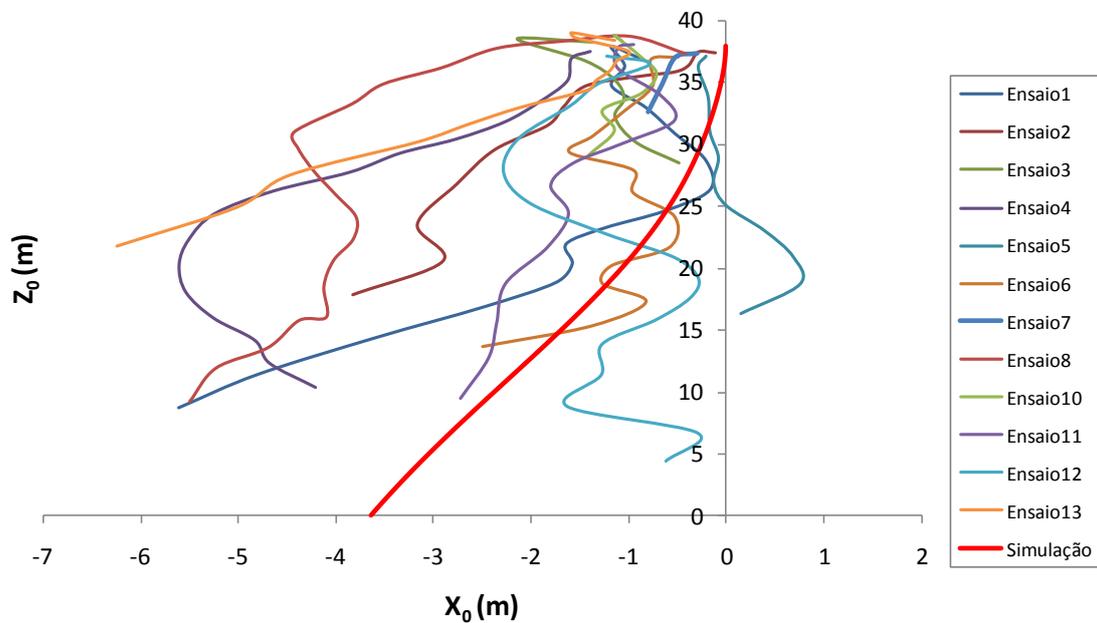


Figura 108 – Trajectos percorrido pelas cascas no ensaio e comparação com o trajecto obtido pelo programa de simulação.

Embora haja alguma heterogeneidade nos resultados obtidos para as diversas partículas ensaiadas, pode verificar-se que a distância horizontal da simulação (-3,64 m) é bastante próxima da distância média percorrida pelas partículas lançadas do edifício.

Com o intuito de reforçar a validação do modelo, através das imagens de vídeo, determinou-se a velocidade de deslocação das partículas ao longo da queda (U_Q), comparando os resultados obtidos com as velocidades resultantes do programa de simulação. A Figura 109 apresenta estes resultados.

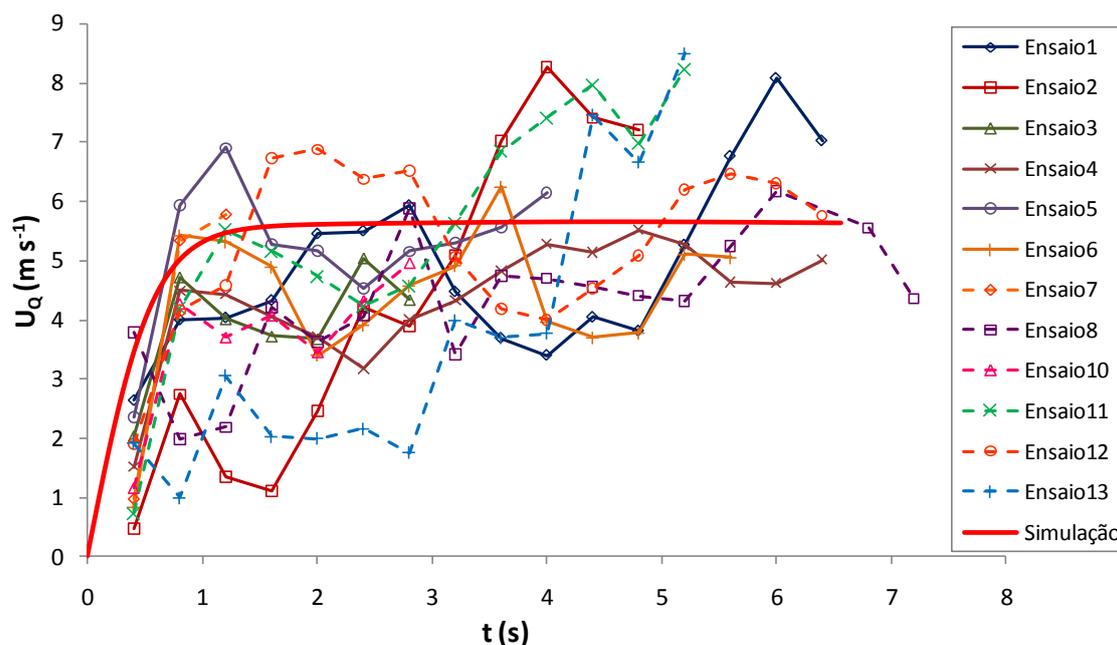


Figura 109 – Velocidades de queda das cascas de eucalipto medidas nos ensaios e comparação com as velocidades de queda obtidas no programa de simulação

Verifica-se que há uma aproximação aceitável dos resultados obtidos por ambas as técnicas. Embora se verifique alguma dispersão no comportamento aerodinâmico das cascas utilizadas nos ensaios, considera-se que a curva definida pelo programa de simulação, representa a média dos resultados obtidos. Nesta perspectiva conclui-se haver uma boa adequação da vertente aerodinâmica do programa.

6.5. Síntese Conclusiva do Desenvolvimento do Programa de Simulação

O desenvolvimento do programa de simulação do transporte de uma partícula incandescente conclui os objectivos finais deste estudo. Na concepção deste programa foram usados os resultados da caracterização das cascas de eucalipto, os modelos desenvolvidos nos ensaios de combustão e os modelos resultantes do estudo aerodinâmico.

Inserindo como dados de entrada, valores referentes às condições ambiente, às características da partícula e às suas condições iniciais de transporte, o utilizador pode simular a trajectória seguida e verificar qual a distância horizontal em que a partícula entra em contacto com o solo.

O programa permite ainda analisar a massa da partícula durante o voo e a diferença entre o tempo de combustão total e o tempo de transporte decorrido. Analisando estas duas variações, é possível verificar se no final do trajecto, a

partícula ainda se encontra em combustão, tendo capacidade de originar um novo foco secundário de incêndio. Neste mesmo gráfico, é possível ainda verificar o tempo de transporte da partícula.

O último resultado de saída do programa consiste num gráfico que permite observar as diferentes orientações α da partícula ao longo do transporte. Este gráfico vem acompanhado da variação da velocidade angular e da aceleração angular em torno do eixo transversal da casca de eucalipto. Verifica-se que as maiores oscilações ocorrem na fase inicial do trajecto até que a partícula assuma uma posição preferencial em torno de 96° ou 276° .

Foram feitas várias simulações que permitiram verificar a importância de parâmetros como a velocidade do vento, a massa ou a orientação inicial da partícula na distância de projecção da casca. Também se apresentou uma simulação em que no momento $t=0$ s, a partícula já apresentava uma velocidade relativa ao escoamento, próxima da sua velocidade terminal. Verificou-se que esta condição inicial não se afigura de grande importância na trajectória seguida.

Realizaram-se alguns ensaios com vista à validação do programa, lançando de uma altura de 38 m, várias cascas de eucalipto, filmando as trajectórias percorridas. Não tendo sido possível lançar as cascas em combustão, esta validação foi parcial. No entanto, do ponto de vista aerodinâmico, o programa apresentou uma similaridade entre os resultados obtidos nos ensaios de validação e os valores originados pelo programa de simulação, tanto em termos de trajectória seguida, como no que respeita à velocidade de queda das partículas.

Este programa apresenta algumas limitações no que respeita à sua aplicação. Não tendo sido incluída qualquer entrada relativa à componente vertical do vento, limita-se a validade do programa a um terreno horizontal em que não haja qualquer tipo de correntes verticais. Por outro lado, os modelos de combustão utilizados, desenvolvidos em laboratório, foram obtidos para um escoamento com temperatura e teor de oxigénio em torno de 15°C e 21% , respectivamente. Num local próximo da frente de chama os valores de temperatura são claramente superiores e os teores de oxigénio são menores, pelo que a aplicação deste programa numa zona próxima do incêndio pode afastar-se da realidade. Nesta perspectiva, considera-se que o programa não deve ser aplicado para simular a ascensão da partícula na pluma térmica, mas apenas para analisar o transporte da partícula na fase descendente. Esta limitação é ainda reforçada pelo facto de que a grande complexidade das correntes em turbilhão que se verificam na pluma térmica, implicariam um estudo tridimensional do fenómeno, sendo que este programa faz uma análise bidimensional, no plano definido pelo eixo longitudinal da partícula e a direcção

do escoamento a que é sujeita, resultante do seu movimento e do vento meteorológico.

Outra aproximação que o programa compreende, consiste na utilização de um modelo simplificado para determinação do perfil vertical da velocidade do vento. Embora haja modelos mais precisos e rigorosos considerou-se que uma equação simples, tal como foi usada, permitia uma mais fácil interação com o utilizador. Não obstante, os modelos mais sofisticados têm uma aplicação mais pertinente para partículas mais leves e mais pequenas. Neste caso, com partículas de massa superior a 10 g , a utilização desses modelos mais complexos, acabava por se traduzir numa variação mínima no comportamento aerodinâmico da partícula.

7. Discussão e Conclusões Finais

Os objectivos inicialmente propostos consistiam na determinação de um programa que permitisse prever a trajectória de uma partícula incandescente durante o transporte. Torna-se evidente o contributo deste trabalho para uma melhor compreensão do mecanismo dos focos secundários. A abordagem ao tema, considerando a variação das alterações que o combustível sofre ao longo do seu transporte, tanto no que respeita à sua orientação relativamente ao escoamento incidente, como na variação da sua massa e das suas dimensões, constituem-se por si só como um contributo original que permitirá melhorar o rigor dos modelos existentes de previsão da propagação de incêndios por focos secundários.

Os modelos anteriores (Tarifa, 1967, Ellis, 2000, entre outros) determinam a distância máxima de projecção das partículas através do produto do tempo máximo de combustão (t_b) pela velocidade horizontal do vento (Ux). Estes modelos consideravam a partícula a arder como um todo ao invés de uma combustão mais demorada em que a casca arde de uma extremidade para a outra, como no presente trabalho. Um dos grandes contributos desta dissertação consiste em que o programa definido permite determinar a distância real a que partícula é projectada, em vez da distância máxima de projecção, como acontecia nos modelos anteriores.

Uma vez que os principais equipamentos foram construídos para a realização de ensaios relacionados com os focos secundários, a definição de uma metodologia e a sua calibração apresentam-se de grande interesse para a continuação da sua utilização.

A análise das características dos combustíveis estudados foi fundamental para a prossecução do estudo, tendo permitido relacionar os parâmetros aerodinâmicos e de combustão com as características físicas das partículas. Embora se tenha consciência de que as características de pinhas, escamas de pinhas e cascas de eucalipto possam ter sido objecto de estudo noutra campo de conhecimento, uma abordagem focada para os focos secundários tornou-se essencial. A definição de parâmetros como o grau de abertura de uma pinha ou o grau de enrolamento para as cascas de eucalipto, foram variáveis definidas pelo autor que manifestaram um interesse fundamental no estudo do seu transporte e combustão.

A escolha dos combustíveis analisados também se assume de interesse não apenas por serem pouco estudadas, como também pela sua importância na floresta portuguesa. O facto de os ensaios terem sido realizados com partículas naturais ao invés de formas regulares tornou o estudo mais condizente com a realidade, no entanto esta escolha dificultou tanto a análise de dados como a realização dos ensaios.

Os ensaios de combustão em pinhas levaram à criação de um modelo que permite prever a velocidade de combustão destas partículas em função das suas características físicas. Estes estudos permitiram concluir que os parâmetros físicos mais importantes na combustão de uma pinha são o seu grau de abertura e a sua massa inicial. Nestes ensaios foi ainda analisada a velocidade de escoamento que se assumiu de grande relevância na combustão das pinhas e que também integrou o modelo mencionado.

Estes ensaios tiveram seguimento com a determinação da influência da orientação dos combustíveis e da velocidade de escoamento no processo de combustão. Foi analisada a velocidade de combustão durante a fase de combustão com chama, na fase de combustão sem chama e na totalidade do processo. Também os tempos de combustão foram estudados, nomeadamente o tempo de combustão com chama e o tempo total de combustão. Verificou-se que a orientação da partícula assume uma relevância tal que leva a uma variação nos parâmetros mencionados que podem chegar a ser superiores a uma ordem decimal de grandeza. A integração destes resultados nos modelos de previsão torna-se essencial uma vez que a grande heterogeneidade do campo de ventos numa situação de incêndio, associada à alteração da posição preferencial das partículas resultante da modificação das suas dimensões, provocam uma constante variação da sua orientação face ao escoamento. Os modelos actualmente existentes não integram este parâmetro, pelo que este estudo se assume como um contributo importante no aumento do rigor dos modelos que o passem a integrar.

Os ensaios dinâmicos realizados permitiram verificar que a variação das condições durante o transporte de uma partícula incandescente provoca um efeito residual na combustão. Desta forma quando uma partícula passa de condições mais favoráveis à combustão para condições que provocam uma queima menos intensa, passa a apresentar, nesta última fase, uma velocidade de combustão superior àquela que teria se não se tivesse dado a transição. Numa situação real de incêndio as variações das condições existentes são dinâmicas pelo que estes resultados devem igualmente ser tidos em consideração. A utilização de coeficientes obtidos em ensaios estáticos leva a uma taxa de perda de massa menor do que acontece na realidade. Nesta perspectiva, um modelo baseado em ensaios estáticos poderá conduzir a resultados errados nomeadamente considerando que uma partícula extingue a sua combustão num certo tempo que é inferior ao que acontece numa situação real.

Nos ensaios dinâmicos pôde observar-se algumas das situações de reacendimento referidas por *Ellis (2000)* o que não aconteceu nos ensaios estáticos. Este fenómeno verificou-se sobretudo em situações em que baixou drasticamente a velocidade de ventilação, tal como acontece quando uma

partícula atinge o solo e termina o seu movimento. Esta conclusão pode ser importante no estudo da probabilidade de ignição de leitos de combustível.

Concluiu-se que o escoamento convectivo resultante da combustão da partícula assume uma importância desprezável quando comparados com o escoamento forçado a que a partícula é sujeita durante o seu transporte. Desta forma deduz-se que estas forças são de tal forma insignificantes que podem não ser consideradas nos modelos de previsão.

Foram realizados ensaios com vista à determinação da variação da velocidade terminal das partículas ao longo da sua combustão. A metodologia usada foi original permitindo verificar que, quer para as pinhas, quer para as cascas de eucalipto com forma tubular, o valor da velocidade terminal diminui ligeiramente numa fase inicial da queima, para se manter sensivelmente constante até que cerca de 85% da massa da partícula tenha sido consumida. Esta conclusão apoia os trabalhos de *Clements (1977)* e reduz a importância da inclusão da variação deste parâmetro na simulação de modelos aplicados a estes combustíveis.

A determinação dos coeficientes aerodinâmicos, a par com os estudos de combustão, permitiram desenvolver um programa que simula o transporte de uma partícula incandescente. Na utilização deste programa, o utilizador deverá introduzir as variáveis de entrada referentes às características das partículas e às condições ambientais, obtendo como saídas valores que permitem a trajectória da partícula e que permitem analisar o estado de combustão da partícula. Estes duas saídas permitem analisar a distância de projecção da partícula e verificar se no momento em que esta atinge o solo ainda se encontra em combustão ou se já foi totalmente consumida. Ainda são determinados valores que permitem analisar a orientação que a partícula segue ao longo do transporte.

Este programa de simulação concilia os modelos definidos nos ensaios aerodinâmicos e de combustão, considerando a orientação da partícula relativamente ao escoamento, o que o diferencia dos restantes modelos de previsão.

Foram feitos alguns ensaios de validação do programa de simulação lançando diversas cascas de uma altura de 38 m, filmando as trajectórias seguidas. A comparação dos resultados dos ensaios de validação, com os valores resultantes da simulação no programa desenvolvido, mostrou uma boa similaridade entre ambos. Estes ensaios foram realizados num edifício público, o que limitou de certa forma as suas condições. Por questões de segurança, as partículas foram lançadas sem se apresentarem em combustão. Os ensaios foram realizados num dia em que o vento era praticamente inexistente, no entanto não foi medida a sua velocidade efectiva nas diversas alturas

percorridas pelas cascas. Para efeitos de simulação, considerou-se que o vento era nulo.

Embora se tivesse tentado contemplar os diversos factores que interferissem nos ensaios, houve alguns aspectos que não foram controlados e que retiram algum rigor aos modelos desenvolvidos, nomeadamente:

- Não foi tido em consideração o envelhecimento e a maturação das partículas;
- Nos ensaios de combustão o escoamento apresentava uma temperatura entre 15°C e 20°C . Numa situação de incêndio as temperaturas atingidas são substancialmente superiores pelo que as velocidades de combustão obtidas poderão não se adequar àquelas que se verificam numa zona próxima do incêndio. *Ellis (2000)* fez alguns estudos de combustão de partículas em que o escoamento era feito à temperatura ambiente justificando esta aproximação com o refrescamento que o ar que entra na coluna de convecção promove. No entanto considera-se que os modelos de combustão terão uma aplicação mais exacta numa zona em que a radiação da frente de chama principal já não é sentida de forma clara. Neste pressuposto, o programa de simulação não contempla a fase de ascensão da partícula, reduzindo-se a sua aplicação à trajectória descendente em que a componente horizontal assume maior relevância;
- Por questões de ordem técnica, nos ensaios de combustão com pinhas a velocidade de escoamento máxima atingida foi de $6,5 \text{ m.s}^{-1}$. Esta velocidade de escoamento é inferior à velocidade terminal de queda de uma pinha que varia entre 15 e 20 m.s^{-1} . Durante o voo, uma pinha é transportada a uma velocidade relativa ao escoamento próxima da sua velocidade terminal. Nesta perspectiva considera-se que os resultados do modelo de combustão podem ter alguma aproximação à realidade. No mesmo tipo de ensaios, para as cascas de eucalipto foi atingida uma velocidade máxima de ventilação de $5,5 \text{ m.s}^{-1}$ que é um valor bastante próximo da velocidade terminal de queda de uma casca de eucalipto com características semelhantes ($\approx 3,5$ a $7,5 \text{ m.s}^{-1}$);
- Os ensaios aerodinâmicos foram sujeitos a uma análise bidimensional num plano definido pelo eixo maior da partícula e pela direcção do escoamento, embora se tenha consciência que numa situação real o movimento da partícula e as forças a que é sujeita se manifestem nas três dimensões métricas. No entanto os ensaios de validação realizados permitiram visualmente observar que a rotação deste tipo de partículas se faz sobretudo no plano considerado, pelo que se considere que esta é uma aproximação aceitável;
- O programa de simulação desenvolvido considera um perfil de ventos que apenas varia em altura. Tendo em consideração que a célula

convectiva provoca alterações do escoamento no plano horizontal, esta é uma aproximação que poderá adulterar resultados quando a distância percorrida pela partícula é superior à dimensão horizontal da célula convectiva. Por outro lado este modelo considera uma cobertura regular do solo, o que representa uma aproximação da realidade. As irregularidades naturais do terreno levariam a alterações do escoamento no plano horizontal;

- Não se considera a fase de escoamento descendente da célula convectiva o que pode provocar a queda da partícula a uma distância inferior.
- Não se considerou a rotação em torno do eixo longitudinal da casca na definição do modelo final, embora se tenha verificado alguma influência deste factor na velocidade de combustão e se considere que o mesmo pode ter relevância no comportamento aerodinâmico. Este facto deve-se à realização dos ensaios com as partículas fixas ao invés de as manter a flutuar livremente no escoamento tal como na metodologia que *Ellis (2000)* usou nos seus estudos. No entanto a fixação das partículas em análise permite obter resultados de perda de massa muito mais consistentes e credíveis do que a outra metodologia que se baseia na observação da secção em que a partícula se mantém numa flutuação normalmente bastante oscilante. Nos ensaios com a partícula fixa também se evita que por vezes a partícula em análise embata nas paredes do túnel, como por vezes acontece quando esta é deixada a flutuar no escoamento.

Para além dos contributos descritos no início deste capítulo, este trabalho desenvolveu uma metodologia de análise que poderá ser aplicada no estudo de outros combustíveis diferentes, nomeadamente em cascas de eucalipto com configurações diferentes da forma tubular, a ramos, etc.. Para além disso, este estudo poderá ser completado no sentido de determinar os coeficientes aerodinâmicos de pinhas e escamas, permitindo adaptar o programa de simulação a estes combustíveis.

Considerando a possibilidade de integração destes estudos num programa generalizado de previsão de focos secundários que inclua as diversas fases dos mecanismos dos focos secundários, propõe-se ainda que se analise:

- A influência da temperatura e do teor de oxigénio na queima das partículas, permitindo estender este programa a uma zona mais próxima do incêndio que se caracterize por uma escoamento passível de um estudo bidimensional (na proximidade da chama, o escoamento é feito em turbilhões com movimentos tridimensionais);
- A rotação da partícula em torno do seu eixo longitudinal, estudando a velocidade angular das partículas em função das suas características e do escoamento a que são sujeitas;

- O tipo de partículas libertadas na combustão de diferentes espécies para diversos escoamentos ascensionais, que poderão provocar situações de incêndio com diferentes intensidades;
- A ignição de leitos não apenas com cascas de eucalipto tubulares mas com outros tipos de combustíveis, considerando a porosidade e constituição dos leitos, assim como do vento a que são sujeitos (simulando encostas com maior ou menor declive);
- A interação entre o foco de incêndio principal e os focos secundários por ele originados em função da distância entre eles, do vento, da configuração geomorfológica e do tipo de leito de combustível entre os dois focos;
- O campo de ventos de forma a integrar as células das correntes de convecção que são importantes por causa das correntes descendentes que podem provocar um local de aglomeração da queda de partículas.
- Focos secundários de situações reais de incêndio, comparando as distâncias percorridas com os modelos existentes.

Este programa poderá ainda ser melhorado, incluindo a componente vertical do escoamento, o que permite estender a sua aplicação a terrenos com declive.

Após as melhorias sugeridas, este programa deve ser incluído noutros programas que lhe facultem automaticamente dados de entrada. A sua disponibilização às forças de combate e de decisão em incêndios, permitir-lhes-á prever com maior rigor o local provável de queda de partículas incandescentes. Desta forma, poderão deslocar para estas zonas meios humanos cuja função será de mera observação e, em caso de visualização de um foco secundário, poderão combatê-lo precocemente, evitando o seu desenvolvimento.

8. Bibliografia

- 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. (1983a) Potential Spotting Distance from Wind - Driven Surface Fires. USDA Forest Service, Research Paper INT-309, Intermountain Forest and Range Experiment Station.
- Albini F. A. (1983b) Transport of Firebrands by Line Thermals. *Combustion Science and Technology*, Vol. 32, Pp. 277-288.
- Alexander M. E., Tymstra C., Frederick K. W. (2004) Incorporating breaching and spotting considerations into Prometheus – the Canadian wildland fire growth model. *Foothills Model Forest*; QN 6.
- Andersen A., Pesavento, U., Wang, J. Z. (2005a) Unsteady aerodynamics of fluttering and tumbling plates. *J. Fluid Mech.*, vol. 541, pp. 65–90.
- Andersen A., Pesavento, U., Wang, J. Z. (2005b) Analysis of transitions between fluttering, tumbling and steady descent of falling cards. *J. Fluid Mech.*, vol. 541, pp. 91–104.
- Anthenien R. A. (2006), Tse SD, Fernandez-Pello AC; On the trajectories of embers initially elevated or lofted by small scale ground fire plumes in high winds; *Fire Safety Journal* 41 (2006) 349–363.
- Autoridade Florestal Nacional (2010); 5º Inventário Florestal Nacional – Portugal Continental. Direcção Nacional de Gestão Florestal; autoridade Florestal Nacional.
- Butler B, Bartlette R, Bradshaw L, Cohen J, Andrews P, Putnam T, Mangan R (1998) Fire behavior associated with the 1994 South Canyon Fire on Storm King Mountain, Colorado. USDA Forest Service, Rocky Mountain Research Station, Research Paper RMRS-RP-9. (Ogden, UT), 82 p.
- Byram G. M. (1954) Atmospheric Conditions Related to Blowup Fires. USDA Forest Service (SE) Station Paper 35.
- Chase C. H. (1981) Spot Fire Distance Equations for Pocket Calculators. USDA Forest Service, Res. Note INT-310.

- Cheney N. P., Bary G. A. V. (1969) The Propagation of Mass Conflagrations in a Standing Eucalypt Forest by the Spotting Process. Paper A6, Mass Fire Symposium, Canberra, February 1969, C of A.
- Clements H. B. (1977) Lift-Off of Forest Firebrands. USDA Forest Service Research Paper SE-159. March 1977. Southeastern Forest Experiment Station. Asheville. North Carolina.
- Ellis P. F. (2000) The Aerodynamic and Combustion Characteristics of Eucalypt Bark - A Firebrand Study. Ph.D. Dissertation. Australian National University. Canberra.
- Finn D. L. (2007) Falling Paper and Flying Business Cards. *SIAM News*, Volume 40, Number 4.
- Fonda R.W., Varner J. M. (2004) Burning Characteristics of Cones from Eight Pine Species. *Northwest Science*, **78**, 322-333.
- Hirata K., Shimizu K., Fuluhara K., Yamauchi K., Kawaguchi D., Funaki J (2009) Aerodynamic Characteristics of a Tumbling Plate under Free Flight. *Trans. Jpn. Soc. Mech. Eng.*, Vol 75, No. 749,B.
- Kolomenskiy D., Schneider K. (2010) Numerical simulations of falling leaves using a pseudo-spectral method with volume penalization. *Theor. Comput. Fluid Dyn.* 24:169–173.
- Larjavaara M., Kuuluvainen T., Tanskanen H., Venäläinen A. (2004) Variation in Forest Fire Ignition Probability in Finland. *Silva Fennica* 38(3): 253–266.
- Lee S. L., Hellman J. M. (1969) Study of firebrand trajectories in a turbulent swirling natural convection plume. *Combustion and Flame*,13: 645-655.
- Lee, S. L., J. M. Hellman (1970) Firebrand trajectory study using an empirical velocity-dependant burning law. *Comb. and Flame* 15:265-74.
- Luke R. H., McArthur A. G. (1978) Bushfires in Australia . CSIRO Div. Forest Res. AGPS Canberra.
- Manzello S. Maranghides A., Mell E. M. (2007) Firebrand generation from burning vegetation; *International Journal of Wildland Fire* 16(4) 458–462.
- Manzello S. Maranghides A., Shields J. R., Mell E. M., Yoshihiko H., Daiasaku N. (2008); Mass and size distribution of firebrands generated from burning Korean pine (*Pinus koraiensis*) trees. *Fire Mater* 2009; 33: 21-31.
- McArthur A. G. (1967) Fire behaviour in eucalypt forests. *Comm. of Australia For. & Timber Bur.* Leaflet No. 107.

- Muraszew A., Fedele J. B., Kuby W. C. (1975) Firebrand Investigation. Aerospace Report ATR-75 7470-1; The Aerospace Corp., 1975.
- Muraszew A.; J. B. Fedele, W. C. Kuby (1976) Investigation of fire whirls and firebrands. Aerospace Rep. ATR-76(7509)-1, The Aerospace Corp., El Segundo, Calif.
- Pagni P. J., Woicheese J. P.(2000) Fire Spread by Brand Spotting; Fifteenth Meeting of the UJNR Pane on Fire Research an Safety – March 1-7, 2000 – Volume 2.
- Pastor E., Zárate L., Planas E., Arnaldos J. (2003) Mathematical models and calculation systems for the study of wildland fire behavior . Science Direct. Progress in Energy and Combustion Science 29 (2003) 139-153.
- Pita LP, Viegas DX, Gaspar S, Schuman J (2010) Fuel Beds Ignition by Eucalyptus Bark. 6th International Conference on Forest Fire Research, Edited by Domingos Xavier Viegas. Coimbra, Portugal.
- Porterie B., Zekri, N., Clerc J. P., Loraud J. C. (2005) Influence des brandons sur la propagation d'un feu de forêt. C. R. Physique 6 (2005) 1153–1160
- Porterie B., Zekri, N., Clerc J. P., Loraud J. C. (2007) Modeling forest fire spread and spotting process with small world networks. Combustion and Flame 149 (2007) 63–78
- 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 (1993) Mann Gulch fire: a race that couldn't be won. USDA Forest Service, Intermountain Research Station Gen. Tech. Rep. INT-299, (Ogden, UT) 10 p.
- Sardoy N., Consalvi J., Porterie B., Fernandez-Pello A. (2007) Modelling transport and combustion of firebrands from burning trees. *Combustion and Flame* 150, 151-169.
- Sardoy N., Consalvi J., Fernandez-Pello, A. Porterie B., Kaiss (2009) Ground-level distribution of firebrands generated by line fires. *Combustion and Flame* 154, 478-488.
- 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.

- Tarifa C. S.; del Notario P. P. and Moreno F.G. (1965) On the Flight Paths and Lifetimes of Burning Particles of Wood . Tenth Symposium (International) on Combustion, Pp. 1021-1037.
- Tarifa C. S.; del Notario P. P.; Moreno F. G. and Villa A. R. (1967) Transport and Combustion of Firebrands. Final Report of Grants FG-SP-114 and FG-SP 146, Aeronautical Institute of Madrid for USDA.
- Viegas D. X., Ribeiro L. M., Viegas M. T., Pita L. P., Rossa C. (2009) Impacts of Fire on Society: Extreme Fire Propagation Issues. In 'Earth Observation of Wildland Fires in Mediterranean Ecosystems'. (Ed. E Chuvieco) Springer Verlag Geosciences.
- Wang (2006) Ember Attack: Its Role in the Destruction of Houses during ACT Bushfire in 2003. Bushfire Conference 2006 – Brisbane, Australia.
- Weber, R. O., De Mestre N. J., 1990 Flame Spread Measurements on Single Ponderosa Pine Needles: Effect of Sample Orientation and Concurrent External Flow, Combust. Sci. and Tech., 1990, Vol. 70, pp 17-32.
- Woicheese J. P., Pagni P. J., Liepmann D. (1997) Brand Lofting above Large-Scale Fires. 2nd International Conference on Fire Research and Engineering (ICFRE2), Boston, U.S.A.. Society of Fire Protection Engineers.

ANEXOS

ANEXO 1 – ANÁLISE DAS PROPRIEDADES DAS PINHAS			
Referência – côr	massa em base seca (g)	Altura (cm)	Diâmetro (cm)
1- amarela	129,04	15,5	10,0
2- cinza	115,78	14,0	9,5
3- cinza	117,27	14,5	10,0
4- intermédia	131,39	15,3	10,5
5- amarela	94,56	12,0	10,0
6- intermédia	65,75	10,5	8,5
7- intermédia	92,85	14,5	10,0
8- cinza	68,70	11,0	8,0
9- cinza	35,82	9,0	7,0
10- amarela	20,61	7,5	6,0

ANEXO 2- DETERMINAÇÃO DO CENTRO DE MASSA DAS PINHAS									
PINHA	1	2	3	4	5	6	7	8	9
h (cm)	9,5	8,9	15,6	11,3	12,3	13,4	12,9	12,3	12,2

ANEXO 3 – DETERMINAÇÃO DO NÚMERO DE ESCAMAS DAS PINHAS					
PINHA	m ₀ (g)	h (cm)	D (cm)	G _A	Nº. de escamas
1	115	17	10	1,63	137
2	125	17	11	1,94	143
3	100	12,8	10,8	2,13	138
4	70	13	9,5	2,15	140
5	80	12,5	9	1,61	141
6	155	12,5	9,5	0,96	142
7	60	12	10	2,83	139
8	50	12	10	3,39	138
9	30	8,5	3,5	0,31	135
10	15	7	6	2,43	135

ANEXO 4 – ANÁLISE DAS PROPRIEDADES DE DIVERSAS CASCAS DE EUCALIPTO				
Casca	Altura (cm)	Largura (cm)	e (mm)	m₀ (g)
1	10,2	7,8	0,8	2,47
2	11,1	5,4	0,9	2,55
3	15,3	7,1	0,8	3,34
4	15,6	5,5	0,7	2,51
5	19,8	4	0,8	2,50
6	29,5	4,6	0,6	4,00
7	20,1	6	1	5,11
8	23,5	8,3	0,9	6,83
9	24,5	7,4	1	6,17
10	27	9,1	1,1	12,44
11	34,6	9,2	1,2	15,56

ANEXO 5- ENSAIOS DE COMBUSTÃO DE PINHAS											
REFERÊNCIA DO ENSAIO		DADOS DO ENSAIO				DADOS DO COMBUSTÍVEL					
		U (m.s ⁻¹)	ρ_{ar} (g m ⁻³)	HR ar (%)	T _{ar} (K)	m _i (g)	Dimensões		G _A	Área ⊥ (cm ²)	Humidade (% BS)
							L (cm)	Ø (cm)			
TV070410	P1	5,34	1170	40	24,0	142,19	N/D	N/D	N/D	ND	13,6
	P2	5,34	1170	40	24,0	111,41	N/D	N/D	N/D	ND	13,37
TV070503	P1	0	1172	41	26,5	121,76	15,5	9,0	1,12	63,62	12,13
	P2	1,84	1172	41	26,5	129,06	15,5	9,5	1,22	70,88	12,04
	P3	4,08	1180	41	26,5	125,06	15,0	10,0	1,43	78,54	14,69
	P4	6,19	1180	47	26,5	114,58	16,5	9,5	1,34	70,88	13,39
	P5	8,27	1180	47	26,5	119,76	15,5	9,5	1,37	70,88	13,93
TV070529	P1	3,85	1180	52	19,5	69,76	10,0	8,0	1,25	50,27	10,22
	P2	3,74	1162	45	24,5	76,70	13,0	9,0	1,68	63,62	10,16
	P3	3,72	1163	48	24,0	132,10	17,0	11,0	1,82	95,03	9,31
TV070706	P1	3,69	1155	44	27,5	72,63	12,0	9,0	1,73	63,62	11,05
	P2	3,57	1149	41	29,0	103,46	15,5	10,5	1,99	86,59	11,36
	P3	5,13	1149	40	29,0	68,07	11,5	9,0	1,83	63,62	9,81
	P4	5,19	1147	38	29,5	143,27	18,5	9,5	1,17	70,88	9,36
	P5	3,48	1147	37	29,5	55,38	11,0	8,0	1,61	50,27	9,12
	P6	5,29	1145	37	30,0	75,90	12,0	8,0	1,21	50,27	10,44
	P7	5,34	1132	37	33,5	83,36	13,0	10,0	2,06	78,54	12,16
	P8	5,22	1132	37	33,5	109,90	15,3	9,0	1,23	63,62	9,15
TV070917	P1	0	1160	61	26,0	76,16	15,0	9,5	2,07	70,88	10,39
	P2	2,5	1168	66	24,0	75,29	13,0	10,3	2,50	83,32	10,39
	P3	4,12	1168	66	24,0	74,08	13,0	10,0	2,34	78,54	11,77
	P4	6,43	1168	66	24,0	74,47	14,5	8,5	1,55	56,75	9,52
	P5	8,14	1170	68	23,5	77,11	13,5	9,5	1,98	70,88	10,60
TV080416	P1	4,07	1188	50	20,0	121,19	17,0	10,5	1,77	86,59	11,43
	P2	6,5	1167	35	26,0	130,37	14,5	9,5	1,19	70,88	9,82
	P3	4,37	1167	35	26,0	66,31	8,5	7,5	1,06	44,18	9,36
	P4	4,23	1167	37	26,0	82,24	11,0	8,0	1,10	50,27	9,37
	P5	6,44	1167	40	26,0	121,24	14,5	9,5	1,28	70,88	9,41

ANEXO 6A: ENSAIOS ESTÁTICOS (ÂNGULOS DE IGNIÇÃO) – CASCAS DE EUCALIPTO

Ref. do ensaio	$\theta(^{\circ})$	U ($m.s^{-1}$)	m_0 (g)	L. (cm)	b_0 (cm)	b_1 (cm)	G_E
080908-U0C1	90	0	15,22	24	2,5	9	3,6
080908-U0C2	45	0	20,20	29,7	2,8	14,8	5,3
080908-U0C3	45	0	17,88	30,2	2,5	10,6	4,2
080908-U0C1	0	0	19,20	30	3,5	12	3,4
080908-U0C2	0	0	20,41	26,8	2,3	8	3,5
080922-U0C1	0	0	30,46	29,7	2,5	10,2	4,1
080922-U0C2	0	0	29,07	28,0	3	13,8	4,6
080922-U0C4	-6	0	25,63	14,0	2,8	14	5,0
080922-U0C3	-8	0	27,66	25,0	2,5	10,5	4,2
080922-U0C5	-10	0	30,79	26,5	1,8	10	5,6
080922-U0C6	-15	0	24,14	23,5	2,8	13,3	4,8
080922-U0C7	-30	0	27,32	23,0	2,6	9,2	3,5
080908-U0C6	-45	0	17,88	30,2	2,5	10,6	4,2
080908-U0C7	-45	0	15,10	30,2	1	2,1	2,1
080908-U0C8	-45	0	20,20	30,7	2,8	14,8	5,3
080908-U0C9	-90	0	14,31	22,5	2,3	9	3,9
08107-U2C3	90	2,1	23,68	31,0	2,9	17	5,9
08107-U2C2	47	2,2	21,14	24,7	2,4	10,5	4,4
08107-U2C1	4	2,3	16,35	28,5	2,4	10,5	4,4
08107-U2C4	-4	2,3	17,83	26,5	2,7	8,5	3,1
08107-U2C6	-47	2,4	20,86	24,0	2,7	8	3,0
08107-U2C5	-90	2,1	21,11	31,0	2,6	14,5	5,6
08107-U2,5C3	90	3,3	30,28	30,1	3,1	11	3,5
08110-U2,5C5	90	3,3	12,95	17,5	2,6	10,0	3,8
08107-U2,5C2	60	3,4	21,23	27,5	2,6	10	3,8
08110-U2,5C4	45	3,3	15,37	21	2,6	10,0	3,8
08107-U2,5C1	0	3,2	19,61	30,7	2,6	10	3,8
08107-U2,5C4	0	3,7	23,23	30,0	2,5	8,5	3,4
08110-U2,5C3	0	3,6	16,54	24	2,8	10,0	3,6
08110-U2,5C2	-45	3,2	31,31	31	3,7	12,7	3,4
08107-U2,5C6	-65	3,4	35,24	31,0	2,5	8	3,2
08107-U2,5C5	-90	3,1	26,49	29,9	3,1	11	3,5
08110-U2,5C1	-90	3,3	19,55	30	2,8	9,0	3,2
08107-U3C3	90	4,5	16,49	30,9	2,3	13	5,7
08107-U3C2	50	4,7	26,97	26,0	2,9	10,5	3,6
08107-U3C1	3	4,7	20,62	29,4	2,9	10,5	3,6
08107-U3C4	-3	4,7	18,78	28,0	2,7	13	4,8
08107-U3C6	-40	4,7	26,99	25,0	2,7	13	4,8
08107-U3C5	-90	4,2	24,33	30,7	2,3	13	5,7
08107-U3,5C2	-45	5,4	32,50	25,0	2,6	10	3,8
08107-U3,5C1	-90	5,5	28,36	25,5	3,1	10	3,2

ANEXO 6B: ENSAIOS ESTÁTICOS (ÂNGULOS DE IGNIÇÃO) – PINHAS						
Ref. do ensaio	$\theta(^{\circ})$	$U (m.s^{-1})$	$m_0 (g)$	$h (cm)$	$D (cm)$	G_A
081001-U0P7	90	0	112,21	10,5	13,5	3,3
081001-U0P8	45	0	106,64	10,5	12,5	2,8
081001-U0P5	45	0	108,7	9,8	13,5	3,4
081001-U0P4	0	0	110,75	10,0	14,0	3,7
081001-U0P1	0	0	110,72	8,5	12,5	2,6
081001-U0P9	0	0	107,32	9,5	13,0	3,1
081001-U0P3	-45	0	109,08	10,0	13,5	3,4
081001-U0P2	-45	0	108,37	10,0	13,0	3,1
081001-U0P6	-90	0	107,19	9,5	14,5	4,2
081016-U2P1	-90	2,19	84,26	12,0	9,0	1,5
081016-U2P2	-45	2,22	84,83	12,0	9,0	1,5
081016-U2P3	0	2,25	81,46	12,0	8,8	1,5
081016-U2P5	45	2,29	80,06	12,2	9,0	1,6
081016-U2P4	90	2,19	81,32	12,2	9,0	1,6
081016-U3P3	0	4,47	88,35	12,0	8,8	,4
081016-U3P4	-30	4,48	85,01	12,0	8,5	1,3
081016-U3P1	-60	4,63	85,44	12,0	9,0	1,5
081016-U3P2	-90	4,63	83,17	12,5	8,5	1,3
081016-U4P2	6,39	-45	82,07	12,0	8,8	1,4
081016-U4P1	6,57	-90	87,32	12,5	9,0	1,5

ANEXO 6C: ENSAIOS ESTÁTICOS (ÂNGULOS DE IGNIÇÃO) – ESCAMAS				
Ref. do ensaio	$m_0 (g)$	Comprimento (cm)	Largura (cm)	$\theta(^{\circ})$
082209U0E2	0,77	2,0	4,0	90
082209U0E5	0,74	2,1	3,8	45
082209U0E6	0,81	2,0	4,0	45
082209U0E4	0,83	2,0	4,0	0
082209U0E3	0,77	2,0	4,0	0
082209U0E7	0,89	2,0	4,2	-45
082209U0E8	0,8	2,1	3,8	-45
082209U0E9	0,7	2,0	3,8	-45
082209U0E1	0,91	2,0	4,0	-90
082209U0E10	0,74	2,1	3,2	-90

ANEXO 7: ENSAIOS DINÂMICOS (ÂNGULOS DE IGNIÇÃO) – CASCAS DE EUCALIPTO										
COM VELOCIDADE DE VENTILAÇÃO VARIÁVEL										
Ref. do ensaio	$\theta(^{\circ})$	$U (m.s^{-1})$	Variação de $U (m.s^{-1})$	$U anterior (m.s^{-1})$		$m_0 (g)$	$L (cm)$	$b_0 (cm)$	$b_1 (cm)$	G_E
090415- UΔC1	45	0	---	---	---	17,24	30,2	12,3	2,37 5	5,2
		4,39	4,39	0						
		2,35	-2,04	4,39	↓					
090415- UΔC2	45	0	---	---	---	9,74	30,4	10,6	2,2	4,8
		6,82	6,82	0						
		2,41	-4,41	6,82	↓					
090415- UΔC3	45	0	---	---	---	15,39	32	15,6	3	5,2
		4,56	4,56	0						
		0	-4,56	4,56	↓					
090415- UΔC4	45	0	---	---	---	9,88	31	11,2	2,6	4,3
		2,13		0						
		0	-2,13	2,13	↓					
090415- UΔC5	45	0	---	---	---	14,46	30,6	9,3	2,4	3,9
		4,42	4,42	0						
		2,38	-2,04	4,42	↓					
090415- UΔC6	45	0	---	---	---	15,08	31,4	8,3	2,3	3,6
		4,53	4,53	0						
		0	-4,53	4,53	↓					
090415- UΔC7	45	0	---	---	---	9,47	30,1	8	1,9	4,2
		2,01	2,01	0						
		0	-2,01	2,01	↓					
090415- UΔC8	45	0	---	---	---	15,61	30,5	11,8	2,4	4,9
		4,29	4,29	0						
		6,67	2,38	4,29						
090415- UΔC9	45	0	---	---	---	13,03	30,2	9,8	2,5	3,9
		2,02	2,02	0						
		0	-2,02	2,02	↓					
090415- UΔC10	45	0	---	---	---	18,25	28,7	15,2	2,4	6,3
		2,17	2,17	0						
		6,72	4,55	2,17						
090415- UΔC11	45	0	---	---	---	10,89	29,8	8,5	2,2	3,9
		6,69	6,69	0						
		NR		---	---					
090415- UΔC12	45	0	---	---	---	11,52	30,6	11	2,1	5,2
		6,72	6,72	0						
		NR		6,72	---					
080326- UΔC1	45	0	---	---	---	18,72	30,3	15	2,8	5,3
		1,89	1,89	0						571
		6,76	4,87	1,89						43

ANEXO 7: ENSAIOS DINÂMICOS (ÂNGULOS DE IGNIÇÃO) – CASCAS DE EUCALIPTO

Ref. do ensaio	$\theta(^{\circ})$	$U (m.s^{-1})$	Varição de $U (m.s^{-1})$	U anterior ($m.s^{-1}$)		$m_0 (g)$	$L (cm)$	$b_0 (cm)$	$b_1 (cm)$	G_E
080326- UΔC2	45	0	---	---	----	22,11	30,2	16,5	2,8	5,8
		2,19	2,19	0						928
		4,57	-2,38	2,19						57
080326- UΔC4	45	0	---	---	----	18,22	31	10,5	3,1	3,3
		6,94	6,94	0,00						870 97
080326- UΔC5	45	0	---	---	----	17,62	30,5	17,5	3,1	5,6
		6,79	6,79	0						451
		0	-6,79	6,79	↓					61
		2,16	2,16	0						
080326- UΔC6	45	0	---	---	----	11,62	31,1	12	2,4	5
		6,81	6,81	0						
		2,49	-4,32	6,81	↓					
		0	-2,49	2,49	↓					
		6,69	6,69	0						
080326- UΔC7	45	0	---	---	----	15,51	33	11	2,5	4,4
		2,16	2,16	0						
		4,75	-2,59	2,16						
080326- UΔC8	45	0	---	---	----	10,46	31	8,8	2,3	3,8
		2,23	2,23	0						26
		4,21	-1,98	2,23						08 7
090424- UDC1	45	0	---	---	----	12,55	30	12	2,14 9	5,6
		6,96	6,96	0						
		2,37	-4,59	6,96	↓					
090424- UDC2	45	0	---	---	----	11,52	30,3	7,3	2,12 5	3,4
		6,67	6,67	0						
		4,47	-2,2	6,67	↓					
090424- UDC3	45	0	---	---	----	11,39	30,5	8,3	1,85	4,5
		4,39	4,39	0						
		0	-4,39	4,39	↓					
090424- UDC4	45	0	---	---	----	12,11	30,3	8,5	1,85	4,6
		4,24	4,24	0						
		0	-4,24	4,24	↓					
090424- UDC5	45	0	---	---	----	9,84	30,5	7,5	1,75	4,3
		4,57	4,57	0						
		0	-4,57	4,57	↓					
090424- UDC6	45	0	---	---	----	11,31	31	7,5	1,77 5	4,2
		4,48	4,48	0						
		2,29	-2,19	4,48	↓					

ANEXO 7: ENSAIOS DINÂMICOS (ÂNGULOS DE IGNIÇÃO) – CASCAS DE EUCALIPTO

Ref. do ensaio	$\theta(^{\circ})$	$U (m.s^{-1})$	Varição de $U (m.s^{-1})$	U anterior ($m.s^{-1}$)		$m_0 (g)$	$L (cm)$	$b_0 (cm)$	$b_1 (cm)$	G_E
090424-UDC7	45	0	---	---	----	----	7,87	30,2	7	1,6 75
		2,16	2,16	0						
		4,36	2,2	2,16	↓					
090424-UDC8	45	0	---	---	----	11,82	30,2	9,7	1,6	6,1
		4,42	4,42	0						
		6,54	2,12	4,42						
090424-UDC9	45	0	---	---	----	6,66	29,7	5,5	1,65	3,3
		4,69	4,69	0						
		6,64	1,95	4,69						
090424-UDC10	45	0	---	---	----	13,48	30	10,4	2,32 5	4,5
		6,61	6,61	0						
		4,54	-2,07	6,61	↓					
090424-UDC11	45	0	---	---	----	18,11	30,4	13,7 5	2,07 5	6,6
		6,61	6,61	0						
		4,96	-1,65	6,61	↓					
090424-UDC12	45	0	---	---	----	10,94	29,8	10,9	1,97 5	5,5
		6,57	6,57	0						
		4,57	-2	6,57	↓					

ANEXO8 – ROTAÇÃO EM TORNO DO EIXO LONGITUDINAL					
Ref do ensaio	m_0 (g)	b_0 (cm)	b_1 (cm)	L (cm)	Rotação (rpm)
SpEB01	11,12	2	10,6	30,1	327
SpEB02	26,51	3,075	15,8	30	628
SpEB03	33,7	2,45	9,4	29,8	1031
SpEB04	15,93	2,1	17,5	29,5	697
SpEB05	16,07	2,2	17,7	29,7	835
SpEB06	17,72	1,7	7,75	30	0
SpEB07	13,11	0	10,65	29,8	0

ANEXO 9: ENSAIOS COM PINHAS PARCIALMENTE QUEIMADAS						
	m_0 (g)	m_f (g)	% queima (% m/m)	h (cm)	\varnothing (cm)	A (cm ²)
PINHA 1A	99,80	99,80	0	13,5	11,0	95,0
PINHA 2A	100,56	100,56	0	14,0	11,5	103,9
PINHA3A	103,20	103,20	0	13,5	11,5	103,9
PINHA 4A	102,62	58,03	43	11,4	11,3	100,2
PINHA 5A	101,45	53,02	48	12,0	7,5	44,7
PINHA 6A	99,67	53,59	46	10,0	10,7	90,7
PINHA 7A	99,90	67,22	33	10,9	11,0	94,2
PINHA 8 A	101,51	40,84	60	10,3	9,1	64,5
PINHA 9 A	100,89	53,39	47	8,0	9,1	65,0
PINHA 10A	99,21	34,44	65	ND	7,0	38,4
PINHA 11A	100,20	18,25	82	4,8	5,9	27,0
PINHA 12A	102,64	58,40	43	9,0	9,7	74,0

ANEXO10 – DETERMINAÇÃO DA VELOCIDADE TERMINAL DAS CASCAS DE EUCALIPTO						
Casca	m_0 (g)	L (cm)	b_1 (cm)	b_0 (cm)	e (mm)	Humidade (%)
C1	10,07	30	11,65	2,2	0,9	13,77
C2	35,88	29,8	10,75	2,6	3	13,76
C3	18,47	30,5	18,1	2,225	0,7	14,48
C4	23,56	30	12,75	2,5	1,8	13,74
C5	14,05	30	12,6	2,2	0,7	14,41
C6	16,06	30,3	14,25	2,15	0,9	13,88
C7	15,06	30,3	10,05	1,975	1	13,89

ANEXO11 – DETERMINAÇÃO DOS COEFICIENTES AERODINÂMICOS							
Amostras	L (cm)	m_0 (g)	b_0 (cm).	b_1 (cm)	e (mm)	T (°C)	H (%)
EBQ6	30	15,29	2,5175	9,5	1,225	13,2	64
C19	30	19,76	2,5	13,45	1,1	15,3	60
	25	59,02	2,67	13,1	1,1		
	20	55,86	2,57	13,25	1,1		
C18	30	28,05	2,75	11	2	15,1	62
	25	22,71	2,7	10,55	2,05		
	20	17,64	2,6	10,8	1,9		
	15	12,78	2,425	20,5	1,8		
C20	30	15,15	2,375	18,45	0,8	17,4	60
	25	12,01	2,4	16,8	1,8		
	20	9,22	2,15	15,8	2,8		

ANEXO12 – ENSAIO DE VALIDAÇÃO DO PROGRAMA DE SIMULAÇÃO							
	Massa (g)	b_0 (cm)	b_1 (cm)	e (mm)	L (cm)	T (°C)	Humidade (%)
C1	14,2	2,6	12,4	1,3	30	13	65
C2	13,5	2,6	14,1	0,9	30		
C3	14,6	2,8	15,6	1	30		
C4	14,4	2,9	14,5	1	30		
C5	13,4	3	16,3	0,9	30		
C6	15,3	2,5	9,5	1,2	30		
C7	14,1	2,2	12,0	1	30		
C8	14,7	2,4	13,0	0,9	30		
C9	13,6	2,2	13,4	1,2	30		
C10	13,8	2,3	12,0	1,2	30		
C11	13,4	2,5	15,1	1	30		
C12	14	2,7	14,2	1,2	30		
C13	13,9	2,4	13,2	0,9	30		