



**Mário Jorge Costa
Tomé**

**Modelação da nuvem de retardante químico:
Optimização no combate aos fogos florestais**



**Mário Jorge Costa
Tomé**

**Modelação da nuvem de retardante químico:
Optimização no combate aos fogos florestais**

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Doutor em Ciências Aplicadas ao Ambiente, realizada sob a orientação científica do Doutor Carlos Borrego, Professor Catedrático no Departamento de Ambiente e Ordenamento da Universidade de Aveiro.

Apoio financeiro da FCT e do FSE no âmbito do III Quadro Comunitário de Apoio

o júri

presidente

Doutor António Francisco Carrelhas Cachapuz
Professor Catedrático da Universidade de Aveiro.

vogais

Doutor Domingos Xavier Filomeno Carlos Viegas
Professor Catedrático da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra.

Doutor Carlos Alberto Diogo Soares Borrego
Professor Catedrático da Universidade de Aveiro.

Doutora Celeste Oliveira Alves Coelho
Professora Catedrática da Universidade de Aveiro.

Doutor Hermínio da Silva Botelho
Professor Associado da Universidade de Trás-Os-Montes e Alto Douro.

Doutora Ana Isabel Couto Neto Silva Miranda
Professora Auxiliar da Universidade de Aveiro.

Doutor Manuel Joaquim Sabeça Feliciano
Assistente do 1º. Triénio da Escola Superior Agrária do Instituto Politécnico de Bragança.

agradecimentos

Ao Professor Doutor Carlos Borrego, o meu mais sincero agradecimento pela oportunidade concedida, ensinamentos e incentivos demonstrados ao longo da execução desta Tese e por todos os esforços enveredados no sentido de apoiar a minha formação.

Ao Departamento de Ambiente e Ordenamento da Universidade de Aveiro, pelo acolhimento e disponibilização de meios.

Ao Mestre Charles George do Departamento Florestal do Ministério da Agricultura Norte-Americano (USDA FS) por aceitar o meu estágio e pelo seu acompanhamento atencioso em Missoula. Obrigado também pelos preciosos comentários, via email, ao longo do presente trabalho.

Aos colegas discentes, funcionários e docentes do Departamento de Ambiente e Ordenamento da Universidade de Aveiro.

Aos colegas docentes da Escola Superior Agrária de Ponte do Lima pelos incentivos e ao Conselho Directivo o apoio cedido.

Aos familiares, uma palavra de gratidão por terem sido muitas vezes privados da minha companhia e pelo encorajamento que procuraram inculcar-me.

À Universidade de Aveiro por ter acolhido os trabalhos de Doutoramento.

À Comissão Europeia que através do projecto europeu ACRE (ENV4-CT98-0729) promoveu e financiou parte do presente trabalho.

Por último, mas não menos importante, o meu reconhecimento à Fundação para a Ciência e a Tecnologia pela atribuição da bolsa PRAXIS XXI/BD/13725/97.

resumo

O número de fogos e a área ardida em Portugal têm aumentado nos últimos anos. As causas para este facto são diversas. Importa, pois, conhecê-las para as poder eliminar. Esta filosofia preventiva encontra-se hierarquicamente acima de uma atitude remediativa como o combate aos incêndios florestais. Contudo, não existindo uma eficiência plena na prevenção, deve o Estado munir-se das ferramentas necessárias para um combate eficaz deste problema que surge todos os verões. Os meios aéreos são um exemplo por excelência de eficácia, uma vez que possibilitam a descarga de milhares de litros de água ou retardantes químicos sobre, ou a jusante, da frente de fogo. A sua velocidade, aliada à possibilidade em aceder mesmo a sítios remotos para meios terrestres, torna-os ainda mais valiosos nos meses quentes. Porém, a sua eficácia encontra-se associada à construção de uma linha contínua de retardante, com a largura e concentração adequada. Caso tal não se verifique, estar-se-á a desperdiçar em parte, esta ferramenta. Ainda hoje não se conhece toda a física da nuvem, especialmente a atomização/deformação e dispersão da mesma na atmosfera, pelo que a forma de aplicar o retardante não está otimizada.

Exceptuando o sistema MAFFS, a aplicação de retardantes químicos ou água faz-se pela abertura do aerotanque, ficando o líquido sujeito à acção da gravidade. Ao sair do tanque, as forças aerodinâmicas atomizam o fluido, formando gotas milimétricas ou menores. Estas gotas, por sua vez, vão cair até atingirem o solo ou a vegetação. Durante este percurso, a nuvem de gotas é dispersada, sofre ainda evaporação e, em menor extensão, troca de calor com o ar atmosférico.

Importa referir que são diversas as variáveis operacionais que condicionam a mancha de retardante no solo. Dentro destas, as mais influentes são (1) a velocidade de voo (2) altura de voo, (3) caudal de saída de retardante, (4) direcção de voo e (5) propriedades físicas do retardante, nomeadamente viscosidade e elasticidade. Estas variáveis devem ser ajustadas de forma a otimizar a descarga de retardante numa situação concreta, interessando analisar a mancha necessária para parar ou diminuir a frente de fogo e variáveis ambientais como o vento, temperatura e humidade atmosférica. De forma a integrar o efeito de todas as variáveis, foram realizadas simulações que utilizam estes parâmetros operacionais como *inputs*. Foram usados dois modelos distintos - RAM e FLUENT - com propósitos e alcances diferentes.

O trabalho desenvolvido permitiu concluir acerca da aplicabilidade de códigos CFDs para modelar a nuvem de retardante. Estas simulações descrevem várias propriedades associadas à nuvem, nomeadamente (i) campo de velocidades, (ii) turbulência, (iii) humidade, (iv) temperatura, (v) densidade, (vi) trajectória das gotas de retardante e (vii) pressão.

As simulações comprovam que os aerotanques mais modernos, que controlam e debitam um caudal constante, são mais eficientes, por produzirem uma mancha igualmente mais uniforme segundo a sua longitudinal. O MAFFS é um sistema especial que possui esta mesma vantagem, existindo ainda outros exemplos comerciais com libertação gravítica do fluido. Os sistemas mais recentes são, contudo, mais caros e de utilização limitada na Europa.

As simulações efectuadas permitem inferir acerca do efeito das principais variáveis operacionais:

- No que se refere à altura de voo, verifica-se uma correlação directa com o aumento da dispersão transversal e uma consequente diminuição das concentrações de retardante. Para largadas a alturas inferiores a 30 metros, existem riscos acrescidos de o fluído atingir o solo antes de ser completamente atomizado, pondo em perigo vidas e bens em terra. Este valor mínimo de segurança deve ser ajustado tendo em conta o caudal, a viscosidade e a elasticidade do retardante, bem como o aerotanque em causa;
- A trajectória de voo é definida pela posição e orientação da mancha de retardante necessárias a jusante da frente de fogo. Contudo, o ângulo entre a trajectória do avião e a direcção do vento atmosférico condiciona a dispersão da nuvem, especialmente das gotas mais finas;
- A variável mais influente na mancha de retardante é dada pelo cociente entre o caudal de retardante à saída do aerotanque e a velocidade do avião, ou seja, a quantidade de líquido debitado por unidade de tempo e de espaço linear percorrido pelo avião;
- As propriedades físicas do fluido influenciam directamente o comportamento da nuvem. A atomização do líquido é inversamente proporcional à visco-elasticidade do retardante, o que afecta a distribuição granulométrica das gotas. A fase final do revestimento do combustível é dependente da visco-elasticidade e também da tensão superficial do retardante;
- Diversos outros parâmetros operacionais influenciam o comportamento da nuvem e, portanto, a mancha de retardante, como as condições atmosféricas (vento, humidade e temperatura) e a proximidade à frente de fogo;

A título conclusivo, sugerem-se aerotanques que debitam um caudal constante, apontam-se os cuidados a ter com a altura da largada e alerta-se para a necessidade de ajustar as propriedades físicas do fluido às circunstâncias do incêndio em questão. Não se tendo esgotado o presente estudo, recomenda-se a sua continuação ao nível da simulação e da aferição dos modelos através de ensaios à escala real.

abstract

Both area and number of forest fires have grown during the last years. There are several causes that explain this fact. It is important to know these causes in order to avoid them. Prevention is more desirable than the remediation of fire fighting. However, the efficiency of the prevention is below 100 % and, thus, there is the need of wildfire fighting tools. Aerial means are an excellent example of efficiency as they can drop thousands litres of water or chemical retardants above or at the front of the fire line. Aircraft velocities and its possibility to access remote places for terrestrial means, make them even more important in an integrated system. However, their efficiency is dependent on the continuity of the crop pattern with both cross range and concentrations needed. If these levels of retardant are not achieved, its efficiency can be low. The physics of the retardant cloud is not yet known in detail, especially the atomization/deformation of the bulk liquid, and thus the application of the retardant is not optimized.

Except in the MAFFS, the aerial application of retardants begins by the liquid exit promoted by gravity. As the liquid leaves the air tanker, this fluid is subject to aerodynamic forces that atomize the retardant into droplets. These particles fall in the atmosphere till they reach the ground or the vegetation. During the cloud trajectory, droplets are dispersed, evaporated and exchange heat with the surrounding air.

There are several operational variables that influence the retardant pattern at the ground. The most important are: (1) airplane velocity, (2) airplane height, (3) retardant flow-rate, (4) direction between airplane and wind and (5) physical properties of the retardant fluid, mainly the viscosity and elasticity. These parameters can and should be adjusted in order to optimize the aerial application of retardants in function of the retardant pattern needed to slow down the fire and the environmental conditions like wind, humidity and air temperature. In order to integrate all of the influencing variables, simulations were made, by using these variables as model inputs. Two models were used – RAM and FLUENT with different purposes.

The developed work allowed verifying that CFDs are applicable in order to describe the cloud behaviour. Performed simulations compute several cloud properties such as: (1) wind field, (2) turbulence, (3) humidity, (4) temperature, (5) density, (6) droplets trajectory and (7) pressure field.

The simulations preclude that the most modern air tankers that control the flow-rate are more efficient because they produce a more constant retardant pattern along its longitudinal. MAFFS is an example of such technology, coexisting with others where the retardant is released by the gravity force. These new systems are, however, more expensive and rarely used in Europe.

The developed simulations allow the following conclusions:

- In what concerns the flight height, there is an increase of the lateral dispersion of retardant and a decrease in the retardant pattern maximum concentrations. For drops below 30 meters, there is a considerable risk of injury for people on the ground because the fluid can attain the soil before a complete atomization. This minimum value must be adjusted considering the fluid properties and the retardant flow rate exiting the air tanker and its geometry;
- Although the airplane trajectory is defined by the desired fire wall, the angle between the airplane and the wind influences the dispersion of the cloud, especially of the smaller droplets;
- The most important parameter affecting the retardant pattern is the ratio between the flow-rate and the airplane velocity, which is the amount of retardant released by unit of time and space;
- The retardant properties do affect the cloud behaviour and thus the efficiency. The atomization is inversely proportional to the visco-elasticity. The third phase of the retardant coating is dependent of the viscosity and also on the superficial tension of the chemical retardant.
- There are other parameters that influence the retardant cloud at a less extent, like the atmospheric conditions (temperature, humidity and stability) and the proximity of the fire front.

The main conclusions that arise from this work are (1) the recommendation of the use of the most modern air tankers with constant flow-rate, (2) care with low height drops, (3) and the adjustment of the retardant physical properties with the real characteristics of the fire being analyzed. The study presented is not terminated and, thus, it is recommended its continuation at the level of the models validation extent based on more experimental work.

À Célia pelo apoio
Ao Pedro pelos sorrisos

ÍNDICE

1 FOGOS FLORESTAIS: MODELAÇÃO E COMBATE	1
1.1 Introdução	1
1.2 Breve análise histórica do controle dos fogos em Portugal	3
1.3 Impactes dos incêndios florestais	6
1.4 Evolução da área florestal em Portugal	9
1.5 Progressão do fogo	10
1.5.1 Química da combustão	10
1.5.2 Diferentes tipos e comportamento de fogos	13
1.5.3 Efeito de diversos factores	16
1.5.4 Modelação do comportamento do fogo	23
1.5.5 Modelação da progressão do fogo como ferramenta de combate	24
1.6 Produtos usados para combate dos incêndios	25
1.6.1 Retardantes de curta duração	27
1.6.2 Retardantes de longa acção	31
2 FÍSICA DA NUVEM DE RETARDANTE QUÍMICO	35
2.1 Introdução	35
2.2 Atomização e Reologia	39
2.3 Dispersão das gotas	50
2.3.2 Cálculo da trajectória das partículas na atmosfera	58
2.4 Penetração da canópia e/ou deposição do retardante	66
2.5 Modelação da penetração	72
3 ENSAIOS EXPERIMENTAIS	75
3.1 Introdução	75
3.2 Dados meteorológicos	78
3.3 Medição do tamanho de gotas na mancha de retardante	80
3.4 Recolha de imagens vídeo	83
3.5 Medição da precipitação de retardante ao solo	85
4 MODELAÇÃO	97
4.1 Modelos existentes	97
4.1.1 PKWB - Picot Kristmanson Basak-Brown Wallace model	98

4.1.2 FSCBG - Forest Service Cramer Barry Grim model	99
4.1.3 PATSIM PATtern SIMulation	100
4.1.4 FLUENT	103
4.1.5 Breve comparação dos 4 modelos descritos	104
4.2 Modelos utilizados	105
4.2.1 RAM	106
4.2.2 FLUENT	112
5 RESULTADOS DA MODELAÇÃO E COMPARAÇÃO COM DADOS EXPERIMENTAIS	129
5.1 Simulações	129
5.2 Resultados das simulações	134
5.2.1 Resultados do caso A com o Fluent	135
5.2.2 Resultados do caso B com o Fluent	142
5.2.3 Resultados do caso A com o RAM	145
5.2.4 Resultados do caso B com o RAM	146
5.3 Comparação dos resultados da modelação com as medições	150
5.4 Notas finais	158
6 CONCLUSÕES	161
REFERÊNCIAS	165
ANEXO I	

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 - Variação temporal do impacto ambiental de um incêndio florestal.....	6
Figura 1.2 – Esquema geral da pirólise da celulose (adaptado de Simoneit et al., 1999).	11
Figura 1.3 – Representação esquemática das reacções e produtos envolvidos na 2ª via da pirólise (Simoneit et al., 1999).	12
Figura 1.4 – Tipos de fogos relativos ao meio de propagação (Cottrell, 1989).	14
Figura 1.5 – Corte transversal de um fogo florestal (Cottrell, 1989).	15
Figura 1.6 – Projecção de partículas incandescentes.....	16
Figura 1.7 – Espécies dominantes na floresta Portuguesa (Borrego et al., 1991).	18
Figura 1.8 – Efeito do vento no fogo (Chandler et al., 1991).....	21
Figura 1.9 – Efeito da inclinação do terreno no aquecimento dos combustíveis.	23
Figura 1.10 – Os três factores básicos de sustentação do fogo.	25
Figura 1.11 – Calor sensível e latente da água (adaptado de Perry e Green, 1997).	27
Figura 1.12 – O processo de formação da espuma a partir de espumífero concentrado (NWCG, 1992).	29
Figura 1.13 – Efeito dos surfactantes adicionados à água.....	30
Figura 1.14 – Tipo de espuma para combate aos fogos florestais.....	31
Figura 2.1 – Imagens de um tanque aéreo e respectivo sistema de abertura das 6 comportas independentes.	36
Figura 2.2 – Sistema MAFFS para acoplamento em aviões Hércules C-130.	37
Figura 2.3 – Fenómenos físicos associados à nuvem de retardante.	38
Figura 2.4 – Escoamento de um fluido Newtoniano entre duas placas horizontais.	39
Figura 2.5 – Variação da tensão tangencial com o gradiente de velocidades para diferentes fluidos (Schowalter, 1997).	40
Figura 2.6 – Forças actuantes em meia gota de líquido.	42
Figura 2.7 – Esquema dos diferentes mecanismos de atomização, em função do nº de Weber (Pilch e Erdman, 1987).	45
Figura 2.8 – Imagem de um camião esmagado por uma descarga de retardante efectuada a baixa altitude (Cortesia de Charles George, USDA FS).	47
Figura 2.9 – Diâmetro médio das gotas de retardante em função de diversos tipos de retardante com várias concentrações e da velocidade do avião.....	48
Figura 2.10 – Influência da reologia sobre o tamanho das gotas produzidas na atomização à velocidade de 64 km.h ⁻¹ (Van Meter e George, 1981).....	49
Figura 2.11 – Diâmetro médio de gotas de retardantes (adaptado de Van Meter, 1983).	50
Figura 2.12 – Volume de análise com a fase dispersa (partículas ou gotas).	51
Figura 2.13– Espaçamento entre partículas.....	54
Figura 2.14 – Forma geométrica de uma gota de retardante com mais de 3 mm, em queda livre. ...	60
Figura 2.15 – Velocidade terminal de gotas de água em ar à temperatura de 20° C e pressão de 1 bar (Clift et al., 1978).	61
Figura 2.16 – Diâmetro da gota ao longo do tempo para diferentes temperaturas e humidade relativa de 10%.	64
Figura 2.17 – Taxas iniciais de evaporação de uma gota de 1 mm de diâmetro em função da temperatura e da humidade atmosférica.	64
Figura 2.18 – Impacção da gota com o combustível.	67
Figura 2.19 – Modelo de combustível (fractal) e respectiva malhagem para utilização num CFD. 72	
Figura 2.20 – Visualização da disposição de várias árvores e de alguns dados estatísticos da cobertura vegetal (criado com o <i>Stand Visualization System</i> (SVS), desenvolvido no USDA FS por R. J. McGaughey).	73
Figura 3.1 – Imagens relativas às acções no aeroporto de Marignane durante a preparação do retardante e enchimento do aerotanque.	76

Figura 3.2 – Localização dos 1188 recipientes usados em Marselha (ACRE, 2000).....	77
Figura 3.3 – Imagens relativas ao procedimento da medição da precipitação de retardante através da grelha de recipientes.	77
Figura 3.4 – Exemplo da deposição de retardante ao solo (Giroud, 2000).	78
Figura 3.5 – Estação meteorológica usada nos ensaios.....	79
Figura 3.6 – Dados registados pela estação sónica durante o período de um ensaio.	80
Figura 3.7 – Sistema simples para amostragem de gotas de retardante.	81
Figura 3.8 – Sistema rotativo para medição do tamanho das gotas de retardante.....	81
Figura 3.9 – Utilização de azoto líquido para amostrar gotas de retardante por congelamento.....	82
Figura 3.10 – Representação esquemática da posição das duas câmaras de vídeo.	84
Figura 3.11 – Vista frontal da nuvem de retardante ao longo do tempo.	84
Figura 3.12 - Vista lateral da nuvem de retardante ao longo do tempo.....	85
Figura 3.13 – Níveis de precipitação da mancha de retardante na largada n.º 1.	87
Figura 3.14 – Níveis de precipitação da mancha de retardante na largada n.º 2.	88
Figura 3.15 – Níveis de precipitação da mancha de retardante na largada n.º 3.	88
Figura 3.16 – Níveis de precipitação da mancha de retardante na largada n.º 4.	89
Figura 3.17 – Níveis de precipitação da mancha de retardante na largada n.º 6.	89
Figura 3.18 – Níveis de precipitação da mancha de retardante na largada n.º 7.	90
Figura 3.19 – Níveis de precipitação da mancha de retardante na largada n.º 8.	90
Figura 3.20 – Níveis de precipitação da mancha de retardante na largada n.º 9.	91
Figura 3.21 – Níveis de precipitação da mancha de retardante na largada n.º 10.	91
Figura 3.22 – Níveis de precipitação da mancha de retardante na largada n.º 11.	92
Figura 3.23 – Níveis de precipitação da mancha de retardante na largada n.º 12.	92
Figura 3.24 – Níveis de precipitação da mancha de retardante na largada n.º 13.	93
Figura 3.25 – Níveis de precipitação da mancha de retardante na largada n.º 14.	93
Figura 3.26 – Níveis de precipitação da mancha de retardante na largada n.º 15.	94
Figura 3.27 – Níveis de precipitação da mancha de retardante na largada n.º 16.	94
Figura 3.28 – Níveis de precipitação da mancha de retardante na largada n.º 17.	95
Figura 3.29 – Níveis de precipitação da mancha de retardante na largada n.º 18.	95
Figura 4.1 – Aplicação do modelo PBKW (adaptado de Picot e Kristmanson, 1997).....	98
Figura 4.2 – Representação esquemática do modelo PATSIM (Swanson et al., 1975).	101
Figura 4.3 – Geometria do aerotanque <i>Rosenblam</i> . (George e Johnson, 1990).	102
Figura 4.4 – Níveis de cobertura de retardante em função da altitude do avião. Simulado com o modelo PATSIM para a abertura em simultâneo dos dois reservatórios interiores do aerotanque <i>Rosenblam</i> . (George e Johnson, 1990).....	102
Figura 4.5 - Representação esquemática do RAM.	107
Figura 4.6 – Quantidade de líquido atomizado ao longo do espaço bidimensional (xz).....	109
Figura 4.7 – Interação entre a fase contínua e a fase discreta.....	119
Figura 4.8 – Deposição das partículas em função do seu diâmetro e tipo de emissão.	121
Figura 4.9 – Representação esquemática do acoplamento entre as duas fases.....	123
Figura 5.1 – Caudal e distribuição granulométrica para as gotas utilizados nas simulações do caso B.	130
Figura 5.2 – Malha de cálculo usada no caso A.	131
Figura 5.3 - Quantidade de líquido atomizado no espaço bidimensional (XZ) para o caso B.	133
Figura 5.4 – Concentração de retardante (kg.m^{-3}) e linhas de corrente no plano de simetria $Y = 0$, para $t = 1,0$ segundo. Eixos X e Z em metros.....	135
Figura 5.5 - Concentração de retardante (kg.m^{-3}) e campo de ventos no plano de simetria $Y = 0$, para $t = 2,0$ segundos. Eixos X e Z em metros.	136
Figura 5.6 - Concentração de retardante (kg.m^{-3}) e campo de ventos no plano de simetria $Y = 0$, para $t = 3,0$ segundos. Eixos X e Z em metros.	136
Figura 5.7 - Concentração de retardante (kg.m^{-3}) e campo de ventos no plano de simetria $Y = 0$, para $t = 4,0$ segundos. Eixos X e Z em metros.	137

Figura 5.8 - Concentração de retardante ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$) e campo de ventos no plano de simetria $Y = 0$, para $t = 5,0$ segundos. Eixos X e Z em metros.	137
Figura 5.9 – Temperatura do ar (K) no plano de simetria para $t = 3,0$ segundos. Eixos X e Z em metros.	138
Figura 5.10 – Concentração de vapor de água ($\text{kg H}_2\text{O}\cdot\text{Kg}^{-1}$ ar.) no plano de simetria para $t = 3,0$ segundos. Eixos X e Z em metros.	138
Figura 5.11 – Campo de pressão (Pa relativos a 1 atm) no plano de simetria para $t = 3,0$ segundos. Eixos X e Z em metros.	138
Figura 5.12 – Energia cinética turbulenta ($\text{m}^2\cdot\text{s}^{-2}$) no plano de simetria para $t = 3,0$ segundos. Eixos X e Z em metros.	139
Figura 5.13 – Energia de dissipação turbulenta ($\text{m}^2\cdot\text{s}^{-3}$) no plano de simetria para $t = 3,0$ segundos. Eixos X e Z em metros.	139
Figura 5.14 – Viscosidade turbulenta ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$) no plano de simetria para $t = 3,0$ segundos. Eixos X e Z em metros.	139
Figura 5.15 – Linhas de corrente 3D para $t = 3$ segundos, iniciadas à entrada do domínio na vertical de $y = 0$. A escala de cores é respeitante à coordenada transversal Y (em metros). O volume a vermelho corresponde ao interior da nuvem de retardante para concentrações de $0,01 \text{ l}\cdot\text{m}^{-3}$. Eixos X, Y e Z em metros.	140
Figura 5.16– Linhas de corrente no plano transversal $X = 100 \text{ m}$ em $t = 3,0$ segundos. A escala de cores corresponde à velocidade tangente ao corte (V_z e V_y). A malha a vermelho é o invólucro da nuvem de retardante para concentrações de $0,01 \text{ l}\cdot\text{m}^{-3}$. Eixos X, Y e Z em metros.	141
Figura 5.17 – Mancha de retardante simulada pelo FLUENT para o caso A (sistema MAFFS). Precipitação em mm e eixos X e Y em metros.	141
Figura 5.18 - Concentração de retardante ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$) no plano $Y = 25\text{m}$ e linhas de corrente, para $t = 1,0$ segundo. Eixos X, Y e Z em metros.	142
Figura 5.19 - Concentração de retardante ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$) no plano $Y = 25\text{m}$ e linhas de corrente, para $t = 2,0$ segundos. Eixos X, Y e Z em metros.	142
Figura 5.20 - Concentração de retardante ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$) no plano $Y = 25\text{m}$ e linhas de corrente, para $t = 3,0$ segundos. Eixos X, Y e Z em metros.	143
Figura 5.21 - Concentração de retardante ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$) no plano $Y = 25\text{m}$ e linhas de corrente, para $t = 4,0$ segundos. Eixos X, Y e Z em metros.	143
Figura 5.22– Linhas de corrente projectadas no plano $Z = 10 \text{ m}$ e concentração de retardante superior a $0,01 \text{ l}\cdot\text{m}^{-2}$ nos planos $Z = 10\text{m}$, $Y = 25 \text{ m}$ e $X = 120 \text{ m}$ para $t = 3,0$ segundos. Eixos X, Y e Z em metros.	144
Figura 5.23 – Mancha de retardante simulada pelo FLUENT para o caso B. Precipitação em mm e eixos X e Y em metros.	144
Figura 5.24 – Nuvem de retardante do sistema MAFFS, dois segundos após o início da descarga. A escala de cores é relativa à concentração de retardante na atmosfera em $\text{l}\cdot\text{m}^{-3}$. Cortes apresentados em $X = 70\text{m}$; $Y = 25 \text{ m}$; $Z = 15\text{m}$. Eixos X, Y e Z em metros.	145
Figura 5.25 - Mancha de retardante simulada pelo RAM para o caso A (sistema MAFFS). Precipitação em mm e eixos X e Y em metros.	146
Figura 5.26 – Nuvem de retardante do caso B, um segundo após o início da descarga. A escala de cores é relativa à concentração de retardante na atmosfera em $\text{l}\cdot\text{m}^{-3}$. Cortes apresentados em $X = 45 \text{ m}$; $Y = 25 \text{ m}$; $Z = 26 \text{ m}$. Eixos X, Y e Z em metros.	146
Figura 5.27 - Nuvem de retardante do caso B, dois segundos após o início da descarga. A escala de cores é relativa à concentração de retardante na atmosfera em $\text{l}\cdot\text{m}^{-3}$. Cortes apresentados em $X = 90 \text{ m}$; $Y = 25 \text{ m}$; $Z = 15 \text{ m}$. Eixos X, Y e Z em metros.	147
Figura 5.28 - Nuvem de retardante do caso B, três segundos após o início da descarga. A escala de cores é relativa à concentração de retardante na atmosfera em $\text{l}\cdot\text{m}^{-3}$. Cortes apresentados em $X = 130 \text{ m}$; $Y = 25 \text{ m}$; $Z = 2 \text{ m}$. Eixos X, Y e Z em metros.	148

Figura 5.29 - Nuvem de retardante do caso B, quatro segundos após o início da descarga. A escala de cores é relativa à concentração de retardante na atmosfera em $l.m^{-3}$. Cortes apresentados em $X = 130$ m; $Y = 25$ m; $Z = 2$ m. Eixos X, Y e Z em metros.	149
Figura 5.30 – Mancha de retardante ao solo, simulada com o RAM para o caso B. (precipitação em mm e eixos X e Y em metros).	149
Figura 5.31 – Mancha de retardante simulada pelo FLUENT para o caso A. Precipitação em mm. Eixos X e Y em metros.	150
Figura 5.32 - Mancha de retardante simulada pelo RAM para o caso A. Precipitação em mm e eixos X e Y em metros.	150
Figura 5.33 - Níveis de precipitação da mancha de retardante na largada n.º 16 (Figura 3.28). Precipitação em mm e eixos X e Y em metros.	152
Figura 5.34 – Simulação do caso B com o FLUENT. Precipitação em mm e eixos X e Y em metros.	152
Figura 5.35 - Simulação do caso B com o RAM. Precipitação em mm e eixos X e Y em metros.	152
Figura 5.36- Áreas cobertas de retardante associadas a cada nível de precipitação.	155
Figura 5.37 - Comprimento da mancha de retardante associado a cada nível de precipitação.	156
Figura 5.38 Vista frontal da nuvem de retardante para $t = 1$ s, 2 s, 3 s e 4 segundos. Simulações com o FLUENT e fotografias dos ensaios em Marselha.	157
Figura 5.39 - Vista lateral da nuvem de retardante para $t = 1$ s, 2 s, 3 s e 4 segundos. Simulações com o FLUENT e fotografias dos ensaios em Marselha.	157

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1 - Limites superiores e inferiores dos factores de emissão de poluentes	7
Tabela 2.1 – Quantidade de retardante necessário para retardar uma frente de chamas em função do tipo de combustível nos EUA (adaptado de George, 1981).	69
Tabela 3.1 – Parâmetros operacionais relativos às 18 largadas de retardante efectuadas em Marselha	86
Tabela 4.1 – Valores dos números de Schmidt usados no modelo $k - \varepsilon$	117
Tabela 5.1 – Valores dos parâmetros operacionais utilizados nas simulações numéricas.	130
Tabela 5.2 - Valores utilizados na definição das condições iniciais das gotas.....	134
Tabela 5.3– Comparação numérica das manchas de retardante simuladas com a mancha obtida nos ensaios experimentais em Marselha.	154
Tabela 5.4 – Síntese dos principais efeitos e das inter-relações dos parâmetros operacionais	156

SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

c_p	calor específico da água ($\text{J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$)
N_i	fluxo molar de vapor ($\text{kmol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$)
\vec{F}	forças exteriores na partícula (N)
m_p	massa da gota (kg)
\vec{u}	velocidade (vectorial) do gás (m.s^{-1})
A_p	área de superfície da gota (m^2)
c_p	calor específico da gota ($\text{J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$)
c_p	calor específico da partícula ($\text{J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$)
h_{fg}	calor latente da água (J.kg^{-1})
h_{fg}	calor latente da água (J/kg)
\dot{m}_p	caudal mássico da partícula numérica (kg.s^{-1})
$\dot{m}_{p,0}$	caudal mássico inicial da partícula (kg.s^{-1})
C_D	coeficiente de arrasto (-)
D_m	coeficiente de difusão do vapor de água no ar ($\text{m}^2.\text{s}^{-1}$)
h	coeficiente de transferência convectiva de calor ($\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$)
k_c	coeficiente de transferência mássico (m.s^{-1})
C_s	concentração de vapor de água junto da gota (kmol.m^{-3})
C_∞	concentração de vapor de água suficientemente afastada da gota (kmol.m^{-3})
R	constante universal dos gases perfeitos ($8.314 \text{ J.kg}^{-1}.\text{mol}^{-1}.\text{K}^{-1}$)
d_p	diâmetro da gota (m)
k	energia cinética turbulenta, ECT ($\text{m}^2.\text{s}^{-2}$)
α	factor de sub-relaxação (-)
Y_j	fracção mássica da espécie j (-)
X_{H_2O}	fracção molar de vapor de água num local afastado da gota (-)
$\bar{m}_{p,0}$	massa inicial da particular (kg)
\bar{m}_p	massa média de partículas no volume de controlo (kg)
$\bar{\rho}_d$	massa volúmica aparente da fase secundária (kg.m^{-3})
ρ_d	massa volúmica real da fase secundária (kg.m^{-3})

Nu	número de Nusselt, $Nu = \frac{k_c d_p}{D_m}$ (-)
σ_k	número de Prandtl turbulento de k (-)
σ_ε	número de Prandtl turbulento de ε (-)
Sc	número de Schmidt, $Sc = \frac{\mu}{\rho D_m}$ (-)
c_p	poder calorífico da substância j ($kJ \cdot kg^{-1}$)
p_{op}	pressão (Pa)
T_∞	temperatura da fase continua (K)
T_p	temperatura da gota (K)
T_∞	temperatura do gás, num local afastado da gota (K)
τ_p	tempo de relaxação da partícula (s)
τ_v	tempo de resposta ou de relaxação (s)
σ	tensão superficial ($N \cdot m^{-1}$)
S_ε	termos fonte de ε
S_k	termos fonte de k
Δm_p	variação da massa da partícula ao atravessar a célula (kg)
ΔT	variação da temperatura da partícula ao atravessar a célula (K)
\vec{v}	velocidade (vectorial) da partícula ($m \cdot s^{-1}$)
A	área superficial de combustível que se pretende tratar (m^2)
C_D	coeficiente de arrasto (-)
D	diâmetro da gota (m)
D	diâmetro da gota (m)
d_p	diâmetro da partícula (m)
E	espessura do filme de retardante (m)
e_∞	pressão parcial de vapor longe da gota (Pa)
e_s	pressão parcial de vapor junto da gota (Pa)
$g_i = (0, 0, -9.8)$	vector gravidade ($m \cdot s^{-2}$)
K_1	constante empírica dependente da geometria das comportas do aerotanque
K_2	constante empírica dependente da reologia do retardante
M_a	massa molar da mistura “vapor + ar” ($g \cdot mol^{-1}$)
M_{ar_seco}	massa molar do ar seco ($28,9 g \cdot mol^{-1}$)
M_{H_2O}	massa molar da água ($18 g \cdot mol^{-1}$)

M_p massa molar do vapor (18 g mol⁻¹)
 P_a pressão atmosférica (1,013x10⁵ Pa)
 t tempo (s)
 $u_i = (u_x, u_y, u_z)$ flutuação da velocidade média do fluido (m.s⁻¹)
 $U_i = (U_x, U_y, U_z)$ velocidade média do fluido (m.s⁻¹)
 V volume de retardante (m³)
 V' quantidade de retardante retido por unidade de área de solo (m³.m⁻²)
 Vel Velocidade do “pacote” (~ 0,7 x velocidade do avião) (m.s⁻¹)
 $v_i = (v_x, v_y, v_z)$ flutuação da velocidade média da gota (m.s⁻¹)
 $V_i = (V_x, V_y, V_z)$ velocidade media da gota (m.s⁻¹)
 $Volume_{atomizado} (\Delta t)$ volume atomizado durante o intervalo de tempo Δt (l)
 $Volume_{pacote}$ volume inicial do “pacote” (l)
 $X_i = (X, Y, Z)$ posição média da gota (m)
 $x_i = (x, y, z)$ flutuação da posição média da gota (m)
 μ viscosidade dinâmica, também designada viscosidade absoluta (kg.m⁻¹.s⁻¹)
 ρ massa volúmica da gota (kg.m⁻³)
 ρ_w massa volúmica do vapor (kg.m⁻³)
 ρ_a massa volúmica do ar (~1,2 kg.m⁻³)

LISTA DE ACRÓNIMOS

<i>ACRE</i>	<i>Additifs Chimiques Rheologie Évaluation (projecto europeu ENV4-CT98-0729)</i>
<i>CFD</i>	<i>Computational Fluid Dynamics</i>
<i>FSCBG</i>	<i>Forest Service Cramer Barry Grim model</i>
<i>PKWB -</i>	<i>Picot Kristmanson Basak-Brown Wallace modelRAM Retardant Application Model</i>
<i>SNBPC</i>	<i>Serviço Nacional de Bombeiros e Protecção Civil</i>
<i>UA</i>	<i>Universidade de Aveiro</i>
<i>USDA FS:</i>	<i>United States Department of Agriculture Forest Service (Serviço Florestal do Departamento da Agricultura Norte-Americano)</i>

- ap.* - citado por (do latim apud)
e.g. - por exemplo (do latim exempli gratia)
et al. - e outros (do latim et alia)
etc. - e outras coisas mais (do latim et caetera)
i.e. isto é (do latim istud est)

1

FOGOS FLORESTAIS: MODELAÇÃO E COMBATE

1.1 Introdução

Proteger a floresta contra incêndios constitui um dos objectivos prioritários estabelecidos pela Lei de Bases da Política Florestal (Lei n.º 33/96 de 17 de Agosto). A presente Lei surge no seguimento do artigo 15º da Lei de Bases do Ambiente (Lei 11/87, de 7 de Abril) que prevê a adopção de medidas que visem, designadamente, a salvaguarda e valorização do património florestal.

Embora o fogo possa e deva ser encarado como um elemento dos ecossistemas naturais, a área florestal consumida em Portugal tem aumentado significativamente nos últimos anos, pelo que tem constituído motivo de apreensão crescente e merecido a classificação de calamidade. O recente verão de 2003 é um exemplo desta afirmação. Existem, certamente, diversas razões para o crescimento da superfície devastada que abrangem aspectos

associados ao modo de vida nos meios rurais, interesses económicos de legalidade questionável e causas mais difíceis de controlar, como as alterações climáticas. A complexidade do ordenamento florestal representa outro factor que levanta dificuldades a uma prevenção sustentada dos fogos. A substituição crescente de espécies nativas por espécies exóticas resinosas nas últimas décadas aumenta também a vulnerabilidade das florestas face aos incêndios. A juntar a tudo isto, deve apontar-se ainda a escassa limpeza das matas e a falta de construção e manutenção de caminhos que permitam o acesso às viaturas dos bombeiros.

A existência de meios logísticos adequados para uma resposta pronta e imediata aos fogos florestais é uma necessidade imperiosa de forma a minimizar os seus efeitos ambientais e os prejuízos socio-económicos e ainda a evitar perdas mais significativas, como é o caso de vidas humanas. Entre os impactes directos dos fogos sobre os descritores ambientais contam-se a dizimação florística e faunística, as profundas alterações da paisagem, o aumento da vulnerabilidade dos solos à erosão e as repercussões na qualidade do ar quer a nível local, quer à escala global, pelas elevadas emissões de dióxido de carbono. Todos estes impactes dos incêndios correspondem a um afastamento da sustentabilidade desejada para o planeta Terra.

Desde a antiga Grécia que o fogo é admirado e mesmo catalogado como um dos cinco constituintes básicos do Universo. Controlar o fogo era sinónimo de Poder para muitas tribos ancestrais e ainda hoje a superintendência e compreensão deste componente são tidas como elementos que concorrem para o aumento do bem-estar socio-económico. Contemporaneamente, o Homem tem investigado este fenómeno físico-químico de uma forma mais fundamentada e científica de forma a controlá-lo, destacando-se o combate aos fogos selvagens.

A temática de fogos florestais é um exemplo por excelência da multidisciplinaridade e interdisciplinaridade necessárias para a sua abordagem racional e integrada. A química, mecânica de fluidos, biologia, silvicultura, meteorologia e matemática são disciplinas usadas actualmente com aplicação na modelação do comportamento do fogo e que servem como base a uma melhor gestão estratégica da política florestal. O grande esforço

científico da última década, suportado em grande parte pelo financiamento de projectos europeus de investigação, contribuiu para o fortalecimento da cooperação entre equipas de diferentes países e áreas disciplinares com vista ao desenvolvimento e validação de modelos e técnicas aplicadas para fazer face aos fogos florestais que todos os Verões assolam a Europa, especialmente os países mediterrânicos.

O combate eficaz aos fogos florestais requer a aplicação de táticas e estratégias adequadas ao problema. O presente trabalho tem por objectivo o melhoramento de uma das ferramentas disponíveis para essas mesmas táticas – o combate aos fogos com retardantes químicos aplicados por meios aéreos. As vantagens de um meio de combate como este são, na sua maioria, evidentes. A possibilidade de transportar grandes quantidades de produto em tempo real e sobre áreas pouco acessíveis por via terrestre torna os meios aéreos numa ferramenta indispensável, numa estrutura moderna e organizada de combate aos fogos.

1.2 Breve análise histórica do controle dos fogos em Portugal

A preocupação e tentativa de minorar os prejuízos de eventuais incêndios em Portugal remontam há vários séculos, de acordo com alguns documentos legais. D. João I, em 1414, estabeleceu a pena de 20 libras para os que “puserem fogo nas matas por nós coutadas ou nelas cortarem lenha ou armarem armadilhas” (Rego, 2000).

A limpeza das florestas é também uma técnica secular de prevenção dos fogos. A utilização da energia da biomassa dos combustíveis na indústria de vidros da Marinha Grande remonta ao tempo do Marquês de Pombal. O alvará desta fábrica (1769) indica que “O Guarda-mor e mais pessoas encarregues do Pinhal de Leiria, e dos mais que lhe ficam circunvizinhos, não farão embaraço algum a que a fábrica se possa servir das lenhas que lhe forem precisas dos mesmos pinhais” (Rego, 2000). Um relatório oficial de 1857 reconhece as vantagens desta medida na prosperidade da referida fábrica e na protecção da “riqueza do estado”. Outra ferramenta preventiva de grande alcance usada ao nível do planeamento florestal é a descontinuidade horizontal dos combustíveis à escala da

paisagem. Esta descontinuidade pode ser total ou consistir numa junção de áreas com diferentes espécies que dificultem a propagação do fogo. Esta medida também não é recente e a prova disso é a Portaria de 2 de Outubro de 1813 com o objectivo de preservar dos incêndios frequentes os pinhais a Sul do Tejo: “...manda o Príncipe Regente nosso Senhor que todas as câmaras do Sul do Tejo obriguem os proprietários dos pinhais do seu distrito a fazerem talhadas e aceiros nos que lhe pertencem, ficando as mesmas câmaras, e especialmente o seu procurador, responsáveis pelos danos causados pelos fogos naqueles distritos em que se não houver executado esta real ordem” (Rego, 2000).

A técnica do contra-fogo é uma ferramenta de luta contra os incêndios com grande potencialidade. No entanto, a sua utilização de uma forma pouco cuidada pode tornar-se numa complicação acrescida, especialmente nos casos de mudança da direcção do vento. Esta é a razão da grande polémica em torno do uso, hoje em dia, dos contra-fogos pelos bombeiros em Portugal. Esta ferramenta está intimamente relacionada com os fogos controlados, pretendendo-se neste caso uma redução dos combustíveis rasteiros. De forma a facilitar o seu controlo, os fogos planeados devem ser lentos, fazendo-os descer encostas ou avançar contra o vento e desencadeando-os em dias de temperaturas e humidades adequadas. Já em 1836, Varnhagen, primeiro administrador Geral das Matas em Portugal, descreve o uso de fogos controlados no Pinhal de Leiria: “Esta queima deve fazer-se com vento próprio, largando-se o fogo do lado oposto ao vento, não devendo este ser muito rijo” (Varnhagen, 1836; *ap.* Rego, 2000). Varnhagen afirma ainda que a altura ideal para efectuar estas queimadas são os “dias secos de Inverno”, uma vez que “o fogo queimará a caruma sem prejudicar as raízes dos pinheiros”.

Em suma, as técnicas preventivas disponíveis hoje em dia para prevenção dos fogos florestais não são propriamente recentes. A recolha tradicional dos combustíveis finos para fins energéticos ou a sua utilização nos terrenos agrícolas está praticamente extinta. Contudo, existem possibilidades de esta recolha poder voltar a ser efectuada noutros moldes. A central térmica de Mortágua, por exemplo, pretende aferir a viabilidade ecológica e económica da combustão de resíduos florestais. Hoje em dia, e tendo em conta as emissões dos fogos controlados, esta técnica apoiada em sistemas de tratamento de efluentes gasosos e novas tecnologias de queima de resíduos, parece ser “ambientalmente

mais correcta”, uma vez que minimiza as emissões de poluentes atmosféricos, além de haver um aproveitamento útil da energia da combustão.

Em finais da década de setenta foi criada a Comissão Nacional Especializada de Fogos Florestais (CNEFF). Contudo, a CNEFF apenas surgiu oficialmente em 1987 pela Resolução do Conselho de Ministros n.º 30/87, e foi reformulada pela resolução do Conselho de Ministros de 21 de Março de 1991. Esta comissão tinha como principais objectivos incentivar a cooperação das diversas instituições envolvidas nesta temática, elaborar planos de acção e promover a investigação científica (Costa, 2000). A recente extinção da CNEFF originou algumas críticas por parte de políticos e cientistas que salientam a importância e o seu bom desempenho na luta contra os Incêndios florestais. Além do apoio à investigação, a CNEFF promoveu a melhoria das infra-estruturas florestais, nomeadamente: (i) abertura e reparação de caminhos, (ii) abertura de aceiros, (iii) construção de pontos de água e (iv) alargamento de caminhos florestais. O Decreto-Lei n.º 179/99 de 21 de Maio criou equipas de Sapadores Florestais, estabelecendo para o território do continente, as regras e os procedimentos a observar na sua criação e regulamentando apoios à sua actividade. Entre as funções das equipas de Sapadores Florestais encontram-se:

- Limpeza de povoamento;
- Realização de Fogos controlados;
- Manutenção e beneficiação da rede divisional;
- Vigilância e apoio ao combate de incêndios e às operações de rescaldo;
- Sensibilização do público para as normas de conduta em matéria de acções de prevenção, do uso do fogo e da limpeza das florestas.

Actualmente, os bombeiros voluntários, coordenados pelo Serviço Nacional de Bombeiros e Protecção Civil (SNBPC), sob tutela do Ministério da Administração Interna (MAI), são o rosto da luta contra os fogos florestais. No preâmbulo do Decreto-Lei 49/2003, que deu origem ao SNBPC, é referido que esta nova instituição irá criar “...mecanismos que permitem assegurar actuações atempadas e eficazes na prevenção de acidentes e na prestação de socorros, definindo linhas de comando, estabelecendo áreas de intervenção, fixando competências e atribuições, optimizando recursos e qualificando agentes”. Esta

nova instituição (SNPCB) resulta da fusão e conseqüente extinção do Serviço Nacional de Bombeiros, do Serviço Nacional de Protecção Civil e da Comissão Nacional Especializada de Fogos Florestais.

1.3 Impactes dos incêndios florestais

Os impactes dos fogos florestais verificam-se em diversos descritores ambientais e podem ocorrer quer de uma forma directa, quer indirecta. Os descritores ambientais mais relevantes no caso dos fogos são a qualidade do ar, fauna, flora, paisagem e solos. Teoricamente, um impacte é definido como a diferença da qualidade do descritor na ocorrência do incêndio e na ausência do mesmo, ao longo do tempo (Figura 1.1).

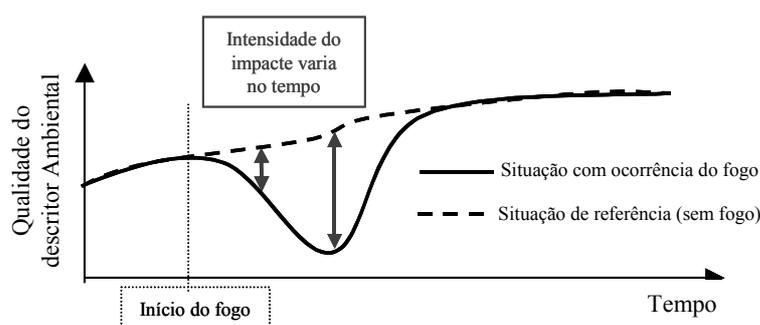


Figura 1.1 - Variação temporal do impacte ambiental de um incêndio florestal.

Em termos de qualidade do ar, constata-se que os incêndios são uma fonte importante de emissões de diferentes poluentes gasosos e partículas para a atmosfera. Estas emissões contribuem para a diminuição da qualidade do ar local e mesmo regional, dependendo da dimensão do fogo (Miranda, 1998). A uma escala temporal e espacial mais elevadas, verifica-se que os fogos contribuem significativamente para o aumento da concentração de CO₂ na atmosfera, revelando um impacte considerável ao nível das alterações climáticas (Crutzen e Andreae, 1990). Em simultâneo, contribuem para o aumento das emissões de CO₂ pela queima de combustíveis fósseis e para o decréscimo da área florestal na Terra, reduzindo a actividade fotossintética e, conseqüentemente, a absorção de CO₂ (Goulden et al., 1996; Tans et al., 1990). Esta situação é preocupante e contribui para agravar o efeito

de estufa da Terra. Contudo, recentemente têm sido publicados trabalhos científicos que atribuem uma contribuição reduzida dos fogos nesta temática. Segundo estes trabalhos, os incêndios florestais concorrem com menos do que 1% das emissões antropogénicas de CO₂ para a atmosfera.

Miranda (1998) apresenta uma extensa compilação de investigações científicas destinadas a quantificar as emissões de diferentes poluentes, abordando diversas classes de vegetação, tipos de fogo, fases do incêndio e distintos trabalhos laboratoriais e de campo. Apesar das emissões variarem com o tipo e fase de fogo, flora, humidade da vegetação e do ar, podem indicar-se intervalos característicos de emissões para os incêndios florestais (Tabela 1.1).

Tabela 1.1 - Limites superiores e inferiores dos factores de emissão de poluentes.

Poluente	CO ₂	CO	PT ¹	CH ₄	HCNM ²	HCT ³
Factor de emissão (g.kg ⁻¹)	150 - 2000	6 - 359	1 - 87	0,2 - 10	1 - 19	1 - 22

¹ Partículas totais; ² Hidrocarbonetos não metano; ³ Hidrocarbonetos totais

Além dos compostos listados na tabela anterior, há ainda que contabilizar outros poluentes minoritários, tais como as dioxinas e furanos, que devido à sua elevada toxicidade representam um grande risco para os bombeiros e para as populações afectadas pela pluma de fumo. Muitos destes poluentes reagem quimicamente entre si ou com moléculas do ar para originar novas moléculas – poluentes secundários – como é o caso do ozono e hidrocarbonetos oxidados característicos do *smog* fotoquímico.

Os impactes na flora são os mais evidentes e têm uma ligação muito forte com os impactes na fauna e paisagem. Moreira e Rego (2000) apresentam uma compilação de informação relevante sobre este assunto. De acordo com estes autores, os efeitos ecológicos podem ser agrupados em quatro áreas temáticas: 1) ecologia da vegetação; 2) ecologia animal; 3) interacção planta-animal e 4) ecologia da paisagem. Em geral, depois de um incêndio num bosque de *Pinus pinaster*, a vegetação herbácea cresce rapidamente, devido aos nutrientes das cinzas e luminosidade, atingindo o máximo de desenvolvimento por volta dos 3-4 anos. Isto deve-se à competição natural com as espécies arbustivas que aumentam progressivamente a sua altura até aos 5 anos após o fogo (Moreira e Rego, 2000). Assim, a

manipulação da vegetação pode ser efectuada com recurso a fogos controlados. Todavia, a frequência destes últimos é motivo de discórdia e disputa de interesses com os pastores a optarem por fogos frequentes e os empresários madeireiros a preferirem uma ausência total de incêndios. A destruição da biomassa florística contribui para um decréscimo da fauna, uma vez que esta depende dos produtores primários para a sua cadeia alimentar. Simultaneamente, os fogos são responsáveis por uma nítida redução da qualidade paisagística, tornando os locais afectados menos atraentes para muitos animais, em especial para a avifauna.

Quanto aos impactes socio-económicos dos fogos florestais, é fundamental lembrar que o sector florestal, em Portugal, produz anualmente, de uma forma directa, cerca de 150 milhões de contos através das seguintes actividades em ordem decrescente de importância: 1) madeira para serrar e folhear; 2) pasta de papel; 3) cortiça; 4) caça; 5) frutos e produtos silvestres; 6) lenha; 7) rolaria para exportação e 8) resina. Estima-se que o valor acrescentado bruto da silvicultura a preços de 1993 tenha atingido os 470 milhões de contos, representando 3,5% do Produto Interno Bruto (Costa, 2000). Este autor refere ainda que em 1998 o sector florestal representou 12% das exportações (441 milhões de contos), situando-o em 2.º lugar, logo depois dos têxteis e vestuário. O sector florestal emprega 260000 pessoas, ou seja, 6% da população activa. A indústria da madeira e mobiliário ocupa mais de 100000 pessoas. Tendo em conta estes números, é fácil perceber que os fogos tendem a baixar os rendimentos deste sector e ameaçam muitos postos de trabalho. Estima-se que a floresta portuguesa fixa, em média, 30 toneladas de CO₂ em celulose por hectare e por ano. Esta absorção de CO₂ é equiparada a benefícios económicos na ordem dos 40 milhões de contos no caso de Portugal (Costa, 2000). Com a entrada em vigor do mercado das cotas de emissão de CO₂, este benefício ambiental irá ter uma tradução directa em dinheiro, tornando-se mais evidente para a sociedade e governo.

Com base num estudo da Direcção Geral de Florestas (DGF), os prejuízos dos fogos florestais ocorridos em 2000 terão ultrapassado os 450 milhões de euros ou 90 milhões de contos (Vieira, 2002). Nos últimos cinco anos, Portugal tem gasto em combate aos fogos florestais cerca de 25 milhões de euros, sendo cerca de metade deste montante dispendido com meios aéreos (Vieira, 2002). Embora este montante pareça significativo, a verdade é

que fica longe dos prejuízos provocados pelos incêndios estimados em cerca de 600 contos por hectare. Existe claramente um défice de investimento na defesa da floresta nacional, sendo urgente um reforço das verbas aplicadas na limpeza, prevenção e combate aos fogos.

Calé (2002) refere que a Associação para a Valorização da Floresta de Pinho quer duplicar nos próximos 20 anos a produtividade de pinhal bravo, passando dos actuais 5,3 para cerca de 11 m³ madeira por ano e por hectare. Além disso, pretende-se ainda que por volta de 2010 existam condições logísticas para arborizar 15 mil hectares anualmente. Esta decisão é, em parte, baseada na actual situação que corresponde a um *deficit* da balança comercial em 122 milhões de euros no sector madeireiro. O mesmo autor afirma ainda que esta medida levanta dúvidas no que se refere à biodiversidade, justificando esta ideia com a seguinte frase de Henrique Pereira dos Santos: “... se não fosse o fogo, o país já estaria cheio de eucaliptos e pinheiros”. Esta afirmação realça os conflitos existentes entre os interesses económicos e ecológicos patentes na escolha entre pinheiro bravo e eucaliptos *versus* as folhosas nobres como os carvalhos, os castanheiros ou os freixos. Note-se que estas últimas folhosas além de constituírem habitats mais ricos do ponto de vista ecológico (Cabral e Telles, 1999) são também mais resistentes aos incêndios do que as resinosas. O Arquitecto Ribeiro Teles defende mesmo uma floresta composta apenas por folhosas sem qualquer Pinheiro Bravo ou Eucalipto. Seja como for, a correcta gestão florestal pressupõe uma perspectiva de médio/longo prazo e a incorporação de medidas ou cuidados ambientais de forma a aumentar a sustentabilidade económica do próprio sector.

1.4 Evolução da área florestal em Portugal

A taxa de arborização passou de 22% no início do século para 37% em 1995. Este aumento deveu-se à rápida expansão da área de eucalipto após a década de 60, tendo havido uma diminuição da área de pinheiro, enquanto que a área de sobreiro se manteve igual. A superfície florestal é de 3,3 milhões de ha, enquanto que uma área de cerca de 3,0 milhões de ha se destina à agricultura. Tendo em conta a política agrícola actual, é previsível que possa haver um acréscimo da área florestada de 80% com pinheiro bravo, sobreiro e outras

folhosas, mas não de eucalipto, uma vez que se supõe que a actual área de eucaliptal esteja já no limite do potencial ecológico (Costa, 2000).

A área de floresta ardida sofreu um grande aumento a partir de 1973. Desde esse ano e até 1999 estima-se que tenham sido devastados cerca de 1,2 milhões de ha, representando uma média de 43000 ha por ano. Quanto ao número de fogos, só existem dados fiáveis a partir de 1983, ano em que se registaram 17000 incêndios florestais. O número médio de ocorrências aumentou, na última década, para valores aproximados de 24000 fogos por ano. No entanto, a área anual ardida neste período manteve-se sensivelmente constante, registando-se em geral valores de 42000 ha.ano⁻¹ (Costa, 2000). Vieira (2002) apresenta dados fornecidos pela DGF relativos às áreas ardidas entre 1980 e 2001, sendo possível observar algumas discordâncias com os dados de Costa (2000). Segundo os dados da DGF, nos últimos 22 anos têm ardido em média cerca de 80000 ha por ano contabilizando matos e povoamentos. Além deste valor médio relativo às últimas duas décadas, é importante realçar a grande variabilidade anual, tendo-se verificado que em 1988 arderam cerca de 20000 ha, e 180000 ha em 1991 (Vieira, 2002). No verão de 2003, e de acordo com o *site* da DGF (www.dgf.min-agricultura.pt), até ao dia 24 de Agosto haviam já ardido cerca de 336000 hectares. É ainda importante realçar que 80% desta área foi consumida em apenas uma semana, de 28 de Julho a 03 de Agosto. Por outro lado, cerca de 40% da área ardida situa-se na região agrária da Beira Interior, o que permite concluir acerca da grande concentração temporal e espacial de grandes incêndios florestais associados a condições meteorológicas extremas.

1.5 Progressão do fogo

1.5.1 Química da combustão

O fogo pressupõe a reacção química entre um combustível e um oxidante, normalmente o O₂ atmosférico. Esta reacção de combustão (oxidação-redução) requer uma fonte de calor para se iniciar. Após a ignição, a reacção liberta energia suficiente para se auto alimentar enquanto houver combustível e oxigénio disponíveis. A reacção é, portanto, exo-

energética, produzindo CO_2 , H_2O e outros poluentes gasosos, partículas, carvão, etc. A libertação de energia é maioritariamente térmica, sendo a restante emitida por radiação visível e infravermelha. No caso dos resíduos florestais, a reacção é bastante complexa, correspondendo na verdade a uma sucessão de reacções químicas onde se produzem compostos intermédios como o alcatrão e óleos voláteis. Note-se que os combustíveis florestais são constituídos basicamente por celulose, hemicelulose, pectina e compostos extraíveis. Mais detalhes da constituição dos resíduos florestais encontram-se desenvolvidos no ponto 1.5.3.1.

A combustão da celulose tem dois percursos possíveis, formando diferentes produtos e emitindo mais ou menos energia consoante a via seguida na pirólise (Figura 1.2).

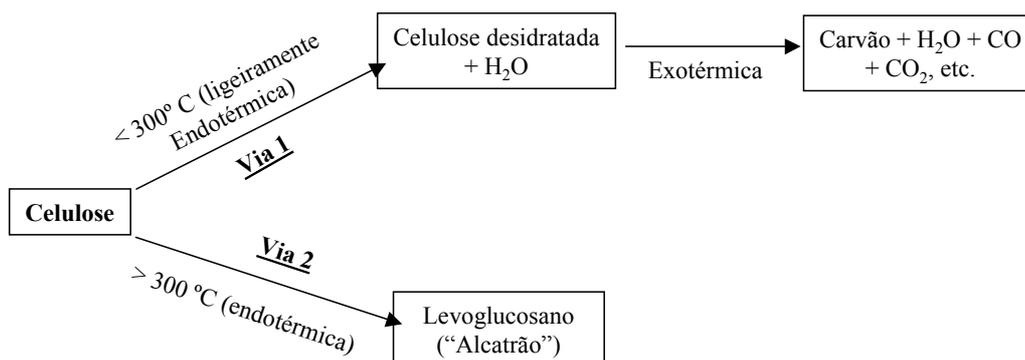


Figura 1.2 – Esquema geral da pirólise da celulose (adaptado de Simoneit et al., 1999).

De acordo com a figura anterior, verifica-se que a celulose se decompõe na presença de uma fonte de calor por duas vias alternativas e competitivas. A primeira domina a temperaturas inferiores a $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ e corresponde à desidratação da celulose, fragmentando-se seguidamente para formar carvão e gases leves (Pappa et al., 1995). A segunda via ocorre a temperaturas superiores a $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ e corresponde à fragmentação do polímero de celulose em diversos anidromonossacarídeos, sobretudo 1,6-anidrido de glucopiranosose, designado vulgarmente por levoglucosano (Figura 1.3).

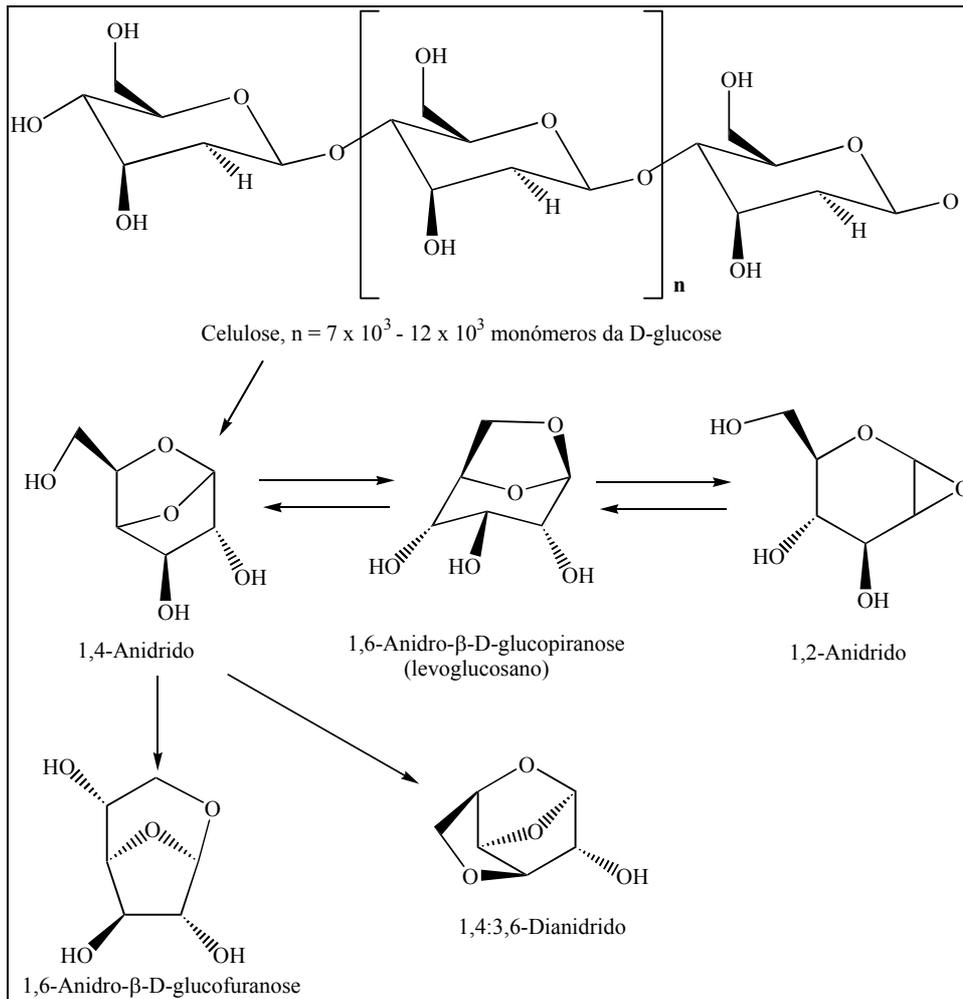


Figura 1.3 – Representação esquemática das reacções e produtos envolvidos na 2ª via da pirólise (Simoneit et al., 1999).

Os produtos de qualquer uma das vias da pirólise são posteriormente oxidados, libertando grandes quantidades de energia. Contudo, os produtos da 2ª via tendem a originar substâncias voláteis que ardem na fase gasosa, formando chamas. No caso do carvão, a oxidação é superficial, contribuindo para uma combustão incandescente, mais lenta e incompleta e portanto menos exo-energética. Saliente-se ainda que o carvão é oxidado a CO, sendo este posteriormente oxidado a CO₂. Na realidade, os processos de combustão e pirólise não actuam faseada nem isoladamente, havendo uma grande influência de outros fenómenos físicos tais como a transferência de calor, convecção, difusão, radiação, etc. Todos estes fenómenos interagem simultaneamente, conferindo ao fogo uma grande complexidade físico-química.

Em termos da progressão do fogo é importante avaliar a quantidade de energia produzida por unidade de celulose queimada. Em termos líquidos e globais as reacções de oxidação desta molécula pela via reaccional 1 libertam mais energia do que a via 2. É neste facto que se baseia a utilização dos retardantes químicos, os quais promovem a desidratação da celulose ou seja a via reaccional 1 em detrimento da via 2. Desta forma os retardantes químicos de longa duração promovem um decréscimo da energia libertada na combustão, diminuindo simultaneamente a velocidade macroscópica da progressão do fogo. Este assunto encontra-se desenvolvido no §1.6.

1.5.2 Diferentes tipos e comportamento de fogos

Existem dois grandes tipos de fogos florestais consoante são ou não controlados. Fogos não controlados são vulgarmente designados por incêndios florestais. Os fogos controlados visam a limpeza/redução da biomassa rasteira de forma a minimizar o risco de incêndios florestais. Por vezes os fogos controlados são também usados com o intuito de reduzir o número de árvores por unidade de área para potenciar a produção de madeira. Estes fogos controlados, além de serem levados a cabo com uma série de precauções logísticas para o controlo da propagação ao perímetro desejado, apenas são realizados em condições físicas (vento, temperatura e humidade do ar e dos combustíveis) previamente bem definidas.

Verifica-se que a maioria dos fogos florestais se propaga em combustíveis rasteiros (herbáceas e arbustos) e do solo (raízes, folhas, ramos mortos, restos de cortes ou limpezas). Dependendo das condições meteorológicas e humidade dos combustíveis, o fogo rasteiro poderá estender-se até ao topo das árvores, constituindo o fogo de copas. Este tipo de fogo é bastante mais intenso e difícil de combater. Existe ainda um terceiro tipo de fogo quando os combustíveis da manta morta inferior e/ou as raízes entram em combustão, designado por fogo de subsolo (Viegas, 1989). Os fogos de subsolo, embora de pequena intensidade e de baixa velocidade, podem propagar-se a distâncias consideráveis sem serem detectados. Por esta razão é necessário que o rescaldo de um incêndio seja feito com muita atenção, recomendando-se uma monitorização do local envolvente à área ardida

durante 2 ou 3 dias após a extinção do fogo. Os três tipos de fogos relativos à localização vertical dos combustíveis (solo, subsolo e aéreos) encontram-se ilustrados na Figura 1.4.

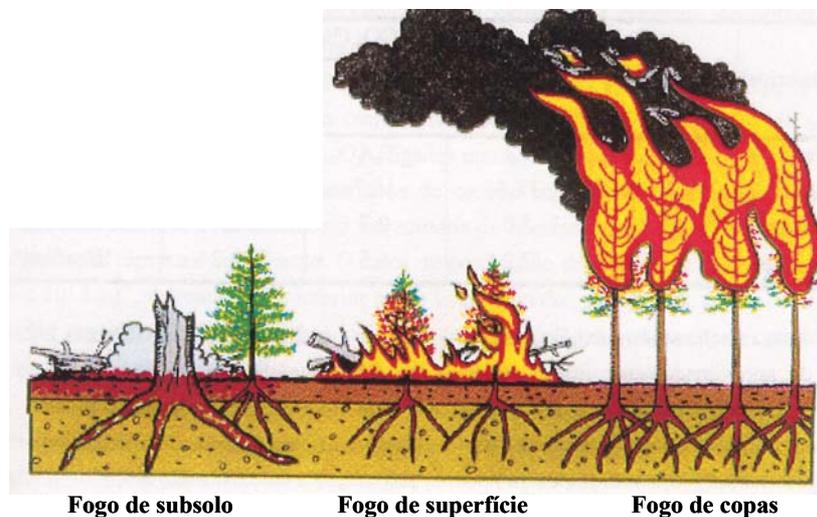


Figura 1.4 – Tipos de fogos relativos ao meio de propagação (Cottrell, 1989).

Outra forma de classificar os fogos prende-se com a sua movimentação em relação ao sentido do vento. Um fogo *heading* move-se de acordo com o vento, enquanto que o fogo *backing* desloca-se contra o vento (Figura 1.5). O fogo *heading* é evidentemente mais veloz. A frente deste fogo a sua passa de forma rápida sobre os elementos de combustível, pelo que a eficiência de combustão é inferior. Já no fogo *backing*, um maior tempo de residência sobre os combustíveis proporciona uma maior eficiência de combustão. Estas cinéticas têm influência sobre o tipo de emissão de poluentes atmosféricos, verificando-se que a combustão mais lenta do fogo *backing* origina produtos mais oxidados do que os dos fogos *heading*.

É conveniente diferenciar os fogos urbanos dos fogos florestais, quando os combustíveis consumidos são estruturas construídas e vegetação, respectivamente. Note-se, contudo, que qualquer um destes incêndios pode provocar um fogo do outro tipo, sobretudo quando as povoações se encontram rodeadas por áreas com vegetação. Neste caso, é vulgar usar-se a designação de fogo suburbano, sendo necessário combatê-lo de uma forma diferente para defender o património edificado das populações. A protecção de habitações, muitas vezes espalhadas pela área florestal, representa um factor que acresce a complexidade na

estratégia de combate dos incêndios florestais por exigir a dispersão das forças de intervenção (Perry, 1990). A esta preocupação junta-se ainda a necessidade de precaver problemas de saúde nas pessoas mais vulneráveis, em consequência da inalação de fumos.

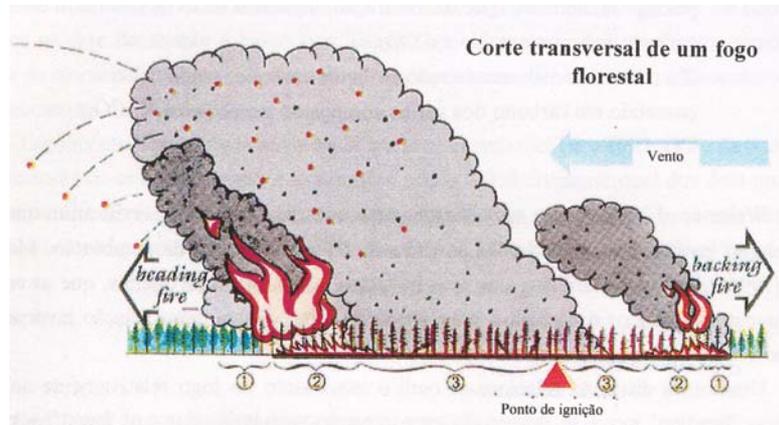


Figura 1.5 – Corte transversal de um fogo florestal (Cotrell, 1989).

Em caso de ventos fortes, os fogos rasteiros, e especialmente os incêndios de copas, podem originar a projecção de partículas incandescentes para zonas a jusante da frente de fogo, constituindo novos focos de incêndio (focos secundários) e tornando as barreiras físicas como aceiros, estradas e mesmo linhas (manchas) de retardante pouco eficazes na delimitação da frente de fogo. A distância atingida por estas partículas varia com a altura da coluna de convecção do incêndio, velocidade do vento e tamanho das partículas (Figura 1.6).

Actualmente, considera-se que este fenómeno (*'spotting'*) tem uma significância muito relevante no comportamento global dos incêndios, pelo que modelos de propagação global como o FARSITE (Finney e Andrews, 1996) incluem módulos específicos para levarem em conta a existência de projecção destas partículas incandescentes (Albini 1979, 1981, 1983a, 1983b; Morris, 1987).

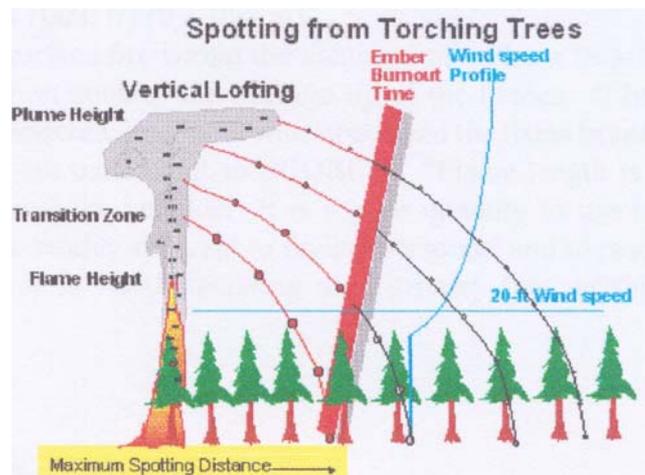


Figura 1.6 – Projecção de partículas incandescentes.

1.5.3 Efeito de diversos factores

São vários os factores intervenientes e condicionantes num incêndio florestal, entre os quais se contam as características físico-químicas dos combustíveis, vento, topografia, humidade e temperatura atmosféricas. A conjugação de todos estes factores potencia a ocorrência de fogos com grande intensidade, exigindo um estado de alerta das equipas operacionais face ao risco elevado. A forma como cada um destes parâmetros se repercute no comportamento do fogo é explicada nos sub tópicos seguintes.

1.5.3.1 Combustíveis

Os componentes químicos dos combustíveis mais relevantes para o estudo dos fogos florestais são as seguintes: (1) humidade; (2) substâncias extraíveis voláteis e não voláteis; (3) celulose; (4) hemicelulose; (5) lenhina; (6) compostos inorgânicos e elementos químicos como o Ca, Na, Mg, Fe, S, Al, Si, Ni, Ba e Pb e (7) compostos de azoto. A celulose é o principal componente estrutural da matéria vegetal. A madeira contém 30 a 40% de celulose, enquanto que 90% da composição do algodão é representada por este polímero. Estima-se que a fotossíntese produza anualmente 1012 kg de celulose.

Estruturalmente, a celulose é um polissacarídeo composto por 7000 a 12000 unidades de D-glucose unidas entre si por ligações $\beta(1,4)$ glucosídicas (Carey, 1996). De uma forma geral, os constituintes responsáveis pela produção de compostos voláteis são a celulose, hemicelulose, lenhina, ceras, óleos essenciais, terpenos, resinas, cutinas, suberinas e pectina. As árvores, arbustos e herbáceas das áreas florestais contêm aproximadamente 50% de carbono, 6% de hidrogénio e 44% de oxigénio em termos mássicos (Ryan e McMahon, 1976). O conteúdo da madeira em celulose e hemicelulose varia de 41 a 53% e de 15 a 25%, respectivamente, dependendo da espécie vegetal. Tanto a celulose como a hemicelulose contribuem para uma libertação energética de cerca de $1,8 \times 10^7 \text{ J.kg}^{-1}$. A lenhina, com poder de combustão de $2,7 \times 10^7 \text{ J.kg}^{-1}$, pode representar 15 a 35% do peso seco das espécies florestais. A percentagem de lenhina é maior nos combustíveis mortos, uma vez que a sua degradação é mais difícil do que a da celulose. Os compostos extraíveis mais importantes em termos de comportamento do fogo são os terpenos e resinas, devido às suas abundâncias e combustibilidade. Os terpenos, responsáveis pelo cheiro característico dos pinhais, são polímeros de isopreno, tendo, portanto, como fórmula molecular $(\text{C}_{10}\text{H}_{16})_n$. As resinas representam substâncias não voláteis, mas solúveis em éter. Em geral, o poder de combustão dos constituintes extraíveis ronda $3,6 \times 10^7 \text{ j.kg}^{-1}$, variando entre 0,2 e 15% em peso seco. A percentagem de extraíveis é o principal factor influente na inflamabilidade das diferentes espécies.

Os minerais, embora constituintes minoritários das plantas, têm um papel determinante na combustão, uma vez que catalisam a hidrólise durante a pirólise levando a um aumento da produção de carvão. Em consequência, contribuem para o decréscimo da produção de levoglucosano (“alcatrão”), reduzindo a combustibilidade da espécie vegetal (Figura 1.2). Estes componentes actuam da mesma forma que os sais inorgânicos dos retardantes químicos de longa acção $[(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ e $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4]$ usados para combate dos incêndios florestais e que são o objecto de estudo desta tese. Existem algumas espécies de arbustos típicos de zonas ribeirinhas com elevados teores de minerais, tornando-as praticamente imunes ao fogo.

Viegas (1991) agrupa a vegetação existente em Portugal em três tipos: (i) agrícolas, (ii) matos e (iii) florestas. Segundo o autor, as zonas agrícolas são pouco susceptíveis de arder,

excepto as searas em períodos de risco extremo. Os matos, constituídos sobretudo por herbáceas e arbustos de reduzido valor económico, poderão proporcionar fogos de intensidades elevadas consoante a sua densidade e humidade. As áreas florestais consistem em povoamentos naturais e/ou artificiais de espécies arbóreas folhosas e resinosas. As folhosas são árvores caducifólias de crescimento lento com bom desenvolvimento em zonas húmidas. As espécies deste grupo mais abundantes em Portugal são o sobreiro (*Quercus suber*), a azinheira (*Quercus ilex*) e o eucalipto (*Eucalyptus globulus*). Embora com menor expressão, devem ainda ser enunciadas as seguintes espécies: carvalho, choupo, castanheiro e bétula (Figura 1.7). O fogo propaga-se mais lentamente no seio das folhosas em resultado das características físico-químicas e de crescimento destas espécies e do microclima do seu habitat. Merece especial destaque o caso do eucalipto que, devido à sua elevada velocidade de crescimento, rapidamente se expandiu no território nacional por forma a aumentar a produção de madeira. Contudo, na sua composição química existem substâncias altamente inflamáveis que libertam quantidades elevadas de energia, tornando o eucalipto numa das folhosas com maior risco face aos incêndios. As resinosas possuem também componentes que ardem facilmente e aumentam a sua susceptibilidade ao fogo. De acordo com a Figura 1.7, em Portugal, a resinosa mais abundante é o pinheiro bravo (*Pinus pinaster*), coexistindo com menores quantidades de pinheiro manso (*Pinus pinea*) e pinheiro silvestre (*Pinus silvestris*).

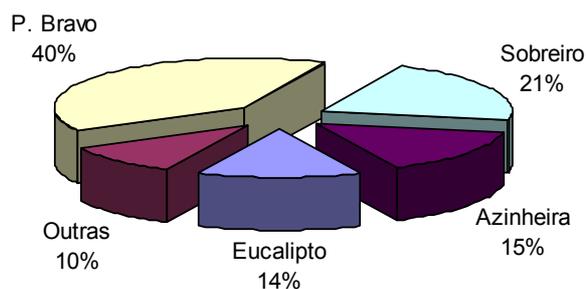


Figura 1.7 – Espécies dominantes na floresta Portuguesa (Borrego et al., 1991).

A característica mais relevante dos combustíveis é o seu teor em água. O grau de humidade condiciona a combustão, podendo mesmo impedi-la. Isto deve-se ao facto da combustão exigir elevadas temperaturas, só possíveis após a evaporação da humidade à custa de grandes quantidades de energia produzida no decorrer do fogo. A água existente nas

plantas pode variar entre 5% (vegetação morta e seca) e 200% do peso seco (agulhas ou folhas secas). Existe sempre um teor de humidade crítico acima do qual os combustíveis não ardem. O combate directo (ou supressão) dos fogos florestais com água visa precisamente atingir ou ultrapassar esse limite crítico de humidade.

A inflamabilidade está relacionada com a constituição química dos combustíveis, mas depende também do tamanho destes, uma vez que uma maior área superficial específica permite uma maior taxa de trocas mássicas e de calor. A compacticidade dos combustíveis é igualmente uma propriedade importante, verificando-se que o seu valor óptimo varia com o tamanho das partículas de combustível (Chandler et al., 1991). O factor de compacticidade dos diversos tipos de leitos de combustível aumenta com a dimensão dos combustíveis. Assim, os troncos de madeira ardem melhor quando firmemente compactados. Já no caso de combustíveis finos, a sua taxa de combustão é reduzida se estes se apresentarem fortemente compactados.

1.5.3.2 Condições meteorológicas

É bem sabido que as variáveis meteorológicas desempenham um papel chave no comportamento do fogo. Este é precisamente o pressuposto que serve de base à existência de índices de risco meteorológico para incêndios florestais. Se em termos qualitativos todos têm a percepção da influência das variáveis meteorológicas, já o seu impacto quantitativo é mais difícil de estudar. Além disso, estes factores físicos estão interrelacionados, alterando-se mutuamente. Um bom exemplo desta afirmação é a própria dinâmica da coluna de convecção formada pelo gradiente térmico. Este fenómeno provoca advecção que, por sua vez, acarreta diluição térmica e variação da humidade relativa do ar local. Da mesma forma que as condições atmosféricas condicionam o incêndio, os fogos de dimensão considerável podem também ter repercussões sobre os parâmetros atmosféricos. De facto, ao provocarem alterações na velocidade e direcção do vento, aumento de temperatura e diminuição da humidade do ar, produzem condições propícias à sustentabilidade dos próprios incêndios. Existe, portanto, um efeito “bola de neve” com carácter, muitas vezes, incontrolável. Os operacionais Norte-Americanos assumem que,

acima de determinadas intensidades dos fogos, a intervenção, mesmo de meios aéreos com retardantes químicos, é impotente e que a continuação do combate ao fogo apenas serve como refúgio às críticas daqueles que contestam a inoperância das tropas. Nesta dualidade de interesses prevalece, muitas vezes, uma actuação consumidora de recursos humanos e materiais para evitar os receios da população face à ameaça do incêndio, mesmo havendo convicção por parte dos operacionais de que o esforço dispendido é infrutífero. Em situações ainda mais extremas, tanto os meios aéreos como os terrestres deixam de ter condições de segurança para fazer frente ao fogo e a evacuação das populações é a única solução para minimizar os prejuízos do incêndio.

A **temperatura** do ar influencia directamente a temperatura dos combustíveis e a inflamabilidade dos mesmos. A energia requerida para atingir o ponto de ignição depende do valor inicial deste parâmetro no combustível. Como já foi referido, a temperatura afecta ainda o comportamento do fogo por condicionar outras variáveis como a humidade, o vento e a estabilidade atmosférica.

A **humidade do ar** condiciona a secagem dos combustíveis, influenciando directamente a sua inflamabilidade. Num dia típico de verão, a variação da humidade relativa é oposta à da temperatura, coexistindo situações extremas favoráveis por volta das 14 ou 15 horas. Chandler et al. (1991) indica que para combustíveis com humidades abaixo dos 5% a velocidade de propagação é elevada, independentemente do tamanho daqueles. Com valores de humidade entre 5 e 10%, a velocidade é maior para os combustíveis finos. A propagação do fogo é idêntica para os distintos materiais para humidades no intervalo 10-15%. Acima deste último valor, verifica-se a extinção do fogo em combustíveis finos.

A **estabilidade atmosférica** tem repercussões no movimento vertical atmosférico, podendo apresentar-se neutra, instável (intensificando os movimentos) ou estável (suprimindo os deslocamentos verticais). Em condições de atmosfera instável formam-se facilmente correntes ascendentes, favorecedoras dos incêndios. O calor gerado pelo fogo provoca correntes verticais, especialmente junto da superfície. Contudo, a magnitude destes movimentos depende directamente da estabilidade atmosférica. Inúmeros trabalhos têm sido realizados de forma a modelar esta interacção bidireccional entre o escoamento

atmosférico e o incêndio. Sabe-se ainda que para incêndios com uma intensidade considerável, o escoamento atmosférico é bastante perturbado, especialmente nas proximidades das chamas, devido à formação da coluna de convecção. O grau de perturbação é proporcional à intensidade energética do fogo e à instabilidade atmosférica. Uma forma prática de avaliar a estabilidade consiste na observação da coluna de fumo e da dispersão do mesmo. A subsidência consiste na descida de uma camada de ar sobre uma grande área a partir de níveis elevados da troposfera. Durante a descida, o ar vai aquecendo e diminuindo a seu teor em humidade relativa. Quando atinge a superfície, a camada de ar quente e seca eleva drasticamente o risco meteorológico de incêndio (Miranda, 1998).

O **vento** representa um elemento meteorológico que, além de ser o mais variável em termos espaciais e temporais, é também o que afecta mais directamente o comportamento do fogo. Por outro lado, influencia as humidades e temperaturas do ar e dos combustíveis devido à convecção e mistura (diluição). A variabilidade temporal da direcção do vento atribui um carácter de imprevisibilidade que tem contribuído para o aumento do número de vítimas entre os bombeiros. O vento, além de contribuir para a secagem dos combustíveis, fornece oxigénio à zona reaccional e aquece mais eficientemente os combustíveis ao provocar a inclinação das chamas. É ainda um veículo transportador de partículas incandescentes, originando novos focos de incêndio a jusante da frente de chamas (Figura 1.8).

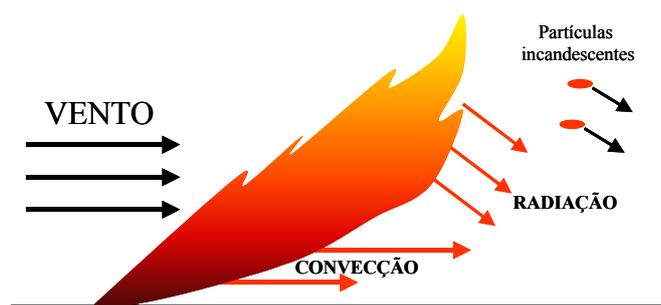


Figura 1.8 – Efeito do vento no fogo (Chandler et al., 1991).

A direcção e velocidade de progressão do fogo são também determinadas pelo vento. Em Portugal, as situações mais propícias a grandes incêndios florestais relacionam-se com ventos de Leste, geralmente muito secos e fortes. Chandler et al. (1991) refere que a

velocidade do fogo duplica por cada acréscimo de 4 m.s^{-1} na velocidade do vento. Nos combustíveis finos o efeito do vento tende a ser superior ao indicado, verificando-se o oposto com os combustíveis mais grosseiros. Após a formação da coluna de convecção, esta análise torna-se mais complexa, devido ao escoamento tridimensional. É ainda de salientar que o aumento da velocidade de progressão com o vento é verificado até um determinado valor, a partir do qual se regista o inverso. De facto, pode observar-se a extinção do fogo devido ao excesso de ar, uma vez que este pode levar a intensas diluições térmicas e de voláteis na zona de chama.

1.5.3.3 Topografia

O relevo do terreno condiciona directamente a propagação do fogo e as operações de combate (Viegas, 1989). A topografia influencia o aquecimento da superfície e dos combustíveis devido à exposição solar do terreno. Superfícies perpendiculares à orientação da radiação solar recebem mais energia por unidade de área do que outras que se posicionam paralelamente. Assim, uma superfície plana e horizontal regista um máximo térmico por volta do meio-dia, enquanto que faces voltadas para Este e Oeste atingem o pico de temperatura de manhã e à tarde, respectivamente. As encostas voltadas a Sul são mais quentes e secas do que as voltadas a Norte, pelo facto de Portugal estar situado no Hemisfério Norte. Assim, o risco de eclosão de incêndios é superior nas encostas voltadas a Sul. A superfície terrestre tem também influência no escoamento atmosférico, funcionando as montanhas como obstáculos a contornar e os vales e desfiladeiros como canais de escoamento preferenciais (Miranda, 1998). As cadeias montanhosas criam por vezes escoamentos próprios que condicionam factores como a temperatura e humidade do ar. Estes escoamentos, designados por brisas de montanha, traduzem-se em correntes ascendentes e descendentes em período diurno e nocturno, respectivamente. Além de todas estas influências da topografia no fogo, a inclinação do terreno aproxima ou afasta a chama dos combustíveis situados a jusante da frente de fogo, consoante o incêndio sobe ou desce uma encosta (Figura 1.9).

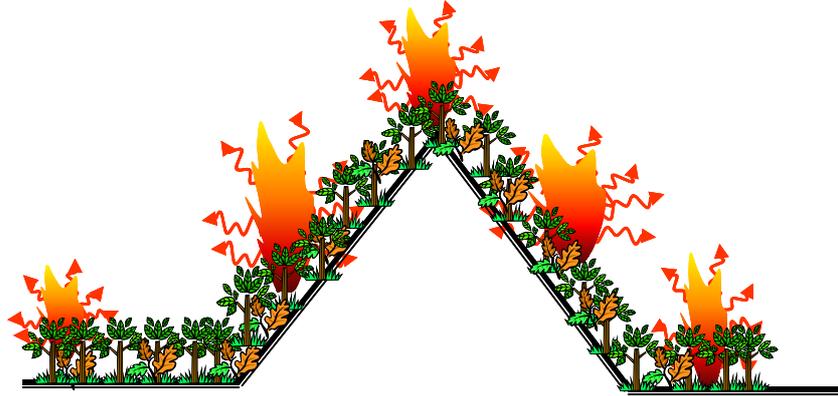


Figura 1.9 – Efeito da inclinação do terreno no aquecimento dos combustíveis.

Este efeito faz com que as chamas aqueçam de forma mais eficiente os combustíveis quando o fogo sobe uma colina, propagando-se mais rapidamente nestas circunstâncias do que em terreno horizontal. Pelas mesmas razões, a propagação numa descida é mais lenta do que num terreno plano não inclinado. Chandler et al. (1991) indicam que há uma duplicação da velocidade de propagação por cada aumento no declive de 15° até aos 30° , valor a partir do qual a velocidade duplica por cada 10° .

1.5.4 Modelação do comportamento do fogo

Tem-se assistido nas últimas décadas a um grande esforço de investigação teórica e empírica sobre o comportamento do fogo. Os modelos encontrados podem dividir-se em puramente estatísticos, empíricos ou físicos (teóricos) ou representar uma mistura destas aproximações. Os modelos teóricos pretendem descrever os fenómenos de uma forma física e química aplicando os conceitos da termodinâmica, sendo desta forma praticamente universais e aplicáveis a um leque muito largo de situações. No entanto, muitas das suas variáveis são difíceis de determinar, tendo obrigatoriamente que ser parametrizadas. Rothermel (1990) refere que os modelos estatísticos baseados em análises probabilísticas podem ser vantajosos. Contudo, a sua aplicação a situações que não as mesmas da sua criação/validação pode conduzir a grandes erros. Assim, a grande desvantagem desta aproximação prende-se com a pouca generalização possível, exigindo análises criteriosas

de situações distintas. Os modelos empíricos apresentam a vantagem de serem fortificados com valores medidos em fogos reais em que os diferentes factores são medidos, fazendo-se variar apenas um deles, a fim de se estudar o seu efeito. A maior dificuldade reside no elevado número de combinações possível entre os factores e, conseqüentemente, no elevado número de ensaios para a realização de séries homogéneas. Além disso, é bastante difícil avaliar o efeito de diferentes variáveis entre si (*e.g.* temperatura e humidade).

Os modelos mais usados baseiam-se no modelo de propagação de Rothermel (Rothermel, 1972) que é, aliás, o mais citado em todo o mundo.

1.5.5 Modelação da progressão do fogo como ferramenta de combate

A estratégia de combate a um qualquer incêndio deve basear-se em pressupostos válidos. Uma das informações vitais neste processo de decisão e acção é a previsão do comportamento da frente de fogo. Na última década a investigação criou modelos fundamentais e semi-empíricos para a simulação da progressão do incêndio. Os meios informáticos (*hardware*) evoluíram de uma forma considerável, possibilitando o uso desta ferramenta em tempo real e permitindo a visualização da progressão da frente de fogo no tempo, através da representação em mapas no monitor de um computador pessoal. Estes modelos apoiam-se em Sistemas de Informação Geográfica (SIG), tornando a sua interpretação bastante simples e clara. Servem de suporte decisório às entidades operacionais envolvidas no combate e à Protecção Civil, ajudando-os a agir mais eficazmente na minimização dos impactes do incêndio. É ainda possível a realização de simulações com diferentes tácticas de supressão a fim de avaliar a eficácia relativa dos combates antes da sua aplicação no palco real.

Em Portugal, uma das limitações para uma utilização mais generalizada deste instrumento relaciona-se com a falta de informação de base, nomeadamente de cartografia sobre uso do solo, mapas de vegetação, topografia, linhas e pontos de água, estradas, caminhos e outros. Toda esta informação representa os dados de entrada dos modelos e deve ser

disponibilizada com a resolução espacial adequada. A informação mais crítica é precisamente a associada aos mapas de combustíveis, os quais se encontram desactualizados por serem muito antigos ou porque nos anos mais recentes se registaram alterações do uso do solo ou incêndios. Um dos obstáculos com que a comunidade científica nacional se depara é a obtenção da informação. Em muitos casos, os dados existentes não são disponibilizados de forma gratuita pelas instituições estatais e a sua obtenção nem sempre ocorre com a brevidade desejada. Por outro lado, a falta de informação/formação, associada à inexperiência na utilização de ferramentas matemáticas e a alguma desconfiança, contribuem para uma atitude menos progressista dos operacionais.

1.6 Produtos usados para combate dos incêndios

Para combater o fogo é essencial compreendê-lo. Resumidamente, o que origina e mantém o fogo é a existência simultânea de três factores num mesmo local: i) combustível, ii) oxigénio e iii) calor (energia). Os norte-americanos recorrem ao designado “triângulo do fogo” para ilustrar este princípio essencial (Figura 1.10).



Figura 1.10 – Os três factores básicos de sustentação do fogo.

De acordo com a Figura 1.10, a eliminação de qualquer um dos três factores essenciais corresponde à quebra do triângulo, ou seja à destruição das condições propícias à deflagração/propagação dos incêndios. A maior parte dos combates aos fogos florestais tenta atacar o factor calor, através da adição de água para arrefecimento do meio. Contudo, os outros dois factores (O_2 e combustível) também podem e devem ser usados como forma de combate ao fogo. A limpeza de aceiros, o contra-fogo e o planeamento de corredores

com espécies menos combustíveis podem ser entendidas como uma actuação ao nível do factor combustível. A eliminação e/ou diminuição de O₂ junto ao combustível são levadas a efeito pelas espumas que constituem uma barreira entre os gases combustíveis e o combustível sólido.

As substâncias usadas para combater os incêndios florestais podem ser agrupadas em classes gerais, de acordo com as suas principais características. Assim, e de acordo com a nomenclatura usada no USDA FS, os produtos químicos são agrupados em 4 classes:

Retardantes de longa acção – substâncias que reduzem ou inibem a combustão, mesmo após a perda da água; este efeito é conseguido pela utilização de sais inorgânicos que alteram a pirólise, reduzindo a energia libertada [*e.g.* (NH₄)₂HPO₄ e (NH₄)₂SO₄];

Retardantes de curta acção – substâncias cujo efeito depende directamente do seu conteúdo em água, tornando-se ineficazes quando perdem essa humidade (*e.g.* água e água com espessantes);

Agentes molhantes – produtos que visam diminuir a tensão superficial da água, aumentando a sua capacidade de penetração e de revestimento dos combustíveis;

Espumíferos – substâncias que misturadas com a água produzem espuma que combate o fogo através do isolamento do combustível e pelo arrefecimento.

Cada uma destas classes é discutida detalhadamente mais abaixo. Note-se que esta nomenclatura não está isenta de possíveis confusões. Refira-se, como exemplo, que as classes 3 e 4 poderiam ser consideradas como pertencentes à classe 2, uma vez que o seu efeito sobre o fogo não existiria na ausência de água. Não se trata de substâncias concorrentes, uma vez que qualquer um destes produtos tem vantagens relativas. A selecção do melhor produto não é, portanto, um aspecto questionável. O que importa realmente conhecer são as características de cada um de forma a utilizar o mais adequado a cada uma das situações. O USDA FS desenvolve continuamente trabalhos com o objectivo de testar novos produtos que surgem no mercado, antes da sua utilização. Estes ensaios

laboratoriais são baseados em protocolos regulamentares pré-estabelecidos que visam testar a eficiência do produto, a sua segurança ambiental, os efeitos na saúde dos trabalhadores e a facilidade de utilização. Os testes visam ainda averiguar se o produto é economicamente rentável. Assim, qualquer empresa fabricante que vise a alienação ao USDA FS é obrigada a submeter uma amostra do produto para ser avaliado através do referido protocolo. Os custos económicos deste processo de qualificação são suportados na íntegra pelos fabricantes. Em Janeiro de cada ano é publicada a lista de todos os produtos avaliados e que poderão ser usados pelas diferentes departamentos operacionais nos EUA.

1.6.1 Retardantes de curta duração

Retardantes de curta duração são todos aqueles cuja eficiência assenta exclusivamente no seu conteúdo em água, tornando-se ineficazes quando perdem essa humidade (*e.g.* água e água com espessantes). A água é, sem dúvida, a substância usada há mais tempo para combater os fogos. O seu efeito reside na sua capacidade em absorver calor do incêndio, arrefecendo, por conseguinte, os combustíveis e o ar circundante. A elevação da temperatura da água é feita através de absorção de energia (calor sensível), bem como da evaporação do líquido (calor latente). A figura seguinte ilustra as quantidades energéticas associadas às transformações físicas da água, por unidade mássica. O calor sensível da água varia muito ligeiramente com a temperatura mas, para a gama de valores em causa, é razoável considerar este parâmetro constante e igual a $4,18 \text{ J} \cdot ^\circ\text{C}^{-1} \cdot \text{g}^{-1} \text{ H}_2\text{O}$. Já o calor latente de evaporação (ΔH_{vap}) associado à mudança do estado físico da água corresponde a $2,36 \text{ J} \cdot \text{g}^{-1} \text{ H}_2\text{O}$.

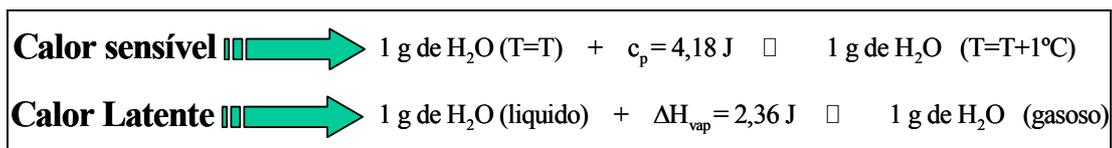


Figura 1.11 – Calor sensível e latente da água (adaptado de Perry e Green, 1997).

A formação de vapor de água causa simultaneamente uma diminuição do oxigénio no ar circundante por diluição, favorecendo o decréscimo da intensidade do incêndio. O uso conjunto de espessante e água tem um único objectivo: a melhoria na aplicação aérea. De facto, em resultado do aumento da viscosidade da água com argilas ou gomas, produzem-se gotas de maiores diâmetros durante a atomização do fluído, diminuindo as perdas por evaporação e a dispersão excessiva das gotículas de menores dimensões. Desta forma, o espessante tem um papel activo apenas durante a aplicação directa da água, não produzindo efeitos sobre o fogo. Embora a água seja eficiente no combate aos fogos, é importante salientar que esta mesma eficácia pode ser aumentada pela adição de substâncias especiais, como os agentes molhantes e os espumíferos.

1.6.1.1 Agentes molhantes

Os agentes molhantes adicionados à água reduzem a tensão superficial deste fluido, contribuindo para uma melhor penetração e formação de um filme aquoso contínuo sobre os combustíveis. A aplicação de água isoladamente origina um goteado não uniforme sobre a superfície da vegetação, pouco eficaz na extinção do incêndio. A reduzida eficácia prende-se com o facto das partes do combustível não cobertas pelas gotas de água não ficarem impedidas do fornecimento de oxigénio. Os agentes molhantes e os espumíferos são ambas substâncias surfactantes, distinguíveis pela ausência das características espumíferas nos primeiros. Todavia, é praticamente consensual o reconhecimento da importância da formação da espuma no combate do fogo, pelo que a utilização dos agentes molhantes, em relação aos espumíferos, tem sido restrita.

1.6.1.2 Espumíferos

De acordo com a terminologia usada nos incêndios, estes produtos surfactantes possuem a designação de “espuma classe A” por contraposição com a classe B que é aplicada em incêndios de combustíveis líquidos (*e.g.* hidrocarbonetos, petróleo). A adição de

espumífero concentrado à água produz a solução espumífera. Esta, uma vez adicionada e misturada no ar, origina a espuma propriamente dita (Figura 1.12).

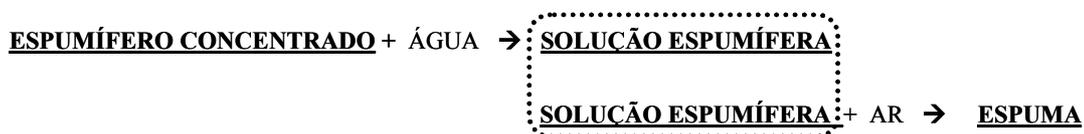


Figura 1.12 – O processo de formação da espuma a partir de espumífero concentrado (NWCG, 1992).

A espuma absorve energia mais rapidamente que uma gota de água, uma vez que as bolhas são constituídas por um filme aquoso bastante fino que reveste uma porção de ar. Assim, a água pode passar facilmente à fase de vapor. Por outro lado, a espuma é opaca e reflecte a radiação, protegendo os combustíveis. Simultaneamente, o surfactante contribui ainda para um isolamento do oxigénio atmosférico, diminuindo a libertação de energia. Segundo a literatura, ao recorrer-se a um determinado volume de água sob a forma de espuma, duplica-se a eficiência relativamente à utilização do mesmo volume de fluido sem agente surfactante. Em geral, a diluição de concentrado de espumífero ronda os 0,1 e 1,0%, sendo vulgarmente usado 0,3%. Portanto, para um avião que transporte em cada viagem 5000 litros de água, deverá adicionar-se 5 a 50 litros de concentrado. O mais comum é proceder à mistura no próprio avião. Em Portugal, os meios de combate estão bastante dependentes dos aviões anfíbios que descarregam espuma continuamente sobre os incêndios. Estes aparelhos transportam um tanque de cerca de 200 l com concentrado de espumífero e preparam a solução espumífera a bordo, num reservatório, através de um sistema automático de mistura com a água sugada das superfícies hídricas (NWCG, 1995). Esta é talvez a maior vantagem relativa aos retardantes de longa acção, para os quais a preparação da solução tem de ser feita em tanques com agitadores especiais. Esta operação só é possível em terra, o que obriga à existência de um aeroporto nas proximidades do incêndio.

Uma das propriedades mais importantes das espumas é o rácio de expansão, existindo 3 categorias:

A - Expansão baixa.....1:1 até 1:20;

B - Expansão média.....20:1 até 200:1;

C - Expansão elevada.....200:1 até 1.000:1.

As espumas de baixa expansão são as mais usadas nos fogos florestais. Na aplicação aérea, produz-se espuma de baixa expansão, embora parâmetros como a altura de voo, velocidade do avião, configuração geométrica do tanque e concentração de espumífero sejam influentes na expansão obtida. Note-se que não seria vantajoso obter uma maior expansão, porque baixas densidades da espuma poderiam comprometer a sua aplicação aérea. Por outro lado, a obtenção de espumas muito expandidas exige a utilização de equipamento sofisticado (NWCG, 1993).

Outra propriedade da espuma que merece consideração é o seu tempo de drenagem. Este corresponde ao tempo que a espuma leva a libertar todo o conteúdo em água a partir da sua estrutura em bolhas. Na prática, este período representa o tempo de vida efectiva da espuma. Espumas com tempos de drenagem reduzidos disponibilizam rapidamente água para os combustíveis, enquanto que tempos mais elevados correspondem a um melhor isolamento dos combustíveis face ao calor e ao oxigénio.

Dado que os espumíferos são surfactantes que reduzem a tensão superficial da água, o líquido drenado pelas espumas pode revestir melhor e mais rapidamente os combustíveis (Figura 1.13).

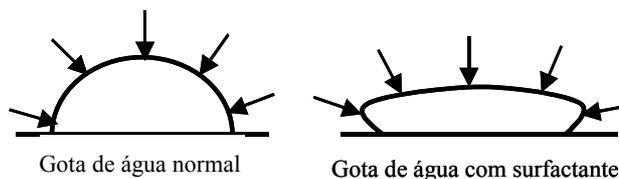


Figura 1.13 – Efeito dos surfactantes adicionados à água.

É vulgar encontrar a terminologia de “tipo de espuma” entre os técnicos, para designar a consistência da espuma, parâmetro que engloba simultaneamente o tempo de drenagem e a expansão da espuma (Figura 1.14).

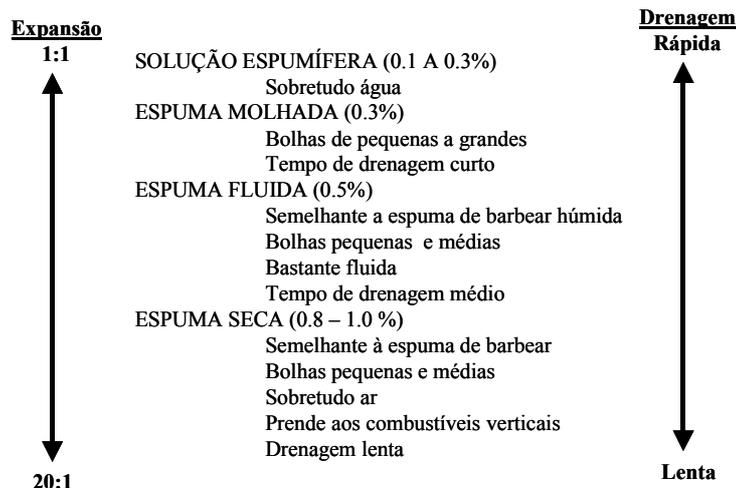


Figura 1.14 – Tipo de espuma para combate aos fogos florestais.

O “tipo de espuma” caracteriza bem o comportamento desta e constitui o parâmetro mais relevante para avaliar a sua eficácia em cada situação específica (NWCG, 1995).

1.6.2 Retardantes de longa acção

O emprego de substâncias químicas para a redução da combustão de diferentes materiais é secular. Já em 1821, Gay Lussac descreve que o fosfato de amónia retardava a combustão de cortinas nos teatros (Lussac, 1821, *ap.* Granzow, 1978). Actualmente existem centenas de compostos químicos com efeito retardante reconhecido, alguns dos quais específicos dos materiais combustíveis (*e.g.* materiais celulósicos, têxteis e plásticos). Contudo, apenas um pequeno número destes apresenta viabilidade de aplicação aos fogos florestais, seja por razões ambientais, económicas, técnicas ou mesmo de disponibilidade em grandes quantidades. A terminologia de retardantes de longa/curta acção está relacionada com a capacidade que a substância tem para retardar o fogo após a evaporação do meio transportador, vulgarmente a água. Os sais como sulfato de amónia $[(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4]$ e hidrogeno fosfato de amónia $[(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4]$ são retardantes químicos de longa duração. Note-se que os retardantes de curta duração (espumíferos) devem ser usados apenas em combate directo, ou seja, têm de ser lançados sobre as chamas na frente de fogo. Em

contrapartida, os retardantes de longa duração devem ser usados apenas adiante da frente de fogo. A razão de ser desta aplicação está relacionada com a forma de actuar dos retardantes e com aspectos táticos. Normalmente, os espumíferos são aplicados para suprimir o fogo, enquanto que os retardantes de longa duração apenas atrasam a combustão, sendo neste caso necessária a intervenção de outros meios aéreos ou terrestres para suprimir por completo a combustão na frente do fogo. Seja como for, o combate com meios aéreos nunca é completo e necessita de um rescaldo detalhado apenas possível com a intervenção de equipas terrestres.

A decomposição da celulose por acção do calor é feita por duas vias reaccionais concorrentes, e que originam produtos diferentes. Na ausência de catalisadores, a decomposição da celulose origina produtos despolimerizados (alcatrão), sobretudo levoglucosano (Figura 1.3). Este monómero, por sua vez, decompõe-se em fragmentos combustíveis como álcoois, aldeídos, cetonas e hidrocarbonetos. Quando catalizada por ácidos, a celulose é desidratada endotermicamente formando vapor de água e carvão. O ácido fosfórico é especialmente eficaz como catalisador devido à sua baixa volatilidade. A elevadas temperaturas, este composto produz ácido polifosfórico que é ainda mais eficaz como catalisador da desidratação da celulose. Este mecanismo de catalisação parece envolver a fosforização da celulose catalizada pela presença de compostos azotados (*e.g.* melaminas, guanidinas e ureia). Portanto, é possível que a parte amoniacal tenha um papel sinérgico com o ácido fosfórico na redução da energia libertada pela celulose. A somar a este efeito químico, acredita-se existir um efeito físico do ácido fosfórico traduzido pelo revestimento do carvão, tornando-o menos permeável e reduzindo a possibilidade de este ser oxidado. Por outro lado, o próprio carvão formado é um mau condutor térmico, pelo que protege a parte interior de atingir elevadas temperaturas e de decompor-se. Evidentemente este fenómeno apenas tem expressão em combustíveis mais grosseiros. Assim, em termos líquidos, as duas vias reaccionais, produzem compostos químicos distintos que, por sua vez, poderão ser ainda oxidados, libertando diferentes quantidades de energia. Em suma, a actuação dos retardantes químicos de longa acção deve-se aos sais inorgânicos que se decompõem a elevadas temperaturas, formando ácidos catalizadores da desidratação da celulose. Esta via reaccional conduz à produção de menores quantidades de energia. Em termos práticos, a diminuição da energia libertada reduz a capacidade de

propagação do fogo, possibilitando uma mais fácil intervenção dos meios terrestres para a completa supressão do incêndio.

É de salientar que em termos económicos os retardantes químicos têm custos consideráveis e, portanto, a sua rentabilidade passa por uma melhor eficácia na aplicação. Nos EUA, em 1996, foram gastos cerca de 120000 m³ de produtos concentrados de retardantes químicos, fornecidos sobretudo por duas grandes empresas mundiais do sector: a Chemonics[®] e a Monsanto[®]. Os EUA gastam anualmente vários milhões de dólares em retardantes químicos, enquanto que em Portugal, o valor é pouco significativo, havendo uma muito maior utilização de espumíferos. Contudo, é de acrescentar que a aplicação destes produtos tem aumentado significativamente nos últimos anos. As razões da baixa utilização de retardantes de longa duração em Portugal são de diferentes ordens: custo financeiro, realidade da frota de aviões e pistas, equipamento para a preparação do retardante, falta de tradição na utilização destes produtos e alguma descrença na vantagem técnico-económica da sua utilização em relação aos espumíferos ou à água simplesmente. Outro factor de peso para a preferência de espumíferos em relação aos retardantes químicos prende-se com a sua maior facilidade de operação, uma vez que podem ser usados em hidroaviões que transportam concentrado de produto em quantidades suficientes para dezenas de descargas, possibilitando um ciclo contínuo sem necessidade de qualquer pista de aviões. Com retardante tal é inviável, uma vez que este é usado em grandes concentrações mássicas (~ 20%) por oposição aos 0,3% dos espumíferos. Acresce ainda que o processo de mistura para os retardantes é mais exigente e inviável de se realizar a bordo.

A mais valia económica da utilização dos retardantes explica-se pelo aumento da eficácia por m³ de solução aplicada, traduzindo-se numa economia real do número de horas de voo e no decréscimo da área ardida, ou seja, na redução dos prejuízos causados pelo incêndio. Todavia, é importante frisar que esta análise de custos/benefício é de difícil abordagem. Existem, no entanto, fortes convicções, sobretudo em países mais experientes nesta área, de que o preço dos retardantes químicos é largamente compensado pela sua eficácia. É esta vantagem técnico-económica que motiva o presente trabalho. Contudo, a demonstração economicista deste assunto não faz parte do âmbito da tese. Nos capítulos seguintes usar-

se-á a terminologia “retardante químico” para designar apenas os produtos de longa acção, os quais constituem o objecto desta investigação.

2

QUÍMICO

FÍSICA DA NUVEM DE RETARDANTE

2.1 Introdução

As vantagens associadas à aplicação de retardantes químicos com plataformas aéreas (aviões e helicópteros) são devidas a três factores:

- possibilidade de transporte de grandes quantidades de fluidos, normalmente 1 a 10 m³, podendo atingir-se 30 a 40 m³ em aviões de grande dimensão;
- rápida intervenção, mesmo em locais inacessíveis por via terrestre, devido à topografia complexa e/ou ausência de caminhos;
- aplicação vertical, o que se traduz numa melhor penetração nos combustíveis aéreos das copas das árvores (Tomé et al., 1999a).

É evidente que estas vantagens também existem no caso de se aplicar apenas água, embora a eficiência desta seja menor do que a obtida com retardantes químicos, tal como discutido no capítulo anterior. O fluido transportado no tanque (depósito) do avião é libertado mediante um comando accionado pelo piloto para abertura das comportas (Figura 2.1). O líquido sai do tanque apenas por acção da gravidade, a qual provoca um caudal elevado, devido à existência de respiradouros (aberturas). Estes situam-se na parte superior do tanque, de forma a permitir um escoamento mais fácil e rápido de todo o retardante transportado (George e Johnson, 1990). Apenas o sistema MAFFS (*Modular Aerial Fire-Fighting System*), também existente em Portugal, funciona de forma diferente. A saída do retardante neste último caso não se efectua apenas por acção da gravidade, ocorrendo pressurização e atomização num dispositivo próprio à saída do avião (Figura 2.2). Este sistema é operado, sobretudo, com aviões Hércules C-130, no caso nacional, pertencentes e pilotados pela Força Aérea Portuguesa. As particularidades apontadas exigem uma atenção especial na modelação por forma a ter em conta estes dois sistemas distintos de aplicação aérea de retardantes químicos. Embora ambos os casos sejam desenvolvidos amplamente, grande parte da investigação desta tese diz respeito aos aerotanques em que o líquido é libertado por acção gravítica. Estes representam a maioria dos aparelhos em uso, apesar de, em geral, constituírem sistemas menos eficientes que o MAFFS.

Imediatamente após a libertação do tanque, o retardante fica sujeito a grandes forças aerodinâmicas/tensões tangenciais provocadas pela diferença de velocidade entre o retardante e o ar circundante (escoamento atmosférico). Normalmente, os aviões fazem a aplicação de retardante a uma velocidade variável de 40 a 80 m.s⁻¹ (~150 a 300 km.h⁻¹), pelo que as forças actuantes sobre a massa de fluido são consideravelmente fortes. Estas forças, conjuntamente com a gravidade e o escoamento atmosférico, ditam o comportamento da nuvem de retardante. Numa fase inicial, são as forças aerodinâmicas que provocam a atomização e, em simultâneo, a deformação do líquido bruto¹. Esta etapa é bastante rápida, influenciando, contudo, o comportamento global da nuvem e, conseqüentemente, a eficiência da aplicação aérea de retardante. No ponto 2.2 deste capítulo apresentam-se mais detalhes sobre a fase de atomização/deformação.

¹ por oposição a líquido atomizado



Figura 2.1 – Tanque aéreo e respectivo sistema de abertura das 6 portas independentes.



Figura 2.2 – Sistema MAFFS para acoplamento em aviões Hércules C-130.

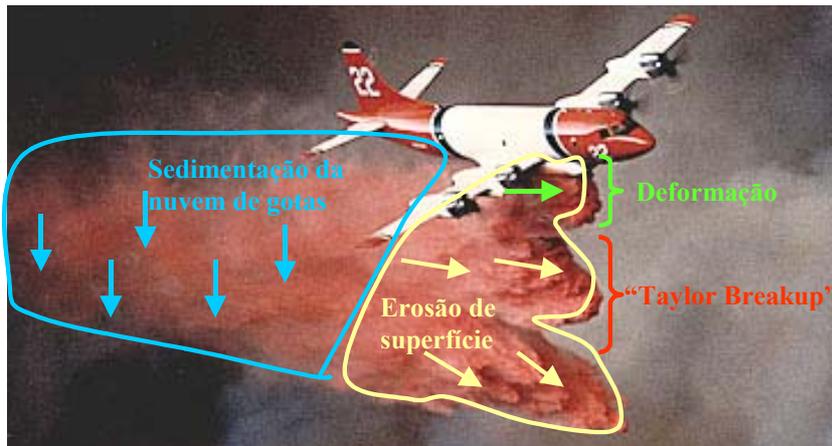


Figura 2.3 – Fenómenos físicos associados à nuvem de retardante.

Do processo de atomização resultam gotas líquidas que irão descer na atmosfera sujeitas a condições atmosféricas que englobam a temperatura, humidade do ar, turbulência e escoamento atmosférico. Por outro lado, o escoamento atmosférico local é perturbado pela passagem do próprio avião, produzindo-se uma esteira que decai ao fim de alguns segundos. O fenómeno da deformação e atomização de milhares de litros de líquido lançado com uma velocidade horizontal inicial semelhante à do avião, produz também alterações no escoamento local atmosférico. Conceptualmente, é este escoamento perturbado, em conjunto com a gravidade, que irão condicionar a trajetória das gotas até ao solo ou combustíveis. As gotas apresentam um tamanho transiente devido à transferência de massa entre estas e o ar circundante, fenómeno designado vulgarmente por evaporação da gota. Assim, o tamanho decresce a uma taxa dependente das condições atmosféricas, como sejam a temperatura e a humidade. Uma descrição detalhada sobre o comportamento das gotas encontra-se no ponto 2.3 deste capítulo.

As gotas de retardante terminam a sua trajetória ao impactarem ou no solo, ou em combustíveis. Nesta fase de deposição das gotas é importante conhecer as propriedades físicas e geométricas da estrutura tridimensional (3D) do combustível. Após a colisão das gotas com o combustível é vulgar surgir escorrência de retardante, sobretudo no caso de gotas grandes. Quando ocorre saturação local do suporte físico, é igualmente possível a

formação de novas gotas de retardante. A escorrência deste último permite o revestimento (*coating*) dos combustíveis situados a jusante do local de impacto da gota.

2.2 Atomização e Reologia

A definição de fluido encontra-se intimamente relacionada com o comportamento dinâmico destes, sempre que se aplica sobre eles uma força. No caso de se aplicar uma tensão tangencial, verifica-se a ocorrência de movimento do fluido. Ao contrário do que acontece com os corpos rígidos, este movimento não é uniforme em todo o volume de fluido. No caso do fluido se encontrar entre duas superfícies, uma inferior fixa e uma superior que se move por acção de uma tensão tangencial, desenvolve-se um gradiente de velocidades linear (Figura 2.4).

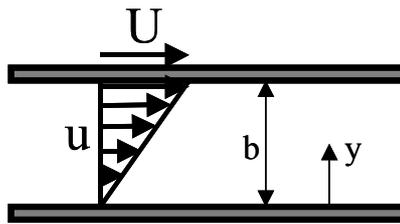


Figura 2.4 – Escoamento de um fluido Newtoniano entre duas placas horizontais.

Assumindo tratar-se de um fluido Newtoniano e condições fronteira de não escorregamento (Equação 2.1), observa-se que o gradiente de velocidade é directamente proporcional à tensão tangencial aplicada e inversamente proporcional à viscosidade dinâmica do fluido:

$$\tau = \mu \frac{du}{dy} \quad \text{Equação 2.1}$$

μ representa a viscosidade, também designada viscosidade absoluta ou viscosidade dinâmica. É uma propriedade de gases e líquidos que quantifica a oposição da substância à sua deformação por acção de uma força exterior. Pode, portanto, ser entendida como uma

força de atrito interno do fluido. A viscosidade é constante para os fluidos Newtonianos, variando apenas com a temperatura. A água, o ar e o óleo enquadram-se neste tipo. A viscosidade dos fluidos não-Newtonianos, além de variar com a temperatura, é também função da tensão tangencial aplicada ao fluido (Figura 2.5).

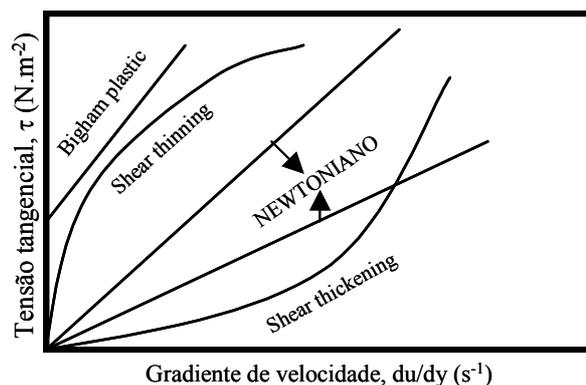


Figura 2.5 – Variação da tensão tangencial com o gradiente de velocidades para diferentes fluidos (Schowalter, 1997).

Para os fluidos não-Newtonianos a relação entre a tensão tangencial e o gradiente de velocidades não é linear. Relativamente à viscosidade, subdividem-se em três classes (Perry e Green, 1997; Munson et al., 1998):

Fluidos reofluidizantes (*shear thinning*) – A viscosidade diminui com o gradiente de velocidade. Isto significa que quanto mais o fluido é deformado, menor é a sua resistência a essa mesma acção. São exemplos deste comportamento reológico a maioria das soluções coloidais e polímeros tais como a tinta *latex* e os **RETARDANTES QUÍMICOS** usados no combate aos fogos florestais;

Fluidos reoessantes (*shear thickening*) – Ao contrário do que acontece aos fluidos *shear thinning*, nestes fluidos a viscosidade aumenta com o aumento da tensão tangencial ou gradiente de velocidade. Assim, estas substâncias tornam-se gradualmente mais resistentes à deformação, com o aumento da força aplicada. Um exemplo desta classe de fluidos é a mistura de água com argila ou areia. Assim, a dificuldade de retirar um objecto de uma solução de areia aumenta drasticamente com a velocidade de remoção;

Fluidos *bigham plastic* – Estas substâncias só se deformam a partir de uma tensão superior a um determinado valor, pelo que abaixo deste, o comportamento é o de um corpo sólido.

Quando a tensão aplicada ultrapassa o referido valor, então o comportamento passa a ser o de um fluido. O comportamento destas substâncias não corresponde nem ao de um sólido nem ao de um líquido. A *mayonnaise* e a pasta dentífrica são exemplos típicos destes fluidos.

Além da viscosidade, outra propriedade com importância no escoamento de fluidos e na sua atomização é a elasticidade. Fluidos viscoelásticos possuem elasticidade não nula. Esta propriedade reflecte-se num aumento da dificuldade em atomizar o respectivo fluido, uma vez que, mesmo ligamentos muito finos, podem voltar a recuperar a situação inicial de líquido bruto. É importante não confundir esta propriedade (elasticidade) com a compressibilidade, propriedade que é normalmente avaliada em termos do parâmetro módulo bruto de elasticidade (*bulk modulus of elasticity*). Fluidos complexos podem possuir memória. A existência desta propriedade significa que o comportamento do fluido não depende apenas das condições actuais do seu estado (tensão tangencial e gradiente de velocidade), mas também da história do próprio fluido, ou seja, das condições existentes nos instantes imediatamente anteriores (Huilgol e Phan-Thien, 1997). A simulação de escoamentos de fluidos com memória é bastante complexa quer em termos teóricos, quer em modelos numéricos de CFD (*Computational Fluid Dynamics*).

Na grande maioria dos problemas com interesse para a engenharia, é comum assumir-se que os líquidos são incompressíveis e que os gases são compressíveis, especialmente em condições de elevadas velocidades. Para velocidades moderadas (n.º de Mach, $Ma < 0,5$) é razoável aceitar-se que mesmo os gases são incompressíveis. É o caso do ar atmosférico na proximidade do avião que aplica o retardante, uma vez que, no momento de largada, a velocidade da plataforma aérea é reduzida significativamente em relação à velocidade de cruzeiro para valores próximos de 60 m.s^{-1} (215 km.h^{-1}) ou 30 nós.

Outra propriedade relevante dos fluidos é a tensão superficial, a qual é posta em evidência sempre que existe uma interface entre um líquido e um gás ou entre dois líquidos imiscíveis. Existem forças que se desenvolvem nesta interface, como se de uma membrana ou “pele” física se tratasse. Este fenómeno superficial deve-se à existência de forças coesivas que actuam nas moléculas de fluido que se encontram à superfície. No interior de

um fluido, qualquer molécula é atraída pelas outras moléculas circundantes, havendo um equilíbrio das forças de atracção moleculares em qualquer ponto do fluido. No caso das moléculas próximas da interface, não existe este equilíbrio e o resultado é uma força resultante que actua em direcção ao interior do líquido. A consequência aparente é a formação da hipotética membrana (Munson et al., 1998). A intensidade da atracção molecular por unidade de comprimento é designada por tensão superficial, representada pela letra grega σ (sigma) e cuja unidade SI é N.m^{-1} . A tensão superficial de líquidos em contacto com o ar diminui com a temperatura. Para a água, à temperatura de 10°C , σ tem o valor de $7,42 \times 10^{-2} \text{ N.m}^{-1}$. A pressão no interior de uma gota de água pode, assim, ser determinada com base nesta propriedade (Figura 2.6).

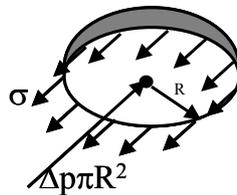


Figura 2.6 – Forças actuantes em meia gota de líquido.

De acordo com a Figura anterior e tendo em conta que a tensão tangencial tem que ser compensada pelas forças de pressão:

$$2\pi R\sigma = \Delta p\pi R^2 \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow \Delta p (= p_i - p_e) = \frac{2\sigma}{R} \quad \text{Equação 2.2}$$

Com base na Equação 2.2, pode-se concluir que a pressão no interior da gota é superior à pressão exterior devida à tensão superficial. Esta propriedade é também responsável pelo fenómeno de capilaridade, existindo comportamentos opostos consoante o líquido molha ou não as paredes do tubo. A importância desta propriedade na temática de combate aos fogos prende-se não só com a atomização dos fluidos, mas também com a estabilidade das gotas sobre a superfície dos combustíveis, e a espessura de equilíbrio de filme de retardante sobre os combustíveis, assunto desenvolvido no § 2.4. A tensão superficial de agentes molhantes e espumíferos é a propriedade mais importante a ter em conta para se

atingir uma aplicação mais homogênea do produto e uma melhor penetração. Normalmente, pretende-se baixar a tensão superficial para aumentar a sua eficácia em termos de revestimento dos combustíveis, e em especial, atingir os combustíveis rasteiros que possam existir a jusante das copas.

A atomização, fenómeno físico que consiste na quebra de ligações existentes num fluido, produz fracções do fluido bruto inicial. No caso da água, é necessário vencer a tensão superficial e a viscosidade para se formarem gotas. A velocidade com que se formam as gotas e o seu tamanho são função das forças aerodinâmicas actuantes e das propriedades do fluido. De uma forma qualitativa, pode-se afirmar que um líquido com uma viscosidade mais elevada é mais dificilmente quebrado (atomizado) formando, portanto, gotas de maiores dimensões. No caso de fluidos viscoelásticos, a atomização tende a ser ainda mais difícil, levando à produção de gotas com dimensões milimétricas e mesmo com alguns centímetros, como acontece na aplicação dos retardantes (Vandersall, 1998). A influência das propriedades intrínsecas do fluido é importante, uma vez que condicionam o processo de atomização e consequentemente alteram as etapas subsequentes (dispersão e deposição das gotas de retardante).

Nas últimas décadas têm sido realizados muitos trabalhos de investigação na área de atomização de fluidos com o objectivo de melhorar a eficiência de diversas tecnologias, nomeadamente a combustão de fuel em motores. Devido à complexidade dos fenómenos inerentes à atomização, verifica-se que não existem ainda formulações teóricas que permitam obter o tamanho de gotas provenientes de um dado processo de atomização, conhecidas as variáveis actuantes. Se isto é verdade para os fluidos Newtonianos, então para o caso de fluidos não-Newtonianos, a situação é ainda mais incógnita. Assim, na ausência de teorias universalmente válidas ou pela impossibilidade da sua tradução em modelos numéricos plausíveis de utilização nos computadores actuais, a investigação da atomização tem-se baseado em formulações semi-empíricas para descrever o processo de atomização. Uma das teorias mais usadas é a de Lord Rayleigh. Além do número de Reynolds (Re), existem outros parâmetros adimensionais com relevância no estudo da atomização e comportamento das gotas, nomeadamente os números de Bond (Bo), Eotvos (Eo), Weber (We) e Sherwood (Sh) (Clift et al., 1978).

A maioria dos retardantes químicos espessados à base de gomas (ou polímeros orgânicos) comporta-se como fluidos *shear thinning*, mas com uma elasticidade elevada, a qual mantém uma viscosidade considerável, mesmo durante as grandes tensões tangenciais que ocorrem na atomização aerodinâmica. Muitos modelos conceptuais/numéricos foram propostos nas últimas décadas para modelar o processo da atomização, embora com aplicações muito limitadas (Mansour e Chigier, 1995). Não se pretendendo fazer qualquer análise exaustiva sobre a temática da atomização de fluidos complexos, é importante realçar que a investigação nesta área ainda não produziu qualquer modelo com uma aplicação fiável à atomização da nuvem de retardante. Isto deve-se ao facto de o avião lançar um grande caudal de líquido, na ordem de alguns $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Assim, simultaneamente com a atomização, ocorre a deformação desta grande massa de líquido bruto, a qual, por sua vez, altera o escoamento atmosférico na sua proximidade, afectando as tensões exercidas sobre o fluido e influenciando o próprio fenómeno de atomização. Trata-se, sem dúvida, de processos complexos que ocorrem em simultâneo e que se influenciam mutuamente, sendo necessária uma aproximação *two-ways* para descrever a interacção bifásica entre o escoamento atmosférico local e o retardante (Crowe et al., 1977 e Crowe et al. 1998).

O n.º de Weber (We) relaciona as forças de inércia com a força da tensão superficial do líquido, e é portanto um parâmetro importante para avaliar a atomização de um líquido (Joseph et al., 1999). Além deste número, também Re afecta a intensidade da atomização uma vez que relaciona as forças de inércia com as forças viscosas. É possível observar na Figura seguinte os diferentes mecanismos de atomização de uma gota de água em função de We .

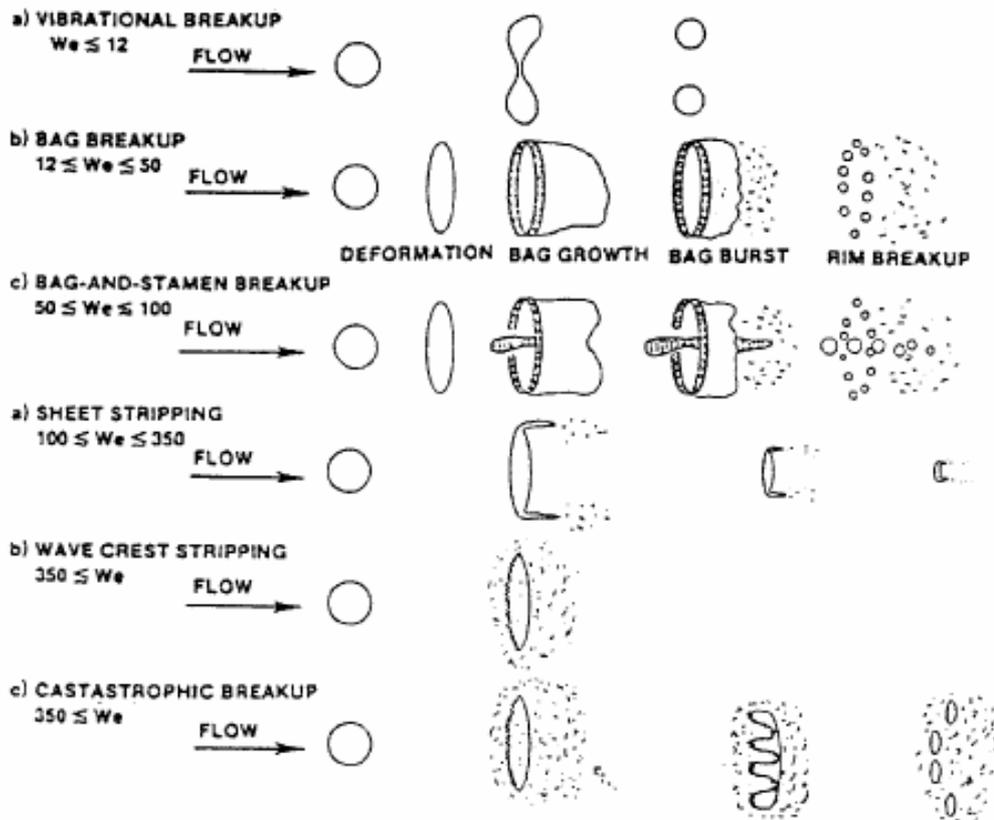


Figura 2.7 – Esquema dos diferentes mecanismos de atomização, em função do n° de Weber (Pilch e Erdman, 1987).

Para os retardantes químicos comerciais, encontra-se vulgarizada a classificação destes em dois grandes grupos, de acordo com comportamento que apresentam. Como é explicado a seguir, pode-se verificar que, de alguma forma, esta classificação está relacionada com as características físicas dos mesmos: viscosidade e elasticidade. Os dois grandes grupos de retardantes químicos são:

tipo água (*water-like*) – engloba todos os retardantes comerciais que apresentam uma viscosidade baixa (como a água) e sem elasticidade. O único ingrediente usado para aumentar a viscosidade é a argila, a qual é pouco eficaz em condições de grandes tensões tangenciais. Isto faz com que estes produtos tenham um comportamento semelhante ao da água nas aplicações aéreas. Assim, estes retardantes caracterizam-se pela elevada atomização aerodinâmica e pela consequente formação de gotas pequenas (< 2 ou 3 mm). Portanto, estes produtos são mais sensíveis à acção de ventos laterais e evaporação, não sendo recomendáveis em condições meteorológicas mais extremas;

espesados com gomas (*gum-thickned*) – retardantes caracterizados pela elevada viscosidade e elasticidade conferidas pelas gomas usadas como ingrediente na fórmula comercial do produto. Goma é o termo vulgarmente usado para designar polímeros orgânicos de cadeia elevada (macromoléculas). O único objectivo destas gomas é precisamente aumentar a viscosidade e a elasticidade do produto, para que o fluido seja menos vulnerável à atomização e, conseqüentemente, forme gotas de maiores dimensões. Por oposição aos retardantes tipo água, estes são menos vulneráveis a condições meteorológicas mais severas como ventos laterais, altas temperaturas e baixas humidades relativas. Evidentemente, estas condições mais “severas” são relativas, uma vez que não devem pôr em causa as condições mínimas de segurança associadas à utilização dos meios aéreos.

As largadas aéreas de retardantes espesados devem ser efectuadas a alturas mais elevadas, visto que o aumento da resistência à atomização poderia levar a que o retardante não fosse completamente atomizado na atmosfera, colocando em risco os bens materiais à superfície, incluindo as copas das árvores e mesmo vidas humanas. A figura seguinte pretende evidenciar isso mesmo. Corresponde a uma fotografia de um camião usado nas operações terrestres de combate a um fogo nos EUA e sobre o qual, por acidente, caiu uma largada de retardante efectuada a baixa altitude.

Os danos observados são facilmente compreendidos tendo em conta a quantidade de movimento (produto da massa pela velocidade) associada ao retardante bruto que atingiu o veículo. Este acidente põe em evidência a necessidade imperiosa de coordenação entre os meios terrestres e aéreos, bem como os cuidados mínimos e normas de segurança a ter nestas operações. É importante realçar que os Norte-Americanos apenas efectuam largadas a alturas superiores a 30 m (acima da copa das árvores), enquanto que os Franceses operam a alturas inferiores a este valor. Evidentemente que, a existir uma altura mínima de segurança, esta dependerá de vários factores, entre os quais o tipo e caudais de retardante à saída da plataforma aérea, condicionados pelo tipo de avião e nº de comportas abertas em simultâneo.



Figura 2.8 – Imagem de um camião esmagado por uma descarga de retardante efectuada a baixa altitude (Cortesia de Charles George, USDA FS).

Uma outra controvérsia existente sobre a aplicação dos retardantes químicos está associada à vantagem relativa da utilização dos retardantes espessados à base de gomas ou de retardantes tipo água. No decurso desta tese procurar-se-á responder a esta assunto. Nesta fase será importante realçar que a questão não está bem formulada, uma vez que o melhor produto dependerá das condições operacionais (tipo e intensidade do fogo, condições meteorológicas, tipo de vegetação, aviões disponíveis,...). Portanto, mediante determinadas condições o retardante X poderá ser o mais indicado, mas noutras condições poderá haver vantagens em usar o retardante Y.

Na ausência de modelos numéricos aplicáveis à modelação da atomização/deformação do retardante bruto, adoptou-se um modelo semi-empírico (George e Johnson, 1990) validado para o efeito e que vem descrito no §5. Efectivamente, os trabalhos realizados para o estudo da atomização de retardantes químicos são escassos. Os três estudos mais aprofundados sobre este assunto encontram-se referenciados cronologicamente de seguida.

Um estudo empírico realizado à escala real e no campo, elaborado por Anderson et al. (1976), apresenta alguns dados sobre o tamanho médio das gotas formadas para diversas soluções de retardantes químicos, em função da velocidade do avião (Figura 2.9).

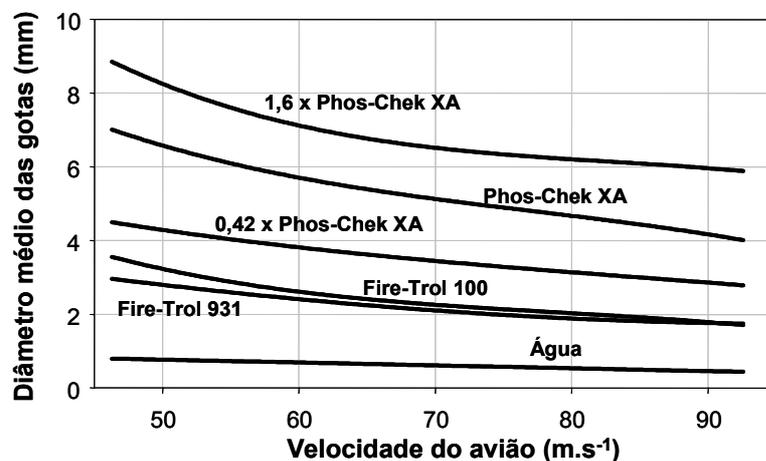


Figura 2.9 – Diâmetro médio das gotas de retardante em função de diversos tipos de retardante com várias concentrações e da velocidade do avião (adaptado de Anderson et al., 1976).

Da figura anterior, verifica-se que a influência da velocidade do avião é tanto mais importante quanto mais viscoso é o retardante. O tipo de produto usado (ou melhor, a sua reologia) condiciona fortemente o tamanho das gotas produzidas. Por exemplo, a uma velocidade de 50 m.s⁻¹, a água produz gotas de tamanho médio inferior a 1 mm, enquanto que uma solução de Phos-Chek XA[®] 1,6 x produz gotas com um diâmetro médio superior a 8 mm, podendo algumas ter tamanho acima de um centímetro.

A Figura 2.10 apresenta alguns resultados obtidos por Van Meter e George (1981) em laboratório relativos à influência da reologia sobre o tamanho das gotas produzidas. Note-se que este trabalho foi realizado em túnel de vento com algumas condicionantes, pelo que os resultados devem ser interpretados com algum cuidado. Contudo, é importante analisar comparativamente os resultados obtidos para cada fluido testado. Deste estudo, verifica-se que a água se atomiza em gotas de diâmetros na ordem dos 2 milímetros, produzindo um intervalo granulométrico bastante estreito comparativamente com os outros fluidos testados. Destaque para a Atapulgit e o Phos-Chek CMC que produzem frequências

consideráveis de gotas de vários milímetros. Em geral, observa-se uma grande variabilidade das distribuições granulométricas entre os diferentes fluidos.

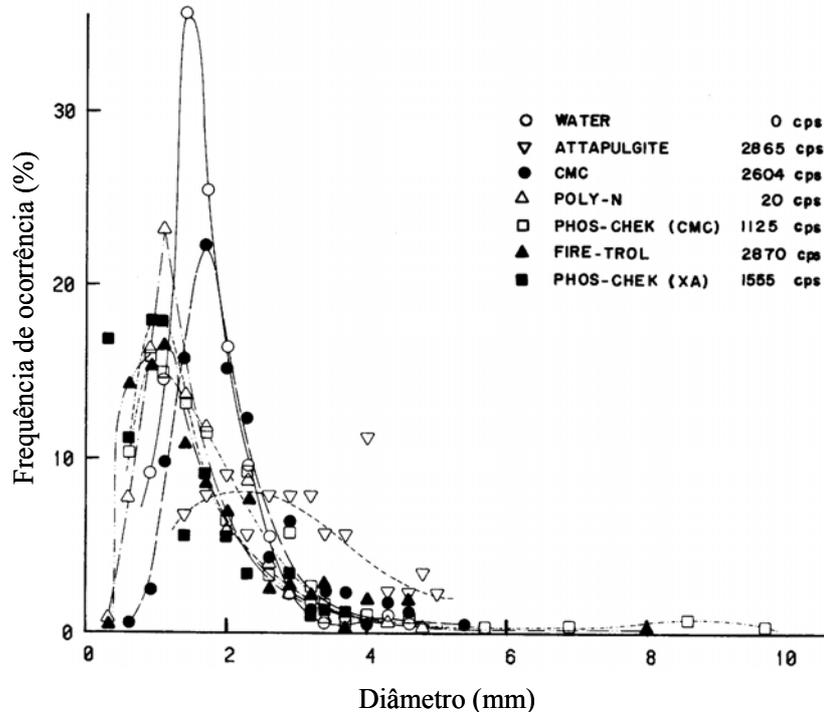


Figura 2.10 – Influência da reologia sobre o tamanho das gotas produzidas na atomização à velocidade de $17,8 \text{ m.s}^{-1}$ (Van Meter e George, 1981).

Dois anos mais tarde, em 1983, Van Meter aprofundou o trabalho anterior, tendo obtido os resultados apresentados na Figura seguinte. Estes resultados têm por base vários ensaios realizados à escala real, incluindo alguns testes já usados no trabalho de Anderson et al. (1976), descrito na Figura 2.9.

Comparando os dados fornecidos nos três documentos citados acima, nota-se que o último refere a formação de gotas até 20 mm de diâmetro, o que não acontece nas outras duas referências. Isto deve-se sobretudo ao facto de na Figura 2.11 se apresentar uma amplitude mais elevada de dados, tanto no que se refere a velocidades, como a características reológicas dos fluidos usados.

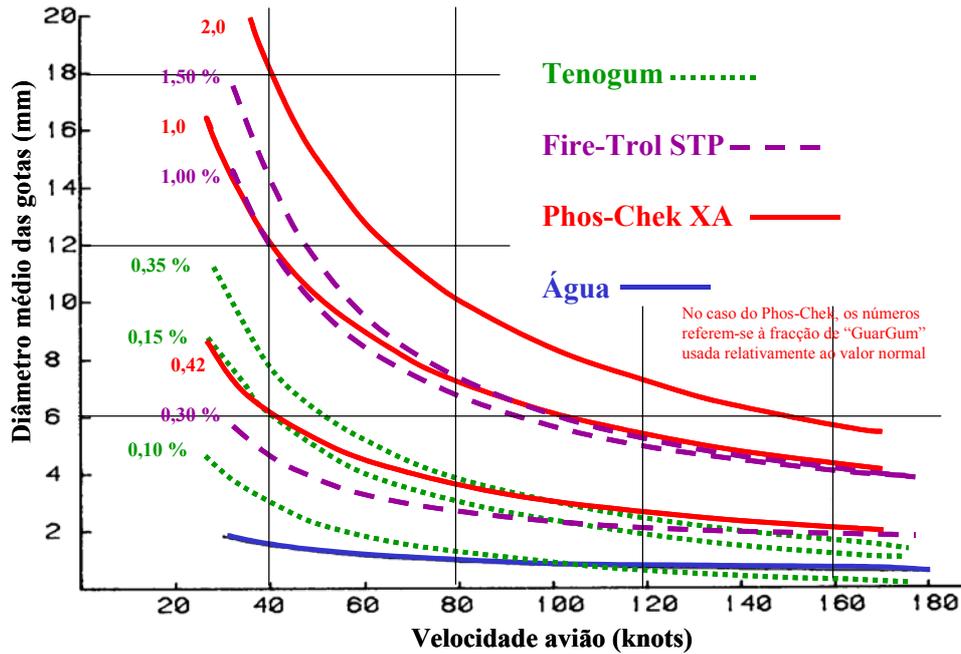


Figura 2.11 – Diâmetro médio de gotas de retardantes (adaptado de Van Meter, 1983).

Em síntese, pode-se constatar que para retardantes espessados à base de gomas, se formam gotas com vários milímetros de diâmetro, podendo mesmo atingir alguns centímetros.

2.3 Dispersão das gotas

Após a formação das gotas durante a fase de atomização, estas descrevem uma trajectória até serem depositadas no solo/canópia. Trata-se de um escoamento bifásico, cuja fase predominante ou primária é o ar atmosférico e a fase secundária corresponde às gotas de retardante. O tratamento para a descrição deste escoamento bifásico depende em grande medida da concentração de gotas (Crowe et al., 1998). Saliente-se, contudo, que a situação transiente da nuvem de retardante corresponde igualmente a concentrações variáveis no espaço e no tempo no que se refere à concentração de gotas, pelo que será legítimo supor a existência de diferentes aproximações físicas, consoante o caso. Matematicamente, a referida concentração da fase secundária pode ser expressa pela fracção volúmica, α_d :

$$\alpha_d = \frac{\delta V_d}{\delta V} \quad \text{Equação 2.3}$$

Na equação anterior, o índice d corresponde à fase secundária e significa *dispersa*. Por oposição, designa-se por fase contínua a fase primária, o ar, usando-se o índice c . Assim, por analogia com a equação anterior, pode-se escrever:

$$\alpha_c = \frac{\delta V_c}{\delta V} \quad \text{Equação 2.4}$$

O volume de análise (δv) deverá ser suficientemente grande para conter um número considerável de moléculas de forma a garantir uma média estável. Isto significa que alterando/diminuindo ligeiramente o volume de controlo, os parâmetros analisados devem manter-se praticamente inalterados. Para o caso de gases, considera-se razoável um volume com 10^4 moléculas, o que corresponde em condições PTN a sensivelmente um volume de 10^{-21} m^3 , ou seja um cubo com $0,1 \text{ }\mu\text{m}$ de lado. Na maioria dos problemas de engenharia, como é o caso da nuvem de retardante, as dimensões em causa são bastante superiores. Caso contrário, teria que se considerar o meio como rarefeito e modelar o escoamento numa base molecular. No caso de um escoamento multifásico, é evidente que o volume mínimo de análise é bastante superior ao de um gás. Considerando que o volume de análise possui gotas de dimensão milimétrica, então o volume mínimo de análise deverá ter centímetros ou mesmo decímetros de comprimento. A Figura seguinte pretende ilustrar o volume de análise num escoamento bifásico.

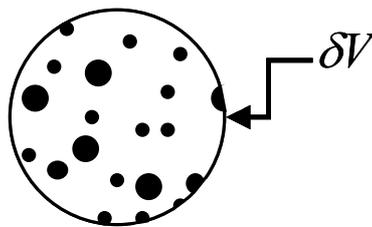


Figura 2.12 – Volume de análise com a fase dispersa (partículas ou gotas).

δV_c representa o volume de análise subtraído do volume de partículas, sendo por vezes designado por volume “oco” (*void*). Tendo em conta as definições anteriores das fracções volúmicas, pode obter-se a seguinte relação:

$$\alpha_c + \alpha_d = 1 \quad \text{Equação 2.5}$$

uma vez que:

$$\delta V_c + \delta V_d = \delta V \quad \text{Equação 2.6}$$

É também comum usar-se a massa volúmica bruta (*bulk*) ou aparente da fase dispersa como sendo a massa da fase dispersa por unidade de volume de análise:

$$\bar{\rho}_d = \frac{\delta M_d}{\delta V} \quad \text{Equação 2.7}$$

A massa volúmica da mistura corresponde à soma das massas volúmicas aparentes das duas fases:

$$\rho_m = \bar{\rho}_c + \bar{\rho}_d \quad \text{Equação 2.8}$$

A relação entre a massa volúmica real (ρ_d) da fase secundária e a sua massa volúmica aparente ($\bar{\rho}_d$) é evidentemente traduzida pela equação:

$$\bar{\rho}_d = \alpha_d \cdot \rho_d \quad \text{Equação 2.9}$$

uma vez que:

$$M_d = \alpha_d \cdot \rho_d \quad \text{Equação 2.10.}$$

Assim, uma alternativa para a definição da massa da mistura bifásica é:

$$\rho_m = \alpha_c \rho_c + \alpha_d \rho_d \quad \text{Equação 2.11.}$$

Outro parâmetro importante para caracterizar a fase dispersa consiste na sua concentração mássica definida pelo cociente entre as massas das fases:

$$C = \frac{M_d}{M_c} = \frac{\bar{\rho}_d}{\bar{\rho}_c} \quad \text{Equação 2.12}$$

Este valor é também designado comumente por razão mássica da partícula. O comportamento de um escoamento bifásico depende em grande parte da distância entre as partículas. Esta informação é indispensável para saber se a partícula pode ou não ser considerada um elemento isolado. Considere-se o esquema da Figura 2.13 que pretende representar partículas esféricas no centro de cubos de comprimento L. Este comprimento L corresponde à distância entre partículas. Assim, poder-se-á facilmente determinar a fracção volúmica da fase dispersa:

$$\alpha_d = \frac{\pi D^3}{6L^3} \quad \text{Equação 2.13}$$

No caso (imaginário) da distância entre as partículas ser exactamente igual ao seu diâmetro, como se encontra representado na parte direita da Figura 2.13, então a fracção volúmica aumenta para $\pi/6$. Note-se que este valor não corresponde ao valor máximo, uma vez que existem outras disposições ou arranjos mais compactos para partículas esféricas.

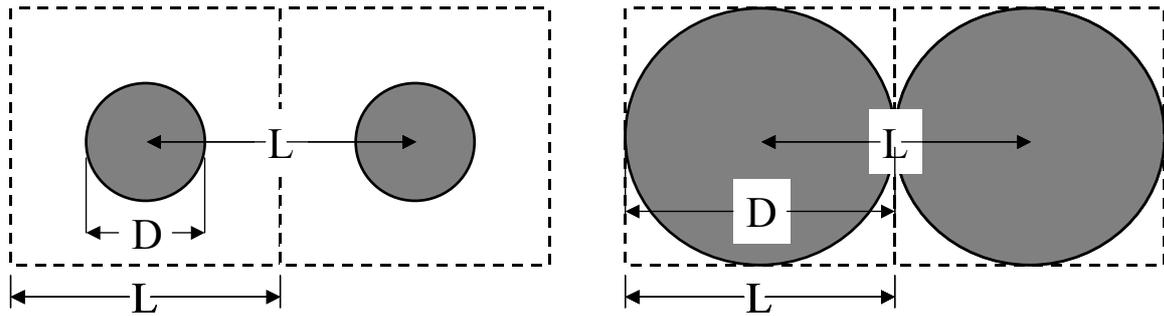


Figura 2.13– Espaçamento entre partículas.

A equação anterior pode ser reescrita na seguinte forma:

$$\frac{L}{D} = \left(\frac{\pi}{6\alpha_c} \right)^{1/3} \quad \text{Equação 2.14}$$

Esta última relaciona o espaço entre partículas, adimensionalizado pelo seu diâmetro, com a sua fração volúmica. Tendo, por exemplo, uma fração volúmica dispersa de 10%, então dispor-se-á de um espaçamento de 1,7, valor relativamente baixo. Significa, nesse caso, que as partículas não poderiam ser consideradas como isoladas. Pelo contrário, seria necessário ponderar a influência mútua das partículas vizinhas no que respeita às transferências de massa, calor e quantidade de movimento (Crowe et al., 1977; Mawhiney et al., 1996 e Crowe et al., 1998). Também se pode expressar a fração volúmica da fase dispersa através da sua concentração mássica e da razão entre as massas volúmicas das duas fases:

$$\alpha_c = \frac{\bar{\rho}_d}{\rho_d} = \frac{\bar{\rho}_d \bar{\rho}_c \rho_c}{\bar{\rho}_c \rho_c \rho_d} = C\alpha \frac{\rho_c}{\rho_d} = \frac{k}{1+k} \quad \text{Equação 2.15}$$

sendo $k = C \frac{\rho_c}{\rho_d}$. Desta forma, tendo em conta a Equação 2.14, é possível determinar a

distância entre partículas da fase dispersa pela seguinte relação:

$$\frac{L}{D} = \left(\frac{\pi}{6} \frac{1+k}{k} \right)^{1/3} \quad \text{Equação 2.16}$$

No caso de gotas de água (ou retardante químico) dispersas em ar em condições normais, tem-se um razão de massas volúmicas, $\frac{\rho_c}{\rho_d}$, na ordem de 10^{-3} . Assim, uma fracção mássica da ordem da unidade (1 kg retardante.kg⁻¹ ar) corresponde a uma distância média entre partículas dez vezes superior ao seu diâmetro $\left(\frac{L}{D} \approx 10 \right)$. Neste caso, as partículas poderiam ser consideradas como isoladas, uma vez que a interferência entre elas próprias seria desprezável. Neste caso, a distância considerável entre gotas não origina muitas colisões entre as mesmas e portanto fenómenos como a coalescência de gotas serão diminutos, não requerendo a existência da abordagem *four-ways coupling* (Crowe et al., 1998). O mesmo já não acontece no caso de existirem concentrações superiores a 3 ou 4 kg retardante.kg⁻¹ ar, existindo neste caso uma proximidade elevada entre as gotas, tal qual num leito fluidizado. No caso da nuvem de retardante, concentrações desta ordem apenas existem na proximidade do aerotanque, durante a fase de atomização. A forte dispersão da nuvem e a entrada de ar na mesma, diminuem rapidamente a concentração da mesma para valores onde apenas fenómenos “two ways” têm lugar (Tomé e Borrego, 2002).

É necessário calcular a ordem do volume da célula de cálculo de forma a garantir uma média estacionária. Exigindo 10^4 partículas para assegurar uma tal média, usando a equação anterior, verifica-se que o volume mínimo deverá ser:

$$V_{\min} = X_{\min}^3 = 10^4 L^3 = 10^4 \left(\frac{L}{D} \right)^3 D^3 \quad \text{Equação 2.17}$$

O comprimento mínimo do cubo correspondente à célula de cálculo será dado por:

$$X_{\min} \approx 20L = 20 \left(\frac{L}{D} \right) D \quad \text{Equação 2.18}$$

Assim, para uma distância entre partículas de 10 vezes o diâmetro destas e diâmetros de 2 mm, a equação anterior permite determinar o volume limitante (mínimo) correspondente a um cubo de lado igual a 0,4 m. No caso das dimensões das células da malha de cálculo serem inferiores a este valor, a fase dispersa não poderia ser considerada como um *continuum* (Crowe et al., 1998). Note-se que a equação anterior evidencia uma relação inversa entre o tamanho mínimo das células de cálculo e da concentração da fase dispersa. Evidentemente, toda esta análise foi efectuada para o caso da fase dispersa ser composta por partículas de um só tamanho, situação pouco realista. Na natureza, e na maioria das aplicações de engenharia, as partículas possuem tamanhos diversos, o que leva ao conceito de distribuição granulométrica. Algumas das distribuições estatísticas mais vulgares como a normal, log-normal e de Rosin-Ramler, permitem a caracterização da função com base em parâmetros estatísticos (*e.g.* média e desvio padrão). Contudo, não existem fórmulas correspondentes às anteriores para as distribuições granulométricas, sendo no entanto racional esperar-se como válida uma média dos valores obtidos pela aplicação das equações a diâmetros discretos. As simulações apresentadas no capítulo 5 foram baseadas numa malha euleriana discretizada em células com dimensões superiores a 0,3 metros, de forma a cumprir este requisito de *continuum*.

2.3.1.1 Tempos de resposta

A principal diferença entre a dispersão de um poluente passivo (gasoso) na atmosfera e a dispersão de partículas reside na inércia destas relativamente a variações da fase contínua (velocidade e temperatura). Tempo de resposta é um conceito relevante no estabelecimento de parâmetros adimensionais para a caracterização do escoamento bifásico, representando o tempo necessário para uma partícula responder a uma alteração do escoamento. Podem definir-se dois tempos de resposta distintos: tempo de resposta de momento (ou cinético) e tempo de resposta térmico.

Para analisar o significado físico do tempo de resposta de momento, deve-se começar por analisar a equação que traduz o movimento de uma partícula esférica. Esta equação resulta da 2ª Lei de Newton ($m\vec{a} = \sum \vec{F}$):

$$m \frac{d\vec{v}}{dt} = \frac{1}{2} C_D \frac{\pi D^2}{4} \rho_c (\vec{u} - \vec{v}) \|\vec{u} - \vec{v}\| \quad \text{Equação 2.19}$$

sendo \vec{v} a velocidade da partícula, \vec{u} a velocidade do gás e C_D o coeficiente de arrasto. O n.º de Reynolds da partícula é:

$$\text{Re} = \frac{\rho_c D \|\vec{u} - \vec{v}\|}{\mu_c} \quad \text{Equação 2.20}$$

μ_c é a viscosidade da fase contínua (gás). Pode-se, então, reescrever a equação 2.19 na seguinte forma:

$$\frac{d\vec{v}}{dt} = \frac{18\mu_c}{\rho_d D^2} \frac{C_D \text{Re}}{24} (\vec{u} - \vec{v}) \quad \text{Equação 2.21}$$

Para números de Reynolds baixos, o factor $C_D \text{Re}/24$ é aproximadamente 1 e, portanto, a igualdade anterior pode ser escrita através da seguinte expressão:

$$\frac{d\vec{v}}{dt} = \frac{18\mu_c}{\rho_d D^2} (\vec{u} - \vec{v}) = \frac{1}{\tau_v} (\vec{u} - \vec{v}) \quad \text{Equação 2.22}$$

O tempo de resposta ou de relaxação, τ_v , encontra-se definido pela equação:

$$\tau_v = \frac{\rho_d D^2}{18\mu_c} \quad \text{Equação 2.23}$$

A solução analítica da equação diferencial 2.22 existe no caso de a velocidade do escoamento ser constante. Nesse caso, e considerando que a velocidade inicial da partícula é igual a zero, obtém-se a solução apresentada pela seguinte expressão:

$$\vec{v} = \vec{u} \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_v}} \right) \quad \text{Equação 2.24}$$

O tempo de relaxação da partícula representa, portanto, o intervalo de tempo necessário para a partícula atingir $\frac{e-1}{e}$ (63%) da velocidade do fluido transportador. Como se pode verificar a partir da Equação 2.23, o tempo de resposta cinético é sensível em relação ao tamanho da partícula. Note-se que as últimas equações apenas são válidas para o regime de Stokes (baixos Re). Caso contrário, a Equação 2.19 terá de ser integrada numericamente por falta de solução analítica para a mesma. É o que acontece para a maioria dos diâmetros de gotas de retardante presentes na nuvem.

2.3.2 Cálculo da trajetória das partículas na atmosfera

Para utilização de um modelo lagrangeano é necessário determinar a equação que descreve a trajetória das partículas num escoamento turbulento e válido para partículas milimétricas. A referida equação resulta da 2ª equação de Newton, a qual expressa que a aceleração de um corpo é igual ao cociente entre a resultante das forças que actuam sobre a partícula e a massa do mesmo corpo. No caso de gotas com centenas de micrómetros, ou mesmo milímetros, as forças mais relevantes são o peso e a força de arrasto. Assim, outras forças (e.g. browniana, impulsão) são normalmente desprezáveis. Usando a notação de Einstein vem:

$$\frac{d^2}{dt^2}(X_i + x_i) = [U_i + u_i - V_i - v_i] \left[\frac{1}{\tau_v} \right] + g_i \quad \text{Equação 2.25}$$

e

$$\frac{d}{dt}(X_i + x_i) = V_i + v \quad \text{Equação 2.26}$$

sendo,

$$\tau_v = \frac{4}{3} \frac{D\rho}{C_D\rho_a\|U_i - V_i\|} \quad \text{Equação 2.27}$$

com,

t = tempo (s);

X_i = posição média da gota (X, Y, Z);

x_i = flutuação da posição média (x, y, z);

U_i = velocidade média do fluido no local da gota (U_x, U_y, U_z);

u_i = flutuação da velocidade média do fluido no local da gota (u_x, u_y, u_z);

V_i = velocidade média da gota (V_x, V_y, V_z);

v_i = flutuação da velocidade média da gota (v_x, v_y, v_z);

g_i = vector gravidade (0, 0, -9,8 m.s⁻²);

D = diâmetro da gota (m);

ρ = massa volúmica da gota;

ρ_a = massa volúmica do ar;

C_D = coeficiente de arrasto.

O coeficiente de arrasto é avaliado empiricamente e depende da forma geométrica da partícula, da viscosidade do fluido e da velocidade relativa entre a partícula e o fluido. Correlações realizadas para partículas com diferentes formas geométricas, encontram-se disponíveis na bibliografia. Teske et al. (1996) apresenta uma lista com algumas expressões aplicáveis a partículas esféricas.

Langmuir e Blodgett sugerem:

$$C_D = \frac{24}{\text{Re}} \left[1 + 0,197 \text{Re}^{0,63} + 0,00026 \text{Re}^{1,38} \right] \quad \text{Equação 2.28}$$

Ishii e Zuber indicam:

$$C_D = \frac{24}{Re} [1 + 0,1 Re^{0,75}] \quad \text{Equação 2.29}$$

Reist propõe:

$$C_D = \frac{24}{Re} [1 + Re^{0,687}] \quad \text{Equação 2.30}$$

Estas correlações são apenas válidas para partículas esféricas, como é o caso de gotas pequenas (menores que 1 mm). No caso de retardantes mais viscosos, é comum a formação de gotas de maiores dimensões durante a atomização, as quais poderão ter uma forma geométrica próxima a dois semi-ovóides, como se evidencia na Figura 2.14. A parte frontal da gota (inferior) tem uma forma mais achatada devido à pressão hidrodinâmica, enquanto que na zona superior esta mesma pressão encontra-se mais uniforme, conferindo à gota uma superfície mais arredondada (Clift et al., 1978). Esta forma, menos aerodinâmica do que uma esfera (rígida), confere à gota um maior coeficiente de arrasto, C_D , e consequentemente, uma menor velocidade terminal.

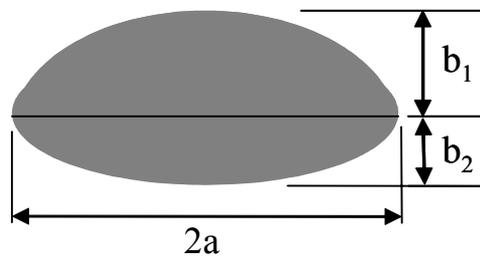


Figura 2.14 – Forma geométrica de uma gota de retardante com mais de 3 mm, em queda livre.

Com base nas dimensões apresentadas na Figura anterior é possível definir factores de forma geométrica dos esferóides em função do número de Eotvos, Eo (Clift et al., 1978):

$$F_{forma} = \frac{b_1 + b_2}{2a} = \begin{cases} 1,0 & \Leftarrow Eo \leq 0,4 \\ \frac{1,0}{1,0 + 0,18(Eo - 0,5)^{0,8}} & \Leftarrow 0,4 < Eo < 8 \end{cases} \quad \text{Equação 2.31}$$

O cálculo de Eo faz uso do diâmetro equivalente da partícula, d_e , definido como o diâmetro de uma esfera com o mesmo volume da gota esferóide:

$$d_e = 2a \left[\frac{b_1 + b_2}{2a} \right]^{1/3} \quad \text{Equação 2.32}$$

A Figura seguinte apresenta a velocidade terminal das gotas de água em função do seu diâmetro equivalente.

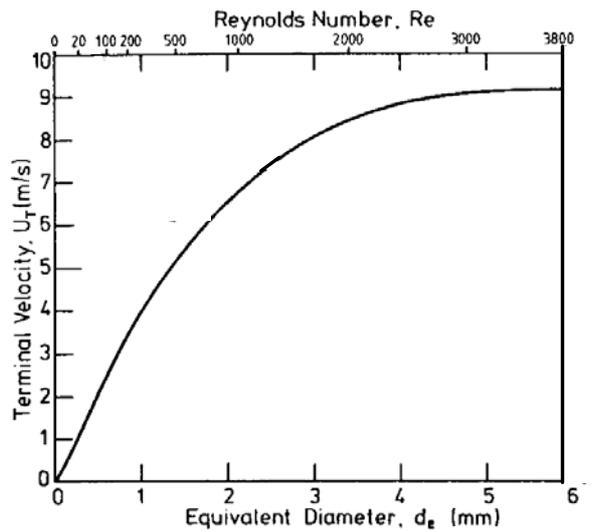


Figura 2.15 – Velocidade terminal de gotas de água em ar à temperatura de 20° C e pressão de 1 bar (Clift et al., 1978).

No caso de retardantes com viscoelasticidade considerável é comum a formação de gotas com diâmetros equivalentes superiores a 4 mm. Para estas “macrogotas”, a curva assintótica da Figura anterior permite inferir valores de velocidade terminal próximos de 9 metros por segundo.

Integrando as equações 2.25 e 2.26 em ordem ao tempo pode-se determinar a posição da partícula em qualquer instante temporal, ou seja a sua trajectória.

$$X_i^n = X_i^{n-1} - \tau_p [U_i^n - V_i^{n-1} + g_i \tau_p] [1 - e^{-\Delta t / \tau_p}] + [U_i^n + g_i \tau_p] \Delta t \quad \text{Equação 2.33}$$

$$V_i^n = -[U_i^n - V_i^{n-1}] e^{-\Delta t / \tau_p} + U_i^n + g_i \tau_p \quad \text{Equação 2.34}$$

Conhecendo o campo de ventos atmosférico (U_i), a posição e velocidade prévias da partícula é possível integrar numericamente as equações que governam o comportamento da partícula, determinando a sua trajectória com resolução temporal Δt (Equações 2.33 e 2.34).

Como já foi afirmado anteriormente, a queda das gotas de retardante na atmosfera constitui um fenómeno transiente, uma vez que existe evaporação da gota. Evidentemente, a evaporação será mais significativa nos casos em que (i) a temperatura atmosférica é elevada; (ii) a humidade atmosférica é baixa e (iii) as gotas são de pequena dimensão, o que lhes confere uma grande área superficial específica. No caso da simulação da aplicação de retardantes, é importante ter em conta este fenómeno, por duas razões principais:

Perda de material, principalmente água. Dado que os sais inorgânicos não se evaporam, a perda de material nunca será completa. No extremo, poderá ser evaporada toda a água, conduzindo à formação de uma partícula sólida com o resíduo de sal. O mais frequente é que a evaporação de água seja apenas parcial, levando a um aumento da concentração do sal activo na própria gota, pelo que, neste caso, não se poderá falar de uma verdadeira perda de retardante químico. Contudo, e embora a quantidade de sal activo seja a mesma, a falta da água poderá condicionar o revestimento adequado dos combustíveis pondo em causa o sucesso do combate.

O comportamento da gota (trajectória) é função do seu tamanho. Assim, havendo uma diminuição do seu tamanho/inércia, a gota será mais facilmente transportada pelo vento, podendo ser arrastada para fora do alvo pretendido, o que constitui uma perda total do sal nela contido.

A evaporação afecta mais as gotas menores. Assim, uma aplicação aérea de retardante tipo *water-like* origina maiores perdas de material por evaporação do que os retardantes espessados à base de gomas.

A expressão matemática que descreve a evaporação de uma gota em condições estáticas é a equação de Maxwell. No caso de uma gota com movimento relativo ao gás adjacente, a equação de Maxwell é multiplicada pelo factor de ventilação, F_v (Teske et al., 1996; Picot e Kristmanson, 1997):

$$\frac{dD}{dt} = \frac{4M_p D_v \rho_a (e_s - e_\infty)}{M_a D \rho (P_a - e_s)} F_v \quad \text{Equação 2.35}$$

com

$$F_v = 1,0 + 0,3 Sc^{1/3} Re^{1/2} \quad \text{Equação 2.36}$$

sendo,

D = diâmetro da gota (m);

M_p = massa molecular do vapor (18 g mol⁻¹);

M_a = massa molecular da mistura “vapor + ar” (28,8 g mol⁻¹);

ρ_a = massa volúmica do ar (~1,2 kg.m⁻³);

ρ = massa volúmica do vapor (kg.m⁻³);

e_s = pressão parcial de vapor junto da gota (Pa);

e_∞ = pressão parcial de vapor longe da gota (Pa);

P_a = pressão atmosférica (1,013x10⁵ Pa).

O coeficiente de ventilação é sempre superior a 1, o que significa que uma gota em movimento evapora a uma taxa mais elevada que uma gota em condições estáticas. Este coeficiente é função dos números adimensionais de Reynolds e de Schmidt. Assim, o coeficiente de ventilação depende do diâmetro da gota, não existindo solução analítica para a equação 2.33. O procedimento para calcular a evaporação de uma gota passa então pela resolução numérica da expressão usando intervalos de tempo adequadamente pequenos. A

Figura 2.14 apresenta os resultados de algumas simulações efectuadas para a evaporação de uma gota de 1 mm de diâmetro com velocidade terminal e numa atmosfera com 10% de humidade relativa e diferentes temperaturas atmosféricas.

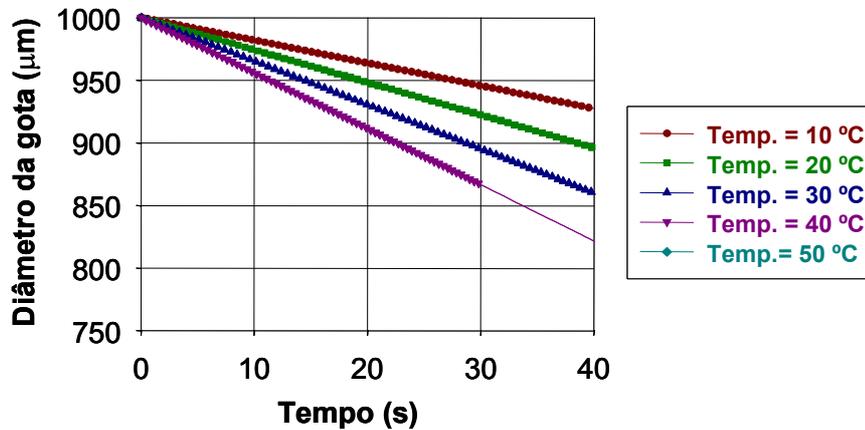


Figura 2.16 – Diâmetro da gota ao longo do tempo para diferentes temperaturas e humidade relativa de 10%.

A figura anterior permite verificar a importância do factor temperatura na velocidade da evaporação. No caso de uma temperatura de 50 °C, o diâmetro foi reduzido em apenas 5% em 10 segundos, mas este valor corresponde a um decréscimo de aproximadamente 15 % no volume da gota. Para gotas de menores dimensões, a taxa de evaporação é mais significativa. A figura seguinte permite comparar o efeito da temperatura e da humidade do ar na taxa de evaporação da mesma gota com 1 mm de diâmetro.

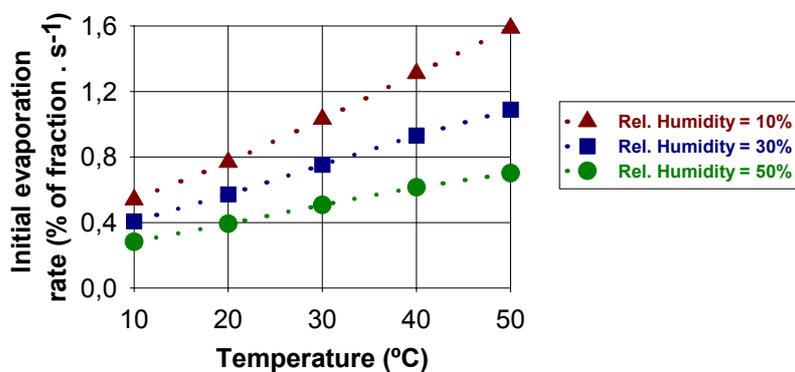


Figura 2.17 – Taxas iniciais de evaporação de uma gota de 1 mm de diâmetro em função da temperatura e da humidade atmosférica.

Na realidade, é difícil prever a temperatura e humidade a que as gotas estarão sujeitas, uma vez que dependerá da tática concreta de combate ao incêndio, especialmente da proximidade da largada à frente de fogo. Embora o retardante químico não seja usado para combate directo, ou seja não é aplicado sobre o fogo, poderá mesmo assim atravessar condições relativamente propícias a elevadas taxas de evaporação. A única forma de conhecer as condições atmosféricas induzidas pela frente de fogo no local da aplicação aérea seria através da utilização simultânea de um modelo físico de propagação do fogo.

A evaporação pode ter um impacto significativo ao nível do comportamento da nuvem de retardante quer devido à perda de material, quer à influência na trajectória das gotas de tamanho transiente. A forma mais cómoda para a simulação da evaporação no modelo global da nuvem consiste na utilização de regressão quadrática dos valores obtidos pelo módulo de evaporação. Desta forma, poupa-se tempo de cálculo no modelo final, sem perda de rigor nas simulações. O cálculo da evaporação não é realizado para gotas com diâmetros superiores a 3 mm, uma vez que estas têm uma pequena área superficial específica e simultaneamente possuem pequenos tempos de residência na atmosfera.

Havendo poucos estudos realizados sobre a nuvem de retardante torna-se importante saber até que ponto a precipitação do retardante pode ser comparada com a vulgar chuva, de forma a poder usar a vasta bibliografia sobre precipitação. É fácil estimar que para um nível de cobertura de retardante de 1 litro por metro quadrado e supondo que todas estas gotas sedimentam em 5 segundos, então a intensidade da precipitação do retardante seria de 720 mm.h^{-1} . As chuvadas mais fortes têm valores de precipitação próximos de 90 mm.h^{-1} . A concentração de água (gotas) da chuva na atmosfera, mesmo durante precipitações intensas, toma valores na ordem de $10 \text{ g H}_2\text{O.m}^{-3}$ (Takahashi et al., 2001), enquanto que na nuvem de retardante se obtêm valores até duas ordens de grandeza superiores ($1000 \text{ g H}_2\text{O.m}^{-3}$).

No que se refere ao diâmetro das gotas, numa precipitação natural, raramente se encontram gotas com diâmetros superiores a 6 mm enquanto que na atomização de retardantes viscoelásticos é possível identificar *macrogotas* com 20 e mesmo 30 mm de diâmetro

equivalente. Por todas estas razões, a queda da nuvem de retardante é fisicamente uma sedimentação de gotas na atmosfera, mas com valores distintos dos normalmente existentes durante as chuvadas, mesmo as mais fortes. Desta forma, a elevada concentração de gotas de retardante em queda livre altera o escoamento atmosférico exigindo uma modelação bidireccional (*two-ways*) do escoamento bifásico.

2.4 Penetração da canóia e/ou deposição do retardante

As gotas de retardante/água atomizadas e posteriormente depositadas/dispersadas na atmosfera atingem o topo da canóia dos combustíveis florestais onde se irá dar um dos seguintes fenómenos físicos: (i) ou a gota atinge um ramo ou folha dos combustíveis dando-se a impacção ou (ii) a partícula líquida penetra na canóia, passa através da porosidade da estrutura tridimensional dos combustíveis e atinge as partes mais inferiores das árvores ou mesmo o solo. Na bibliografia existem diversos trabalhos sobre a intercepção de água da chuva pela vegetação florestal, nomeadamente os de Hashino et al. (2002), Dijk e Bruijnzeel (2001) e Schellekens et al. (1999). Encontram-se ainda estudos sobre a deposição de gotas líquidas sobre objectos com geometrias regulares como cilindros de vários diâmetros, entre os quais se incluem os trabalhos de Hung e Yao (1999) e de Hung e Yao (2002).

Quando se dá a colisão ou impacção entre a gota e o combustível formam-se pequeníssimas gotas satélite que, por sua vez, poderão atingir outras partes da vegetação (Figura 2.18).

A quantidade de líquido que ficou instantaneamente retido poderá sofrer escorrimento, no caso desta zona se encontrar sobressaturada, dirigindo-se para zonas mais inferiores por acção da gravidade. Este escorrimento pode-se dar de uma forma contínua por movimentação do filme ou pela formação de novas gotas que coalescem sobretudo em suportes físicos quase horizontais. A viscosidade do retardante bem como a sua reologia e tensão superficial têm aqui um papel chave, uma vez que irão condicionar a velocidade do

processo, e mais importante, induzir o estado de equilíbrio final associado à espessura de filme líquido que reveste o combustível.

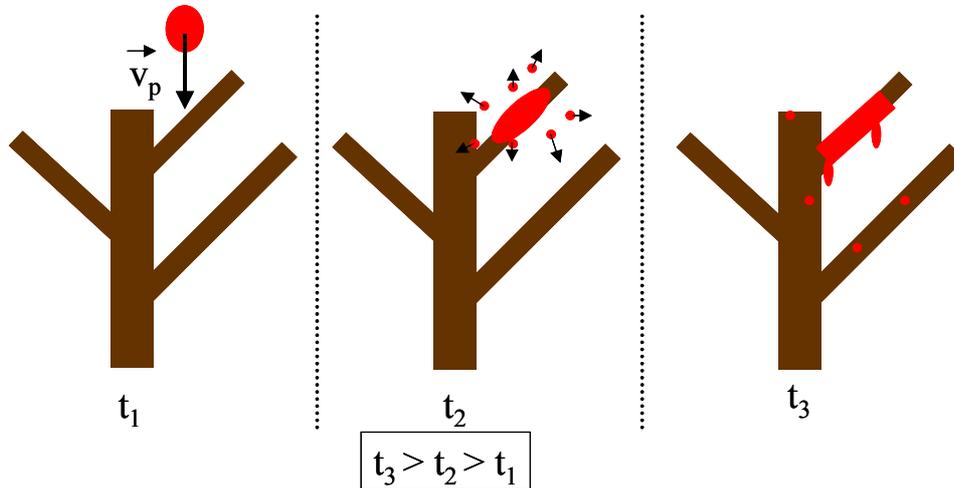


Figura 2.18 – Impacção da gota com o combustível.

Teoricamente, o volume de retardante necessário para revestir uniformemente todos os combustíveis é dado pela seguinte fórmula:

$$V = E \cdot A \quad \text{Equação 2.37}$$

sendo,

V - volume de retardante em m^3 ;

E - espessura do filme de retardante em m ;

A - área superficial de combustível que se pretende tratar em m^2 .

O mais prático é definir a quantidade de retardante necessária por unidade de área de solo ou coberto vegetal. Assim, será mais conveniente a utilização do parâmetro de área superficial de combustível por unidade de área de coberto vegetal designado por A' . A equação anterior pode, portanto, ser reescrita numa base unitária de área de solo com coberto vegetal:

$$V' = E.A' \quad \text{Equação 2.38}$$

Nesta relação, V' representa a quantidade de retardante retido por unidade de área de solo tratado (m^3 retardante por m^2 área de solo). A' é adimensional, uma vez que traduz a área superficial de combustível por unidade de área de solo. É possível estender a aplicação das equações anteriores a cobertos vegetais não homogêneos, onde a espessura de filme de retardante pode diferir para diferentes tipos de combustível. Evidentemente, a equação anterior passa a ser:

$$V' = \sum_i E_i A'_i \quad \text{Equação 2.39}$$

O índice i refere-se aos diferentes tipos de vegetação ou mesmo às diferentes partes de uma espécie vegetal (*e.g.* ramos e folhas). Apesar da coerência das fórmulas anteriores, estas não são muito usadas, uma vez que o recurso ao parâmetro área superficial é pouco frequente, sendo muito mais comum a utilização da carga de combustível em kg.m^{-2} . Contudo, a utilização das expressões anteriores não deverá ser restringida, dada a possibilidade de determinar uma relação directa entre a carga de combustível e a área superficial dos mesmos. Quanto ao parâmetro E , referente à espessura de filme de retardante, pode ser facilmente determinado em laboratório para retardantes químicos com propriedades físicas distintas. A literatura americana (USDA FS) utiliza uma abordagem empírica mais simples para servir de apoio aos operacionais. De acordo com esta metodologia, a quantidade de precipitação de retardante é função apenas do tipo (ou carga) de combustível, como se encontra evidenciado na tabela seguinte. Os valores apresentados na tabela são resultado, em parte, de um trabalho não publicado de Rothermel (1978). Os níveis de cobertura apresentados adequam-se a situações em que a secura dos combustíveis é elevada, podendo tornar-se excessivos noutras condições. A aplicação de retardante em quantidades superiores às recomendadas não é seguida por um aumento concomitante de eficiência, correspondendo a uma perda do produto aplicado.

Tabela 2.1– Quantidade de retardante necessário para retardar uma frente de chamas em função do tipo de combustível nos EUA (adaptado de George, 1981).

Combustível		Precipitação de retardante	
Descrição	Fuel Model (1978 NFDRS)	em galões /100 ft ²	em l.m ⁻² ou mm
Ervas perenes e de ciclo anual da zona Oeste; tundra	A, L, S	1	0,41
Ervas altas; coníferas (com ervas, plantas herbáceas, agulhas e/ou arbustos lenhosos abaixo da canópia); árvores dicotiledóneas como o carvalho, faia e freixo (inverno e verão)	C, H, P, U, E, R	2	0,81
Pequenos ramos quebrados (coníferas ou dicotiledóneas de folha larga); mato verde; erva cortada; arbustos lenhosos do Oeste	K, F, N, T	3	1,22
Coníferas de agulha curta (camada espessa de manta morta)	G	4	1,63
Baldios do sul; abeto do Alasca; mato	D, Q, F	6	2,44
Chaparral misto da Califórnia; ramos quebrados de média e grande dimensão	B, I, J, O	> 6	> 2,44

A quantidade de retardante necessária para atrasar uma frente de fogo é função não só do tipo de combustível, mas também da intensidade do fogo, pelo que os números apresentados na tabela anterior devem ser considerados como valores médios. Não é apenas a quantidade de retardante por unidade de área que importa considerar, mas também a sua repartição nos combustíveis segundo a direcção vertical. Assim, se o retardante ficar maioritariamente depositado nos combustíveis aéreos (*e.g.* por excesso de viscosidade) e não chegar aos combustíveis mais secos ou mortos, o ataque aéreo será pouco eficiente, mesmo que se utilize o nível de precipitação correcto. A quantidade de retardante necessário é inversamente proporcional à sua eficiência, a qual depende da concentração em sais activos. A eficiência das várias formulações comerciais de retardantes é idêntica, pois todos os produtos são submetidos a ensaios laboratoriais e apenas são acreditados no caso de atingirem uma eficácia mínima. Este valor de eficiência serve de referência para os estudos relativos aos níveis óptimos de cobertura de retardante. O USDA FS tem procedimentos laboratoriais exigentes no que concerne à acreditação de retardantes químicos (George e Johnson, 1981; Van Meter et al., 1985; George e Johnson, 1986; USDA, 1989). Assim, qualquer empresa que vise vender retardantes químicos ao USDA FS tem que sujeitar várias amostras do produto a análises físico-químicas e testes de eficiência em túnel de vento. Todos os ensaios são realizados no USDA FS, mas a

expensas da empresa proprietária do produto. Outro parâmetro criteriosamente analisado é a corrosão causada pelo retardante sobre várias superfícies metálicas, de forma a evitar a degradação dos aerotanques.

Existem alguns estudos empíricos que indicam que a sedimentação de gotas de água de chuva na parte superior da canópia pode atingir valores significativos. Grah e Wilson (1945) mediram intercepções máximas de 1,42 mm de água para uma espécie de pinheiro e 0,81 para a *Baccharis Pilularis*. Comparando estes valores com os da Tabela 2.1, facilmente se compreende que a intercepção pode condicionar drasticamente a eficiência do combate a fogos rasteiros em zonas de copas densas. Embora não sendo uma questão consensual, a maioria dos especialistas operacionais recomenda a utilização de retardantes não espessados em incêndios rasteiros, de forma a diminuir a retenção nas partes mais elevadas da vegetação. Outro parâmetro, além da viscosidade, também envolvido na intercepção é a quantidade de movimento que a gota possui no momento da colisão. Assim, os retardantes mais viscosos tendem a produzir gotas com maiores diâmetros, logo com maior capacidade de penetrar os combustíveis. Em termos quantitativos não existem dados claros ou conclusivos sobre o balanço destes dois factores contrários (viscosidade e momento da gota).

Durante a década de setenta, o USDA FS realizou vários trabalhos com vista a resolver a questão da intercepção do retardante nos combustíveis (Swanson e Helvig, 1973; Anderson e Wong, 1978). Anderson e Wong (1978) estudaram o efeito de diversos parâmetros sobre a retenção de um fluido num suporte sólido, nomeadamente:

- Tamanho das gotas (2 mm, 4 a 5 mm e 7 a 8 mm);
- Propriedades físicas do fluido (viscosidade, elasticidade e tensão superficial);
- Composição do suporte sólido (madeira de vidoeiro e polietileno);
- Tamanho do suporte;
- Humidade do suporte;
- Ângulo de impacto;
- Orientação do suporte (0° e 45° com a horizontal);
- Velocidade de queda da gota (variando a altura de lançamento de 0,6 a 13 m).

Foram usados três tipos de suporte sólido, incluindo:

- Simples cilindros (com diâmetros de 6,35 e 12,7 mm);
- Suportes constituídos por vários cilindros horizontais;
- Combustíveis reais (plantas envasadas).

A influência das propriedades dos fluidos foi analisada através da utilização de água e de várias formulações comerciais de retardantes químicos:

- Phos-chek XA;
- Fire-Trol 100;
- Fire-trol 931.

Nos ensaios foram utilizados equipamentos e técnicas diversas, entre as quais fotografia ultra-rápida, balança digital de elevada precisão e cartões de impacção. As investigações evidenciaram que a quantidade de líquido retido no combustível em termos da espessura de filme equivalente é 4 a 15 vezes superior para um retardante espessado do que para a água. Verificou-se também que as gotas de maior velocidade atingem zonas mais profundas da estrutura de suporte devido à maior quantidade de movimento no momento da impacção. Observou-se ainda que as superfícies molhadas (*e.g.* por impacto prévio de outras gotas) têm maior capacidade de retenção de líquido.

Recentemente, o CEREN realizou diversos ensaios laboratoriais, ao abrigo do projecto comunitário ACRE, de forma a estudar o efeito da adição de goma aos retardantes no aumento da quantidade de líquido retido nos combustíveis (ACRE, 1998). Este estudo foi aplicado a diversas espécies vegetais mediterrâneas e permitiu concluir pela existência de uma forte correlação entre a concentração de goma no líquido retardante e a espessura de filme. Assim, a concentração de goma, isto é, a viscoelasticidade do retardante, intervém em duas fases físicas da nuvem resultante da descarga: atomização e revestimento da vegetação.

2.5 Modelação da penetração

A modelação da deposição de retardante pode ser realizada através de CFD com base num modelo 3D da vegetação. De acordo com Calogine et al. (1998), uma das possibilidades é a utilização de fractais para definir o combustível como um sólido tridimensional como se representa na figura seguinte:

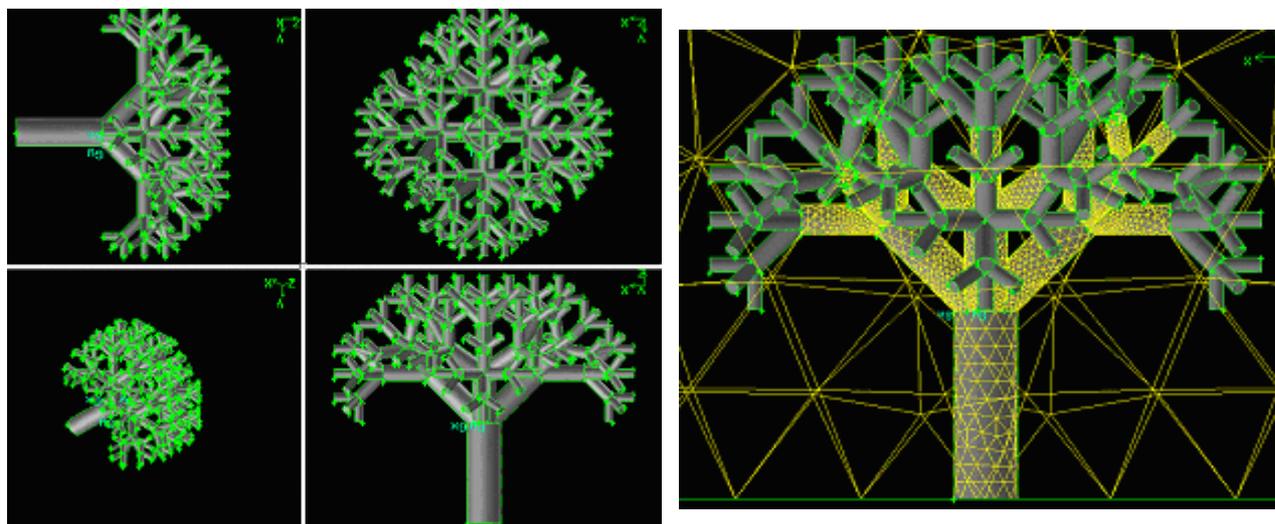


Figura 2.19 – Modelo de combustível (fractal) e respectiva malhagem para utilização num CFD.

Além da definição detalhada de uma árvore, é possível a concepção do arranjo espacial de vários tipos de combustíveis (combustíveis mortos, herbáceas, arbustos e árvores) no solo (Figura 2.20). Recentemente, Seró-Guillaume (2002) apresentou resultados de simulações que permitem determinar a quantidade de retardante depositado sobre a vegetação, considerada como um fractal.

A realidade virtual da vegetação é útil para a simulação da deposição de retardante na sua estrutura, assim como a quantidade de líquido retida. Existem diversos estudos realizados na área da hidrologia sobre a temática da intercepção da chuva pela canópis da vegetação presente. Estes trabalhos, especialmente os de Hashino et al. (2002) e de Schellekens et al. (1999), poderão ser úteis no estudo da retenção de retardante nos combustíveis. Evidentemente, existe uma diferença substancial entre a chuva e a nuvem de retardante que

se prende com as propriedades dos fluidos em causa. A viscoelasticidade dos retardantes espessados com gomas, tende a aumentar a sua retenção, comparativamente com a água.

Esta fase da nuvem de retardante não é modelada na presente tese, embora tenha sido abordada pela sua relação próxima com o trabalho desenvolvido.

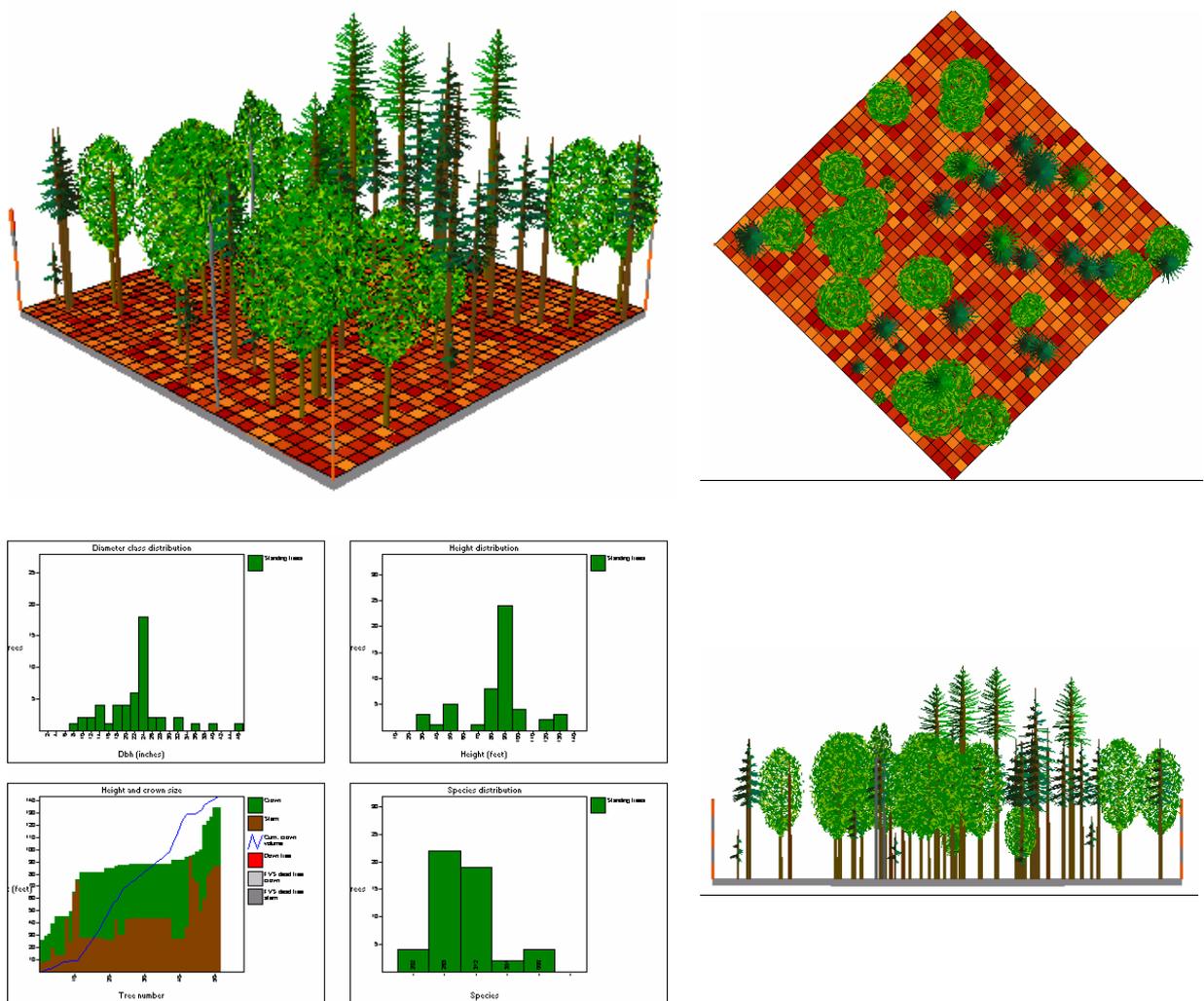


Figura 2.20 – Visualização da disposição de várias árvores e de alguns dados estatísticos da cobertura vegetal (criado com o *Stand Visualization System* (SVS), desenvolvido no USDA FS por R. J. McGaughey).

3

ENSAIOS EXPERIMENTAIS

3.1 Introdução

Com o propósito de avaliar/calibrar os modelos, efectuaram-se ensaios de largada de retardante químico à escala real em Marselha, em Junho de 2000. Este trabalho experimental foi desenvolvido no âmbito do projecto ACRE em cooperação com diversas equipas estrangeiras, lideradas pelo CEREN. A logística associada a experiências deste género, torna-as tecnicamente difíceis de planear e gerir. Acresce ainda a condicionante associada a condições meteorológicas adversas que, tal como sucedeu em Marselha devido a ventos fortes, invalidaram ou causaram adiamentos na realização de alguns ensaios. O número de experiências a concretizar é incontornavelmente dependente dos custos, sempre elevados, constituindo um factor limitativo para a realização experimental.

Em Marselha foram efectuadas 18 largadas aéreas a uma altura de voo de aproximadamente 30 m, ensaiando-se 6 níveis diferentes de viscosidade. Cada nível foi repetido três vezes, de forma a poder avaliar a representatividade e fiabilidade dos ensaios.

O produto usado foi o *Fire Trol 931*, ao qual se adicionou diferentes quantidades de goma para obter os referidos seis níveis de viscosidade. Conseguiram-se produzir soluções de retardante cuja viscosidade variou desde o não espessado, com viscosidade próxima da da água, até aos 1400 cps, no caso da solução com maior teor em goma. O avião usado foi um Turbo Firecat da *Sécutité Civile* que efectou as 18 largadas sobre o aeroporto militar de ISTRES, num espaço previamente preparado para o efeito. O avião partia do aeroporto de Marignane, onde se preparava a solução de retardante com a viscosidade desejada (Figura 3.1).



Figura 3.1 – Imagens relativas às acções no aeroporto de Marignane durante a preparação do retardante e enchimento do aerotanque.

Em cada largada o avião libertou os cerca de 3400 litros de retardante transportado. A precipitação ou nível de deposição de retardante no solo foi avaliado através de uma rede de recipientes colocados sobre uma área de 160 m por 60 m com os recipientes separados entre si de 10 e 5 m segundo as direcções longitudinal e perpendicular à trajectória do avião, respectivamente. No centro da malha, este espaçamento foi reduzido para metade, de forma a aumentar a resolução da análise da mancha de retardante no seu centro, onde existem maiores gradientes espaciais (Figura 3.2).

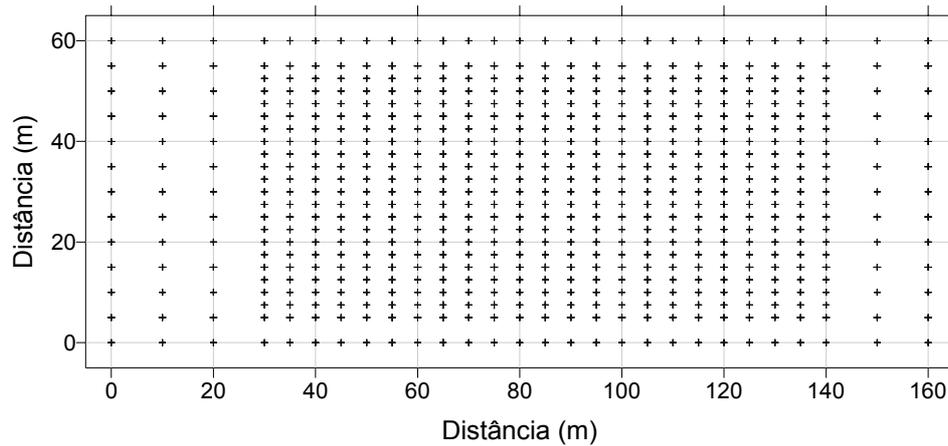


Figura 3.2 – Localização dos 1188 recipientes usados em Marselha (ACRE, 2000).

Na Figura 3.3 podem-se observar algumas imagens referentes ao processo de medição da precipitação de retardante.

Uma vez que os níveis de precipitação de retardante eram relativamente baixos, optou-se por pesar o recipiente com o seu conteúdo em retardante em vez de medir o seu volume, o que traria maiores erros. Nalguns casos, seria mesmo impossível analisar o volume de retardante, uma vez que as gotas colidem com as paredes do recipiente ficando aderentes às mesmas. Através da massa de retardante depositada em cada recipiente é possível estimar o volume, conhecida a massa volúmica do fluido:

$$v_i = \frac{m_i}{\rho} \quad \text{Equação 3.1}$$

Por sua vez, conhecidos os volumes de retardante e a área horizontal dos recipientes, é directo o cálculo da precipitação de retardante em mm (ou $l.m^{-2}$):

$$h = \frac{v_i}{A} \quad \text{Equação 3.2}$$



Figura 3.3 – Imagens relativas ao procedimento da medição da precipitação de retardante através da grelha de recipientes.

A Figura 3.4 exemplifica a deposição de retardante obtida num dos ensaios de Marselha. A maior área coberta com retardante químico corresponde a níveis entre 0,5 e 3 mm e que são os valores de cobertura usados para combater incêndios sobre um vasto leque de combustíveis.

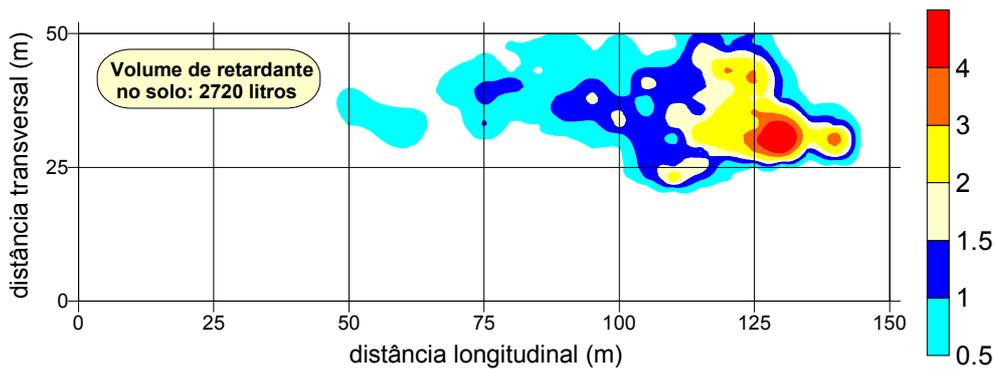


Figura 3.4 – Exemplo da deposição de retardante ao solo (Giroud, 2000).

3.2 Dados meteorológicos

Durante as largadas de retardante foram registadas a velocidade e direcção do vento, a temperatura e humidade numa única estação meteorológica portátil convencional colocada a 4 m de altura (Figura 3.5).



Figura 3.5 – Estação meteorológica usada nos ensaios.

O facto de se ter utilizado apenas uma estação está relacionado com a escala da área de estudo (local) e por existirem condições meteorológicas bastante homogéneas, as quais, por sua vez, se devem à topografia local plana e sem quaisquer obstáculos. A monitorização serviu também para cancelar largadas durante condições meteorológicas que saíssem fora dos intervalos desejados, nomeadamente velocidades superiores a 10 m.s^{-1} .

Em adição a esta avaliação meteorológica, foi realizada, durante um dos dias experimentais, uma quantificação mais fina das características do vento local. O equipamento usado, uma estação sónica colocada a 6 m de altura, permitiu a medição das três componentes vectoriais do vento com uma frequência de 10 Hz. As componentes registadas foram tratadas numericamente de forma a poder-se representar o ângulo azimutal da direcção *quasi-instantanea* do vento (Figura 3.6). Durante os cerca de 90 minutos de dados contidos na Figura 3.6, verificaram-se velocidades horizontais e verticais extremas de cerca de 5 m.s^{-1} e 2 m.s^{-1} , respectivamente. Quanto à direcção dos ventos, esta encontra-se maioritariamente no quadrante de Este. As variações de intensidade de velocidades e da direcção do vento revelam a existência de uma atmosfera ligeiramente instável.

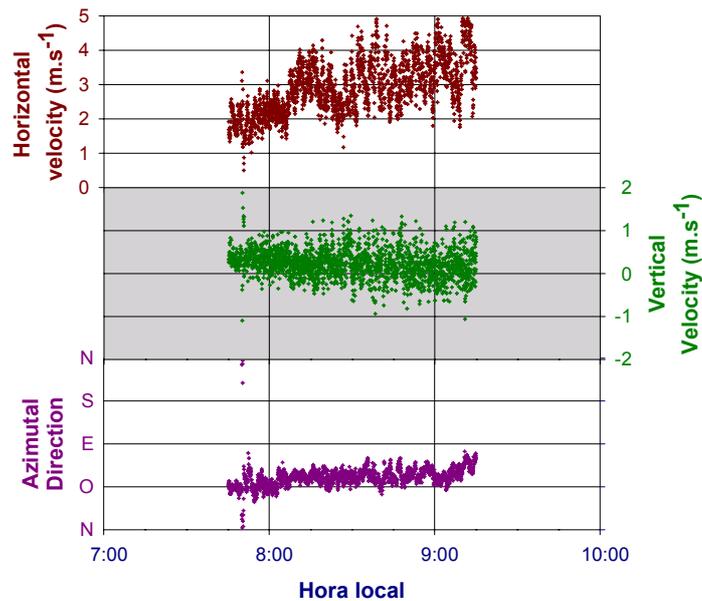


Figura 3.6 – Dados registados pela estação sónica durante o período de um ensaio.

3.3 Medição do tamanho de gotas na mancha de retardante

Durante os ensaios de Marselha, tentou-se ainda recolher dados sobre o tamanho das gotas da chuva de retardante. Para tal foram usadas duas técnicas distintas, nomeadamente a impacção sobre papel e uma técnica criogénica para recolha das gotas e a sua subsequente pesagem.

No que diz respeito à primeira técnica, foram usadas duas variantes. Uma amostragem simples das gotas (Figura 3.7) e um sistema rotativo para reduzir a possibilidade de saturação do papel na zona central da mancha, onde a precipitação é maior (Figura 3.8). O fundamento desta técnica reside na possibilidade de estabelecer uma relação entre os diâmetros da gota esférica isolada e a sua marca circular no papel aquando da sua impacção com a respectiva velocidade terminal. Para tal podem-se realizar ensaios controlados, afim de determinar esta relação. Experiências similares foram realizadas pelo USDA FS para aplicação a medições da nuvem de retardante químico (George e Johnson, 1981). Em Marselha foram usados 3 amostradores rotativos em diferentes locais centrais

da mancha de retardante e 3 impactores simples na periferia da nuvem. Esta parte experimental nem sempre foi devidamente concretizada, uma vez que, por vezes, a nuvem caía ao lado do local esperado, não atingindo assim os amostradores.

Como se pode ver na figura anterior, o papel circular, apesar do sistema rotativo, ficou saturado em alguns locais, inviabilizando a percepção de gotas isoladas essencial para a sua medição. Este facto pode-se dever a duas situações distintas: (i) uma insuficiente atomização do retardante antes de alcançar o solo (impactor rotativo), ou (ii) uma concentração muito elevada de gotas a atingir o papel. Embora não se possa fazer uma medição rigorosa do tamanho das gotas, os resultados apontam para valores que variam entre centenas de micrómetros e vários milímetros de diâmetro. Em situações pontuais verificou-se a ocorrência de “macrogotas” com alguns centímetros.

A amostragem/medição de gotas não é fácil de executar. Neste sentido, e como se disse anteriormente, foi usada paralelamente a técnica criogénica. Trata-se também de um processo simples em que se usam recipientes cheios com azoto líquido e com uma abertura superior. As gotas de retardante ao mergulharem no azoto líquido congelam, antes de atingirem a base do referido recipiente. Este rápido congelamento deve-se à baixa temperatura do azoto líquido, o que induz uma transferência de energia da gota para o nitrogénio até à solidificação do retardante. O ponto de fusão dos retardantes químicos ronda os 0 °C, uma vez que são constituídos por 80% de água. Após a solidificação das gotas procedeu-se à sua pesagem e cálculo do diâmetro. A figura seguinte apresenta algumas imagens referentes aos ensaios realizados em Marselha de acordo com esta técnica.



Figura 3.7 – Sistema simples para amostragem de gotas de retardante.



Figura 3.8 – Sistema rotativo para medição do tamanho das gotas de retardante



Figura 3.9 – Utilização de azoto líquido para amostrar gotas de retardante.

Os resultados obtidos por esta técnica revelaram a existência de uma distribuição de tamanhos de gotas que abrange sobretudo a gama milimétrica. Este método foi usado pontualmente em 2 largadas e em apenas um local da mancha de retardante químico. Assim, apesar das vantagens da técnica, o reduzido número de amostras inviabilizou um tratamento estatístico fiável para a distribuição granulométrica das gotas de retardante. O objectivo primário desta aplicação foi sobretudo o de averiguar as potencialidades/dificuldades da sua utilização no campo. Efectivamente, esta técnica mostrou-se válida, pelo que no futuro deverá ser usada de uma forma mais intensiva, até porque é relativamente económica e simples de realizar.

Uma outra técnica utilizável para a monitorização de gotas consiste na utilização de equipamento específico para o efeito designado por *distrometer*. Embora nos ensaios de Marselha não se tenham usado *distrometers*, este equipamento encontra-se descrito no Anexo I por ter constituído trabalho de pesquisa durante a preparação dos ensaios de Marselha e principalmente por ter um elevado potencial na recolha de dados em futuros testes de largadas de retardante à escala real. De resto, já se encontram previstos novos ensaios em França ao abrigo do projecto Europeu ERAS (*Extension Retardant Application System*), actualmente a decorrer.

3.4 Recolha de imagens vídeo

Durante as 19 largadas aéreas foram usadas 2 câmaras de vídeo posicionadas estrategicamente de forma a captar imagens que ajudassem a perceber melhor o comportamento da nuvem de retardante na atmosfera. Assim, uma das câmaras foi colocada em posição frontal e a segunda foi posicionada lateralmente em relação à trajectória do avião e da malha (Figura 3.10).

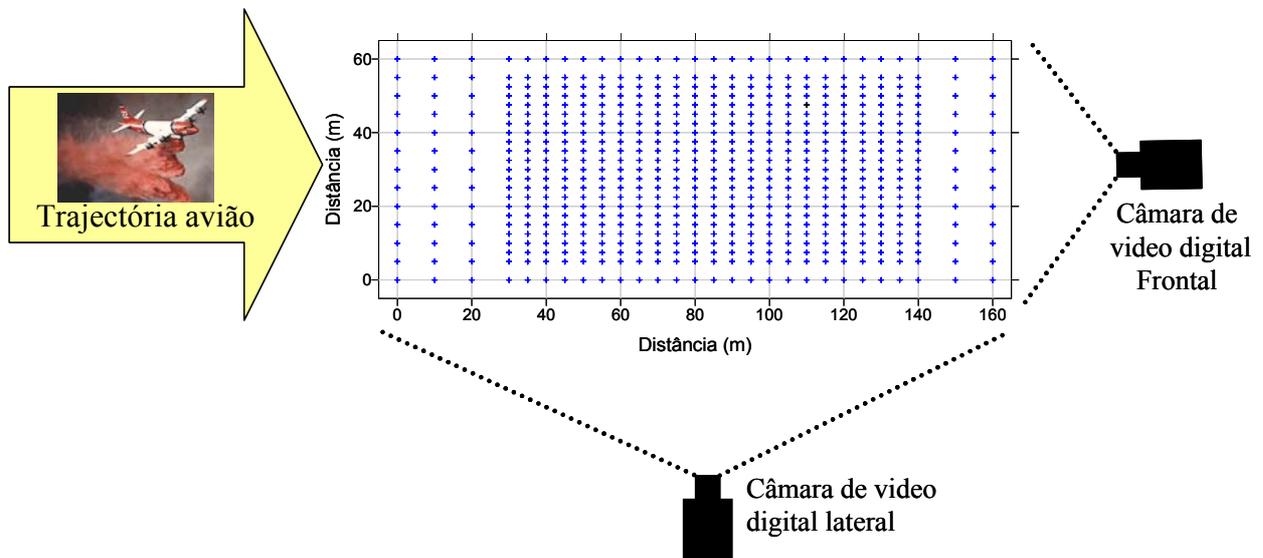


Figura 3.10 – Representação esquemática da posição das duas câmaras de vídeo.

Nas figuras seguintes é possível visualizar imagens correspondentes às vistas lateral e frontal na nuvem de retardante. Estas figuras correspondem à largada de retardante sem goma, com viscosidade próxima de 70 centipoises (ACRE, 2000). As largadas de produtos mais viscosos apresentam comportamentos distintos. O tratamento de imagens digitais referentes às vistas lateral e frontal é também uma ferramenta poderosa na aferição do modelo desenvolvido no âmbito da presente tese. Contudo, por razões de limitação de tempo, tal não foi efectuada, embora se julgue importante num trabalho futuro nesta área. Estas imagens foram usadas na comparação visual com as simulações.



Figura 3.11 – Vista frontal da nuvem de retardante ao longo do tempo.



Figura 3.12 - Vista lateral da nuvem de retardante ao longo do tempo.

3.5 Medição da precipitação de retardante ao solo

O principal objectivo das experiências realizadas em Marselha consistiu na medição do nível de precipitação de retardante no solo. O procedimento baseou-se simplesmente na medição do volume de líquido depositado em cada recipiente usado na grelha de “copos” (Figura 3.2). A tabela seguinte contém a informação relativa às 19 largadas efectuadas, nomeadamente a viscosidade do retardante, a velocidade e direcção do vento, a temperatura e humidade relativa do ar. Foram ensaiados seis níveis diferentes de viscosidade, obtidos por adição de diferentes concentrações de goma ao retardante usado (Fire Trol 931). Foi ainda executada uma largada com água para comparação da performance do retardante.

Tabela 3.1 – Parâmetros operacionais relativos às 19 largadas de retardante.

Largada n.º	Classe de viscosidade	Viscosidade dinâmica (cP)	Vento		Ar atmosférico	
			Velocidade (m.s ⁻¹)	Direcção	Temperatura (°C)	Humidade rel. (%)
Ângulo Meteor. (°)						
1	Retardante sem goma	73,1	8	nd	nd	nd
2		70,5	8	nd	nd	nd
3		73,4	2	264	23	38
4	150 – 200 cP	179	2	320	17	57
5		185	1	351	19	50
6		177	2	264	22	41
7	250 – 350 cP	246	nd	nd	nd	nd
8		346	nd	nd	nd	nd
9		260	nd	nd	nd	nd
10	400 – 450 cP	432	1	226	21	59
11		445	1	263	21	58
12		432	1	148	23	48
13	600 – 700 cP	637	7	306	19	48
14		720	7	296	19	48
15		720	4	155	24	40
16	1000 – 1400 cP	1260	4	53	21	69
17		1430	4	16	22	63
18		1060	6	1	22	58

nd = não disponível

1 centipoise (cP) = 10⁻³ N.s.m⁻² = 10⁻³ Pa.s

A mancha de retardante n.º 5 não se encontra disponível por falhas técnicas. Durante as largadas 1, 2, 3, 7, 8, 9 e 15 não foi possível registar os dados meteorológicos. De uma forma geral, os valores de velocidade do vento foram baixos durante algumas largadas e moderados nos dois dias em que se realizaram as 7 largadas relativas aos 2 níveis de viscosidade mais elevada e a descarga de água.

Nos três primeiros ensaios foi usado *Fire-Trol 931*, diluído de acordo com as especificações deste produto, sem adição de goma, obtendo-se viscosidades na casa dos setenta centipoises. Durante as duas primeiras largadas efectuadas, o vento soprou relativamente forte, com a velocidade de 8 m.s^{-1} , o que transportou a nuvem de retardante para fora da malha de copos (Figura 3.13 e Figura 3.14). A baixa viscosidade facilitou, no entanto, uma atomização mais rápida e intensa, aumentando as condições de dispersão e transporte convectivo. Assim, perdeu-se parte da informação relativa a estes 2 ensaios, existindo apenas dados completos relativos à terceira largada que foi realizada noutro dia, com vento bastante fraco (Figura 3.15).

Embora o nível de cobertura de retardante dependa das características do fogo e da vegetação, um incêndio só abranda perante níveis de $0,8$ a $3,0 \text{ l.m}^{-2}$. Neste sentido, é importante analisar o comprimento da mancha de retardante em função dos níveis de precipitação e criticar estatística ou visualmente a homogeneidade da deposição no solo, sobretudo na sua direcção longitudinal. Em suma, o retardante será tanto mais eficaz quanto maior for o comprimento da mancha, desde que esta não apresente descontinuidades passíveis de atravessamento pelo incêndio. A largada 3 originou uma mancha de retardante razoavelmente homogénea, facto que se deverá em grande medida à baixa velocidade do vento. É ainda importante reparar na grande dispersão lateral desta mancha relativamente às obtidas com níveis de viscosidade mais elevados, nas largadas posteriores.

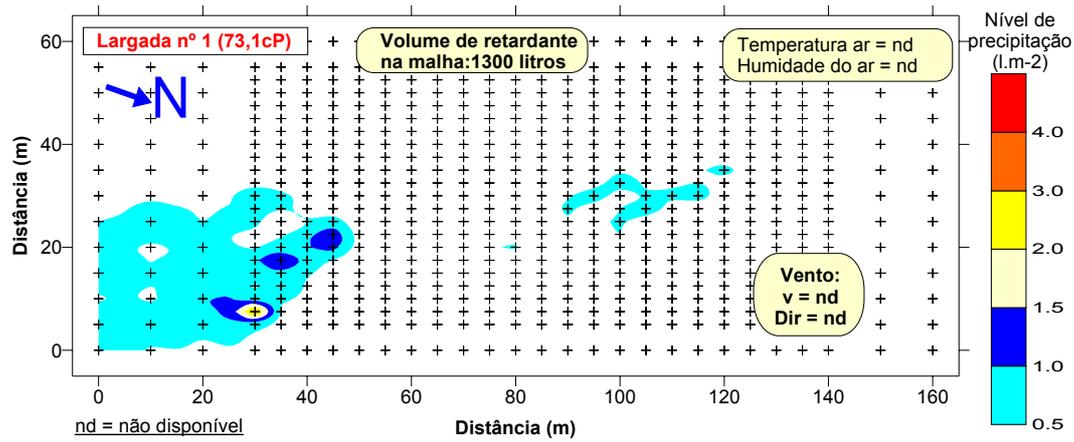


Figura 3.13 – Níveis de precipitação da mancha de retardante na largada n.º 1.

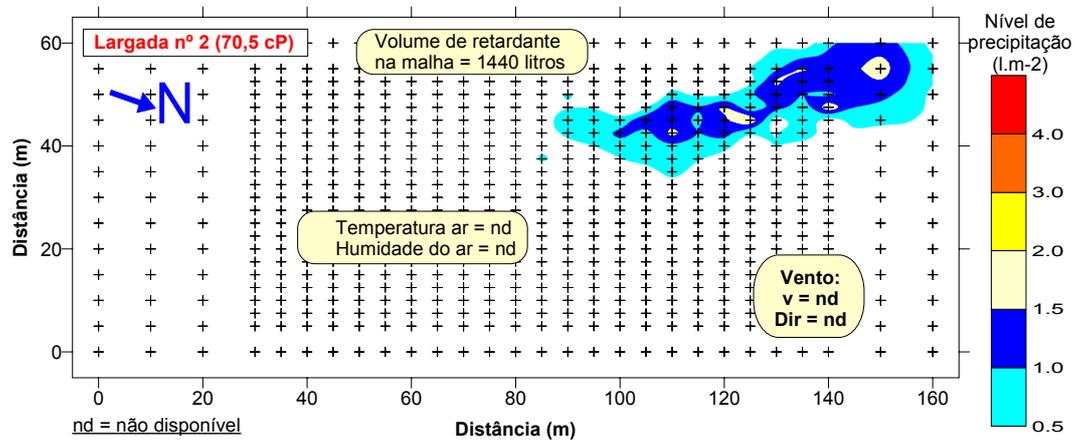


Figura 3.14 – Níveis de precipitação da mancha de retardante na largada n.º 2.

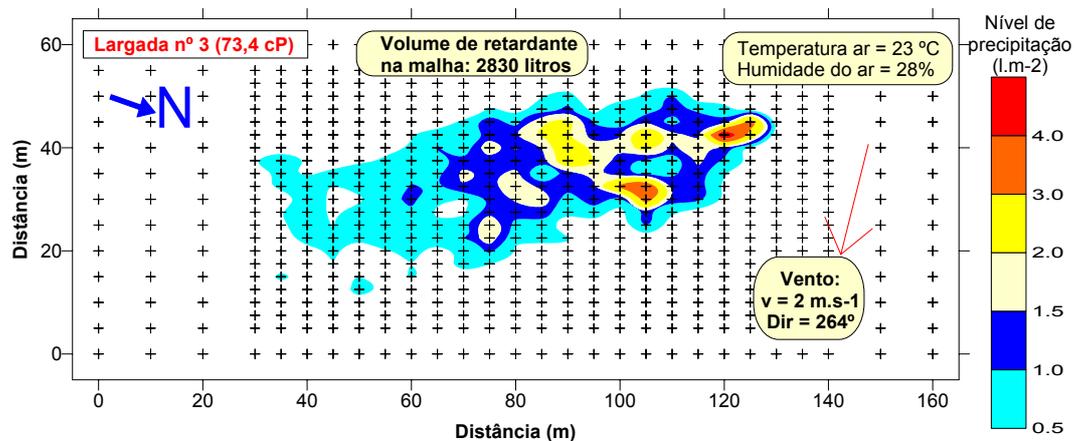


Figura 3.15 – Níveis de precipitação da mancha de retardante na largada n.º 3.

Nas largadas 4 e 6 foi adicionada goma ao Fire-Trol de forma a aumentar a viscosidade do retardante para valores na ordem dos 180 cP. Uma pequena parte da mancha da largada n.º 4 caiu fora da grelha. Contudo, pode-se constatar uma grande disparidade na forma das 3 manchas. Um facto mais surpreendente é a muito baixa taxa de recuperação de retardante na largada n.º 6 (Figura 3.17), onde se obteve apenas 1630 litros de retardante dos cerca de 3400 transportados pelo avião. De facto, não há uma explicação simples para esta perda, tanto mais que as condições atmosféricas se caracterizaram por evaporação moderada e vento fraco. O facto do vento ter sido quase perpendicular à trajectória do avião, poderá ter contribuído para o aumento da dispersão, mas não condicionaria tão intensamente a deposição. A largada 4 produziu uma mancha com uma boa continuidade, especialmente para níveis superiores a 0,5 ou mesmo 1,0 mm.

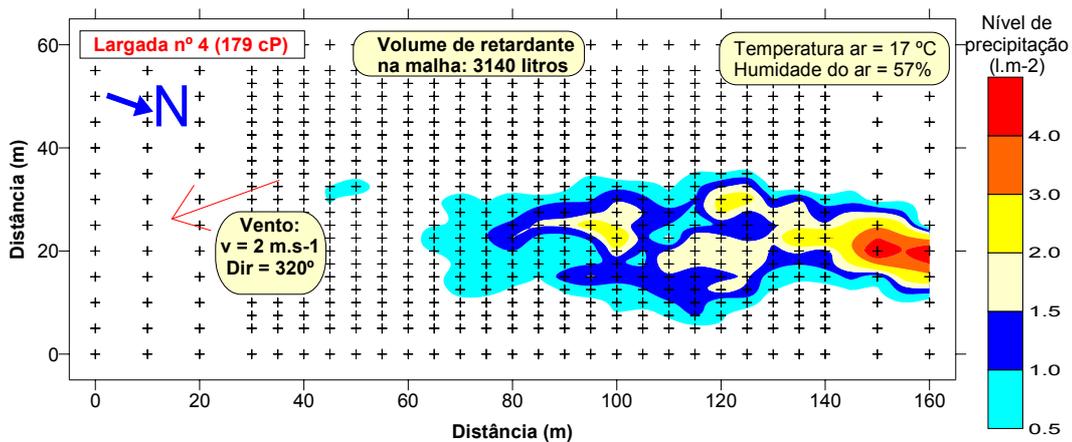


Figura 3.16 – Níveis de precipitação da mancha de retardante na largada n.º 4.

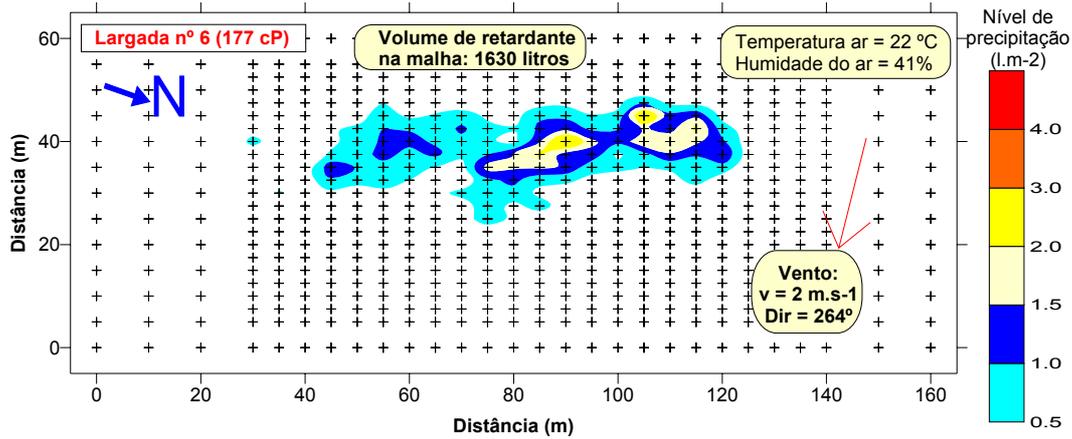


Figura 3.17 – Níveis de precipitação da mancha de retardante na largada n.º 6.

As largadas 7, 8 e 9 representadas nas Figura 3.18, Figura 3.19 e Figura 3.20 respectivamente, pertencem ao terceiro nível de viscosidade ensaiado. Nesta classe, a viscosidade variou entre cerca de 250 e 350 cP. As três manchas obtidas diferem entre si, mas, de uma forma geral, apresentam a mesma dispersão transversal e longitudinal. A homogeneidade longitudinal é fraca nestas 3 manchas, especialmente para níveis de cobertura acima dos 1,5 mm.

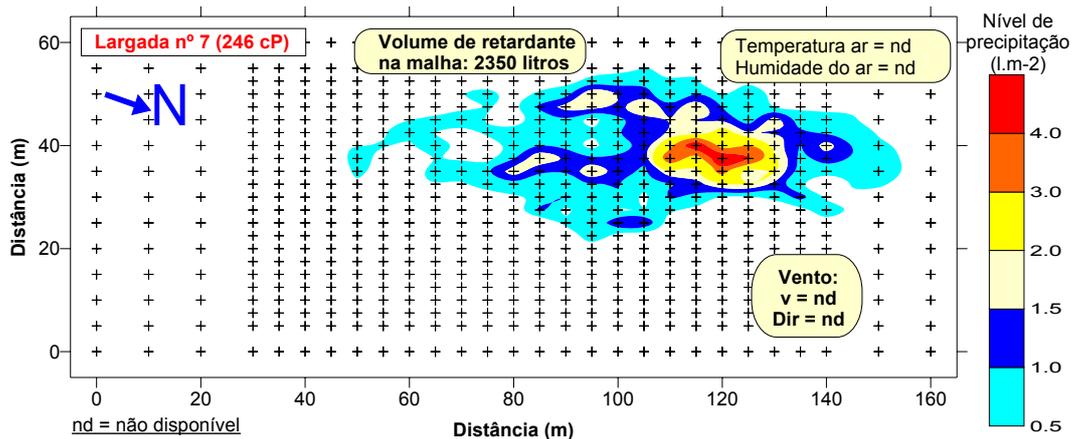


Figura 3.18 – Níveis de precipitação da mancha de retardante na largada n.º 7.

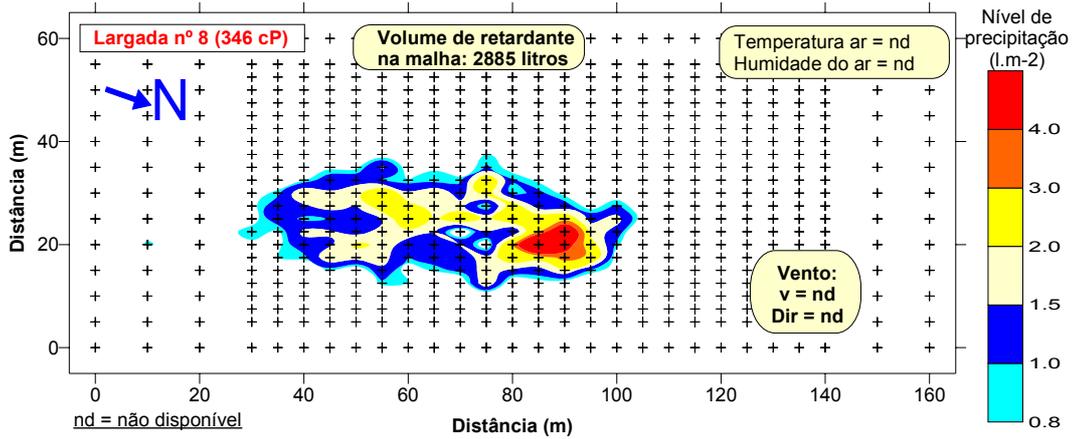


Figura 3.19 – Níveis de precipitação da mancha de retardante na largada n.º 8.

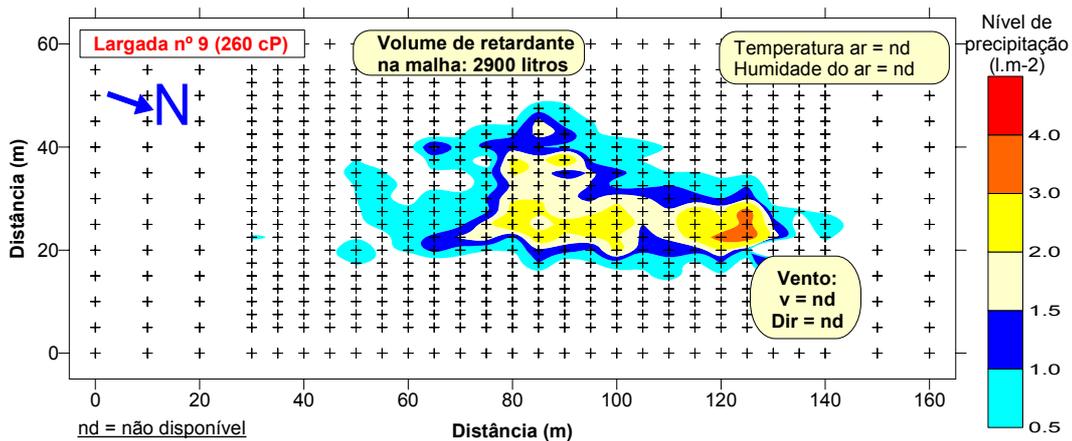


Figura 3.20 – Níveis de precipitação da mancha de retardante na largada n.º 9.

Com a quarta gama de viscosidade foram efectuadas as largadas 10, 11 e 12 (Figura 3.21, Figura 3.22 e Figura 3.23). Verificou-se uma menor dispersão transversal comparativamente às largadas das classes anteriores, originando uma mancha mais estreita e concentrada, atingindo níveis acima dos 4 l.m⁻².

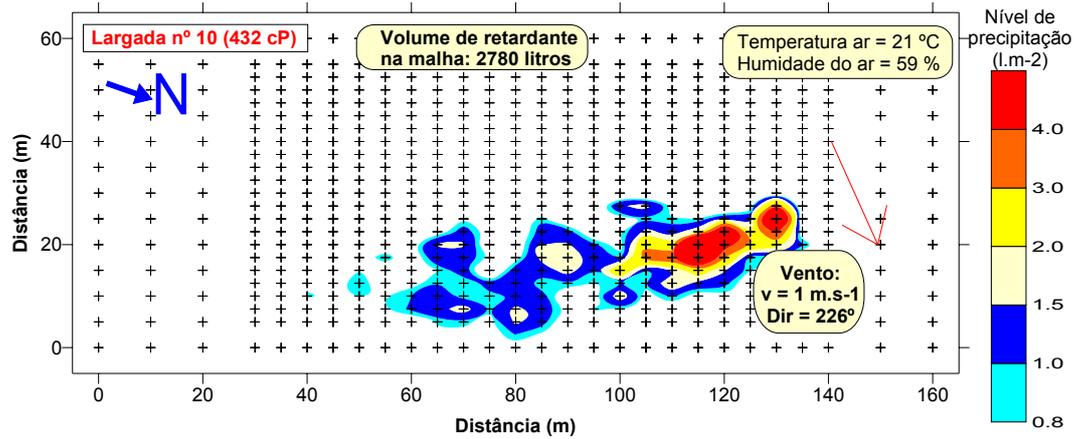


Figura 3.21 – Níveis de precipitação da mancha de retardante na largada n.º 10.

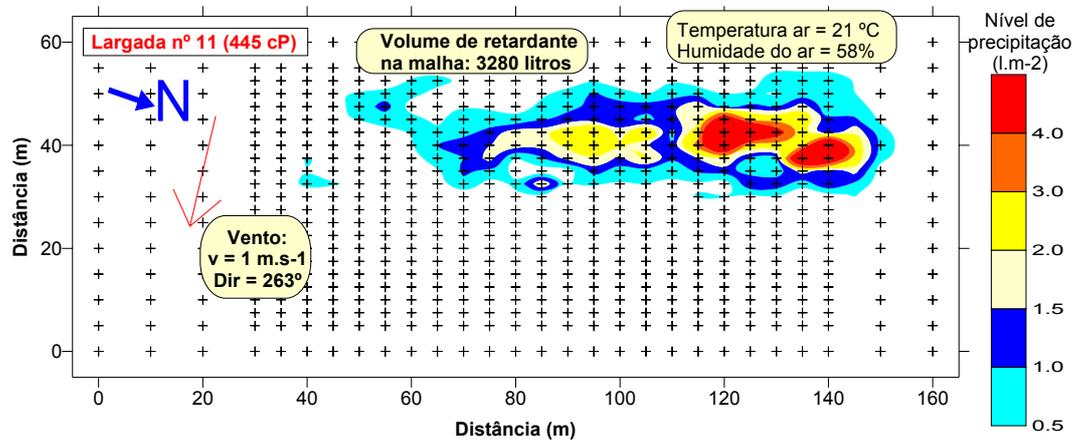


Figura 3.22 – Níveis de precipitação da mancha de retardante na largada n.º 11.

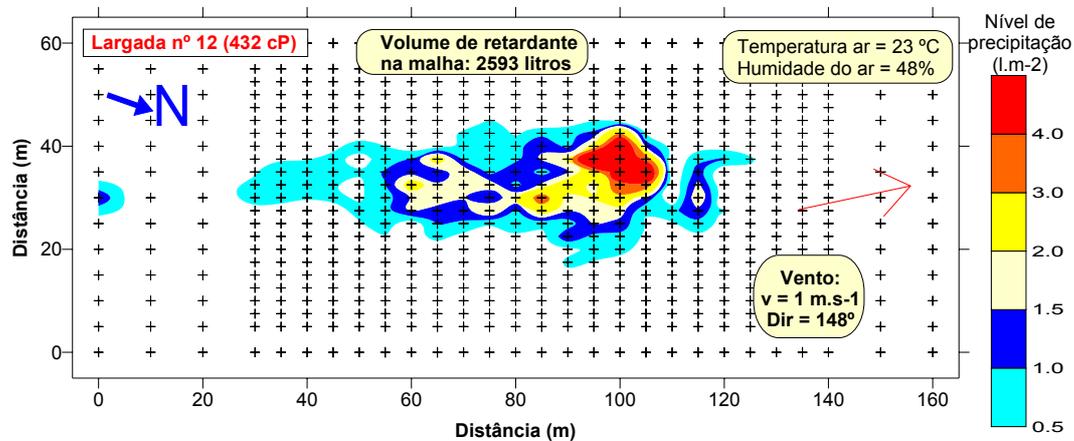


Figura 3.23 – Níveis de precipitação da mancha de retardante na largada n.º 12.

Nas largadas 13, 14 e 15, relativas à quinta gama de viscosidade, verificou-se uma fraca continuidade da mancha de retardante, especialmente no que toca à direcção longitudinal e a níveis de precipitação acima de 1,0 mm.

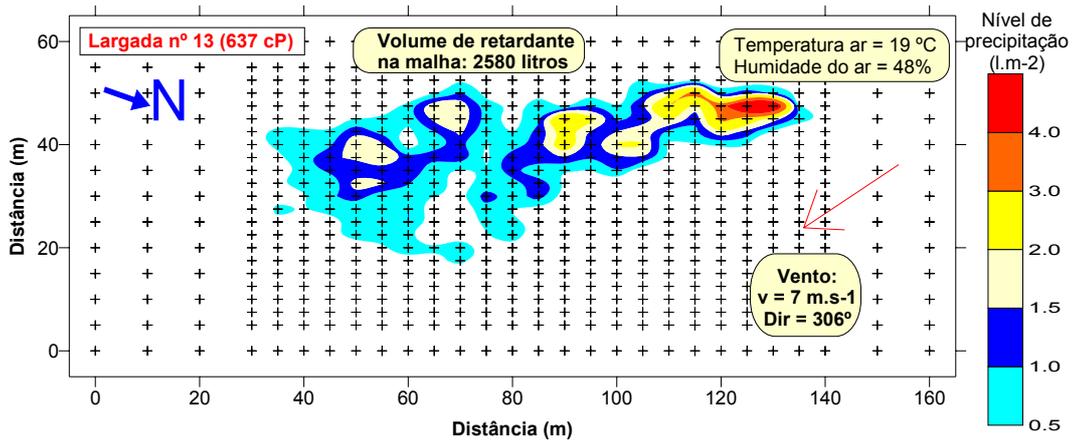


Figura 3.24 – Níveis de precipitação da mancha de retardante na largada n.º 13.

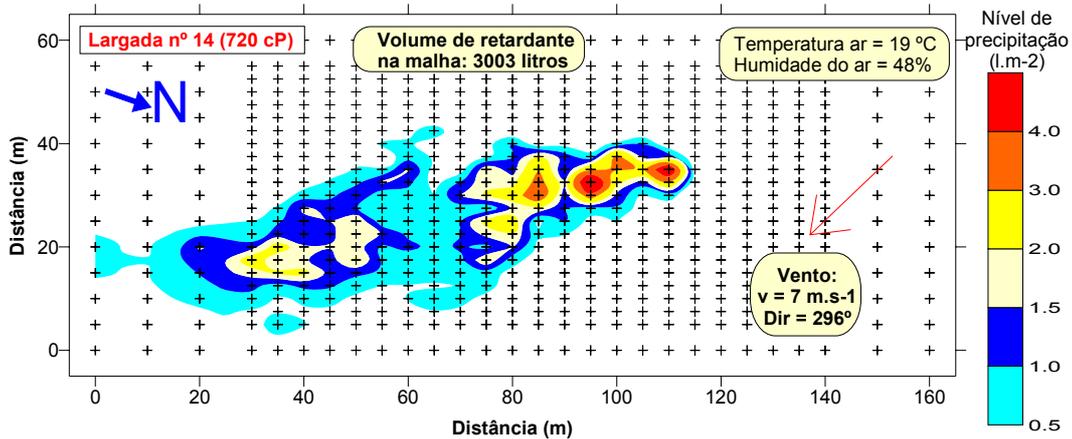


Figura 3.25 – Níveis de precipitação da mancha de retardante na largada n.º 14.

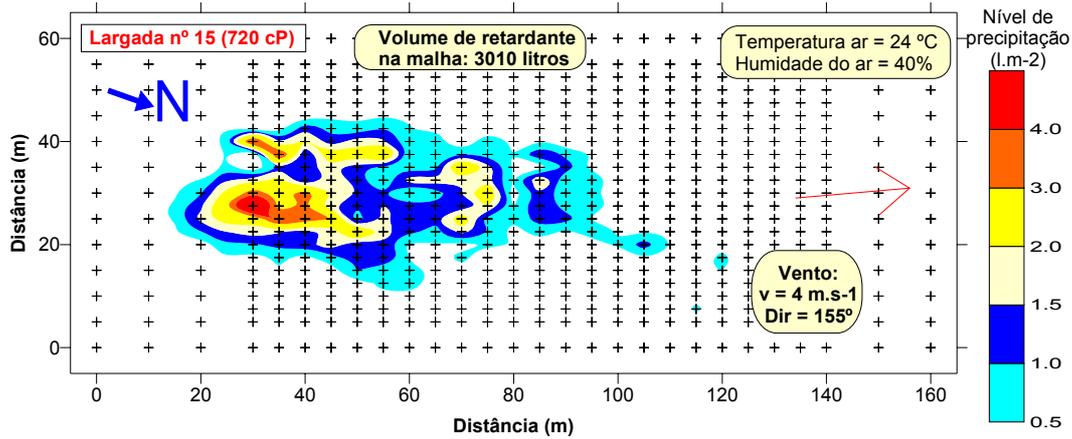


Figura 3.26 – Níveis de precipitação da mancha de retardante na largada n.º 15.

As largadas 16, 17 e 18 correspondem à sexta gama de viscosidades, tendo-se observado uma certa disparidade entre as 3 manchas, provavelmente por motivos eólicos. Torna-se assim algo difícil concluir quanto ao verdadeiro efeito do aumento da viscosidade acima dos 1000 centipoises. Verificou-se ainda uma ampliação da dispersão lateral do retardante, o que contraria o espectável. O único factor que permitirá justificar este comportamento é o aumento da velocidade da componente transversal do vento.

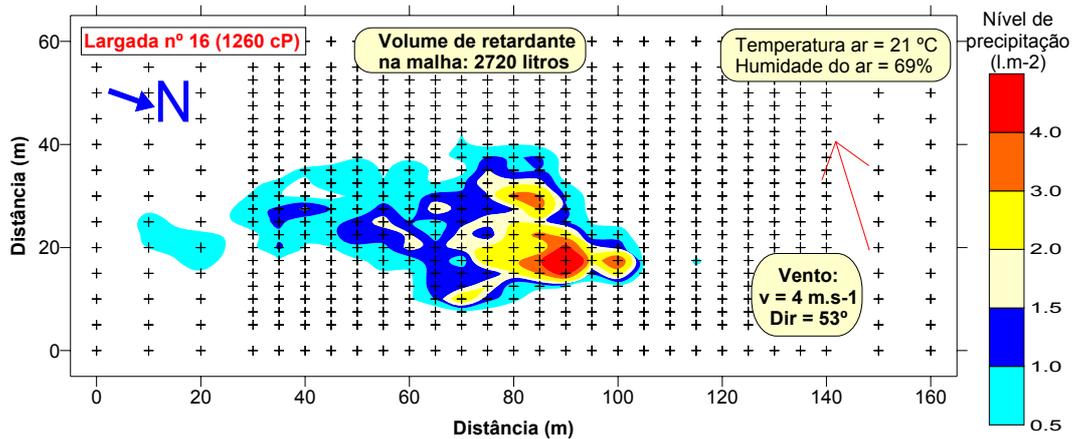


Figura 3.27 – Níveis de precipitação da mancha de retardante na largada n.º 16.

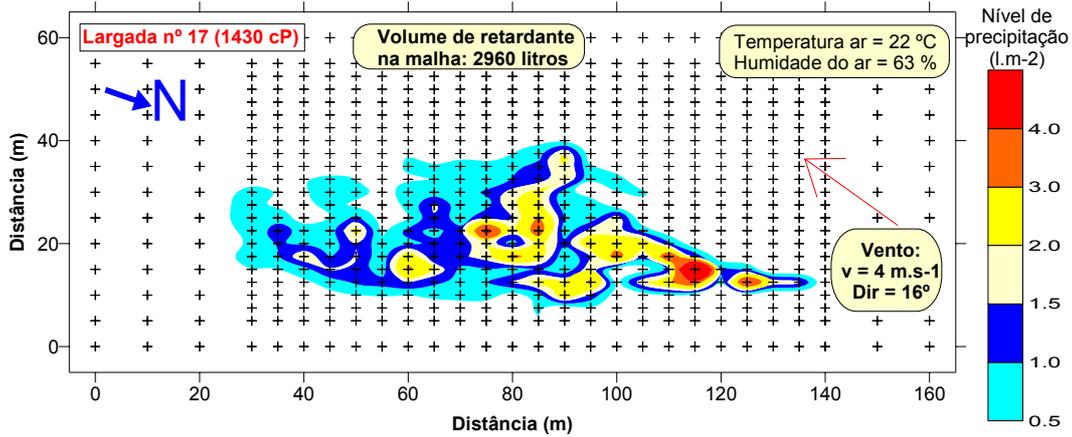


Figura 3.28 – Níveis de precipitação da mancha de retardante na largada n.º 17.

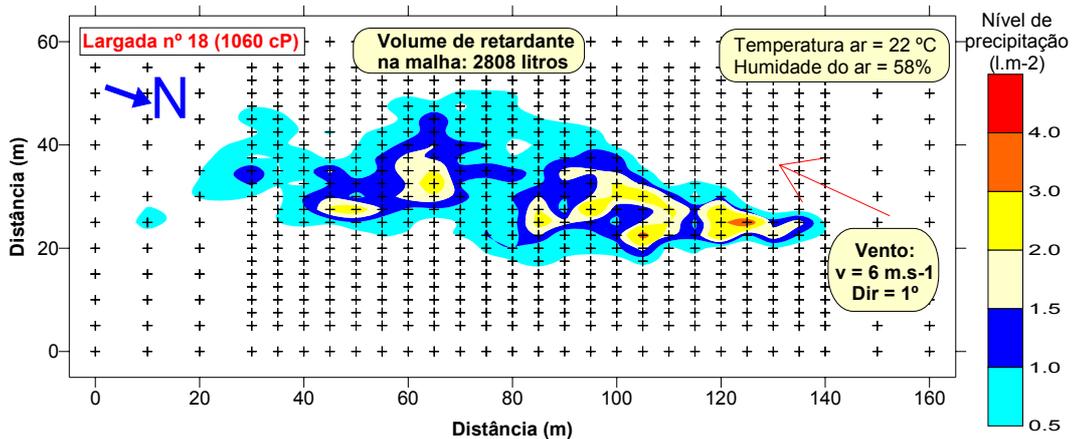


Figura 3.29 – Níveis de precipitação da mancha de retardante na largada n.º 18.

De uma forma geral, pode-se constatar que as três largadas de cada nível de viscosidade não são verdadeiras réplicas experimentais, mas sim aproximações. Isto deve-se ao facto de as condições meteorológicas não serem parâmetros controláveis e diferirem em cada ensaio. A variabilidade observada entre ensaios do mesmo grupo quer na viscosidade, quer no caudal de retardante, poderão igualmente ter contribuído para as diferenças constatadas. O sistema mecânico de abertura das comportas do aerotanque pode atrasar ou acelerar a abertura do depósito em alguns décimos de segundo, o suficiente para originar a emissão de um caudal ligeiramente diferente, com as consequentes alterações no processo de atomização e de dispersão. Ainda que as pequenas discrepâncias entre os factores físicos

de cada grupo de 3 largadas pareça não explicar a divergência de algumas manchas, devemos-nos lembrar que a influência destes factores poderá ser superior à soma aritmética das influências, uma vez que existem fenómenos e parâmetros operacionais que são mutuamente influentes, sendo possíveis sinergias consideráveis.

Os resultados aqui apresentados são usados no capítulo 5 para comparação com as simulações efectuadas.

4

MODELAÇÃO

4.1 Modelos existentes

A parte inicial do trabalho de investigação consistiu na pesquisa bibliográfica e simultaneamente na procura de modelos numéricos com potencialidades na aplicação à modelação da nuvem de retardante. Rapidamente foi possível constatar e confirmar que o escasso trabalho realizado para o estudo e modelação da nuvem se limitava ao esforço efectuado pelo USDA FS na década de setenta. O trabalho desta instituição foi compilado, dando origem ao modelo semi-empírico PATSIM - PATtern SIMulation (George e Johnson, 1990). Esta ferramenta possui a vantagem de ter sido desenvolvida especificamente para a simulação da nuvem de retardante, mas possui limitações à extensão de novos módulos e de utilização de variáveis importantes, como a intensidade e direcção do vento. Desta forma, continuou-se a procura de outros modelos que, de alguma forma, pudessem ser uma mais valia para a modelação da nuvem. Encontrou-se na aplicação aérea de pesticidas algumas semelhanças com os fenómenos existentes durante a queda do retardante químico, nomeadamente a existência de gotas que sedimentam na atmosfera, a evaporação e a penetração/deposição do material líquido sobre a canópia das árvores. Os dois modelos mais usados na área dos pesticidas são o FSCBG (Teske et al.,

1996) e o PBKW (Picot e Kristmanson, 1997). Uma abordagem a estes utensílios de modelação constitui parte do corpo deste capítulo. Por último, descreve-se o FLUENT que difere dos outros 3 modelos, por se tratar de uma ferramenta comercial e por ser um CFD geral ou *multi-purpose*. A descrição de qualquer um destes modelos será reduzida ao essencialmente relevante, indicando-se sempre a documentação de base de cada uma das ferramentas numéricas.

4.1.1 PKWB - Picot Kristmanson Basak-Brown Wallace model

O modelo *Picot Kristmanson Basak-Brown Wallace* (Picot e Kristmanson, 1997) simula o comportamento dos pesticidas aplicados com meios aéreos (aviões ou helicópteros) sobre terrenos agrícolas ou florestas no controlo de pragas e doenças. Desenvolvido na Universidade de New Brunswick, em Fredericton, Canada, o modelo consegue calcular a trajectória das gotas desde a sua emissão em linha até atingirem a canópia da vegetação ou o solo. Incorpora também um módulo de deposição para cálculo da interacção entre as gotas e a estrutura tridimensional da canópia (Figura 4.1).

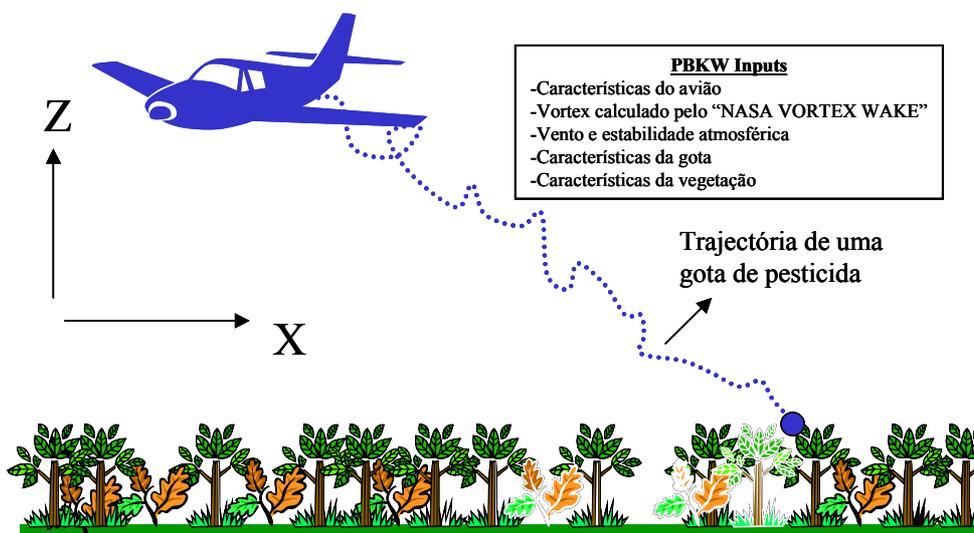


Figura 4.1 – Aplicação do modelo PBKW (adaptado de Picot e Kristmanson, 1997).

A trajectória das gotas é obtida com base na aproximação simples *one way*, o que confere ao modelo uma leveza elevada face a um qualquer PC actual. O arquétipo considera, por aproximação, que a trajectória das gotas é influenciada, mas não interfere no escoamento atmosférico. A simplificação é correcta, uma vez que a aplicação de pesticidas corresponde à emissão de uma pequena quantidade de massa discreta (gotas) por volume de fase contínua (ar atmosférico). Assim, esta aproximação reduz substancialmente o cálculo numérico, sem perda de rigor científico. Para o cálculo do escoamento atmosférico é usada uma aproximação euleriana, utilizando o código *NASA VORTEX WAKE*, que embora não seja um CFD, permite o cálculo da esteira do avião em termos de escoamento médio e turbulência. Este módulo permite simular o escoamento perturbado usando dados como a velocidade e direcção do vento, estabilidade atmosférica, características do avião e velocidade deste último. Posteriormente, gotas de diferentes tamanhos, sujeitas à acção da gravidade, são deslocadas e dispersas numericamente neste escoamento atmosférico transiente. Durante a sua trajectória, cada gota pode trocar massa com o ar circundante (evaporação) com uma intensidade directamente proporcional à temperatura do ar e inversamente proporcional à humidade atmosférica.

4.1.2 Forest Service Cramer Barry Grim model

O modelo *Forest Service Cramer Barry Grim* (FSCBG) é, à semelhança do PKBW, usado na modelação da aplicação aérea de pesticidas. Trata-se de um modelo gaussiano de fonte em linha, desenvolvido sobretudo nas duas últimas décadas no USDA FS, em cooperação com o *US Army*. Esta ferramenta modela a dispersão e deposição das gotas de pesticida, utilizando dados meteorológicos. O FSCBG tem sido extensamente testado e validado através de dados obtidos em campanhas experimentais realizadas para o efeito. Uma vasta análise de sensibilidade paramétrica aos *inputs* encontra-se descrita em Teske et al. (1996). O *FSCBG User Group* e o *National Spray Model Advisory Committee* constituem entidades responsáveis pela apresentação de recomendações relativas a possíveis actividades e estratégias de desenvolvimento e avaliação do modelo. Este último apresenta algumas vantagens relativamente ao PBKW, nomeadamente: (i) a possibilidade

de usar vento não perpendicular à trajectória do avião e (ii) a simulação da deposição de pesticida a longa distância (km ou dezenas de km) para estudo do impacte ambiental. Recentemente, o modelo foi alterado passando a designar-se AgDisp (*Agriculture Dispersion*).

4.1.3 PATSIM PATtern SIMulation

O modelo *PATtern SIMulation* (PATSIM) foi desenvolvido na década de setenta no laboratório do USDA FS em Missoula, Montana, com o objectivo de compreender e subsequentemente permitir melhorar o desempenho da aplicação aérea de retardantes. Trata-se de um modelo semi-empírico, baseado em centenas de largadas aéreas realizadas à escala real e no campo. Uma das limitações do modelo prende-se com a ausência de um módulo de penetração/deposição/percolação do retardante sobre a estrutura tridimensional da vegetação. No entanto, é bastante valioso, uma vez que simula a precipitação de retardante ao nível do solo em galões por 100 pés quadrados (gpf), ou seja, 0,41 l.m².

George e Johnson (1990) descrevem a estrutura do modelo e apresentam o seu código fonte de programação em turbo Basic. As principais limitações desta ferramenta são: (i) não tem em conta nem a velocidade, nem a direcção do vento; (ii) impossibilidade de utilização para condições diferentes das usadas no seu desenvolvimento empírico; (iii) considera apenas as propriedades físicas do fluido através de duas classes discretas (retardantes espessados com gomas ou *water-like*); (iv) não possui qualquer módulo sobre penetração; e (v) não tem em conta a humidade relativa ou temperatura atmosféricas. Apesar de todas as limitações aqui apresentadas, o modelo PATSIM é uma ferramenta útil na definição de guias operacionais relativas à aplicação de retardante a partir de plataformas aéreas. A figura seguinte pretende ilustrar o PATSIM enquanto modelo conceptual. O cálculo é iniciado pela divisão do volume de retardante em “pacotes” libertados em intervalos temporais de 0,02 segundos. Cada um destes pequenos volumes segue uma trajectória de projectil simples e simultaneamente é sujeito a erosão de acordo com uma equação empírica analisada mais abaixo.

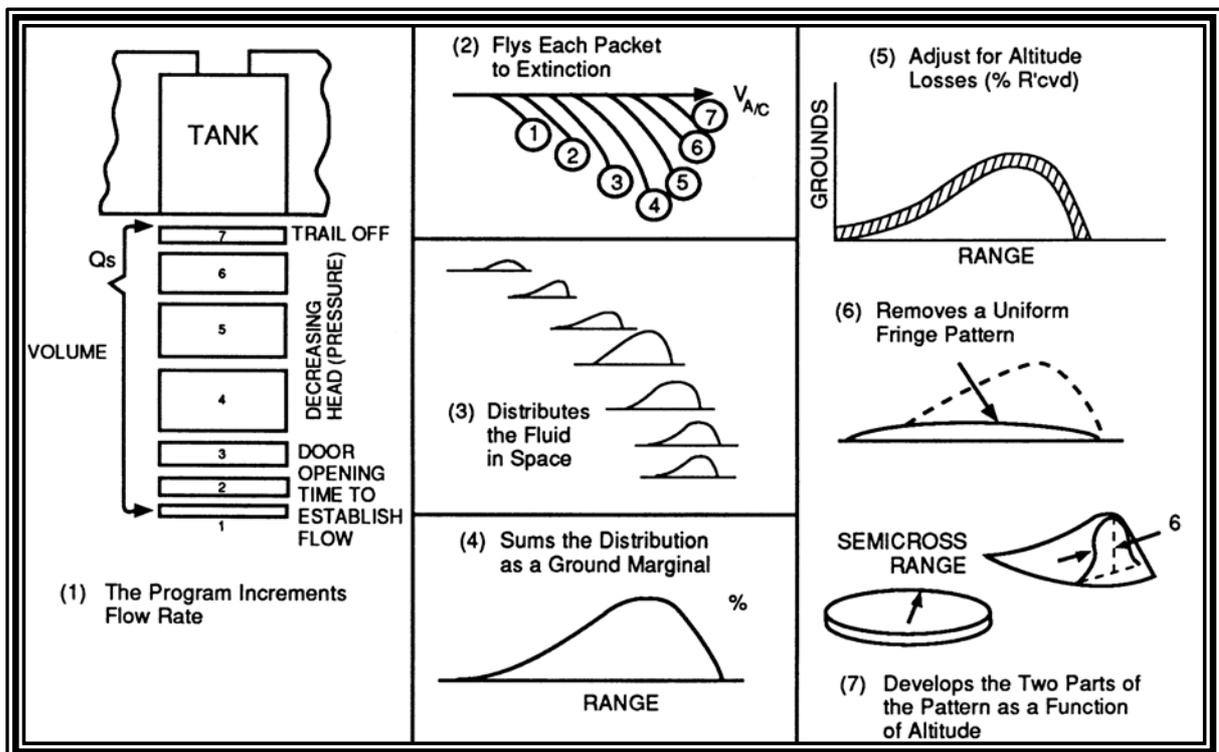


Figura 4.2 – Representação esquemática do modelo PATSIM (Swanson et al., 1975).

Um exemplo da aplicação do PATSIM é apresentado de seguida. Trata-se do avião P2V-5, equipado com um aerotanque *Rosenbalm* com capacidade para 9278 litros. A geometria do tanque é apresentada na figura seguinte, onde se pode constatar a existência de 6 compartimentos independentes. Os dois reservatórios laterais têm capacidades individuais de 1673 litros. Os quatro reservatórios interiores possuem capacidade para 1483 litros cada. Na Figura 4.4 podem observar-se os diferentes níveis de retardante, simulados com o modelo PATSIM, para a abertura em simultâneo dos dois reservatórios interiores do aerotanque *Rosenblam*. As duas imagens correspondem às vistas frontal e lateral dos níveis de retardante obtidos com diferentes alturas de largada. Como seria de esperar, alturas superiores correspondem a uma maior mancha, mas com menores concentrações de retardante.

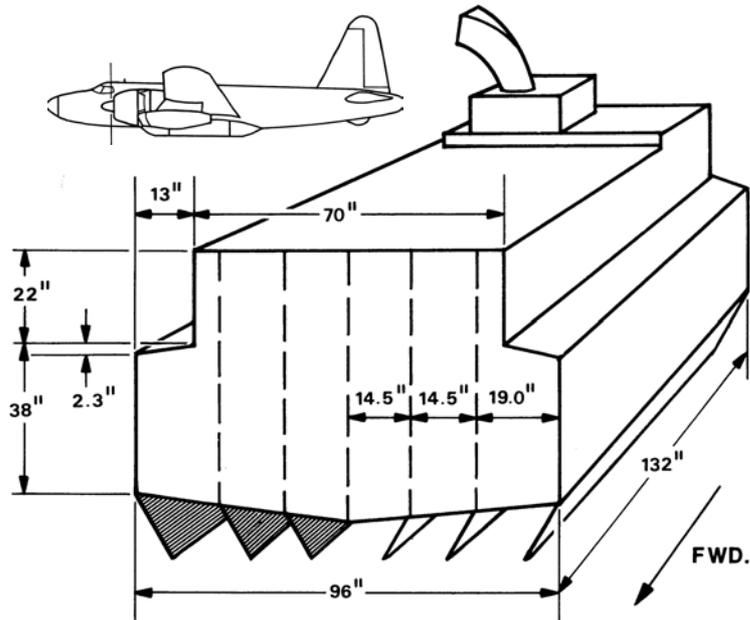


Figura 4.3 – Geometria do aerotanque *Rosenblam*. (George e Johnson, 1990).

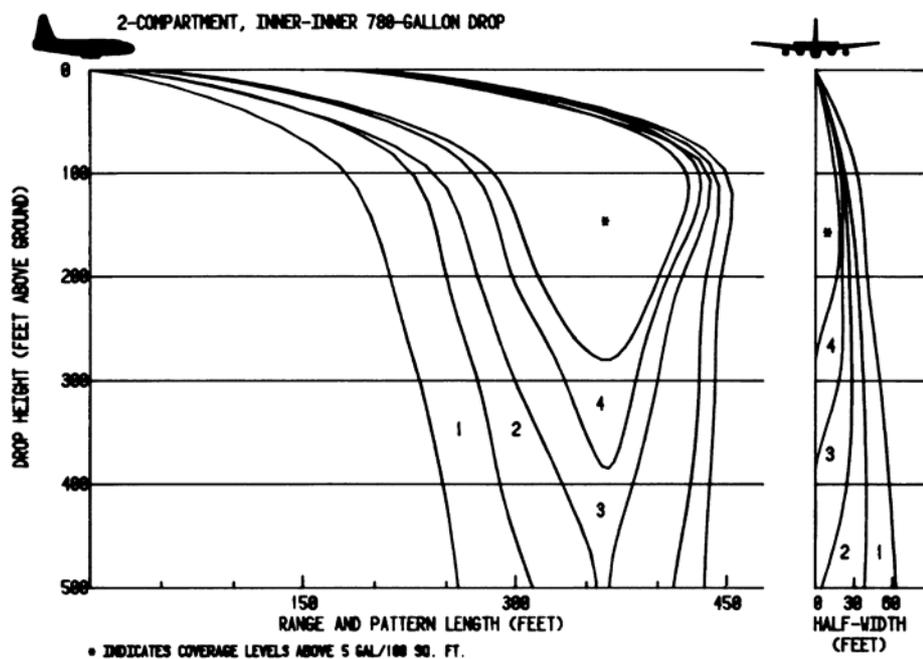


Figura 4.4 – Níveis de cobertura de retardante em função da altitude do avião. Simulado com o modelo PATSIM para a abertura em simultâneo dos dois reservatórios interiores do aerotanque *Rosenblam*. (George e Johnson, 1990).

Mais detalhes sobre o modelo PATSIM podem ser encontrados em diversas publicações internas do USDA FS, nomeadamente George (1975), Swanson et al. (1975), Swanson et al. (1976), Swanson et al. (1978), George e Johnson (1981), Blakely et al. (1982) e George e Johnson (1990).

4.1.4 FLUENT

Distinto dos outros 3 modelos descritos anteriormente, o FLUENT é um modelo de dinâmica de fluidos baseado na discretização do domínio de cálculo em células numéricas. Este software, desenvolvido e comercializado pela FLUENT Inc.[®] (www.fluent.com), permite a utilização de malhas estruturada e não estruturada através do seu pré-processador Gambit (FLUENT Inc., 2001b). O FLUENT possui vários modelos de turbulência (*e.g.* $k-\varepsilon$, $k-w$, RNS,...) e permite a simulação de diversos fenómenos físicos, tais como a convecção, radiação, evaporação, reacções químicas, etc. (FLUENT Inc., 2001a). Tem ainda uma interface amigável e várias funcionalidades úteis ao utilizador como sejam: 1) pós-processamento e visualização dos resultados, 2) exportação dos ficheiros 3D para diferentes softwares específicos de visualização e 3) refinamento da malha nos locais mais críticos e simultaneamente de maiores gradientes. Este último aspecto é conseguido através da escolha do gradiente máximo desejado para qualquer variável escalar em uso na modelação, o que permite uma diminuição significativa do número de células de cálculo, uma vez que só se utiliza a malha fina onde é efectivamente necessária. Outra característica funcional é o leque alargado de condições fronteira possíveis (*e.g.* simetria, entrada mássica, velocidade de entrada e saída com pressão). Pode ainda considerar-se que é um software não limitado, visto que possibilita a programação de macros e subrotinas (*User Defined Functions*, UDF). As subrotinas ou funções definidas pelo utilizador são escritas em linguagem de programação C, podendo ser compiladas com o FLUENT para uma maior performance de cálculo.

4.1.5 Breve comparação dos 4 modelos descritos

Dos 4 modelos referidos, o FLUENT é o que apresenta menos similitudes, por ser o único software comercial com código de programação não público e por ser um verdadeiro CFD (*Computational Fluid Dynamics*). Efectivamente, o FSCBG, o PATSIM e o PBKW são modelos públicos e gratuitos. Exceptuando o PATSIM, em Tbasic, o código fonte de programação em *Fortran* destas 3 ferramentas é acessível mediante pedido aos seus autores.

O FSCBG e o PBKW são modelos com bastantes semelhanças, uma vez que a aplicação directa destes é comum. Ambos são usados na modelação da aplicação aérea de pesticidas. Contudo, o modelo FSCBG apresenta mais funcionalidades, sendo mais vulgarizado do que o PBKW. Por exemplo, o PBKW apenas pode ser aplicado a simulações em que o ângulo entre a direcção do avião e a velocidade do vento é ortogonal ou paralelo, o que restringe a sua utilização. Já no FSCBG, este ângulo pode tomar qualquer valor entre 0° e 360°.

O modelo PATSIM é, dos quatro, o único desenhado para uma aplicação à modelação da nuvem de retardante. Contudo, as suas capacidades são limitadas. A formulação semi-empírica impede a sua aplicação aos novos tanques aéreos com controlo do caudal de retardante, uma vez que os ensaios que lhe serviram de base foram realizados na década de setenta com aviões diferentes. Entre as principais limitações desta ferramenta destacam-se ainda a impossibilidade de utilizar ou ter em conta parâmetros importantes, como sejam as condições meteorológicas (velocidade e direcção do vento, estabilidade atmosférica, temperatura e humidade do ar) e as propriedades físicas do retardante (viscosidade, tensão superficial e elasticidade), e a ausência de um módulo para a deposição sobre combustíveis.

Note-se que o PATSIM foi desenvolvido na década de setenta, pelo que o próprio programa apresenta limitações impostas pelo *hardware* de então. Hoje em dia, o poder de cálculo numérico aumentou significativamente, em paralelo com os CFDs, possibilitando uma análise física da nuvem mais detalhada. Constata-se, porém, que o *hardware* ainda

limita a resolução espacial e temporal usada na simulação com este CFD. Não obstante, realizaram-se simulações com um detalhe ajustado aos fenómenos físicos principais associados à queda na nuvem de retardante.

Em síntese, nenhum dos quatro modelos é por si só completo ou ideal para a aplicação ao problema em causa. Assim, desenvolveu-se um código numérico em *Fortran*, designado por RAM (*Retardant Application Model*) que integra alguns módulos adaptados do PATSIM e do FSCBG.

A estratégia definida para a modelação da nuvem de retardante baseou-se em dois pilares principais:

- o desenvolvimento do RAM;
- a utilização do FLUENT.

A comparação entre simulações e resultados empíricos obtidos em Marselha e dados da década de setenta produzidos pelo USDA FS permitem avaliar o desempenho da modelação efectuada.

4.2 Modelos utilizados

De forma a compreender a dinâmica associada à aplicação de retardante químico, desenvolveu-se o modelo RAM, integrando as três fases físicas intervenientes na nuvem: (i) atomização, (ii) sedimentação e dispersão atmosférica e (iii) deposição. Este trabalho, desenvolvido na Universidade de Aveiro, nasceu da parceria com outras equipas europeias no âmbito do projecto Europeu de investigação ACRE (*Additifs Chimiques Rheologie Evaluation*). A equipa de Aveiro desenvolveu os módulos relativos às fases de sedimentação e dispersão atmosférica e de deposição sobre uma superfície plana sem vegetação, uma vez que os restantes módulos ficaram a cargo de outros grupos. O modelo RAM foi desenhado por forma a possibilitar facilmente a inclusão do módulo de atomização do retardante. Dificuldades no desenvolvimento e integração do módulo de

atomização levaram à adopção do módulo semi-empírico de atomização existente no modelo PATSIM no RAM.

A nuvem de retardante é simulado com o RAM, modelo mais simples, e com o FLUENT, modelo CFD mais completo. O FLUENT apresenta diversas capacidades como sejam a sua interface amigável para pré e pós-processamentos e malhas estruturada e não estruturada. Possibilita ainda a utilização de diversos módulos de uma forma acoplada, interactiva e inteligente para uma melhor refinação temporal e espacial (FLUENT Inc., 2003). O facto de ser um modelo amplamente usado para estudar fenómenos de engenharia, confere à sua validação um grau de confiança suplementar. O RAM, por ser mais leve em termos computacionais, permite a realização de um número mais elevado de simulações com diversas combinações de parâmetros operacionais. Contudo, é importante aferir previamente a qualidade das simulações do RAM. Este trabalho é efectuado por comparação com valores experimentais obtidos em Marselha, mas também por confronto com as simulações realizadas pelo FLUENT. Todavia, é importante ter em conta que as simulações do FLUENT justificam igualmente uma análise crítica e cuidadosa face aos resultados experimentais.

4.2.1 RAM

O RAM é um modelo lagrangeano 4-D que utiliza um campo de ventos com perfil de potência, o qual não requer qualquer malha de cálculo. O corpo principal deste modelo corresponde ao módulo lagrangeano que permite calcular a trajectória das diversas gotas de retardante constituintes da nuvem. Este módulo possui uma aproximação *one way*, semelhante ao FSCBG. O RAM incorpora, a montante, o módulo de atomização do modelo PATSIM, o qual fornece as condições iniciais para o módulo lagrangeano. Na figura seguinte é possível ver uma representação esquemática sobre a constituição do RAM.

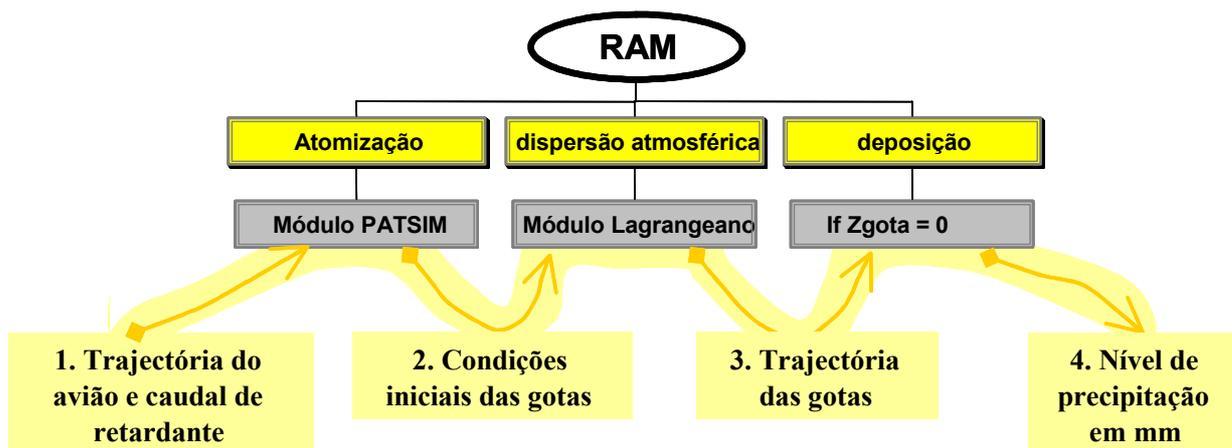


Figura 4.5 - Representação esquemática do modelo RAM.

4.2.1.1 Módulo de atomização

O módulo de atomização é usado para a definição das condições iniciais das gotas de retardante, conhecidas as seguintes variáveis operacionais: (i) trajectória do avião; (ii) tipo de retardante e (iii) caudal de retardante à saída do aerotanke. O modelo conceptual aqui usado é o PATSIM - *PATtern SIMulation* (Swanson et al., 1975), o qual apresenta a vantagem de ser simples e de ter sido validado intensamente com resultados obtidos em largadas experimentais conduzidas pelo USDA FS. O módulo de atomização apresenta, contudo, algumas limitações, nomeadamente a incapacidade de ter em conta as propriedades reológicas e a elasticidade do retardante. Esta limitação é mitigada, em parte, pela diferenciação de duas classes de fluidos: (i) retardantes não espessados ou “tipo água” e (ii) retardantes espessados à base de gomas.

Conceptualmente, o módulo de atomização divide o caudal de retardante em “pacotes” ou volumes de retardante correspondentes a intervalos de 0,02 segundos. De seguida, e em simultâneo com o seu deslocamento, cada um destes volumes finitos é desintegrado com uma intensidade exponencial em ordem ao tempo, de acordo com a equação seguinte:

$$Vol_{atom}(\Delta t) = \frac{\Delta t \cdot K_2 \cdot e^{K_1 \cdot t}}{Vel \cdot Vol_{pacote}} \quad \text{Equação 4.1}$$

com,

$Vol_{atom}(\Delta t)$ – volume atomizado durante o intervalo de tempo Δt ;

K_1 – constante empírica dependente da geometria das comportas do aerotanque;

K_2 – constante empírica dependente da reologia do retardante;

t – tempo decorrido desde o início da libertação deste “pacote” (s);

Vel – velocidade do “pacote” ($\sim 0,7$ x velocidade do avião) ($m \cdot s^{-1}$);

Vol_{pacote} – volume inicial do “pacote” (l).

Embora se trate de uma expressão semi-empírica, a coerência desta equação pode ser discutida, no seu aspecto qualitativo, da seguinte forma:

- (i) o volume atomizado é inversamente proporcional ao volume inicial do “pacote”, uma vez que corresponde a uma maior inércia a vencer pelas forças aerodinâmicas;
- (ii) o volume atomizado varia também de forma inversa com a velocidade inicial do volume, uma vez que o produto em cociente na equação corresponde a uma quantidade de movimento e, portanto, tem as mesmas unidades físicas que um impulso (produto de uma força por um tempo).

A intensidade da atomização aumenta com a velocidade relativa entre o retardante e o escoamento atmosférico, devido ao incremento das forças aerodinâmicas. A intensificação da atomização significa apenas que o diâmetro das gotas formadas é menor, não reflectindo necessariamente um maior volume de líquido atomizado por unidade de tempo. Os aviões aplicam o retardante a velocidades quase fixas, na ordem dos 102 nós, ou seja, cerca de $60 m \cdot s^{-1}$. Durante a desintegração de cada volume finito de retardante calcula-se a trajectória, considerando simplifcadamente que estes apresentam um comportamento semelhante ao de um projectil sem resistência ao ar. Portanto, as equações que regem o movimento destes “pacotes” são:

$$\begin{array}{l}
 \text{Movimento} \\
 \text{no plano} \\
 \text{horizontal} \\
 \text{H - horizontal}
 \end{array}
 \left\{ \begin{array}{l}
 a_h = 0 \text{ (m.s}^{-2}\text{)} \\
 u_h = 0,7 \cdot \text{Vel}_{\text{aviao}} = \text{constante (m.s}^{-1}\text{)} \\
 X_h = X_0 + t \cdot u_h \text{ (m)}
 \end{array} \right.$$

$$\begin{array}{l}
 \text{Movimento} \\
 \text{no direcção} \\
 \text{vertical} \\
 \text{V - vertical}
 \end{array}
 \left\{ \begin{array}{l}
 a_v = g (= -9,8 \text{ m.s}^{-2}\text{)} \\
 u_v = v_0 + g \cdot t \text{ (m.s}^{-1}\text{)} \\
 Z_v = Z_0 + v_0 \cdot t + 0,5 g \cdot t^2 \text{ (m)}
 \end{array} \right.$$

v_0 refere-se à velocidade inicial do fluido à saída do tanque aéreo, a qual toma normalmente um valor próximo de -5 m.s^{-1} . Calculando a trajectória dos volumes de retardante conjuntamente com a desintegração, é possível determinar o volume de retardante atomizado ao longo do espaço bidimensional (xz), como se representa na figura seguinte:

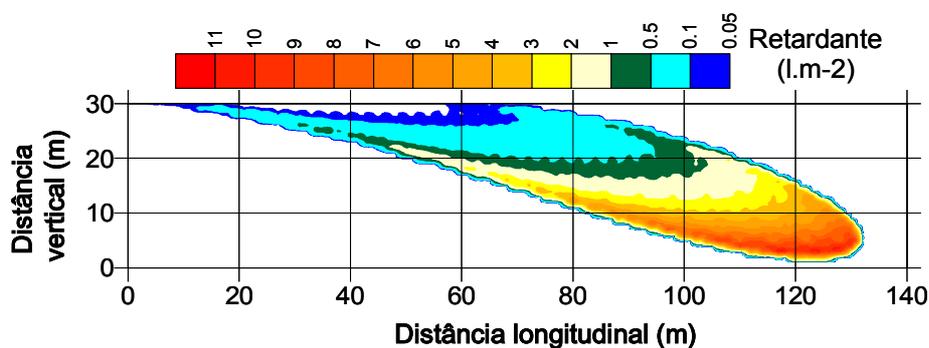


Figura 4.6 – Quantidade de líquido atomizado ao longo do espaço bidimensional (xz).

É possível observar no gráfico anterior que o retardante atinge o solo ($115 < x \text{ (m)} < 135$) antes de completar a sua atomização, o que numa situação real implica perigo para bens e pessoal em terra.

4.2.1.2 Evaporação das gotas

A evaporação das gotas é duplamente consequente, dado que reduz a massa das partículas, alterando o comportamento dinâmico das mesmas. A expressão que traduz a variação do diâmetro de gotas em movimento com o tempo é a equação de Maxwell, multiplicada pelo factor de ventilação da gota, F_V (Borrego et al., 1999):

$$\frac{dD}{dt} = \frac{4M_p D_v \rho_a (e_s - e_\infty)}{M_a D \rho (P_a - e_s)} F_V \quad \text{Equação 4.2}$$

sendo

$$F_V = 1,0 + 0,3Sc^{1/3} Re^{1/2} \quad \text{Equação 4.3}$$

Uma vez que o factor de ventilação é função do diâmetro da gota, D , a equação não tem solução analítica, sendo resolvida numericamente através da sua discretização em pequenos intervalos de tempo. Como é evidente, a evaporação afecta sobretudo as gotas mais finas, uma vez que estas residem mais tempo na atmosfera e possuem uma maior área superficial específica. Apesar de os retardantes serem normalmente aplicados a alguma distância da frente de fogo, é frequente a existência de condições extremas de temperatura e humidade, encontradas pelas gotas em queda, tornando a evaporação num fenómeno não desprezável.

4.2.1.3 Trajectória e dispersão das gotas

As forças que condicionam a trajectória das gotas durante a queda na atmosfera são a sua inércia, a força de arrasto e a força gravitacional. A força de impulsão é, neste caso, desprezada por ser inferior a 0,15 % do peso da própria partícula. O balanço de forças é, portanto, traduzido por:

$$\frac{d^2}{dt^2} X_i = [U_i - V_i] \left[\frac{1}{\tau_p} \right] + g_i \quad \text{Equação 4.4}$$

e

$$\frac{d}{dt} (X_i) = V_i \quad \text{Equação 4.5}$$

Estas equações podem ser integradas numericamente conhecendo o escoamento atmosférico (U_i) e a posição e velocidade iniciais de cada gota, ficando (Tomé et al., 1999a):

$$V_i^n = -[U_i^n - V_i^{n-1}] e^{-\Delta t / \tau_p} + U_i^n + g_i \tau_p \quad \text{Equação 4.6}$$

$$X_i^n = X_i^{n-1} - \tau_p [U_i^n - V_i^{n-1} + g_i \tau_p] [1 - e^{-\Delta t / \tau_p}] + [U_i^n + g_i \tau_p] \Delta t \quad \text{Equação 4.7}$$

O RAM não calcula a perturbação do escoamento atmosférico pelo avião ou pela queda do retardante, assumido um perfil de velocidades em potência:

$$U_{i(Z_1)} = U_{i(Z_2)} \left(\frac{Z_1}{Z_2} \right)^p \quad \text{Equação 4.8}$$

Nas simulações efectuadas, usou-se $p = 0,23$ para as duas componentes horizontais do vento. É evidente que a equação anterior deverá ter em conta a direcção do vento relativamente ao domínio de cálculo. Quanto à terceira componente, vertical, considera-se que toma o valor zero em todo o domínio. Assim, o escoamento usado no RAM é constante segundo qualquer direcção horizontal, variando apenas na vertical, com a distância ao solo.

A descrição lagrangiana utiliza as equações anteriores, de forma a calcular a trajetória de cada gota ($X_i = f(\text{tempo})$). Uma vez que existem vários milhões de gotas físicas numa nuvem de retardante, o número de partículas simuladas é inferior. Contudo, a simulação contém um número de partículas suficientemente grande, de forma a conseguir representatividade estatística para o movimento das gotas reais na atmosfera. A dispersão das gotas em torno da sua posição média é calculada tendo em conta o diâmetro (inércia) da partícula e a turbulência local atmosférica (Picot et al., 1997; Teske et al., 1996).

A dispersão das gotas segue uma distribuição gaussiana em torno da sua posição média e possui um desvio padrão calculado a partir de uma expressão algébrica complexa que tem em conta a integração temporal da turbulência atmosférica local e o diâmetro da partícula (Teske et al., 1996). Assim, gotas de maiores dimensões são mais resistentes à dispersão, uma vez que possuem maior inércia perante os turbilhões e residem menos tempo na atmosfera.

4.2.1.4 Deposição ao solo

O cálculo da precipitação ao solo, em mm de retardante, é realizado a partir da determinação das coordenadas espaciais da trajetória da partícula ao atingir a superfície ($x, y, z = 0$). A partir destes dados é possível associar uma malha bidimensional à superfície do solo, associando cada gota sedimentada à respectiva célula da malha. Somando os volumes de retardante associados a cada partícula presente e dividindo pela área da célula obtém-se a precipitação (litros por metro quadrado ou mm).

4.2.2 FLUENT

A utilização do FLUENT justifica-se pela necessidade de aferir os resultados do RAM com um modelo CFD profusamente usado e com diversos módulos que permitem o estudo de

diferentes particularidades, como sejam a transferência de massa (evaporação) e de quantidade de movimento através da abordagem *two-ways*. Esta aproximação, bidireccional, consiste na modelação da troca de propriedades entre a fase contínua (escoamento atmosférico) e a fase discreta (gotas de retardante). As propriedades são a massa, a energia e a quantidade de movimento, originando 5 equações escalares que descrevem as relações inter-fásicas.

Sendo um CFD, o FLUENT calcula as equações diferenciais de conservação da massa, da quantidade de movimento e da energia, por discretização espacial e temporal. A equação da continuidade, na sua forma analítica é dada por:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = S_m \quad \text{Equação 4.9}$$

Esta equação é válida para escoamentos compressíveis e incompressíveis. S_m representa o termo fonte de massa da fase contínua. Nas simulações da nuvem de retardante, este termo assume um valor positivo correspondente à evaporação de água das gotas da fase discreta.

Da aplicação da segunda lei de Newton a um elemento de fluido, resulta a equação vectorial de Navier Stokes, que traduz a conservação da quantidade de movimento. Num referencial inercial (sem aceleração), este balanço é traduzido pela equação:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \vec{v}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot \bar{\bar{\tau}} + \rho \vec{g} + \vec{F} \quad \text{Equação 4.10}$$

sendo o tensor de tensões calculado por:

$$\bar{\bar{\tau}} = \mu \left[(\nabla \vec{v} + \nabla \vec{v}^T) - \frac{2}{3} \nabla \cdot \vec{v} I \right] \quad \text{Equação 4.11}$$

$\rho\vec{g}$ representa a força gravitacional. \vec{F} corresponde às forças exteriores, como as que resultam da interacção com as gotas de retardante. Num tópico ulterior, será apresentada uma explicação mais detalhada sobre estas forças.

A conservação da energia é traduzida por:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho E) + \nabla \cdot [\vec{v}(\rho E + p)] = \nabla \cdot \left(k \nabla T - \sum_j h_j \vec{J}_j + (\vec{\tau} \cdot \vec{v}) \right) + S_h \quad \text{Equação 4.12}$$

k é a condutividade térmica do gás e \vec{J}_j , caracteriza o fluxo difusivo de espécies. Os três primeiros termos no membro da direita representam a transferência de energia por condução, difusão de espécies e dissipação viscosa, respectivamente. S_h é o termo fonte de energia, traduzindo o calor proveniente de reacções químicas ou das trocas com a fase particulada. A nuvem de retardante químico, sobretudo devido às diferenças de temperatura entre as gotas e o ar circundante e ao calor latente da água associado ao consumo de energia na evaporação, fazem, normalmente, baixar a temperatura do ar local, ao mesmo tempo que pode elevar a temperatura da gota em um ou dois graus Celsius.

A energia do fluido é dada por:

$$E = h - \frac{p}{\rho} + \frac{v^2}{2} \quad \text{Equação 4.13}$$

sendo h a entalpia sensível definida para gases ideais da seguinte forma:

$$h = \sum_j Y_j h_j \quad \text{Equação 4.14}$$

Y_j representa a fracção mássica da espécie j . A entalpia de cada substância é função da temperatura:

$$h_j = \int_{298,15K}^T c_{p,j} dT \quad \text{Equação 4.15}$$

sendo c_p o poder calorífico da substância j .

4.2.2.1 O modelo de turbulência $k - \varepsilon$

Escoamentos turbulentos são caracterizados por possuírem velocidades flutuantes. Estas flutuações são responsáveis pelo transporte de propriedades como a quantidade de movimento, energia e massa das espécies presentes. Segundo Bradshaw (1975), a turbulência é um movimento tridimensional instacionário, no qual o estiramento e vórtices provocam flutuações de velocidade que se distribuem por todos os comprimentos de onda, entre um mínimo determinado pelas forças viscosas e um máximo limitado às condições de fronteira do escoamento. Normalmente, as flutuações são de escala reduzida e de grande frequência. O seu cálculo numérico directo (DNS) torna-se proibitivo na grande maioria das aplicações de engenharia, como a presente. Desta forma, é necessário proceder à aproximação de Reynolds, dividindo arbitrariamente as variáveis dependentes numa componente média u e numa parte flutuante u' :

$$\hat{u} = u + u' \quad \text{Equação 4.16}$$

A substituição da Equação 4.16 nas equações de conservação anteriores permite obter as chamadas equações de Navier-Stokes com média de Reynolds (NSMR ou RANS, acr. Inglês). Estas novas equações possuem termos adicionais, devido ao facto das anteriores possuírem termos não lineares. Estes novos termos levantam o problema do fecho das equações que é realizado com os modelos de turbulência. No presente caso, adoptou-se o

modelo $k - \varepsilon$ por ser o mais aceite e testado. O fecho de turbulência permite relacionar as tensões turbulentas (ou de Reynolds) com as variáveis conhecidas do escoamento, nomeadamente as propriedades médias, através de parametrizações semi-empíricas.

O modelo usado pressupõe que as tensões turbulentas sejam proporcionais aos gradientes de velocidade (Equação 4.17). Ao coeficiente de proporcionalidade chama-se viscosidade turbulenta, μ_t , por analogia com a lei de Newton para escoamentos laminares (Equação 4.16). Esta proposta, realizada por Boussinesq, baseia-se no facto de que tanto a viscosidade laminar, como a viscosidade turbulenta retiram energia ao escoamento médio, transferindo-a para escalas menores (turbilhões menores e movimentos moleculares, respectivamente). A principal desvantagem do modelo conceptual de Boussinesq reside na consideração da viscosidade turbulenta como isotrópica, o que não é estritamente verdadeiro.

$$\tau_{lam} = \mu_l \frac{\partial u}{\partial y} \quad \text{Equação 4.17}$$

$$\tau_{turb} = -\rho \overline{u_i' u_j'} = \mu_t \left(\frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_j} + \frac{\partial \overline{u_j}}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \rho \delta_{ij} k \quad \text{Equação 4.18}$$

k é designado por energia cinética turbulenta (ECT), sendo na verdade uma energia por unidade de massa volúmica:

$$k = \frac{1}{2} \overline{(u_i')^2} = \frac{ECT}{\rho} \quad \text{Equação 4.19}$$

Em 1879, Reynolds propôs a equivalência entre a viscosidade cinemática turbulenta e a difusividade turbulenta. Actualmente, a razão entre estas duas variáveis designa-se por número de Schmidt turbulento, existindo na literatura valores que variam entre 0,7 e 1. Esta abordagem pode ser estendida a outras propriedades do fluido, originando o número

de Prandtl turbulento da variável X. Segue-se uma lista dos valores usados no módulo $k - \varepsilon$ do FLUENT.

Tabela 4.1 – Valores dos números de Prandtl usados no modelo $k - \varepsilon$.

n.º de Prandtl turbulento da.....	Representação	Valor
....temperatura	σ_T	0,9
...ECT (k)	σ_k	1,0
...DECT (ε)	σ_ε	1,3

O modelo semi-empirico $k - \varepsilon$ standard baseia-se nas equações de transporte da energia cinética turbulenta, k e na sua taxa de dissipação, ε (Launder e Spalding, 1975):

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho k u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon + S_k \quad \text{Equação 4.20}$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \varepsilon u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + S_\varepsilon \quad \text{Equação 4.21}$$

Nestas equações, G_k e G_b representam a produção de energia cinética devido aos gradientes de velocidades médias e à flutuação (*buoyancy*), respectivamente. $C_{1\varepsilon}$, $C_{2\varepsilon}$ e $C_{3\varepsilon}$ são constantes do modelo, apresentando os seguintes valores:

$$C_{1\varepsilon} = 1,44;$$

$$C_{2\varepsilon} = 1,92;$$

$$C_{3\varepsilon} = 1,44.$$

σ_k e σ_ε são os números de Prandtl turbulentos para k e ε , respectivamente (Tabela 4.1). S_k e S_ε são termos fonte. Conhecendo k e ε , a viscosidade turbulenta, μ_t , é calculada pela seguinte expressão:

$$\mu_i = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad \text{Equação 4.22}$$

Onde C_μ é outra constante, igual a 0,09.

4.2.2.2 Equação de estado

As equações anteriores fazem uso da viscosidade do fluido, ar e vapor de água, que interessa relacionar com as demais propriedades do gás. A relação entre a pressão, temperatura e massa volúmica corresponde à equação dos gases perfeitos:

$$pv = nRT \quad \text{Equação 4.23}$$

Havendo uma mistura de duas substâncias com massas moleculares distintas, o valor a usar na expressão anterior corresponde à média das massas moleculares dos seus componentes ($M_{\text{ar_seco}} = 28,9 \text{ g.mol}^{-1}$ e $M_{\text{H}_2\text{O}} = 18 \text{ g.mol}^{-1}$), ponderada pelas respectivas abundâncias.

4.2.2.3 Fase discreta

O FLUENT calcula o escoamento atmosférico por uma análise euleriana, enquanto que as gotas de retardante (fase discreta) são tratadas por uma aproximação lagrangiana, determinando-se as suas trajectórias no seio da fase contínua. O acoplamento bidireccional do FLUENT permite calcular trocas de propriedades entre as duas fases, nomeadamente massa, energia e quantidade de movimento:

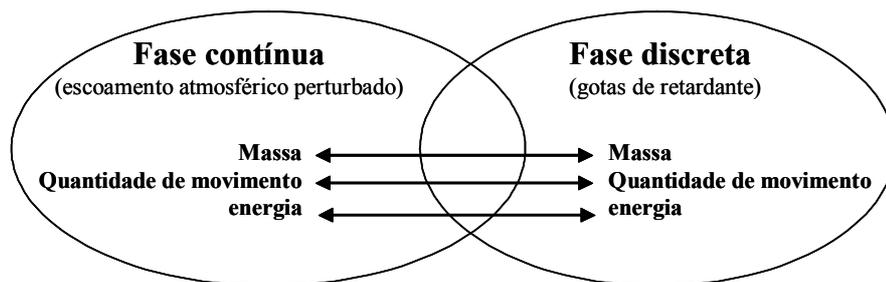


Figura 4.7 – Interação entre a fase contínua e a fase discreta.

A transferência de massa corresponde à evaporação de água na superfície da gota. A transferência de calor, originada pelo gradiente de temperatura entre as duas fases em contacto, induz o aquecimento da gota (considerando o ar mais quente). Simultaneamente, há um arrefecimento da partícula, devido ao calor latente consumido pela evaporação. Em geral, o balanço destes fenómenos opostos corresponde a um aumento de 1 ou 2 graus Celsius na temperatura da gota. A troca de quantidade de movimento é também intuitiva. Se o ar induz um efeito de arrasto sobre as partículas, então estas irão produzir uma força sobre a fase contínua, igual em módulo, mas de sentido oposto. Trata-se da aplicação da terceira lei de Newton do par “acção-reacção”. Esta técnica de interacção teve origem na metodologia designada por *Particle Source in Cell* (PSI) desenvolvida por Crowe et al (1977).

Tal como foi discutido no capítulo anterior, a troca de quantidade de movimento só tem real interesse em situações de grande concentração da fase particulada. No caso da nuvem, as simulações com o FLUENT revelam a existência de zonas concentradas com 5 kg de retardante por metro cúbico de ar, o que justifica e exige a modelação das trocas de propriedades. Constata-se que a fase discreta afecta significativamente a fase contínua e vice-versa. A análise exaustiva destes fenómenos encontra-se patente nos resultados da modelação apresentados no capítulo 5.

Tal como já foi sumariamente referido no capítulo anterior, a trajectória de uma partícula calcula-se com base na dupla integração da sua equação de balanço de forças:

$$\frac{d\vec{u}_p}{dt} = F_D(\vec{u} - \vec{u}_p) + \frac{\vec{g}(\rho_p - \rho)}{\rho_p} + \vec{F}_i \quad \text{Equação 4.24}$$

onde o termo $F_D(\vec{u} - \vec{u}_p)$ representa a força de atrito por unidade mássica.

$$F_D = \frac{18\mu}{\rho_p d_p^2} \frac{C_D \text{Re}}{24} \quad \text{Equação 4.25}$$

\vec{u} é a velocidade da fase contínua, \vec{u}_p a velocidade da partícula, μ a viscosidade molecular do fluido, ρ a massa volúmica do fluido, ρ_p a massa volúmica das partículas e d_p o diâmetro da partícula. O número de Reynolds, Re , obtém-se da seguinte expressão:

$$\text{Re} = \frac{\rho d_p \|\vec{u}_p - \vec{u}\|}{\mu} \quad \text{Equação 4.26}$$

O coeficiente de arrasto, C_D , é função de Re e da forma da partícula (*e.g.* esfericidade da gota) através de relações empíricas (Haider e Levenspiel, 1989; Morsi e Alexander, 1972).

O termo \vec{F} representa o somatório das forças exteriores que actuam na partícula (*e.g.* gravidade, forças electromagnéticas, Browniana, termoforese). No caso das gotas de retardante, a única força interveniente é o peso da partícula, por acção da gravidade.

A turbulência, além de condicionar o escoamento médio do ar atmosférico, dispersa também as gotas da nuvem. Este fenómeno pode ser simulado com recurso à técnica de Monte Carlo ou através da análise da função de probabilidade da massa volúmica. Nesta última, determina-se a trajectória média (sem dispersão) e a função de probabilidade da massa volúmica que se considera gaussiana com desvios padrão distintos nas três direcções espaciais (Crowe et al., 1998).

No presente caso, verifica-se que os deslocamentos aleatórios devidos à turbulência têm uma baixa importância, uma vez que se trata de partículas grosseiras (milimétricas) que residem pouco tempo na atmosfera (alguns segundos). De facto, numa situação sem vento lateral, a abertura da nuvem é essencialmente definida pela atomização, a não ser que a altura da largada seja elevada. Com vento lateral, as partículas de distintos tamanhos podem ser elutriadas com diferentes intensidades, produzindo uma mancha de retardante mais aberta. Saliente-se que se a nuvem for muito densa, este fenómeno é minimizado, uma vez que o retardante sedimentaria como um todo. No caso extremo de uma situação diluída, as gotas seriam livremente transportadas pelo escoamento atmosférico, havendo uma maior elutriação. A figura seguinte pretende ser uma representação conceptual desse fenómeno para o caso ideal de diluição infinita da fase discreta, sendo válida a aproximação *one way*.

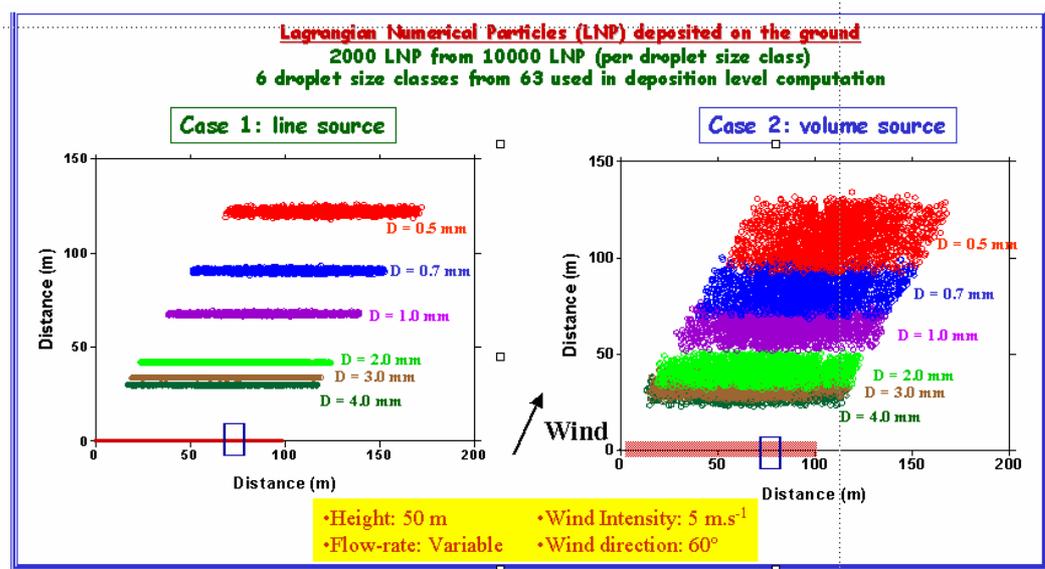


Figura 4.8 – Deposição das partículas em função do seu diâmetro e tipo de emissão.

4.2.2.4 Integração numérica da equação da trajectória

O cálculo da trajectória das gotas resulta da integração numérica das equações diferenciais em intervalos de tempo discretos. Pela integração da Equação 4.24 obtém-se a expressão para a velocidade da partícula, que por sua vez é usada na seguinte expressão para obter os deslocamentos discretos:

$$\frac{d\vec{x}_p}{dt} = \vec{u}_p \quad \text{Equação 4.27}$$

Assumindo como desprezáveis as forças externas, a Equação 4.24 pode ser reescrita, obtendo-se a Equação 4.28 (FLUENT, 2003). Assim, as Equações 4.27 e 4.28 são integradas numericamente nas três direcções do espaço.

$$\frac{d\vec{u}_p}{dt} = \frac{1}{\tau_p} (\vec{u} - \vec{u}_p) \quad \text{Equação 4.28}$$

sendo τ_p o tempo de relaxação da partícula. O FLUENT usa um esquema trapezoidal para integrar esta última equação.

$$\begin{aligned} \frac{\vec{u}_p^{n+1} - \vec{u}_p^n}{\Delta t} &= \frac{1}{\tau} [\vec{u}^* - \vec{u}_p^{n+1}] + \dots\dots\dots \\ \vec{u}^* &= \frac{1}{2} (\vec{u}^n + \vec{u}^{n+1}) \\ \vec{u}^{n+1} &= \vec{u}^n + \Delta t \vec{u}_p \cdot \nabla \vec{u}^n \end{aligned} \quad \text{Equação 4.29}$$

onde n representa o número da iteração simultânea das Equações 4.27 e 4.28.

4.2.2.5 Acoplamento entre a fase contínua e discreta

À medida que as partículas se deslocam e atravessam a face de uma célula de cálculo da fase contínua, o modelo determina a quantidade de energia, quantidade de movimento e massa que a partícula perde/ganha, incorporando esses valores como termos fonte da fase contínua nessa mesma célula de cálculo. Os termos fonte alteram o campo de vento. Este,

por sua vez modifica a trajetória da partícula, e esta altera os termos fonte. A forma de calcular esta dependência cíclica é através de sucessivas iterações, até que deixe de haver alteração na trajetória das partículas e do escoamento atmosférico.

A metodologia associada ao *two-ways-coupling* encontra-se representada esquematicamente na figura seguinte.

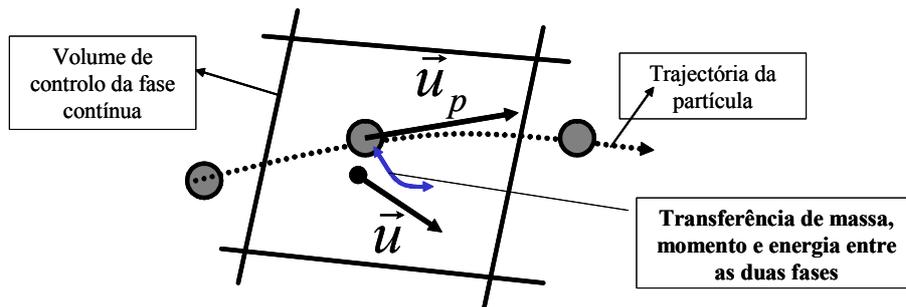


Figura 4.9 – Representação esquemática do acoplamento entre as duas fases.

4.2.2.6 Troca de quantidade de movimento

O cálculo da variação da quantidade de movimento da partícula ao atravessar o volume de controle, permite determinar o termo fonte das equações de Navier-Stokes da fase contínua. A variação da quantidade de movimento é dada por:

$$\vec{F} = \sum \left(\frac{18\mu C_D \text{Re}}{24\rho_p d_p^2} (\vec{u}_p - \vec{u}) \right) \dot{m}_p \Delta t \quad \text{Equação 4.30}$$

sendo \dot{m}_p o caudal mássico da partícula numérica. Note-se que, embora cada partícula corresponda a um determinado diâmetro, ela pode representar dezenas ou até centenas de partículas reais. Isto deve-se às limitações do hardware computacional que restringe o

número máximo de partículas usadas na modelação. Obviamente, o desejável seria simular o número real de partículas. Por exemplo, para uma simulação da descarga de 5000 litros de retardante e considerando gotas uniformes com 1 mm³ de volume (diâmetro ~1 mm), teríamos o considerável número de 5 milhões de partículas. A simulação de apenas 500000 partículas numéricas significa que a cada uma das partículas corresponde uma massa 10 vezes superior, apesar do diâmetro de simulação continuar a ser de 1 mm. Para o cálculo da trajectória da partícula, a massa continua a ser a real, ou seja, em acordo com o volume da mesma.

4.2.2.7 Troca de calor/energia

A transferência interfásica de energia é calculada pela avaliação da variação da energia térmica de uma partícula à medida que esta passa através do volume de controlo da malha da fase contínua (Equação 4.24).

$$Q = \left[\frac{\bar{m}_p}{m_{p,0}} c_p \Delta T_p + \frac{\Delta m_p}{m_{p,0}} \left(-h_{fg} + \int_{273,3K}^{T_p} c_p dT \right) \right] \dot{m}_{p,0} \quad \text{Equação 4.31}$$

sendo:

\bar{m}_p = massa média da partícula no volume de controlo (kg);

$\bar{m}_{p,0}$ = massa inicial da partícula (kg);

c_p = calor específico da partícula (J.kg⁻¹.K⁻¹);

ΔT = variação da temperatura da partícula ao atravessar a célula (K);

Δm_p = variação da massa da partícula ao atravessar a célula (kg);

h_{fg} = calor latente da água (J/kg);

c_p = calor específico da água (J.kg⁻¹.K⁻¹);

T_p = temperatura da partícula à saída do volume de controlo (K);

$\dot{m}_{p,0}$ = caudal mássico inicial da partícula (kg.s⁻¹).

A temperatura da gota é actualizada através de um balanço energético que relaciona a variação do calor sensível com a transferência convectiva do calor latente entre a gota e a sua vizinhança (fase contínua):

$$m_p c_p \frac{dT_p}{dt} = h A_p (T_\infty - T_p) + \frac{dm_p}{dt} h_{fg} \quad \text{Equação 4.32}$$

sendo,

c_p = calor específico da gota ($\text{J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$);

T_p = temperatura da gota (K);

h = coeficiente de transferência convectiva de calor ($\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$);

T_∞ = temperatura da fase contínua (K);

$\frac{dm_p}{dt}$ = taxa de evaporação (kg.s^{-1});

h_{fg} = calor latente da água (J.kg^{-1}).

4.2.2.8 Troca de massa

A transferência de massa de uma gota ao atravessar uma célula da malha euleriana é determinada pela seguinte expressão:

$$M = \frac{\Delta m_p}{m_{p,0}} \dot{m}_{p,0} \quad \text{Equação 4.33}$$

No caso da nuvem, a transferência de massa resume-se à evaporação de água à superfície das gotas. As formulações de retardantes químicos possuem normalmente 20 % (m/m) de sais inorgânicos e 80 % de água (m/m). Isto significa que as gotas de retardante nunca se evaporam na totalidade. No caso extremo de uma gota perder os 80 % de água, passaria ao

estado sólido com a totalidade dos sais activos presentes. Esta consideração é importante, uma vez que a evaporação não implica obrigatoriamente uma perda de massa de retardante. Existe sim um aumento da concentração do retardante à medida que a gota evolui no seu estado transiente. Na prática, a evaporação da água leva a perdas de retardante, visto que as gotas mais finas se tornam ainda mais leves, sendo arrastadas pelo vento para longe da mancha concentrada de produto. No caso da aplicação aérea de água, pode-se verificar a perda total do conteúdo presente nas gotas mais finas (submilimétricas).

Enquanto houver água na gota, a transferência de massa devida à evaporação é governada pelo gradiente de difusão. O fluxo de vapor para a fase gasosa é directamente proporcional ao gradiente de concentração de vapor de água na vizinhança da gota e no ar mais afastado:

$$N_i = k_c (C_s - C_\infty) \quad \text{Equação 4.34}$$

sendo:

N_i = fluxo molar de vapor ($\text{kmol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$);

k_c = coeficiente de transferência mássico (m.s^{-1});

C_s = concentração de vapor de água junto da gota (kmol.m^{-3});

C_∞ = concentração de vapor de água suficientemente afastada da gota (kmol.m^{-3}).

A concentração de vapor de água à superfície é determinada assumindo que a pressão parcial de vapor nesta interface é igual à pressão de vapor de saturação, à referida temperatura, T_p :

$$C_s = \frac{P_{sat}(T_p)}{RT_p} \quad \text{Equação 4.35}$$

onde R é a constante universal dos gases. A concentração de vapor no gás é avaliada pela resolução da equação de transporte da propriedade “concentração de vapor de água”:

$$C_{\infty} = X_{H_2O} \frac{p}{RT_{\infty}} \quad \text{Equação 4.36}$$

onde X_{H_2O} é a fracção molar de vapor de água num local afastado da gota, p_{op} a pressão existente e T_{∞} a temperatura do gás, num local afastado das gotas.

O coeficiente de transferência de massa, k_c , na Equação 4.34 é calculado a partir da seguinte correlação (Ranz e Marshall, 1952a,b):

$$Nu = \frac{k_c d_p}{D_m} = 2,0 + 0,6 Re_d^{1/2} Sc^{1/3} \Leftrightarrow k_c = \frac{D_m (2,0 + 0,6 Re_d^{1/2} Sc^{1/3})}{d_p} \quad \text{Equação 4.37}$$

com,

D_m = coeficiente de difusão do vapor de água no ar ($m^2 \cdot s^{-1}$);

d_p = diâmetro da gota (m);

Sc = número de Schmidt, $Sc = \frac{\mu}{\rho D_m}$;

Nu = número de Nusselt, $Nu = \frac{k_c d_p}{D_m}$.

Por fim, a determinação de perda de massa na gota é efectuada com base na seguinte expressão:

$$m_p(t + \Delta t) = m_p(t) - Nu A_p M_{H_2O} \Delta t \quad \text{Equação 4.38}$$

sendo,

M_{H_2O} = massa molecular da água ($kg \cdot kmol^{-1}$);

m_p = massa da gota (kg);

A_p = área de superfície da gota (m²).

4.2.2.9 Sub-relaxação dos termos de trocas interfásicas

A troca de quantidade de movimento, massa e energia inclui factores de sub-relaxação, de forma a evitar divergência nos cálculos do *two-ways coupling*:

$$X_{new} = X_{old} + \alpha(X_{calculated} - X_{old}) \quad \text{Equação 4.39}$$

Sendo α o factor de sub-relaxação ($< 1,0$); X representa qualquer das três propriedades trocadas. Os valores mais comuns para α situam-se entre 0,5 e 0,7. No caso de haver dificuldades com a convergência da solução, então estes valores deverão ser reduzidos.

5

RESULTADOS DA MODELAÇÃO E COMPARAÇÃO COM DADOS EXPERIMENTAIS

5.1 Simulações

Neste capítulo apresentam-se duas simulações distintas. A primeira (caso A), corresponde a um caso simples e ideal, enquanto a segunda (caso B) permite a realização de comparações por se basear nos resultados experimentais da campanha de Marselha. A facilidade de interpretação das entradas e saídas do caso A justificam o interesse da sua utilização. Além disso, esta modelação pretende simular um avião que aplica retardante através do sistema MAFFS (*Modular Airborne Fire Fighting System*), no qual o retardante é libertado do tanque da aeronave através de bocais que atomizam instantaneamente o fluido. O sistema MAFFS é usado geralmente em aviões de grande porte como o *Hércules*

C130. O caso B representa um sistema distinto, com descarga gravítica. Imediatamente após a descarga, o retardante bruto é atomizado pelas forças aerodinâmicas resultantes do gradiente de velocidades entre este e o ar. Os valores dos principais parâmetros operacionais utilizados em ambos os casos constam da tabela seguinte.

Tabela 5.1 – Valores dos parâmetros operacionais utilizados nas simulações numéricas.

Parâmetro	Caso A	Caso B
Altura de voo (m)	30	
Velocidade do avião ($m.s^{-1}$)	60	
Volume de aplicação de retardante (l)	3400	3400
Caudal de retardante ($l.s^{-1}$)	1700 (Const. durante 2 s)	Variável (Figura 5.1)
Velocidade do vento a 10 m ($m.s^{-1}$)	5	
Direcção do vento em relação ao avião ($^{\circ}$)	0	107
Temperatura atmosférica (K)	303 K	294 K
Humidade relativa atmosférica (%)	30 %	69 %
Distribuição das gotas	Rosin Ramler (figura 5.1)	
Energia cinética turbulenta ($m^2.s^{-2}$)	0,02	
Energia de dissipação turbulenta ($m^2.s^{-3}$)	0,00015	

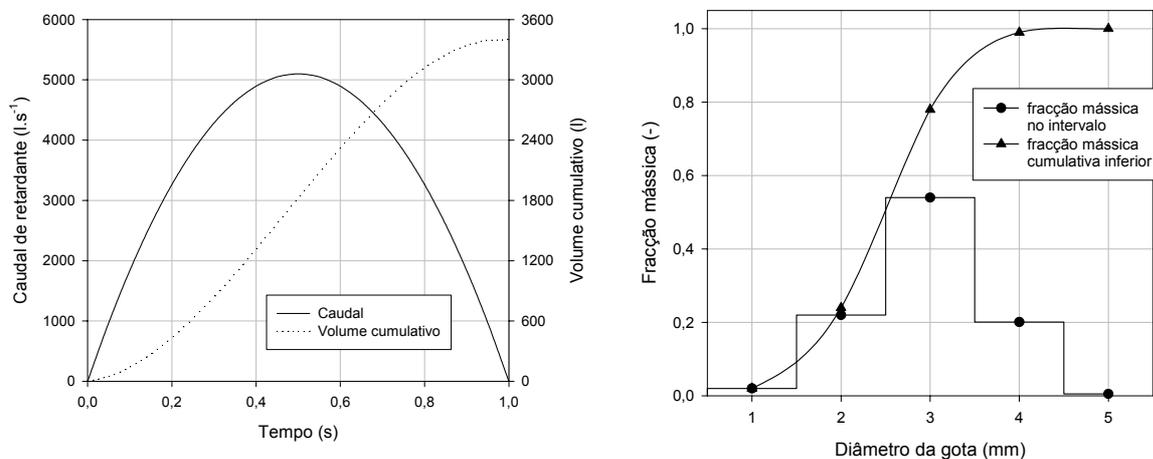


Figura 5.1 – Caudal e distribuição granulométrica para as gotas utilizados nas simulações do caso B.

O domínio utilizado para a simulação é representado por um paralelepípedo com $\Delta x = 250$ m, $\Delta y = 80$ m e $\Delta z = 80$ m. Deve referir-se, contudo, que no caso A, os cálculos

se baseiam apenas em metade do domínio, dado a simetria no plano $y = 40$ m resultante do alinhamento entre a direcção do vento e o avião. As malhas, não estruturadas, possuem tetraedros de tamanho variável. Nas verticais da aplicação do retardante e junto ao solo, efectuou-se um tratamento mais refinado, aumentando-se a discretização das malhas. Tal deve-se ao facto de nestes locais do domínio existirem maiores gradientes de diversas propriedades, nomeadamente, velocidades e concentração de retardante. Contudo, os gradientes próximos do solo são calculados por “funções de parede” e não directamente, através de células de pequeno tamanho. A figura seguinte apresenta, para o caso A, o detalhe do plano de simetria ($y = 40$ m).

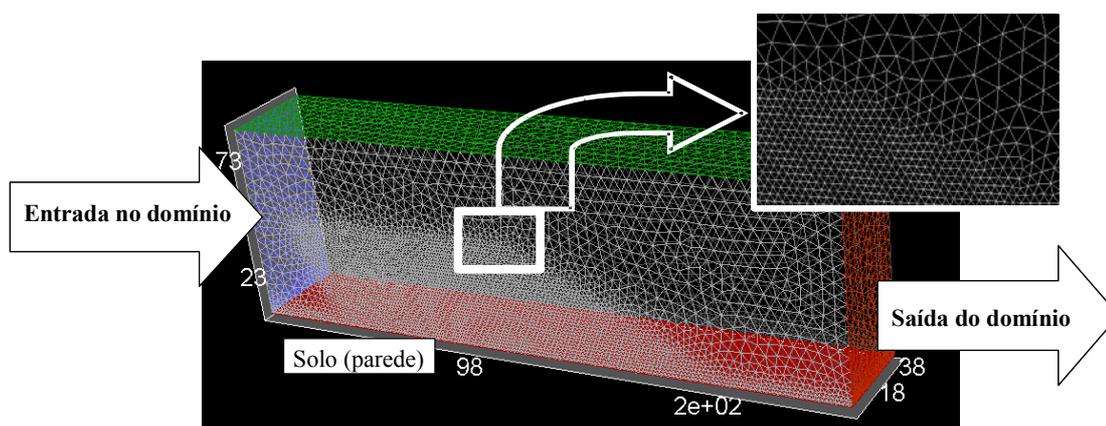


Figura 5.2 – Malha de cálculo usada no caso A.

As malhas dos casos A e B são constituídas por 365205 e 369950 células (tetraedros). A grelha A contém células com volumes variáveis de $0,0282 \text{ m}^3$ a $26,2 \text{ m}^3$. A grelha B é mais grosseira, abrangendo células com volumes desde $0,0265 \text{ m}^3$ até $47,6 \text{ m}^3$. Contudo, ambas as malhas possuem células finas na região crítica de passagem da nuvem.

A entrada do vento no domínio segue um perfil exponencial com $p = 0,23$ (condições atmosféricas neutras e rugosidade da superfície intermédia (5 cm)). As direcções de vento são 0° e 107° para os casos A e B, respectivamente. A energia cinética turbulenta e a sua taxa de dissipação apresentam valores constantes à entrada do domínio. Tal como sucede com a intensidade do vento, os valores destes dois parâmetros também variam com a

altura. No entanto, o modelo calcula o desenvolvimento dos campos de turbulência correctos, poucos metros a jusante da entrada. A temperatura do ar e humidade relativa são parametrizados à entrada de acordo com os valores constantes na Tabela 5.1. Estes valores correspondem a uma fracção mássica de 0,0078 e 0,0105 kg H₂O.kg⁻¹ ar nos casos A e B, respectivamente. Estas últimas variáveis intervêm ao nível da transferência de massa das gotas de retardante para o ar, fenómeno que afecta a quantidade de fluido passível de recuperação ao nível do solo.

A distribuição granulométrica das gotas considerada é do tipo Rosin Ramler, com diâmetro médio $\bar{d} = 3,2$ mm, parâmetro *spread* $n = 5$ e discretizada em 5 diâmetros (Figura 5.1). Usa-se aqui a distribuição de Rosin Ramler por ser aceite na bibliografia como ajustável à atomização. Os trabalhos do USDA FS apresentados na Figura 2.8, ajustaram as distribuições granulométricas das gotas de retardante a distribuições *log-normal*. Contudo, verifica-se que para os parâmetros estatísticos em causa, existe uma boa concordância entre as duas distribuições analíticas. Saliente-se, todavia, que a distribuição das gotas não é conhecida, pelo menos com um grau de confiança elevado, tal como foi anteriormente discutido nos capítulos 2 e 4.

As gotas são injectadas no domínio com condições iniciais (posição, velocidade diâmetro e temperatura) bem definidas e determinadas com um programa de pré-processamento desenvolvido em *fortran*. Para o caso A, em que existe uma atomização imediata do retardante à saída do avião, o pré-processador é relativamente simples, usando a velocidade do avião e o caudal de retardante para produzir ficheiros de injeções para o FLUENT. Para aplicações de retardante do caso B, o pré-processamento da atomização é mais elaborado, uma vez que incorpora o código resultante do módulo semi-empírico de atomização do modelo PATSIM (*PATtern SIMulation*) (George e Johnson, 1990; Swanson et al., 1975). A figura seguinte apresenta o resultado da atomização aplicada ao caso B segundo um plano vertical. Os valores apresentados neste gráfico correspondem à integração das concentrações segundo a sua perpendicular (eixo dos *yy*), representando valores de precipitação (mm ou l.m⁻²) e não uma concentração na atmosfera (l.m⁻³).

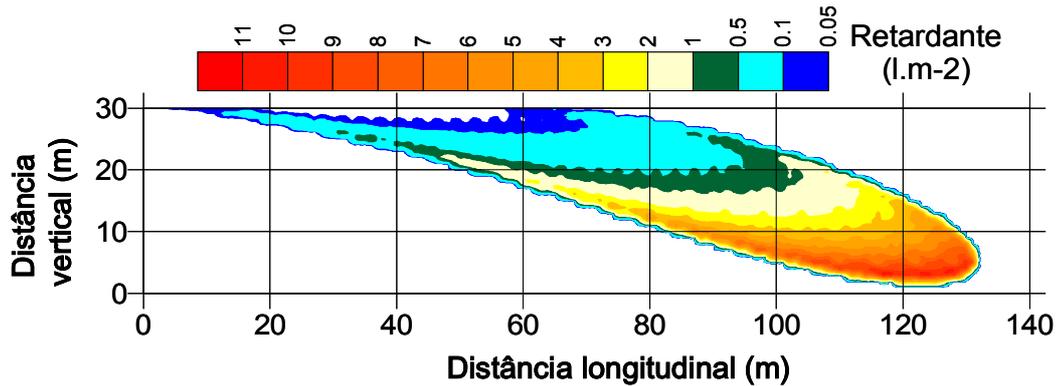


Figura 5.3 - Quantidade de líquido atomizado no espaço bidimensional (XZ) para o caso B.

Na simulação representada na figura anterior, o avião liberta, à velocidade de 60 m.s^{-1} , 3400 litros de retardante durante 1 segundo. Relativamente à distância longitudinal no domínio, considera-se que a contagem do tempo corresponde à posição do avião sobre a vertical de $x = 10 \text{ m}$, libertando o retardante até $x = 70 \text{ metros}$. É possível verificar que uma parte do volume de líquido é atomizado já na proximidade do solo, o que constitui uma potencial situação de perigo para aqueles que combatem o fogo perto da área de largada, como já foi mencionado no capítulo 2.

Ainda com base no modelo PATSIM, a distribuição lateral/transversal (eixo dos yy) resultante da atomização do fluido foi tomada como uma distribuição normal, impondo limitações rígidas. Considera-se que o desvio padrão desta distribuição é uma função decrescente com a altura (z) de acordo com a equação 5.1.

$$\sigma_y = 3,5 + \frac{30 - z}{30} \quad \text{Equação 5.1}$$

Isto significa que o líquido atomizado nas proximidades do avião (valores de z mais elevados) se encontra menos disperso lateralmente que o atomizado perto do solo. Partindo dos valores de precipitação da Figura 5.3 e após a sua diluição na direcção transversal (eixo yy), de acordo com a referida distribuição normal de σ_y e média zero, obtêm-se as concentrações iniciais de retardante na atmosfera em litros por metro cúbico de ar.

Na simulação do caso B, o avião descarrega o retardante a 30 m de altura, pelo que σ_y varia entre 3,5 e 4,5 metros. Note-se que a Equação 5.1 é unicamente aplicável ao caso B, porque, no caso A, a atomização é instantânea (sistema MAFFS), produzindo uma emissão em linha perfeita com as dimensões finitas, apresentadas na Tabela 5.2. Os parâmetros da distribuição normal são utilizados com o objectivo de determinar as condições numéricas iniciais das gotas, o que é realizado pelo pré-processador através de uma simulação de *Monte Carlo* aplicada a cada classe granulométrica. O intervalo de tempo utilizado nas simulações de pré-processamento foi de 0,05 segundos. Tanto no modelo RAM como no FLUENT, a integração de cada trajectória das gotas corresponde a um intervalo de tempo que evita um deslocamento superior a 0,1 m (ordem de grandeza das células de cálculo).

Tabela 5.2 - Valores utilizados na definição das condições iniciais das gotas.

Propriedades iniciais das gotas	Caso A				Caso B			
	Valor médio	Desvio padrão	Limites		Valor médio	Desvio padrão	Limites	
			Mín.	Máx.			Mín.	Máx.
Posição X (m)	+	+	+	+	#	#	#	#
Posição Y* (m)	25	3	20	30	0	Eq. 5.1	0	5
Posição Z (m)	25	3	20	30	#	#	#	#
Velocidade X (m.s ⁻¹)	25	3	19	31	25	3	19	31
Velocidade Y (m.s ⁻¹)	0	1	-2,5	2,5	0	1	-2,5	2,5
Velocidade Z (m.s ⁻¹)	-10	1	-13	7	-10	1	-13	7

* - o valor médio para a posição y corresponde à trajectória do avião;

– calculado com base na equação 4.1 e deslocamento do avião em função do tempo;

+ – determinado com base no deslocamento do avião em função do tempo.

5.2 Resultados das simulações

As simulações efectuadas com o programa FLUENT produzem resultados 3D instacionários (x, y, z, t) para diferentes propriedades. Entre estas contam-se o escoamento atmosférico perturbado, a trajectória e temperatura das gotas de retardante, a concentração

da nuvem, a temperatura e humidade do ar, as variáveis de turbulência e a mancha de retardante ao nível do solo. Alguns dos dados obtidos são apresentados e discutidos de imediato. As primeiras figuras mostram a evolução temporal da forma da nuvem e o campo de ventos perturbado, enquanto que as seguintes se referem a outros parâmetros. Esta secção é dividida em quatro partes correspondentes aos casos A e B simulados com o RAM ou o FLUENT

5.2.1 Resultados do caso A com o FLUENT

As Figuras 5.4 a 5.8 mostram a concentração de retardante e o escoamento atmosférico perturbado no plano de simetria para os tempos 1, 2, 3, 4 e 5 segundos. O campo de ventos encontra-se representado através das linhas de corrente projectadas no plano de simetria $Y=0$. Em cada linha de corrente existem marcas (triângulos) espaçadas entre si de deslocamentos correspondentes a um intervalo de tempo de 2 segundos. Desta forma, é fácil ter a percepção, não só da direcção do escoamento, mas também da variação do módulo da velocidade. Pontos mais próximos ou mais afastados entre si, numa mesma linha de corrente, significam velocidades menores ou maiores, respectivamente. O mapa de cores diz respeito à concentração da nuvem de retardante na atmosfera e tem unidades de litros de retardante por metro cúbico de ar.

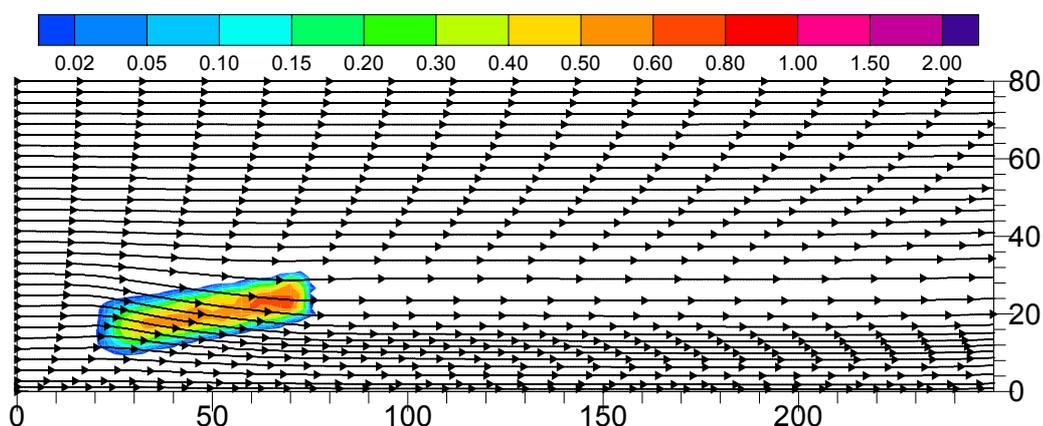


Figura 5.4 – Concentração de retardante (kg.m^{-3}) e linhas de corrente no plano de simetria $Y = 0$, para $t = 1,0$ segundo. Eixos X e Z em metros.

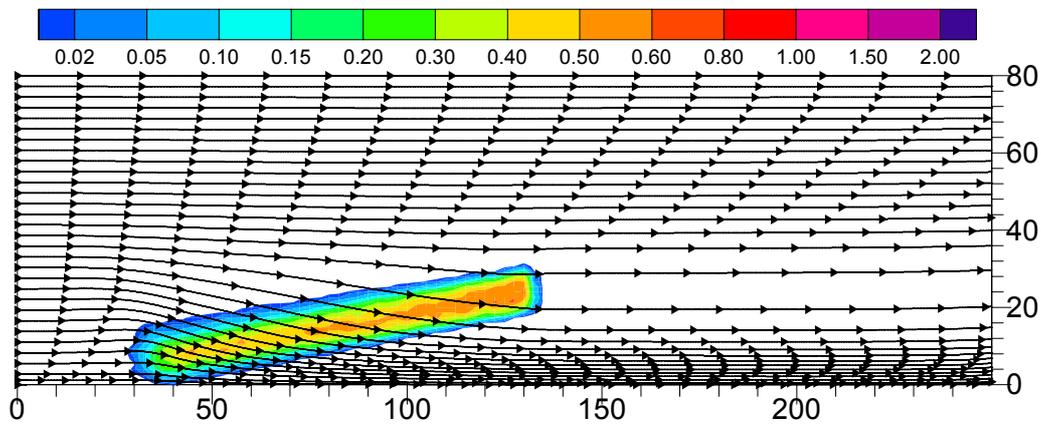


Figura 5.5 - Concentração de retardante (kg.m^{-3}) e campo de ventos no plano de simetria $Y = 0$, para $t = 2,0$ segundos. Eixos X e Z em metros.

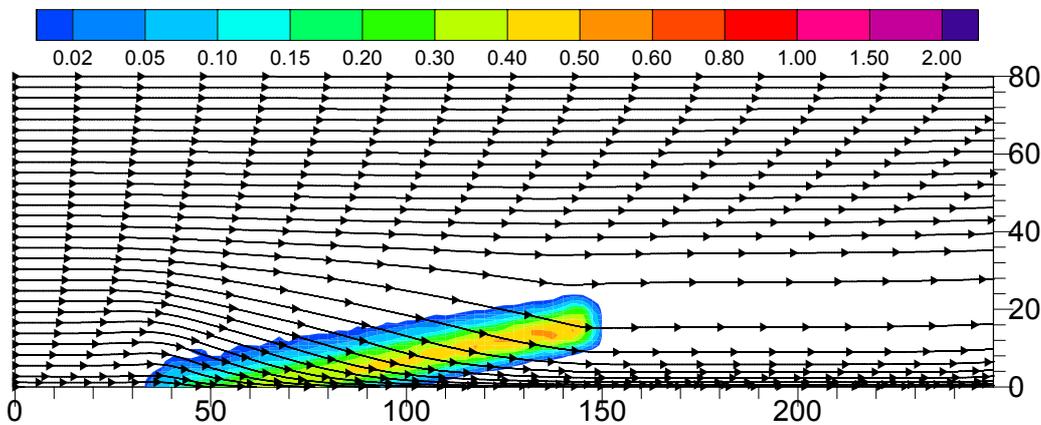


Figura 5.6 - Concentração de retardante (kg.m^{-3}) e campo de ventos no plano de simetria $Y = 0$, para $t = 3,0$ segundos. Eixos X e Z em metros.

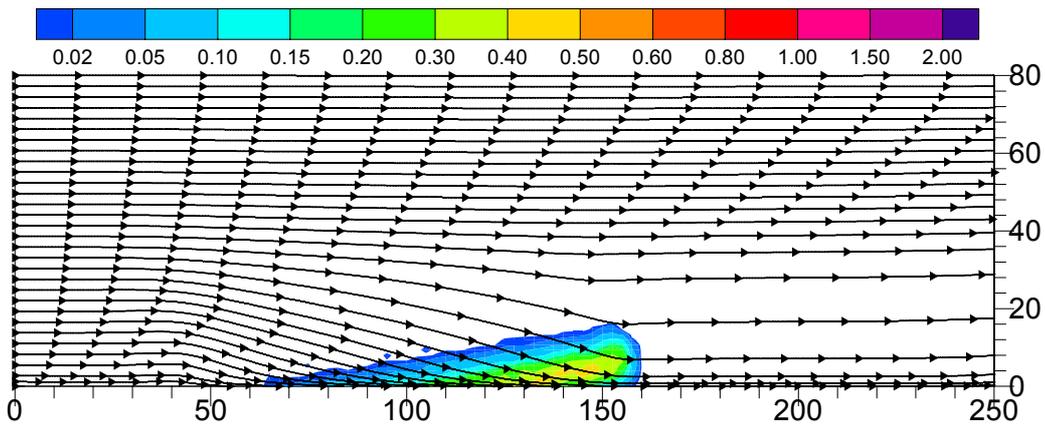


Figura 5.7 - Concentração de retardante (kg.m^{-3}) e campo de ventos no plano de simetria $Y = 0$, para $t = 4,0$ segundos. Eixos X e Z em metros.

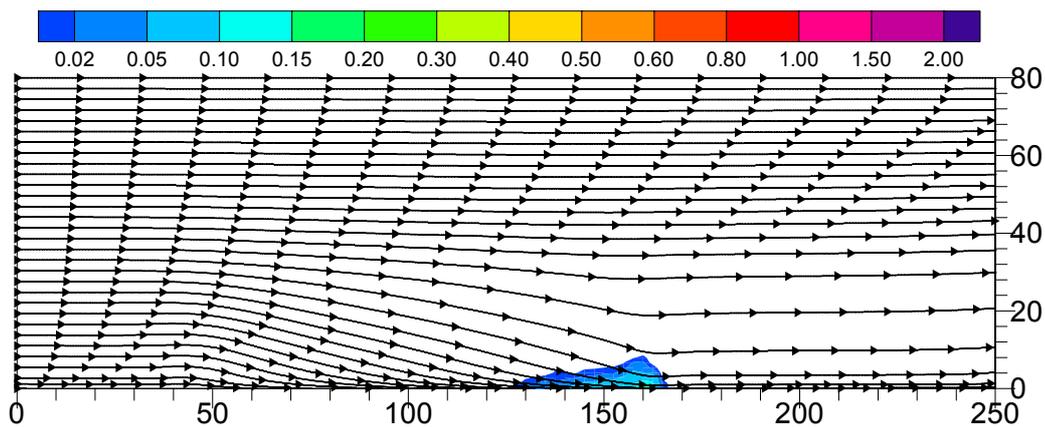


Figura 5.8 - Concentração de retardante (kg.m^{-3}) e campo de ventos no plano de simetria $Y = 0$, para $t = 5,0$ segundos. Eixos X e Z em metros.

As figuras seguintes representam, sucessivamente, a temperatura do ar, concentração de vapor de água, campo de pressão, energia cinética turbulenta (k), taxa de dissipação de energia cinética (ϵ) e viscosidade turbulenta. Todas as figuras se referem a $t = 3,0$ segundos e têm representada a malha de isosuperfície de retardante com concentração de $0,02 \text{ l.m}^{-3}$.

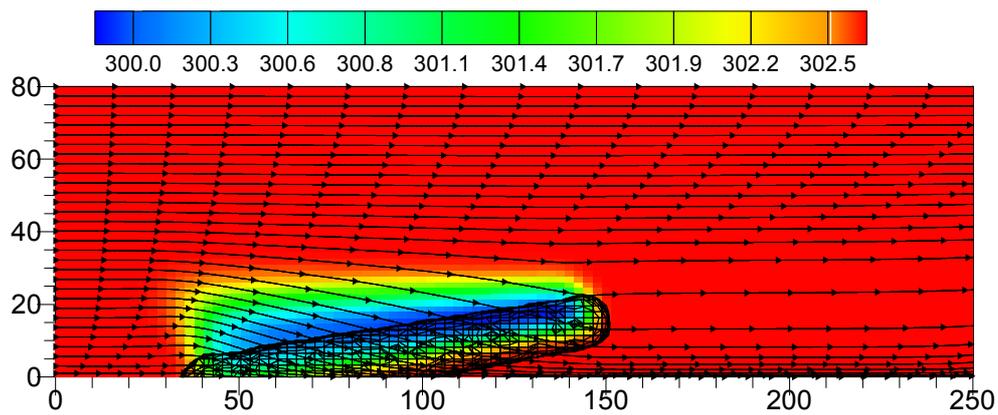


Figura 5.9 – Temperatura do ar (K) no plano de simetria para $t = 3,0$ segundos. Eixos X e Z em metros.

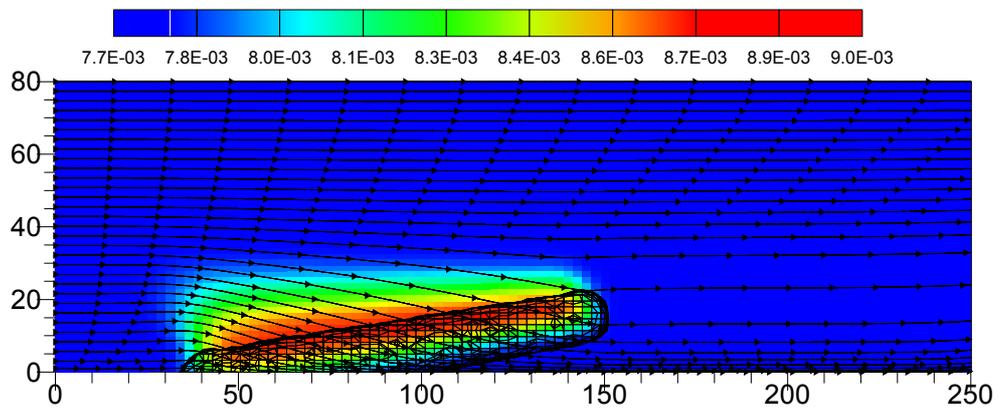


Figura 5.10 – Concentração de vapor de água ($\text{kg H}_2\text{O.Kg}^{-1}$ ar.) no plano de simetria para $t = 3,0$ segundos. Eixos X e Z em metros.

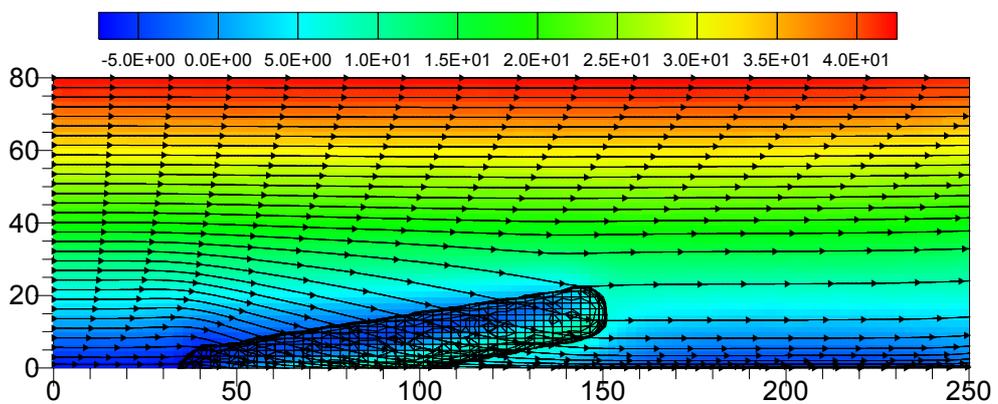


Figura 5.11 – Campo de pressão (Pa relativos a 1 atm) no plano de simetria para $t = 3,0$ segundos. Eixos X e Z em metros.

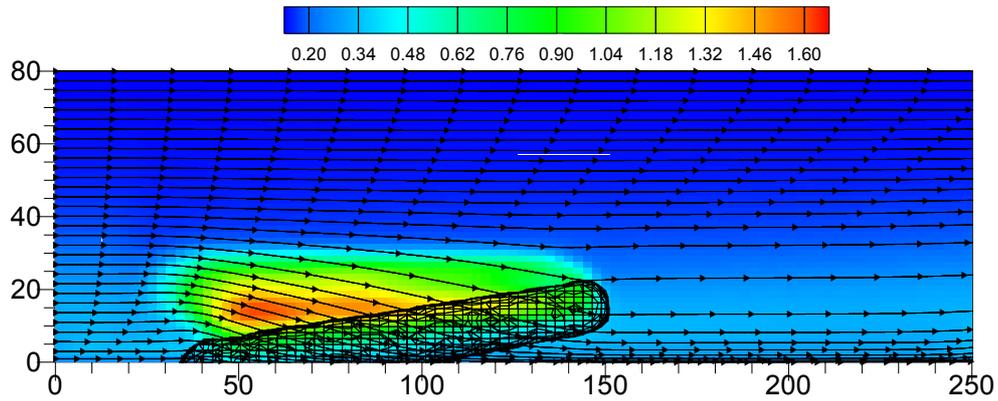


Figura 5.12 – Energia cinética turbulenta ($\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$) no plano de simetria para $t = 3,0$ segundos. Eixos X e Z em metros.

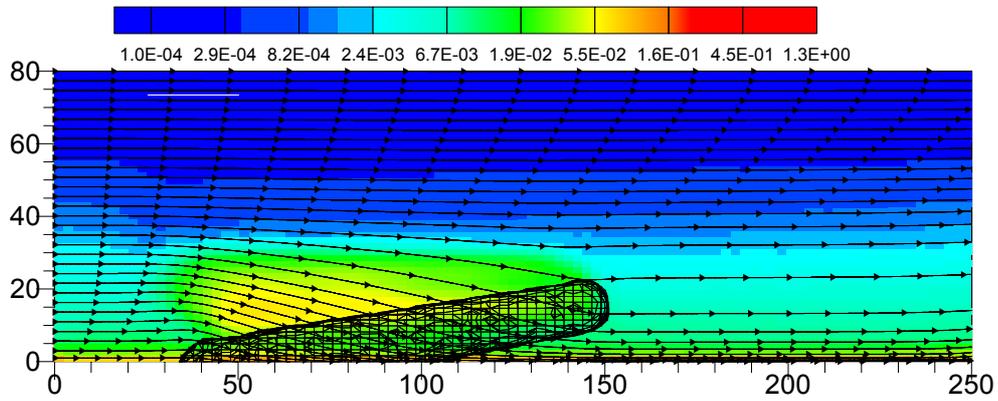


Figura 5.13 – Energia de dissipação turbulenta ($\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-3}$) no plano de simetria para $t = 3,0$ segundos. Eixos X e Z em metros.

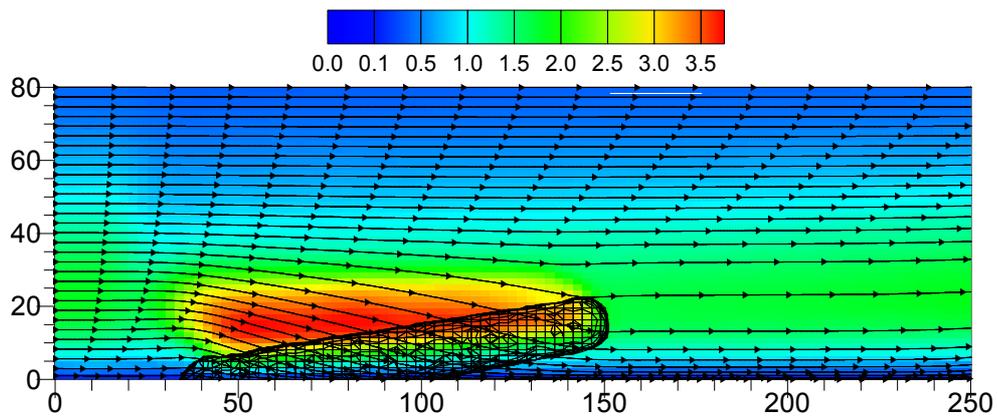


Figura 5.14 – Viscosidade turbulenta ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$) no plano de simetria para $t = 3,0$ segundos. Eixos X e Z em metros.

As Figuras anteriores revelam uma forte perturbação do escoamento atmosférico devido à queda da nuvem. Esta perturbação é notória na zona ocupada pela nuvem e especialmente na zona ligeiramente a montante da mesma. No que se refere à Temperatura, é possível observar temperaturas mínimas próximas de 300 K, ou seja, 3 K abaixo da temperatura ambiente. A humidade máxima simulada corresponde a 8,8 gramas de água por quilo de ar seco, valor significativamente acima da humidade ambiente (7,8 gramas de água por quilo de ar seco). O campo de pressão revela uma perturbação significativa na zona frontal da nuvem e um abaixamento da pressão na parte posterior da mesma. A energia cinética turbulenta atinge valores superiores a $1,5 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$ junto da nuvem, enquanto que a taxa de dissipação da mesma alcança os $1,3 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-3}$. A intensidade de turbulência, ou seja, a capacidade de mistura da nuvem pela atmosfera, avalia-se pela viscosidade turbulenta do escoamento. Valores de viscosidade de $3,5 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$, representam condições de turbulência forte, o que influencia directamente a dispersão transversal da nuvem.

As linhas de corrente apresentadas nas figuras anteriores representam o escoamento no plano $Y = 0$. Contudo, a perturbação da nuvem sobre o escoamento atmosférico é um fenómeno tridimensional. Desta forma, apresentam-se como ilustrações do escoamento 3D as duas figuras seguintes respeitantes a $t = 3,0$ segundos.

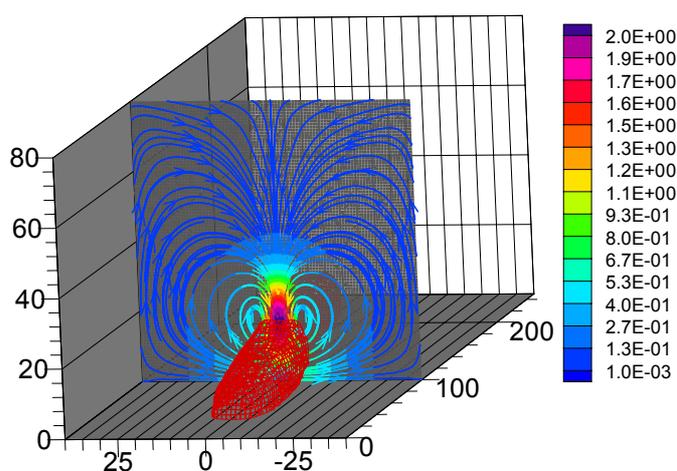


Figura 5.15– Linhas de corrente no plano transversal $X = 100 \text{ m}$ em $t = 3,0$ segundos. A escala de cores corresponde à velocidade tangente ao corte (V_z e V_y). A malha a vermelho é o invólucro da nuvem de retardante para concentrações de $0,01 \text{ l} \cdot \text{m}^{-3}$. Eixos X, Y e Z em metros.

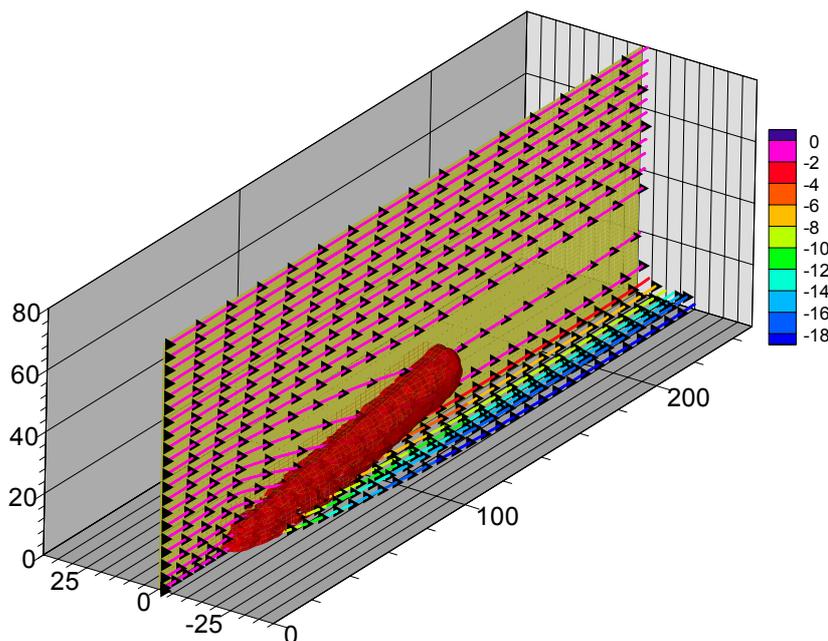


Figura 5.16 – Linhas de corrente 3D para $t = 3$ segundos, iniciadas à entrada do domínio na vertical de $y = 0$. A escala de cores é respeitante à coordenada transversal Y (em metros). O volume a vermelho corresponde ao interior da nuvem de retardante para concentrações de $0,01 \text{ l.m}^{-3}$. Eixos X, Y e Z em metros.

Por último, apresenta-se o nível de cobertura de retardante ao solo ($Z = 0$), onde se pode observar uma mancha muito uniforme e praticamente simétrica relativamente ao seu eixo longitudinal.

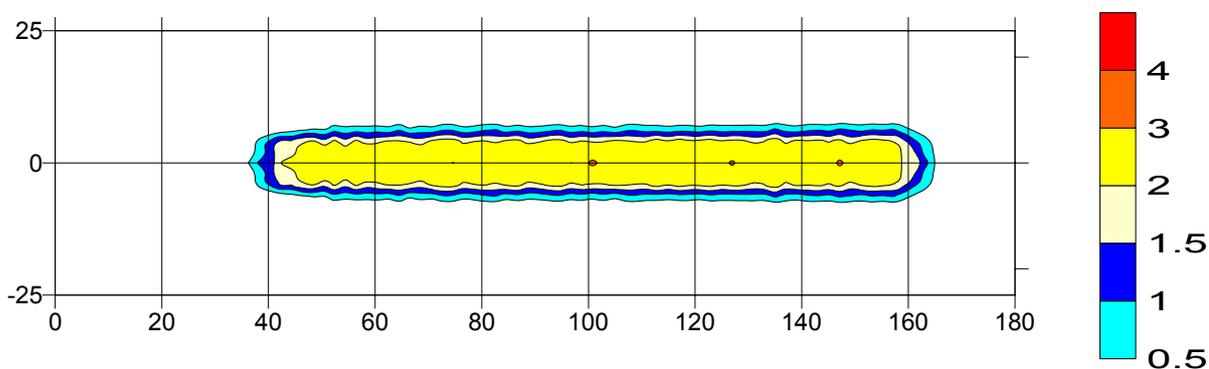


Figura 5.17 – Mancha de retardante simulada pelo FLUENT para o caso A (sistema MAFFS). Precipitação em mm e eixos X e Y em metros.

5.2.2 Resultados do caso B com o FLUENT

A concentração de retardante na atmosfera e o escoamento perturbado são apresentados nas figuras seguintes para os tempos 1, 2, 3 e 4 segundos.

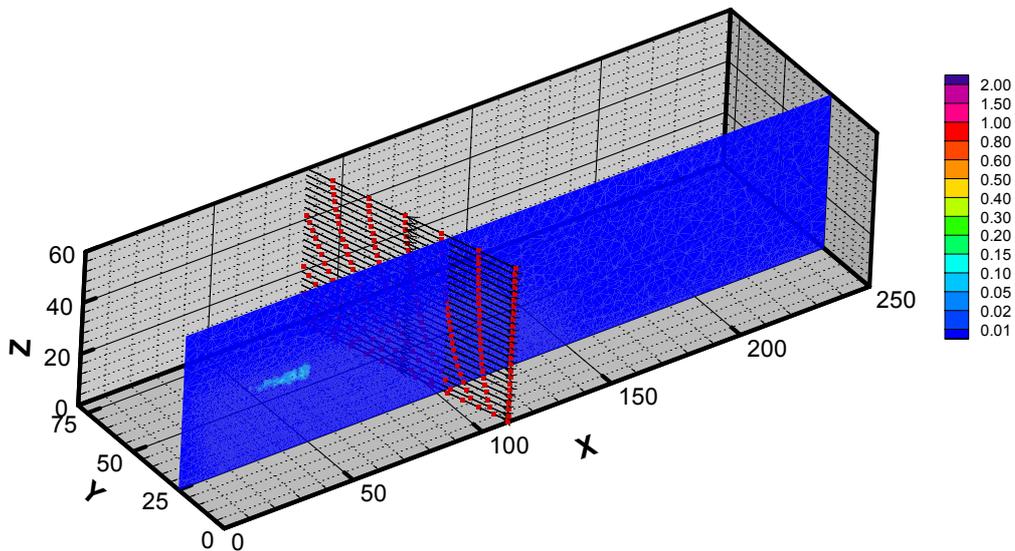


Figura 5.18 - Concentração de retardante (kg.m⁻³) no plano Y = 25m e linhas de corrente, para t = 1,0 segundo. Eixos X, Y e Z em metros.

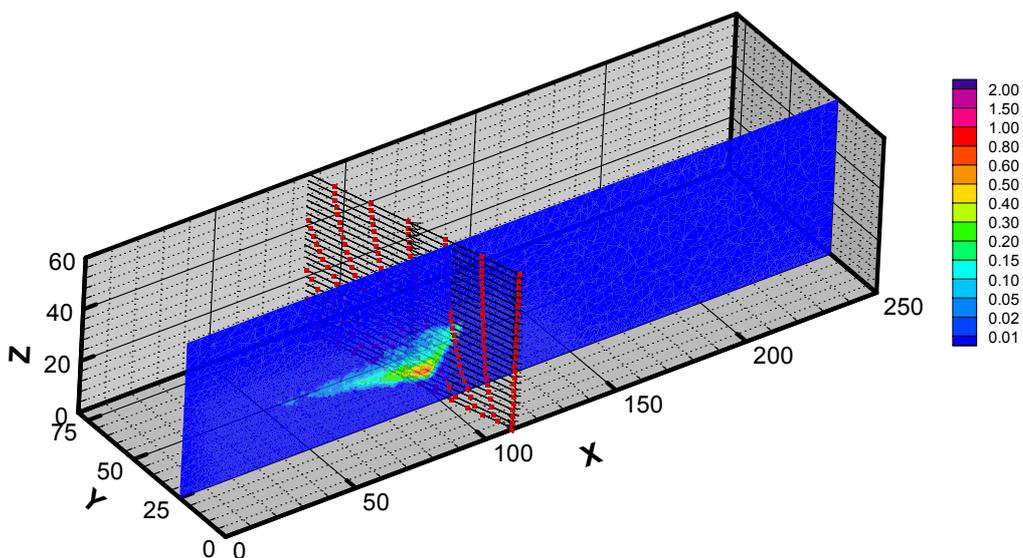


Figura 5.19 - Concentração de retardante (kg.m⁻³) no plano Y = 25m e linhas de corrente, para t = 2,0 segundos. Eixos X, Y e Z em metros.

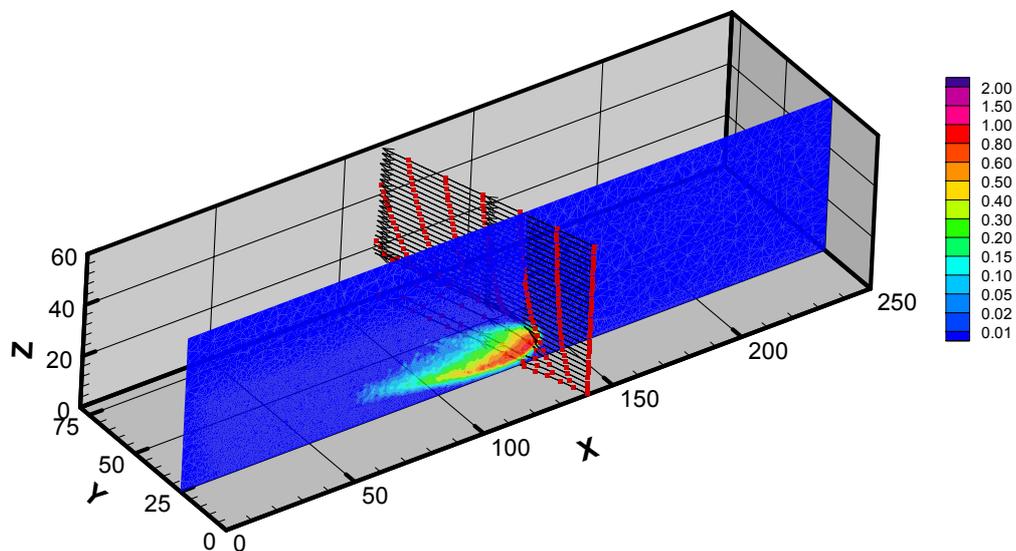


Figura 5.20 - Concentração de retardante ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$) no plano $Y = 25\text{m}$ e linhas de corrente, para $t = 3,0$ segundos. Eixos X, Y e Z em metros.

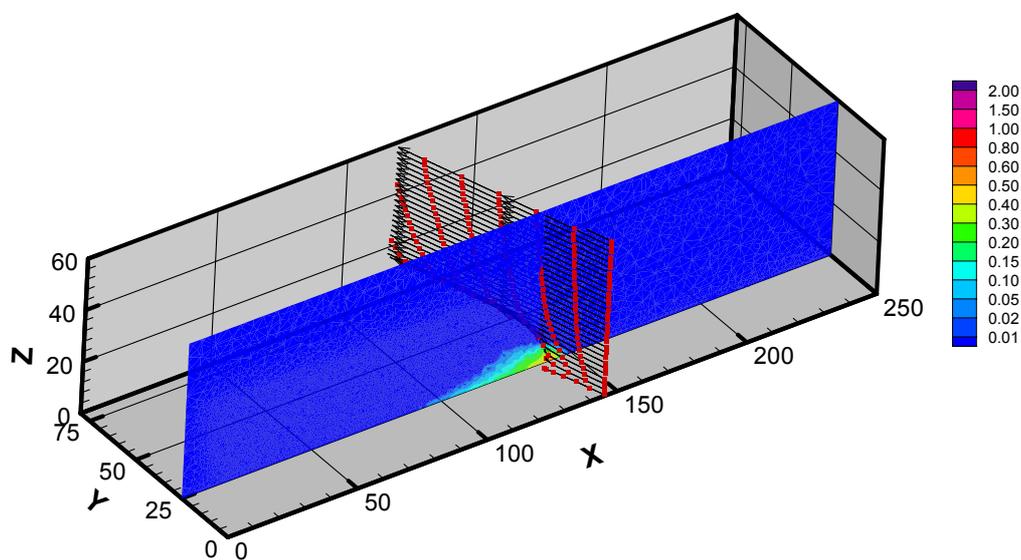


Figura 5.21 - Concentração de retardante ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$) no plano $Y = 25\text{m}$ e linhas de corrente, para $t = 4,0$ segundos. Eixos X, Y e Z em metros.

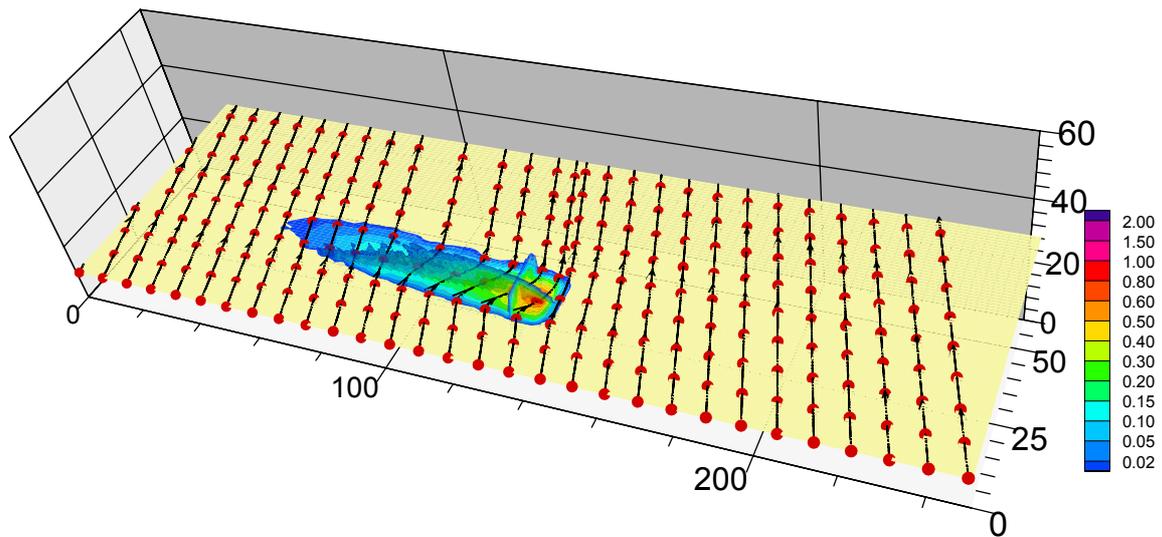


Figura 5.22– Linhas de corrente projectadas no plaxo $Z = 10$ m e concentração de retardante superior a $0,01 \text{ l.m}^{-2}$ nos planos $Z = 10\text{m}$, $Y = 25$ m e $X = 120$ m para $t = 3,0$ segundos. Eixos X, Y e Z em metros.

Na figura seguinte encontram-se representados os níveis de precipitação de retardante obtidos no solo ($Z = 0$).

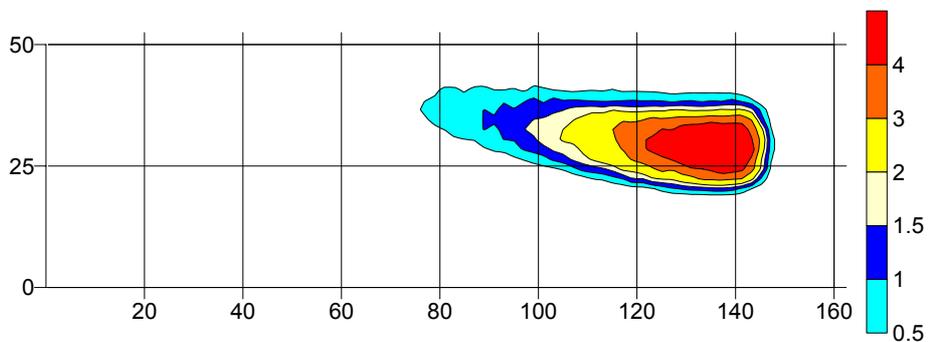


Figura 5.23 – Mancha de retardante simulada pelo FLUENT para o caso B. Precipitação em mm e eixos X e Y em metros.

É possível observar uma mancha contínua e com níveis superiores a 4 mm, capazes de abrandar o incêndio mesmo em situações de fogo intenso.

5.2.3 Resultados do caso A com o RAM

A figura seguinte representa a mancha de retardante aplicada por um sistema MAFFS, após 2 segundos do início da largada do retardante. Nas diversas figuras que se seguem, o avião apresentado serve apenas para ilustração, não tendo sido calculado o escoamento à sua volta.

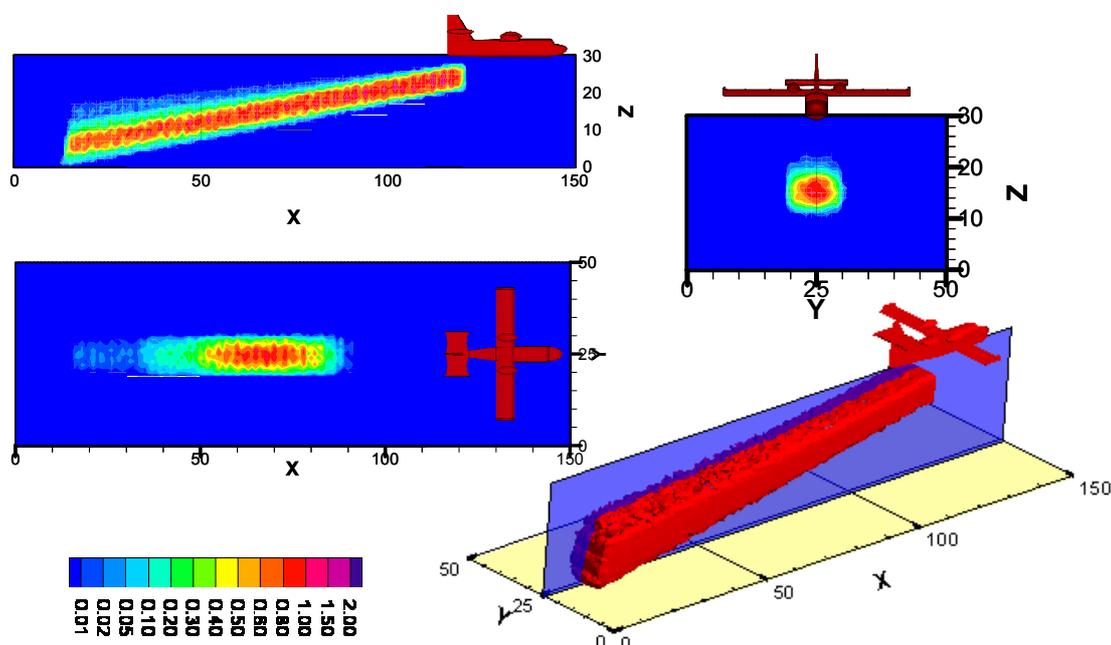


Figura 5.24 – Nuvem de retardante do sistema MAFFS, dois segundos após o início da descarga. A escala de cores é relativa à concentração de retardante na atmosfera em $l.m^{-3}$. Cortes apresentados em $X = 70m$; $Y = 25 m$; $Z = 15m$. Eixos X, Y e Z em metros.

Os níveis de precipitação da mancha de retardante simulada encontram-se representados na figura seguinte.

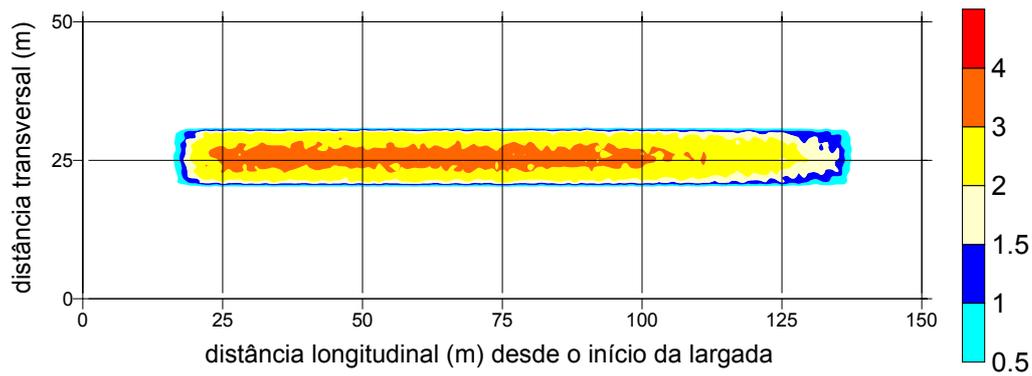


Figura 5.25 - Mancha de retardante simulada pelo RAM para o caso A (sistema MAFFS). Precipitação em mm e eixos X e Y em metros.

5.2.4 Resultados do caso B com o RAM

A simulação do caso B com o modelo RAM, encontra-se representada nas figuras seguintes. Estas traduzem a evolução temporal da nuvem durante os primeiros 4 s.

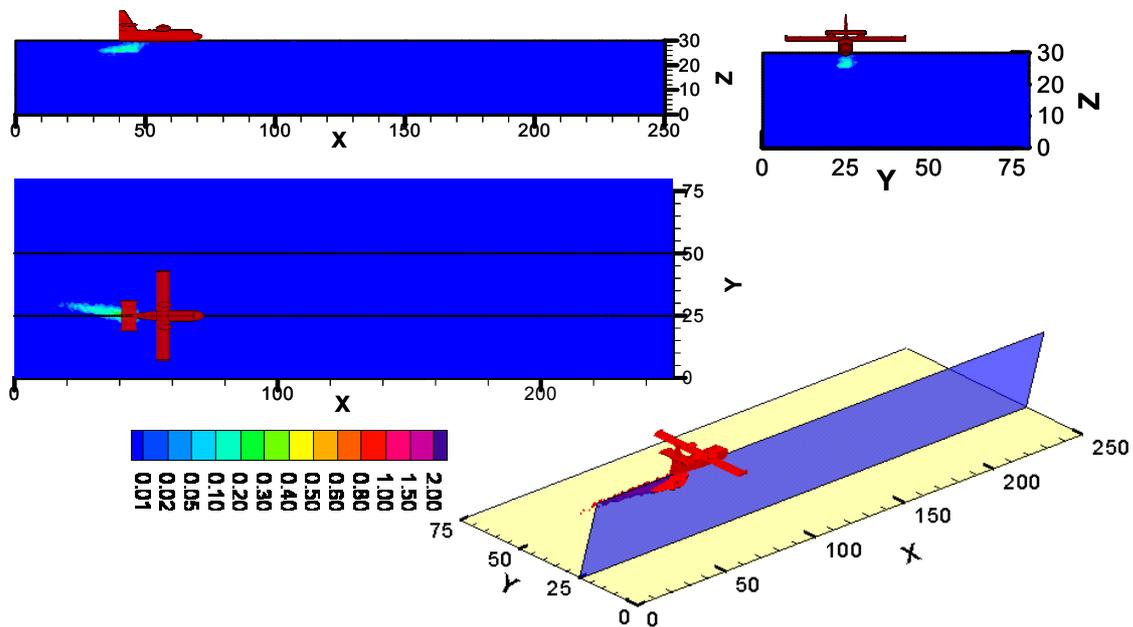


Figura 5.26 – Nuvem de retardante do caso B, um segundo após o início da descarga. A escala de cores é relativa à concentração de retardante na atmosfera em $l.m^{-3}$. Cortes apresentados em $X = 45\text{ m}$; $Y = 25\text{ m}$; $Z = 26\text{ m}$. Eixos X, Y e Z em metros.

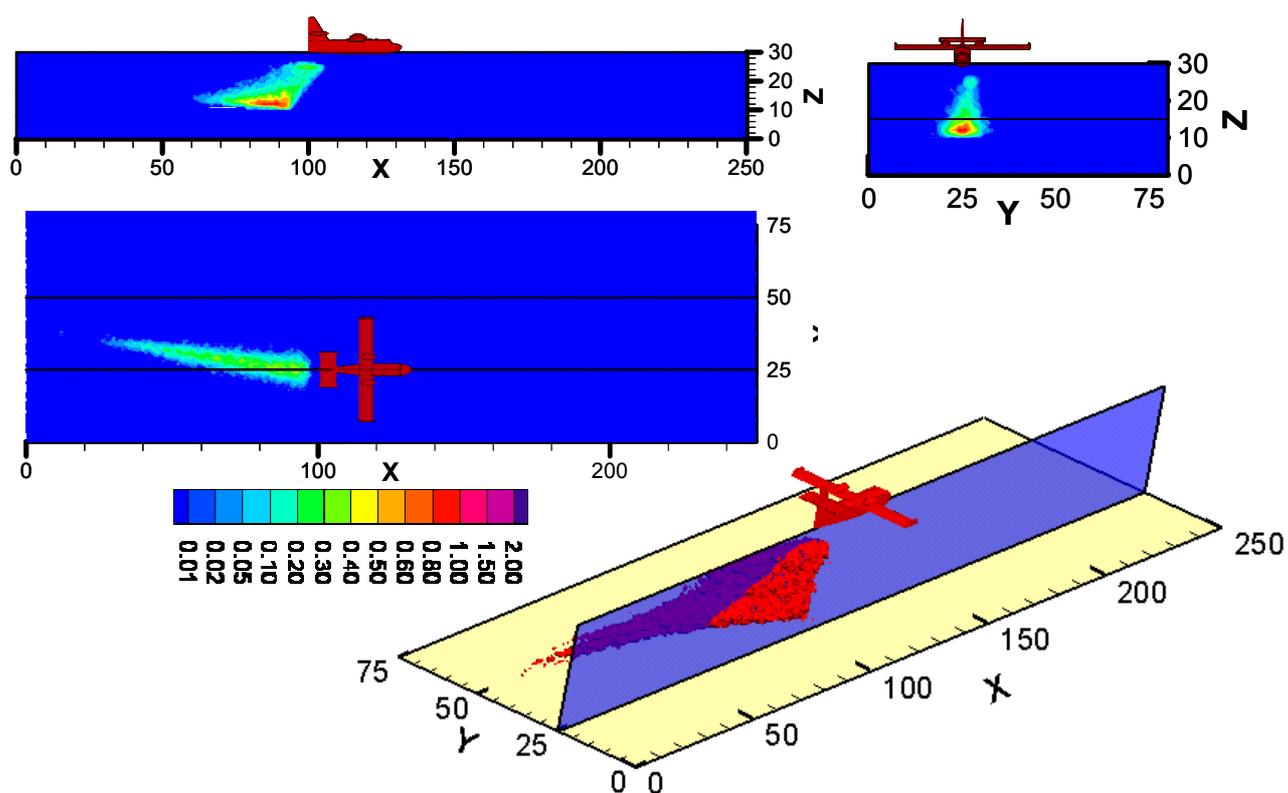


Figura 5.27 - Nuvem de retardante do caso B, dois segundos após o início da descarga. A escala de cores é relativa à concentração de retardante na atmosfera em $l.m^{-3}$. Cortes apresentados em $X = 90$ m; $Y = 25$ m; $Z = 15$ m. Eixos X, Y e Z em metros.

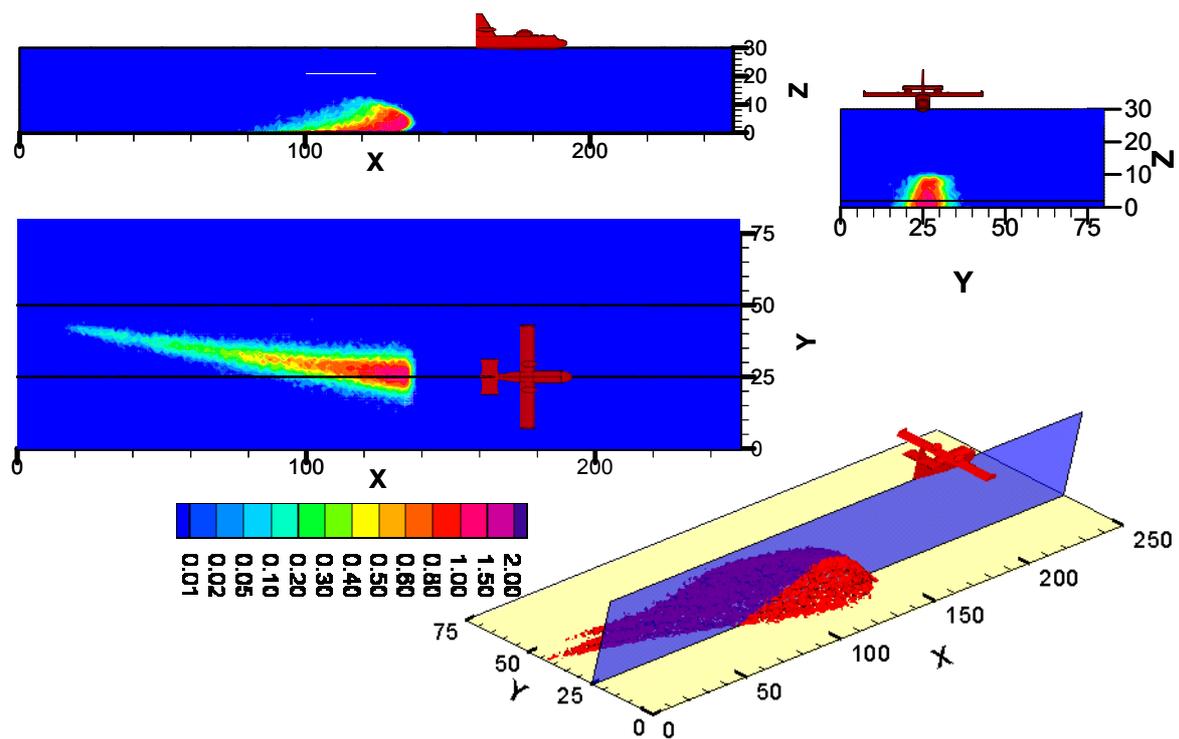


Figura 5.28 - Nuvem de retardante do caso B, três segundos após o início da descarga. A escala de cores é relativa à concentração de retardante na atmosfera em $l.m^{-3}$. Cortes apresentados em $X = 130$ m; $Y = 25$ m; $Z = 2$ m. Eixos X, Y e Z em metros.

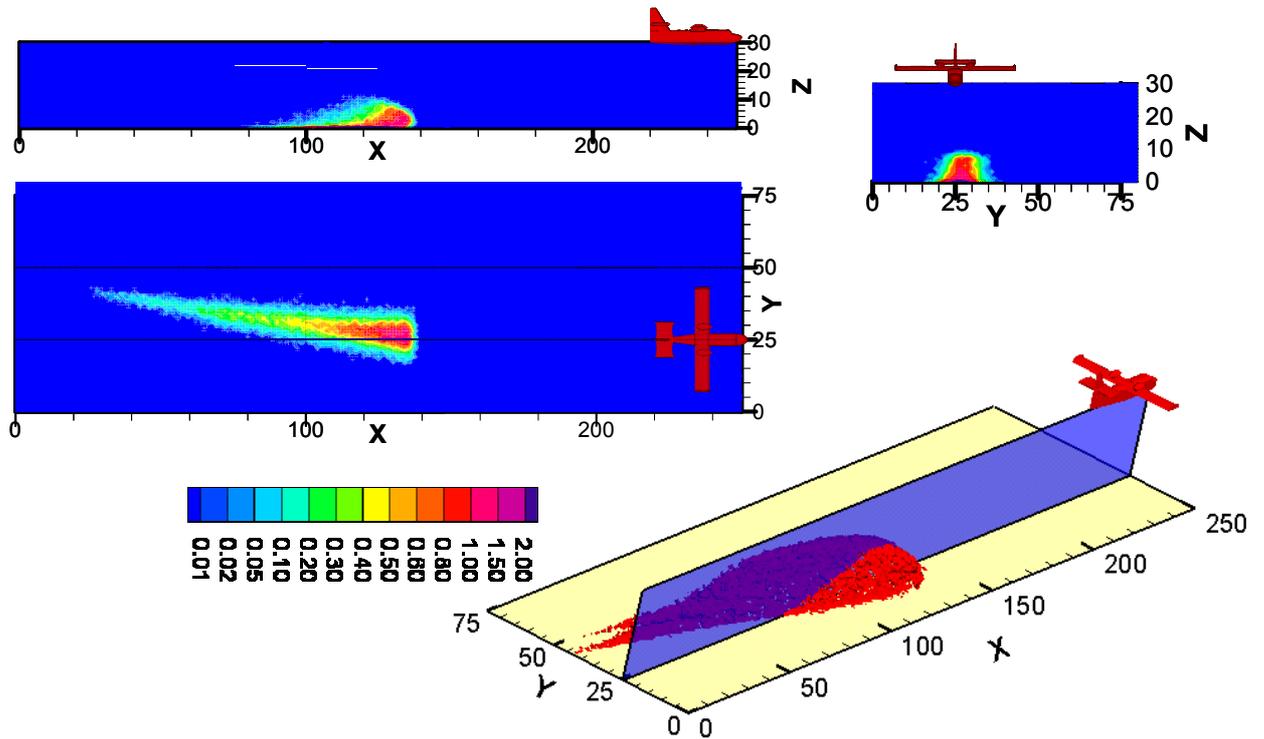


Figura 5.29 - Nuvem de retardante do caso B, quatro segundos após o início da descarga. A escala de cores é relativa à concentração de retardante na atmosfera em $l.m^{-3}$. Cortes apresentados em $X = 130$ m; $Y = 25$ m; $Z = 2$ m. Eixos X, Y e Z em metros.

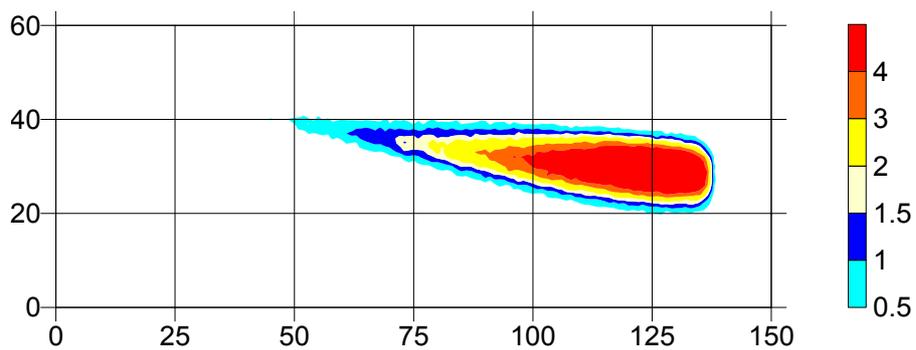


Figura 5.30 – Mancha de retardante ao solo, simulada com o RAM para o caso B. (precipitação em mm e eixos X e Y em metros).

A mancha simulada revela o efeito do vento lateral, “distorcendo” o eixo de simetria em relação à trajetória do avião ($X=25\text{m}$) que existiria no caso ideal de ausência deste fenómeno meteorológico.

5.3 Comparação dos resultados da modelação com as medições

O caso A é um caso ideal, pelo que não existem dados experimentais disponíveis para avaliar a performance das simulações correspondentes. É, no entanto, importante comparar os resultados simulados com os dois modelos numéricos usados. As próximas figuras confrontam os resultados anteriormente apresentados.

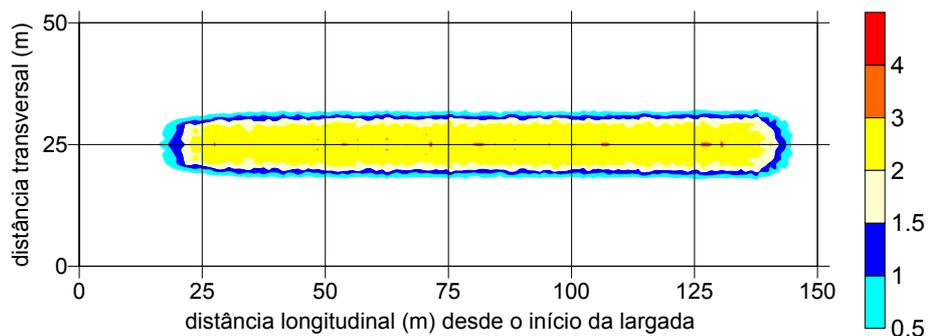


Figura 5.31 – Mancha de retardante simulada pelo FLUENT para o caso A. Precipitação em mm. Eixos X e Y em metros.

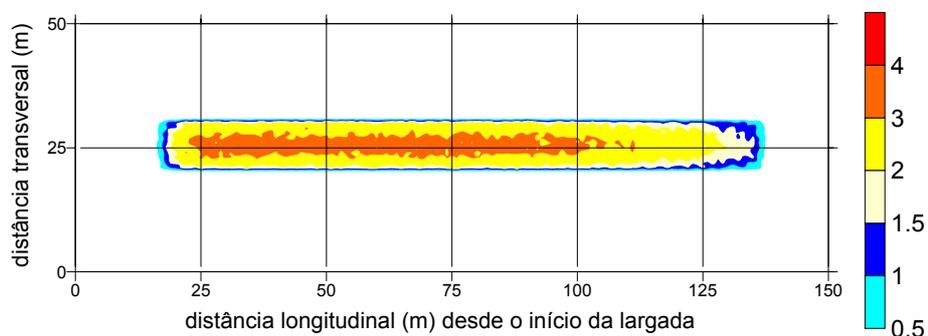


Figura 5.32 - Mancha de retardante simulada pelo RAM para o caso A. Precipitação em mm e eixos X e Y em metros.

É de notar que a Figura 5.31 não coincide com a Figura 5.17, apenas porque se deslocou a mancha 20 metros para a esquerda de forma a fazer coincidir o zero do eixo com o início da largada do retardante. Relativamente à Figura 5.32, não é necessária qualquer mudança de referencial, uma vez que o modelo RAM simulou este caso com a largada do retardante a ser iniciada já em $X = 0$. A comparação destas duas figuras permite concluir que ambos os modelos simulam manchas semelhantes, observando-se, contudo, as seguintes pequenas diferenças: (i) a mancha simulada pelo FLUENT apresenta-se ligeiramente mais deslocada para a direita e (ii) o FLUENT simula uma maior dispersão (transversal) do retardante, devido ao cálculo *two ways*. Este último produz um campo de ventos instacionário e variável no espaço 3D e, conseqüentemente, uma maior dispersão. Em qualquer das simulações, a dispersão lateral é realista para sistemas MAFFS que apliquem retardante em condições de ausência total de vento lateral. Na prática, existirá sempre algum vento lateral, pelo que a mancha de retardante tenderá a ser mais “alargada” e menos concentrada. Para se obterem níveis de cobertura superiores a 2 ou 3 mm, o caudal de retardante à saída do avião deverá ser superior (mantendo a velocidade do avião). Embora os valores do FLUENT sejam mais fiáveis, a diferença entre os resultados dos dois modelos será inferior às incertezas associadas aos valores dos parâmetros operacionais. Assim, é provável que pequenos erros inerentes às simplificações do modelo RAM se encontrem diluídos e sejam desprezáveis face a “erros” superiores no diagnóstico/quantificação dos parâmetros operacionais. Em suma, os erros de modelação, mesmo com o RAM, poderão ser inferiores aos erros dos *inputs*. A questão da aceitação do modelo RAM é relevante, uma vez que este é significativamente mais “barato” em termos computacionais. Uma simulação com o RAM, num vulgar computador pessoal, é efectuada em alguns minutos, enquanto que, para a mesma simulação e usando o mesmo *hardware*, o FLUENT requer dois dias de processamento numérico.

No que se refere à simulação do caso B, existem resultados experimentais de Marselha que permitem avaliar o desempenho dos dois modelos. As figuras seguintes representam as manchas de retardante medidas e simuladas.

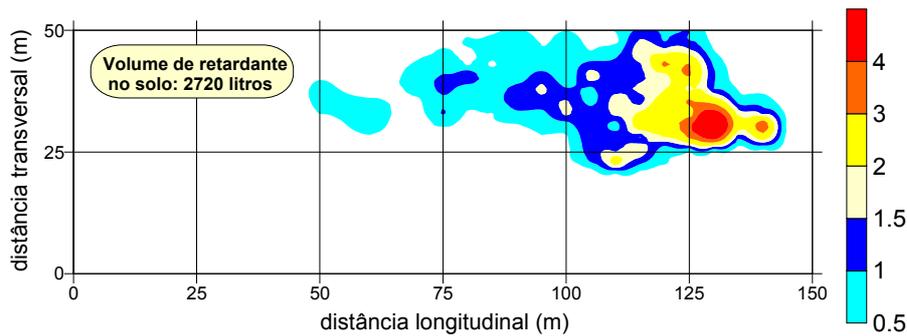


Figura 5.33 - Níveis de precipitação da mancha de retardante na largada n.º 16 (Figura 3.28). Precipitação em mm e eixos X e Y em metros.

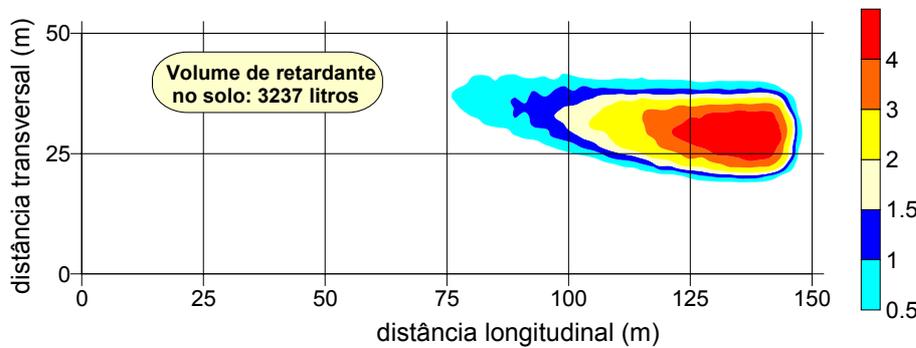


Figura 5.34 – Simulação do caso B com o FLUENT. Precipitação em mm e eixos X e Y em metros.

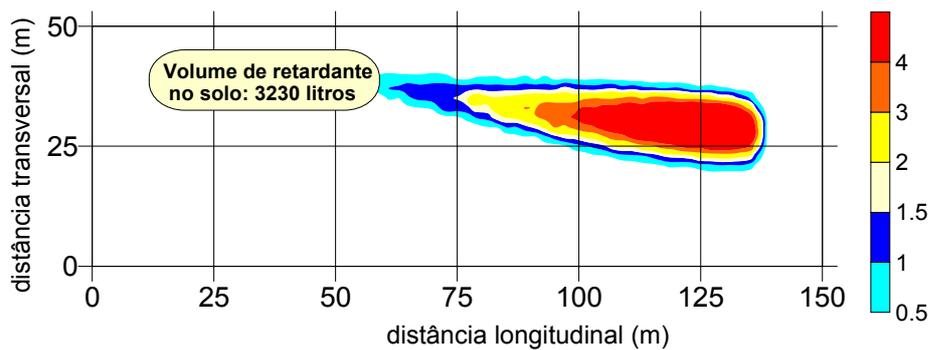


Figura 5.35 - Simulação do caso B com o RAM. Precipitação em mm e eixos X e Y em metros.

As figuras anteriores permitem constatar que ambos os modelos simulam manchas mais estreitas do que a mancha medida durante os ensaios experimentais. Este facto pode corresponder a uma limitação dos modelos, mas é também possível que o erro seja proveniente do módulo de atomização que subavalia a dispersão originada na atomização

do retardante bruto. As manchas modeladas sobreavaliam a quantidade de retardante recuperado ao nível do solo, facto que poderá ser explicado pela distribuição granulométrica das gotas usada nas simulações. Apenas se consideraram gotas com diâmetros superiores a 1 mm, existindo na realidade gotas de menores dimensões, as quais possuem maiores taxas de evaporação. Durante a fase de atomização ocorrem perdas de líquido, mas este fenómeno não é calculado nas simulações. Atendendo à complexidade dos fenómenos envolvidos e apesar das limitações verificadas, os resultados obtidos nas simulações consideram-se satisfatórios. Quanto ao volume de retardante obtido ao nível do solo, verifica-se que ambos os modelos prevêem um quantidades superiores ao real em cerca de 600 litros, o que corresponde a um erro de aproximadamente 20% por excesso. Este facto deve-se simultaneamente a três razões: (i) a distribuição de tamanhos de gotas usada apenas contabiliza gotas com tamanhos superiores a 1 mm, enquanto que na realidade existem gotas sub milimétricas que sofrem maiores taxas de evaporação e são mais influenciadas pelo vento; (ii) a fase da atomização é responsável por perdas de retardante devido à formação de gotas micrométricas que são quase instantaneamente evaporadas; (iii) as medições efectuadas em Marselha não contabilizaram as zonas com menores níveis de precipitação, o que corresponde a um erro por defeito na quantificação do retardante depositado ao nível do solo.

A tabela seguinte apresenta a área e o comprimento de cada mancha, associados a diferentes níveis de cobertura. Estes dois parâmetros caracterizam a eficácia da mancha de retardante no combate aos incêndios. Conhecido o nível de cobertura para fazer frente ao fogo, pode-se determinar o comprimento útil da mancha nesse caso concreto. Suponha-se que se pretende combater um incêndio sobre um combustível do grupo K, de acordo com a classificação de NFDRS (1978). Atendendo à Tabela 2.1, verifica-se que é necessário um nível de retardante de 1,22 mm. Considerando, em vez de 1,22 mm, o valor de 1,5 mm, é fácil constatar, pela Tabela 5.3, que a mancha experimental de Marselha (Figura 5.33) produz um comprimento útil de barreira ao fogo com 33,9 metros. Neste caso, tanto os níveis de retardante inferiores como superiores correspondem a desperdícios de produto. Precipitações inferiores ao valor de referência (1,5 mm) não seriam suficientes para travar o fogo, enquanto que níveis superiores retardariam o fogo, mas com excesso de retardante. A situação ideal, que maximizaria a eficiência do produto, seria uma mancha homogénea

de retardante com $P = \text{const.} = 1,5 \text{ mm}$, ou mais exactamente $P = 1,22 \text{ mm}$. Note-se que esta análise se encontra simplificada, pois a largura da nuvem de retardante também influencia a eficiência da mancha. Contudo, a informação bibliográfica sobre a largura mínima da mancha é praticamente inexistente, sobretudo para combustíveis mais altos (fogos de copas).

Tabela 5.3– Comparação numérica das manchas de retardante simuladas com a mancha obtida nos ensaios experimentais em Marselha.

Nível de precipitação (mm) $P_{\min} < P < P_{\max}$	Marselha		FLUENT		RAM	
	Área da mancha (m ²)	Comprimento da mancha associado à $P > P_{\min}$ (m)	Área da mancha (m ²)	Comprimento da mancha associado à precipitação (m)	Área da mancha (m ²)	Comprimento da mancha associado à precipitação (m)
0,1<P<0,5	798	-	1096	-	1189	-
0,5<P<1,0	696	78,6	188	69,6	126	80,4
1,0<P<1,5	200	57,1	79	58,9	55	76,8
1,5,1<P<2,0	101	33,9	53	50,0	36	62,5
2,0<P<3,0	50	21,4	26	41,1	27	60,7
3,0<P<4,0	47	10,7	55	28,6	39	44,6
P>4,0	9	7,1	32	21,4	28	39,3

Os valores da tabela anterior encontram-se representados graficamente para possibilitar uma melhor comparação dos valores obtidos. A Figura 5.36 corresponde ao gráfico das áreas das três manchas associadas a cada nível de precipitação. Repare que o eixo vertical está em escala logarítmica.

No que concerne às áreas de retardante associadas às diferentes precipitações, verifica-se que no primeiro intervalo de precipitação ($0,5 < P \text{ (mm)} < 1,0$) a mancha experimental apresenta a maior superfície. No segundo e terceiro intervalos considerados ($1,0 < P \text{ (mm)} < 1,5$ e $1,5 < P \text{ (mm)} < 2,0$), a mancha medida continua a apresentar a maior área de cobertura. No entanto, para precipitações superiores a 3,0 mm, as manchas simuladas exibem extensões superiores às medidas em Marselha. As simulações prevêm maior volume de retardante ao nível do solo do que o observado, o que indica que a evaporação modelada encontra-se subavaliada. Tendo em conta a largura das manchas, verifica-se que

a dispersão lateral é também subavaliada por ambos os modelos, o que leva a um aumento dos níveis de precipitação no seu centro longitudinal.

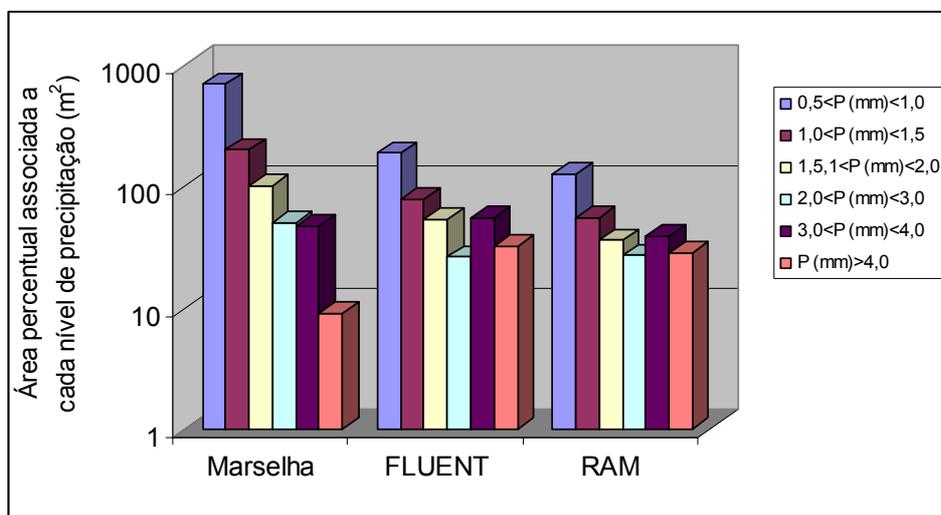


Figura 5.36- Áreas cobertas com retardante e associadas a diferentes níveis de precipitação.

A Figura 5.37 apresenta os comprimentos de mancha associados aos diferentes níveis mínimos de precipitação. Verifica-se que os valores de comprimento útil das três manchas são relativamente concordantes, verificando-se que as diferenças mais notórias correspondem às precipitações mais elevadas. Ambos os modelos prevêem por excesso o comprimento dos níveis mais elevado de retardante, mais concretamente acima dos 1,5 mm. As hipóteses relativas à evaporação e à dispersão lateral usadas para explicar os valores das áreas das manchas da Figura 5.36, servem também para explicar, em parte, as diferenças existentes entre a medição e as simulações dos comprimentos das manchas associadas a diferentes níveis de precipitação.

Em termos da avaliação quantitativa do desempenho dos modelos pela comparação das manchas, é difícil conseguir uma metodologia estatística ou outra que caracterize esse mesmo desempenho num só número, sob pena de se perder informação relevante. Tendo

em conta o processo em modelação, são admissíveis e espectáveis erros na ordem dos 10 a 20 %, em média. Os valores apresentados estão em consonância com esta margem de erro.

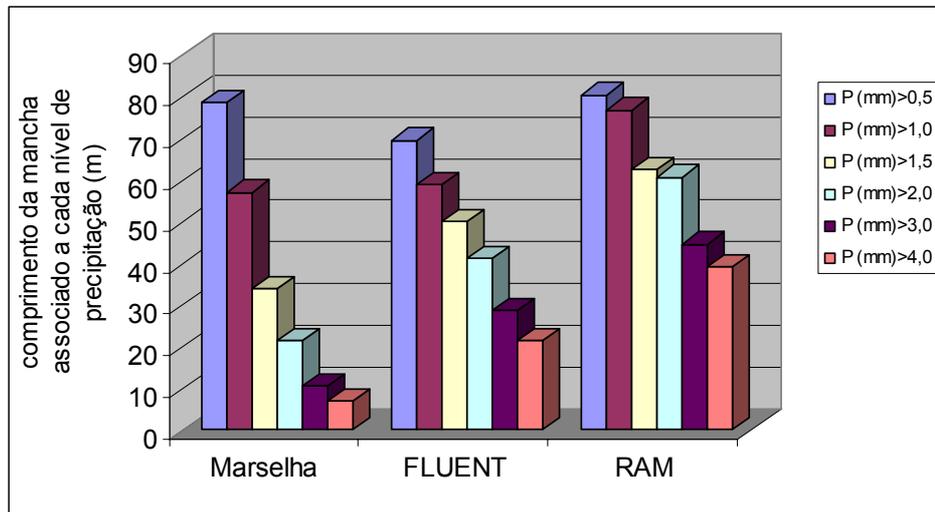


Figura 5.37 - Comprimento da mancha de retardante associado a cada nível de precipitação.

Outra forma de avaliar a performance dos modelos é pela comparação visual da evolução temporal da nuvem de retardante. As Figuras seguintes possibilitam essa comparação com as simulações efectuadas pelo FLUENT para o caso B. O mesmo pode ser realizado para o modelo RAM.

Esta comparação é apenas visual e não tem uma quantificação de semelhança associada, uma vez que existem algumas dificuldades e complexidades inerentes. Desde logo, a visualização da nuvem corresponde a uma integração ao longo da direcção paralela à visão, sendo difícil associar uma fronteira com o respectivo nível de concentração de retardante.

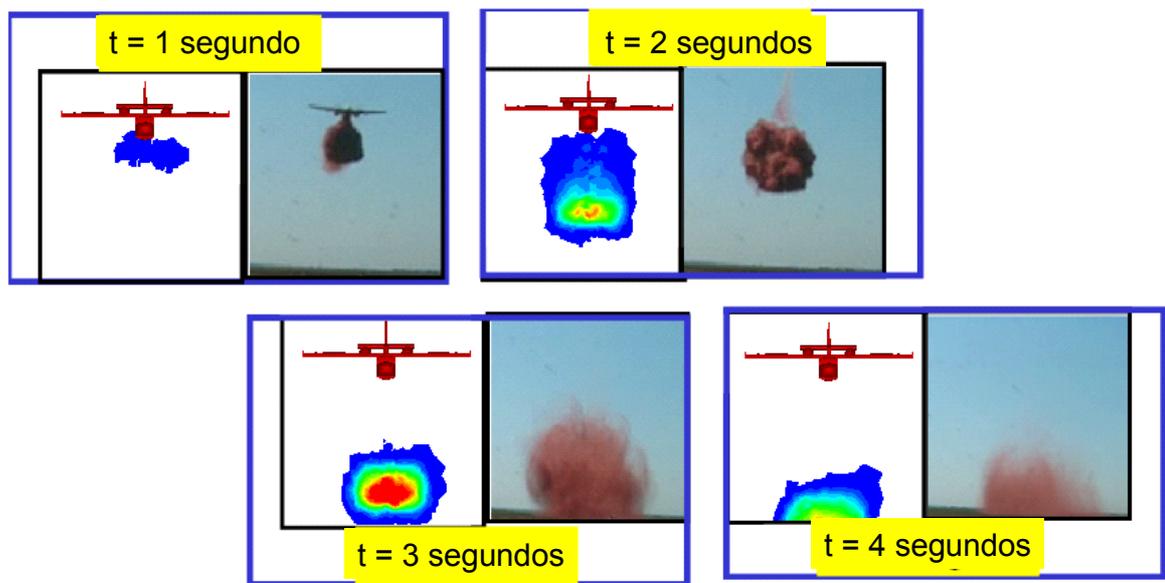


Figura 5.38 Vista frontal da nuvem de retardante para t = 1 s, 2 s, 3 s e 4 segundos. Simulações com o FLUENT e fotografias dos ensaios em Marselha.

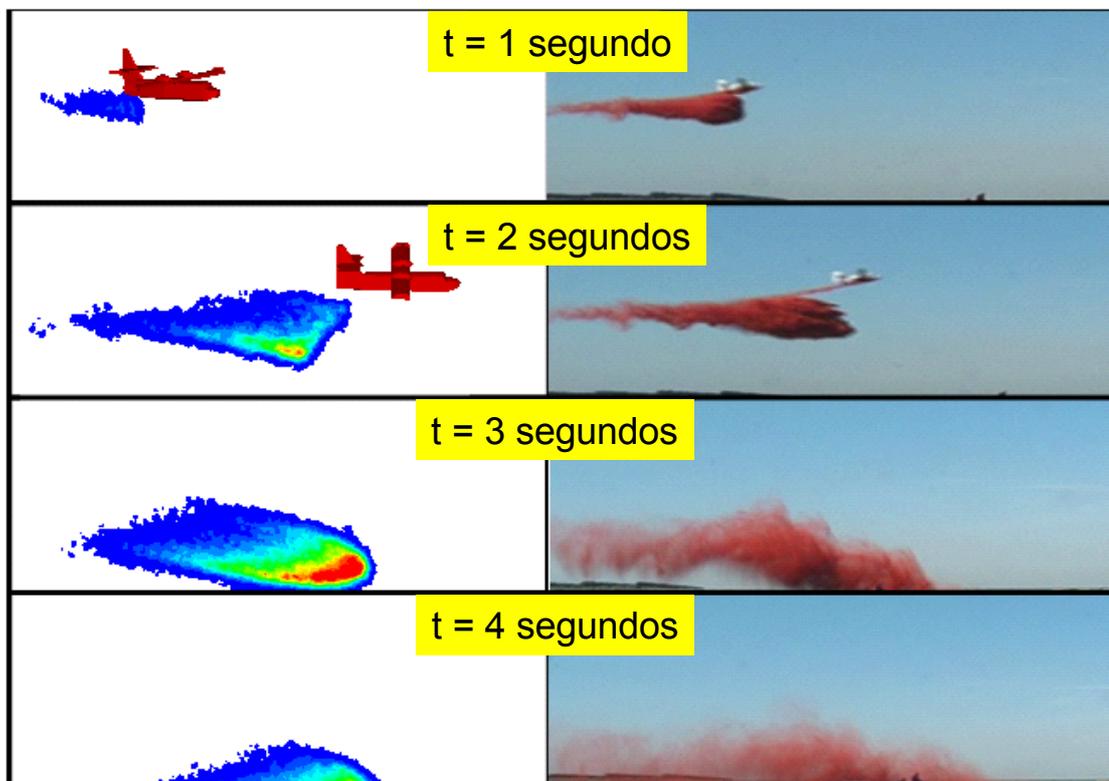


Figura 5.39 - Vista lateral da nuvem de retardante para t = 1 s, 2 s, 3 s e 4 segundos. Simulações com o FLUENT e fotografias dos ensaios em Marselha.

As figuras simuladas correspondem a concentrações de retardante superiores a 0.001 l.m^{-3} . Também não foram registados os tempos associados às fotografias da nuvem durante os ensaios experimentais. Há ainda o facto de o ponto de observação da câmara de vídeo não ser o mesmo que o das simulações. Apesar de reconhecer a importância de todos os aspectos referidos acima, é possível verificar, visualmente, um bom desempenho das simulações. O uso da recolha e tratamento de imagens enquanto ferramenta de validação dos modelos exige uma metodologia formal e técnica própria. Este tipo de validação de simulações é recomendável em ensaios experimentais futuros.

5.4 Notas finais

Com base em diversas simulações realizadas e após trabalho de validação com base nos ensaios experimentais de Marselha, é possível constatar a interacção de influências entre diversos parâmetros operacionais. Nem todas as simulações efectuadas se encontram apresentadas na Tese. De facto, foram realizadas outras simulações destinadas a estudar o efeito de outros parâmetros operacionais no comportamento da nuvem e na mancha de retardante. São exemplos destes parâmetros o caudal, a distribuição granulométrica e a altura da largada. Embora o trabalho realizado não corresponda a um número exaustivo de simulações e validações, é possível a realização de uma síntese das principais tendências observadas. As principais conclusões da análise de simulações e resultados experimentais, encontram-se na Tabela 5.4.

O parâmetro operacional mais importante no condicionamento da mancha de retardante é o caudal libertado por unidade de deslocação do avião. Em segundo lugar surgem diversos factores com a mesma ordem de importância, nomeadamente a altura de largada, as propriedades físicas do fluido, condicionando o tamanho de gotas e a intensidade do vento lateral. Em terceiro lugar contam-se os factores menos importantes como a temperatura do ar e a humidade atmosférica, além da estabilidade atmosférica e velocidade do vento longitudinal. A quantificação destes parâmetros é difícil de efectuar porque o efeito de uma

variável pode estar associado a outras, podendo existir relações de sinergias (ampliação) ou de antagonismos.

Tabela 5.4 – Síntese dos principais efeitos e das inter-relações dos parâmetros operacionais

Parâmetro	Efeito	Parâmetros operacionais sinérgicos
Maior intensidade de vento lateral	- Aumento da dispersão e translação da nuvem.	- Maior altura da largada - Menor diâmetro das gotas (menor viscosidade e elasticidade) - Maior amplitude granulométrica das gotas
Maior temperatura do ar e/ou menor humidade atmosférica	- Aumento na taxa de evaporação.	- Maior altura da largada - Menor diâmetro das gotas (menores viscosidade e elasticidade)
Maior altura de largada	- Aumento na taxa de evaporação. - Aumento da dispersão e translação da nuvem.	- Maior temperatura do ar e/ou menor humidade atmosférica. - Maior intensidade de vento lateral
Maior velocidade do avião	- Aumento da dispersão e translação da nuvem.	- Maior altura de largada
Maior elasticidade/viscosidade	- Maiores gotas produzidas	- Menor velocidade do avião

6

CONCLUSÕES

Com o objectivo de avaliar o êxito da aplicação aérea de retardantes químicos, desenvolveram-se metodologias para modelar a nuvem destes produtos. As simulações fazem uso das variáveis operacionais (*inputs*) associadas à utilização de meios aéreos, permitindo inferir acerca da sua influência sobre a mancha de retardante obtida ao solo. Efectivamente, existe uma mancha óptima que maximiza a diminuição da progressão da frente de fogo, para um dado volume de retardante disponível no aerotanque. A determinação desta mancha óptima é difícil de definir, não tendo constituído parte do âmbito directo da tese. O objectivo último do presente trabalho é estudar e compreender a dinâmica da nuvem de retardante. A partir do conhecimento dos fenómenos físicos associados à nuvem, usou-se a modelação como ferramenta útil à indicação de valores de variáveis operacionais de forma a produzir a mancha óptima. No estudo realizado teve-se a preocupação de não desprezar condicionalismos e limitações existentes, nomeadamente as questões referentes à segurança dos pilotos e pessoas em terra. Nesta questão, assume especial importância o parâmetro altura de voo, não se recomendando largadas a alturas inferiores a trinta metros para caudais de retardante da ordem dos 3000 litros por segundo. Esta altura mínima relaciona-se com o percurso vertical do retardante durante a sua atomização.

Facilmente foram identificadas as variáveis de estudo e criteriosamente agrupadas em duas classes:

Variáveis operacionais controláveis – Altura e velocidade do avião, caudal de descarga do retardante e geometria das comportas e propriedades físicas do retardante (viscosidade, elasticidade e tensão superficial).

Variáveis operacionais não controláveis – necessidade de retardante (função do comportamento do fogo) e condições atmosféricas (velocidade e direcção do vento relativamente à trajectória do avião, temperatura e humidade).

O efeito de algumas variáveis encontra-se estreitamente relacionado com outras, o que torna o seu estudo/modelação mais difícil. Por exemplo, o vento lateral tende a aumentar a dispersão do retardante com uma intensidade proporcional à altura de voo e inversamente proporcional ao tamanho das gotas formadas na atomização.

O modelo RAM, desenvolvido ao longo da tese, permite calcular a dispersão da nuvem com base no módulo empírico de atomização do PATSIM, incorporando automaticamente parte das suas limitações. Contudo, a arquitectura deste modelo lagrangeano possibilita uma fácil adaptação a um qualquer módulo de atomização que seja desenvolvido para o efeito.

Uma das variáveis importantes sob controlo operacional é a reologia e a elasticidade do retardante químico. A função principal dos espessantes usados nas formulações comerciais de retardantes é a produção de gotas de maiores diâmetros, reduzindo a vulnerabilidade da nuvem face ao vento e à evaporação. Contudo, a utilização destes espessantes influencia também o processo de deposição e revestimento da vegetação por este fluido. Tendo em conta que a atomização e o revestimento são processos independentes, a concentração óptima de espessante poderá não ser coincidente nos dois processos, o que levanta a questão sobre o nível óptimo da viscosidade/elasticidade. Verifica-se, assim, que o tema abordado na presente tese apresenta complexidades importantes, especialmente quando integrado com outros fenómenos físicos além dos estudados (*e.g.* revestimento dos combustíveis).

Embora a atomização não tenha sido directamente desenvolvida no âmbito da presente tese, é de salientar que uma deficiente formulação dos dados desta etapa poderá comprometer a qualidade das simulações efectuadas quer pelo RAM, quer pelo FLUENT. Os resultados destes modelos não podem ser melhores que os seus *inputs*. Em todo o caso, tal facto não retira importância ao trabalho aqui desenvolvido, uma vez que a dispersão da fase particulada na atmosfera e a sua interacção energética, mássica e de quantidade de movimento, permitem tirar conclusões importantes, fazendo variar parâmetros operacionais como a velocidade do avião, caudal, velocidade e direcção do vento, mantendo as mesmas emissões dos módulos de atomização usados. Contudo, uma confiança operacional nos valores obtidos fica condicionada ao desenvolvimento e validação de um módulo de atomização mais robusto e preciso.

Um modelo integrado, composto pelo modelo de dispersão usado e pelo módulo de atomização, permitirá a realização de simulações bastante realistas. A realização de um elevado número de simulações para cada aerotanque/avião e a variação dos parâmetros operacionais possibilitará a obtenção de informação essencial para uma efectiva optimização da ferramenta de combate a fogos com meios aéreos. Em alternativa, poder-se-ia desenvolver o problema inverso, ou seja, dadas as características óptimas da mancha de retardante e os valores das variáveis operacionais não controláveis, “questionar” o modelo acerca dos valores das variáveis controláveis, tais como a velocidade e altura de voo.

A informação obtida poderá então ser compilada em manuais ou guias operacionais dirigidos aos responsáveis pela coordenação dos meios aéreos de combate. De facto, parece pouco viável que a utilização dos modelos seja realizada de uma forma directa e em tempo útil durante um combate real. Apesar do reduzido número de trabalhos científicos nesta área, tendo em conta o interesse da União Europeia e dos EUA na melhoria das ferramentas de combate a incêndios e os desenvolvimentos de CFDs, bem como do hardware disponível, é legítimo esperar que nos próximos anos existam avanços significativos na simulação da nuvem. Recomenda-se também o aumento de ensaios experimentais em escala real de forma a calibrar e validar os modelos desenvolvidos.

Verifica-se que o RAM, computacionalmente mais rápido, apresenta um bom desempenho nas suas simulações, em relação ao FLUENT, e com os ensaios experimentais, o que possibilita a sua utilização para simulações em número alargado. Contudo, o FLUENT revela-se mais fiável, sobretudo devido à aproximação *two-ways*.

Os resultados da modelação da nuvem interessam sobretudo a três tipos de instituições:

- bombeiros e sapadores que combatem fogos florestais no terreno com a ajuda dos meios aéreos;
- produtores de retardantes que podem estudar a viscosidade/elasticidade mais favorável para os seus produtos;
- Empresas de desenvolvimento de aerotanques.

Em ciência a resposta a uma pergunta levanta várias outras, pelo que muitas vezes é difícil resolver detalhadamente e por completo um problema aplicado como este. Assim, assume-se aqui esta realidade, deixando os seguintes tópicos para futuros trabalhos nesta área:

- Avaliação do efeito da coluna de convecção do incêndio sobre a queda da nuvem;
- Simulação por fractais da deposição das gotas sobre uma estrutura 3D de combustível;
- Avaliação da importância da esteira de diferentes aviões sobre a nuvem;
- Efeito do escoamento particulado na turbulência local;
- Formulação do problema inverso, de forma a recuperar variáveis operacionais controláveis que optimizem a aplicação.

Em conclusão, atingiram-se os objectivos inicialmente propostos, tendo-se desenvolvido modelações da nuvem de retardante. O trabalho realizado e a sua prossecução permitem atingir uma nova era na utilização aérea de retardantes químicos. A aplicação destes produtos poderá deixar de ser quase exclusivamente empírica, por parte dos pilotos e dos coordenadores em terra, para se basear em guias operacionais, desenhados à luz da modelação. Esta viragem irá trazer melhorias importantes na área de combate a fogos florestais.

REFERÊNCIAS

- ACRE (2001) Additifs Chimiques rheologie Évaluation – Final Report. Valabre.
- Albini F. A. (1983a) Transport of firebrands by line thermals. *Comb. Sci. Tech.* **32**, 277-288.
- Albini F. A. (1983b) Potential spotting distance from wind-driven surface fires. US Department of Agriculture, Forest Service, Research Paper INT-309, Intermountain Forest and Range Experiment Station, Ogden, Utah.
- Albini F.A. (1979) Spot fire distance from burning trees- a predictive model. US Department of Agriculture, Forest Service, General Technical Report INT-56, Intermountain Forest and Range Experiment Station, Ogden, Utah.
- Albini F.A. (1981) Spot fire distance from isolated sources - extensions of a predictive model. US Department of Agriculture, Forest Service, Research Note INT-309, Intermountain Forest and Range Experiment Station, Ogden, Utah.
- Alexander M. E. e DeGroot W. G. (1988) Fire Behaviour in Jack Pine stands as related to the Canadian Forest Fire Weather Index (FWI) System. Environment Canada, Canadian Forestry Service, Northern Centre, Edmonton, Alberta.
- Alexander, M. E. e Lanoville R. A. (1989) Predicting fire Behaviour in the black spruce-lichen woodland fuel type in western and northern Canada. Canadian Forestry Service, Northern Centre, Edmonton, Alberta.
- Anderson W. H. e Wong, J. Y. (1978) Dynamic interaction of fire retardant droplets with fuel, and correlation with the rheological properties of the retardant. Final report 7660-02. Intermountain Forest and Range Experiment Station, Ogden, Utah.
- Anderson W. H., Brown R. E., Louie N. A., Kato K. G., Burchfield J. A., Dalby J. D., Zernov L. (1976) Correlation of Rheological Properties of Liquid Fire Retardant with Aerially Delivered Performance. Final Report 8990-08. Intermountain Forest and Range Experiment Station, Ogden, Utah.

- Andrews P. L. e Rothermel, R. C. (1982) Charts for interpreting wildland fire behaviour characteristics. US Department of Agriculture, Forest Service, Research Paper INT-310, Intermountain Forest and Range Experiment Station, Ogden, Utah.
- Blakely A. D., George, C. W. e Johnson, G. M. (1982) Static testing to evaluate airtanker delivery performance. General Technical Report INT-78. Intermountain Forest and Range Experiment Station, Ogden, Utah
- Borrego C., Santana F. Santos F., Santos J. E Ramalho (1991) Livro Branco sobre o estado do ambiente em Portugal. Ministério do Ambiente e Recursos Naturais, Lisboa.
- Borrego C., Tomé M. e Miranda A. I. (1999b). Modelling the Evaporation and Trajectories of Chemical Retardant Droplets During Free Fall Conditions – Fighting Wildfires with Aircrafts, AMB–QA(01)/99, Universidade de Aveiro.
- Borrego C., Tomé M. e Miranda A. I. (2000) Modelling the Atmospheric Dispersion of a Retardant Cloud Dropped from a Fire-fighting Aircraft - ACRE 3rd Semester Progression Report, AMB–QA(01)/00, Universidade de Aveiro.
- Borrego C., Tomé M. e Miranda A. I. (2001) Modelling of the retardant cloud – Deliverable 8 - ACRE project, AMB–QA-01/2001, Universidade de Aveiro.
- Borrego C., Tomé M. e Miranda A.I. (1999a) Efficiency of the Retardant: Dispersion – ACRE 1st Semester Progression Report, Universidade de Aveiro.
- Borrego C., Tomé M. e Miranda A.I. (1999c) Modelling the Atmospheric Dispersion of a Retardant Cloud Dropped from a Fire-Fighting Aircraft – ACRE 2nd Semester Progression Report. AMB–QA–02/1999, Universidade de Aveiro.
- Bradshaw P. (1975) An introduction to turbulence and its measurements, Pergamon Press, Nova Iorque.
- Cabral C. C. e Telles G. R. (1999) A árvore em Portugal. Assírio e Alvim, Lisboa.
- Calé J. (2002) Para além da combustão. *Ambiente 21*, **5**, 34 – 39.

- Calogine D. e Séro-Guillaume O. (2002) Air flow model in a tree crown. *Forest Fire Research & Wildland Fire Safety*, Edited by D. X. Viegas, Coimbra.
- Calogine D., Margerit J. e Séro-Guillaume O. (1998) Characterisation of vegetation in forest fire models. *III International Conference on forest fire research*, Vol. I, 599-609, Luso.
- Calogine D., Rimbart N. e Séro-Guillaume O. (2002) Modelling of the infiltration of retardant in a tree crown. *Forest Fire Research & Wildland Fire Safety*, Edited by D. X. Viegas, Coimbra.
- Chandler C., Cheney P., Thomas P. Trabaud L. e Williams D. (1991) *Fire in forestry: Forest fire behaviour and effects*. Volume I, 2ª Edição. Krieger Publishing Company, Malabar.
- Clark T. L., Jenkins M. A., Coen L. e Packham D. R. (1996) A coupled atmosphere-fire model: role of the convection Froude number and dynamic fingering at the fireline. *The International Journal of Wildland Fire*, **6**, 177-190.
- Clift R., Grace J. R. e Weber M. E. (1978) *Bubbles, drops and particles*. Academic Press, London.
- Costa A. M. (2000) A prevenção de incêndios florestais e a sua articulação interdepartamental. Congresso Ibérico de fogos florestais, 15-22, Castelo Branco.
- Cottrell W. (1989) *The book of fire*. Missoula, Mountain Press Publishing Company.
- Crowe C., Sommerfeld M. e Tsuji Y. (1998) *Multiphase Flows with Droplets and Particles*. CRC Press.
- Crowe et al. (1977) The Particle Source in Cell method for gas droplet flow. *J. fluid Engr.*, **99**, 325.
- Crutzen, P. J. e Andreae M. O. (1990). Biomass burning in the tropics: impacts on atmospheric chemistry and biogeochemical cycles. *Science* **250**, 1669-1678.

- Deeming J. E., Burgan R. E. e Cohen J. D. (1977) The National fire-danger rating system. US Department of Agriculture, Forest Service, General Technical Report INT-39, Intermountain Forest and Range Experiment Station, Ogden, Utah.
- Dijk A. I. J. M. V. e Bruijnzeel L. A. (2001) Modelling rainfall interception by vegetation of variable density using an adapted analytical model. Part 2. Model validation for o tropical upland mixed cropping system. *Journal of Hydrology*, **247**, 239-262.
- Finne, M. A. e Andrews P.L. (1996) The FARSITE fire area simulator: fire management applications and lessons of summer 1994. Proceedings of the International. Fire Council Meeting, Coer D'Alene.
- Fluent Incorporated (2002). GAMBIT 2.1 User's Guide.
- Fluent Incorporated (2003). FLUENT 6.2 User's Guide.
- Fradsen W. (1971) Fire spread through porous fuels from the conservation of energy. *Combustion and flame*, **16**, 9-16.
- Gay Lussac J. L. (1821) *Annual chimique* **2**, 211.
- George C. W. (1975) Fire retardant ground distribution patterns from the CL-215 air tanker. Research paper INT-165. Intermountain Forest and Range Experiment Station, Ogden, Utah.
- George C. W. (1981) Determining airtanker delivery performance using a simple slide chart-retardant coverage computer. General Technical report INT-113. Intermountain Forest and Range Experiment Station, Ogden, Utah.
- George C. W. e Johnson C. W. (1981) Evaluation of Megatard 2700: A proposed new fire retardant system. General Technical report INT-112. Intermountain Forest and Range Experiment Station, Ogden, Utah.
- George C. W. e Johnson C. W. (1986) Determining fire retardant quality in the field. General Technical report INT-201. Intermountain Forest and Range Experiment Station, Ogden, Utah.

- George C. W. e Johnson C. W. (1990) Developing air tanker performance guidelines. General Technical report INT-268. Intermountain Forest and Range Experiment Station, Ogden, Utah.
- Giroud F. (2000) Effect of product viscosity on ground distribution, Deliverable 5, ACRE project, 12pp., Valabre.
- Goulden M. L., Munger J. W., Fan, S. L., Daube, B. C. e Wolfsy, S. C. (1996) Exchange of carbon dioxide by a deciduous forest: response to interannual climate variability. *Science* **271**, 1576-1578.
- Grah R. F. e Wilson C. C. (1945) Some components of rainfall Interception. *Journal of Forestry*, **43**, 890 – 898.
- Granzow A. (1978) Flame retardation by phosphorous compounds. *Accounts of Chemical Research* **11**, 177-183.
- Haider A. e Levenspiel O. (1989) Drag Coefficient and Terminal Velocity of Spherical and Nonspherical Particles. *Powder Technology*, **70**, 58 – 63.
- Hashino M., Yao H. e Yoshida H. (2002) Studies and evaluation on interception during rainfall based on a tank model. *Journal of Hidrology*, **255**, 1-11.
- Hashino M., Yao H. e Yoshida H. (2002) Studies and evaluations on interceptions processes during rainfall based on a tank model. *Journal of Hydrology*, **255**, 1-11.
- Hinze J.O. (1975) Turbulence. McGraw-Hill Publishing Co., New York.
- Hirsch K. G. e Martell D. L. (1996) A review of initial attack fire crew productivity and effectiveness. *The International Journal of Wildland Fire*, **6**, 199-215.
- Hung L. S. e Yao S.C. (1999) Experimental investigation of the impaction of water droplets on cylindrical objects. *International Journal of Multiphase Flow* **25** 1545-1559.
- Hung L. S. e Yao S.C. (2002) Dripping phenomena of water droplets impacted on horizontal wire screens. *International Journal of Multiphase Flow*, **28**, 93-104.

- Joseph D. D., Belanger J., Beavers G.S. (1999) Breakup of a liquid drop suddenly exposed to a high-speed Airstream. *International Journal of Multiphase Flow* **25** 1263-1303
- Larson D. L., Newton W.E., Anderson P.J. e Stein S.J. (2000) Effects of fire retardant chemical and fire suppressant foam on shrub steppe vegetation in northern Nevada. *International Journal of Wildland Fire*, **9**, 115 – 127.
- Launder B. E. e Spalding D. B. (1972) Lectures in Mathematical Models of Turbulence. Academic Press, London, England.
- Mansour A. e Chigier N. (1995) Air blast atomisation of non-Newtonian liquids. *J. of Non-Newtonian Fluid Mech.* **58**, 161–194.
- Miranda A. I. (1998) Efeito dos incêndios florestais na qualidade do ar. Tese de Doutorado, Universidade de Aveiro.
- Miranda A. I. e Borrego C. (1996) A prognostic meteorological model applied to the study of a forest fire. *The International Journal of Wildland Fire*, **6**, 157-163.
- Moreira F. e Rego F. (2000) Efeitos ecológicos do fogo. Congresso Ibérico de fogos florestais, 33-43, Castelo Branco.
- Morris G.A. (1987) A simple method for computing spotting distance from wind-driven surface fires. US Department of Agriculture, Forest Service. Research Note INT-374. Intermountain Forest and Range Experiment Station, Ogden, Utah.
- Morsi S. A. e Alexander A. J. (1972) An Investigation of Particle Trajectories in Two-Phase Flow Systems. *J. Fluid Mech.*, **55**, 193 – 208.
- NWCG - National Wildfire Coordinating Group (1992) Foam vs Fire – Primer.
- NWCG - National Wildfire Coordinating Group (1993) Foam vs Fire – Class A foam for wildland fires.
- NWCG - National Wildfire Coordinating Group (1995) Foam vs Fire – Aerial Application.
- Pappa A. A., Tzamtzis N. E., Statheropoulos M. K., Liodakis S. E. e Parissakis G. K. (1995) A comparative study of the effects of fire retardants on the pyrolysis of

- cellulose and *Pinus halipensus* pine-needles. *Journal of analytical and Applied Pyrolysis*, **31**, 85-100.
- Perry D. G. (1990) Wild land Fire fighting: Fire behaviour tactics & command, 2nd Edition. Fire Publications Inc, Bellflower CA.
- Perry R. H. e Green D. W. (1997) Chemical Engineers handbook. McGraw-Hill, Kansas.
- Picot J. J. C. e Kristmanson, D. D. (1997) Forestry Pesticide Aerial Spraying: Spray Droplet Generation, Dispersion and Deposition, Kluwer Academic Publishers, Netherlands.
- Pilch M. e Erdman, C. (1987) Use of break-up time data and velocity history data to predict the maximum size of stable fragments for acceleration-induced break-up of a liquid drop. *Int. J. Multiphase Flow* **13**, 741-757.
- Ranz W. E. e Marshall W. R (1952a) Evaporation from Drops, (Part I). *Chem. Eng. Prog.*, **3**, 141-146.
- Ranz W. E. e Marshall W. R. (1952b) Evaporation from Drops, (Part II). *Chem. Eng. Prog.*, **3**, 173-180.
- Rego F. (2000) A problemática dos incêndios florestais. Congresso Ibérico de fogos florestais, 9-13, Castelo Branco.
- Rimbert N., Calogine D. e Séro-Guillaume O. (2002) Modelling of retardant dropping and atomization. *Forest Fire Research & Wildland Fire Safety*, Edited by D. X. Viegas, Coimbra.
- Rothermel R. C. (1972) A mathematical model for predicting fire spread in wildland fuels. US Department of Agriculture, Forest Service, Research Paper, INT-115, Ogden, Utah.
- Rothermel R. C. (1983) How to predict the spread and intensity of forest and range fires. US Department of Agriculture, Forest Service, General Technical Report INT-143, Intermountain Forest and Range Experiment Station, Ogden, Utah.

- Ryan P. e McMahon, C. (1976) Some chemical and physical characteristics of emissions from forest fires. In 69th Annual meeting of the air pollution control association, Portland, 1-17, Oregon.
- Schellekens J., Scatena F. N., Bruinzjeel L. A. e Wickel A. J. (1999) Modelling rainfall interception by a lowland tropical rain forest in northeastern Puerto Rico. *Journal of Hydrology*, **225**, 168–184.
- Schonhumber M., Randeau W. L. e Baptista J. P. V. P. (2000) Application of the 2D-Video-Distrometer for weather radar data inversion. *Physics Chemical Earth (B)*, **25**, 1037-1042.
- Shaw R. A. (2003) Particle turbulence interactions in atmospheric clouds. *Annual Review of Fluid Mechanics*, **35**, 183-227
- Shaw R. A. (2003) Particle-Turbulence Interactions In Atmospheric Clouds. *Annual Review of Fluid Mechanics*. **35**, 183-227.
- Simoneit B. R. T., Schauer J. J., Nolte C. G., Oros D. R., Elias V. O., Fraser M. P., Rogge W. F. e Cass G. R. (1999) Levoglucosan, a tracer for cellulose in biomass burning and atmospheric particles. *Atmospheric Environment* **33**, 173-182.
- Spear T. M. e Cannel C. E. (2002) Mixmaster exposure to dust during mixing of wildland fire retardant chemicals. *International Journal of Wildland Fire*, **11**, 65-73.
- Swanson D. H. e Helvig T. N (1973) High altitude retardant drop mechanization study – Capture of retardants in vertical fuels. Final report (Vol. I e II). Northern Forest Fire Laboratory, Missoula.
- Swanson D. H., George C. W. e Luedecke A. D. (1976) Air tanker performance guides: general instructions manual. General Technical Report INT- 27. Intermountain Forest and Range Experiment Station, Ogden.
- Swanson D. H., Luedecke A. D. e Helvig T. N. (1978) Experimental tank and gating system (ETAGS). USDAFS, Ogden, Utah.
- Swanson D. H., Luedecke A. D. e Helvig T. N. (1978) Experimental tank and gating system (ETAGS) USDA FS, Intermountain Forest and Range Experiment Station, Ogden.

- Swanson D. H., Luedecke A. D., Helvig T. N. e Parduhn F. J. (1975) Development of user guidelines for selected retardant aircraft. Northern Forest Fire Laboratory, Missoula.
- Takahashi T., Yamaguchi N., Kawano T. (2001) Videosonde observation of torrential rain during Baiu season. *Atmospheric Research*, **58**, 205–228.
- Tans P. P. Fung I. Y. e Takahashi T. (1990) Observational constraints on the global carbon dioxide budget. *Science* **247**, 1431-1438.
- Teske, M. E., Barry, J. W., e Thistle, J. H. W. (1996) Aerial Spray Drift Modelling. Environmental Modelling (Vol. II): Computer Methods and Software for Simulating Environmental Pollution and its Adverse Effects. P. Zannetti (ed.), Computational Mechanics Publications, 11 – 42, Southampton, England.
- Tomé M. e Borrego C. (2002) Fighting wildfires with retardant applied with airplanes. Forest Fire Research & Wildland Fire Safety, Edited by D. X. Viegas, Coimbra.
- Tomé M., Borrego C. e Miranda A. I. (1999a) Needs of Improvements on the Aerial Application of Chemical Retardants to Fight Wildfires. Forest Fires: Needs & Innovations, 99-104, Athens.
- Tomé M., Borrego C. e Miranda A. I. (1999b) Fighting Wildfires with Chemical Retardants Dropped from Aircrafts *in* Sixth International Symposium on Fire Safety Science, Abstracts, pp. 111, Poitiers.
- Tomé M., Borrego C. e Miranda A. I. (2000) Combate a Fogos Florestais com Meios Aéreos: Modelação da Nuvem de Retardante: Congresso Ibérico sobre Fogos Florestais, 197-205, Castelo Branco.
- USDA FS (1989) Manufacturer submission procedures for qualification testing of wildland fire chemicals. Technology and development program. USDA FS, Intermountain Forest and Range Experiment Station, Ogden.
- Van Meter W. P. (1983) Using Rheology to Estimate Short-Term Retardant Droplet Sizes. Res. Note INT-327. USDA FS, Intermountain Forest and Range Experiment Station, Ogden.

- Van Meter W. P. e George C. W. (1981) Correlating laboratory air drop data with retardant rheological properties. Res. Note INT-278. USDA FS, Intermountain Forest and Range Experiment Station, Ogden.
- Van Meter W. P., George C. W. e Johnson C. W. (1985) Chemical analysis procedures for forest fire retardant constituents. General technical report INT-181. USDA FS, Intermountain Forest and Range Experiment Station, Ogden.
- Varnhagen F. L. G. (1836) Manual de instruções práticas sobre a sementeira, cultura e corte dos pinheiros e da conservação da madeira dos mesmos; indicando-se os métodos mais próprios para o clima de Portugal. Academia Real das Ciências, Lisboa.
- Viegas D. (1989) Manual sobre incêndios florestais. Lisboa, Secretaria-Geral do Ministério do Planeamento e da Administração do Território.
- Viegas D. (2001) Gestão dos incêndios florestais. Comunicação oral. Ponte de Lima.
- Vieira P. A. (2002) Sempre a arder. *Fórum Ambiente* 83, 19 - 27.
- Wedding, J. B. *et al.* (1986) Mass transfer from water droplets under simulated free-fall conditions. *Atmospheric Environment*, **5**, 1039-1045.
- Wolfango, M. e Sardinha, A. M. (1993) Fogos florestais (1.º Volume, 2.a Edição) Publicações Ciência e Vida, UTAD.

ANEXO I

Além das técnicas usadas nos ensaios de Marselha para a monitorização de gotas, existe uma outra com grandes capacidades, baseada em equipamento específico designado por *distrometer*. Nos ensaios de Marselha não se usou qualquer instrumento deste tipo, devido a razões logísticas, apesar de se ter efectuado pesquisa durante a preparação da campanha de campo. O *distrometer* apresenta um elevado potencial na recolha de dados em possíveis testes de largadas de retardante à escala real. Tendo em conta a possibilidade de utilização em futuros ensaios experimentais, fica aqui registada uma breve análise deste equipamento.

Existem duas classes de *distrometer*: de impacção e visual. O primeiro consiste numa espécie de balança, muito sensível e com uma elevada frequência de análise, que contém um prato horizontal onde impactam as gotas. A quantidade de movimento é medida e, supondo a gota animada de velocidade terminal, é possível determinar o diâmetro da mesma por correlações anteriormente efectuadas com outros equipamentos. O *distrometer* visual ou “2D vídeo *distrometer*” faculta informações adicionais sobre o escoamento bifásico das gotas em sedimentação na atmosfera, permitindo, nomeadamente, a determinação da velocidade e forma das gotas ao passarem no ponto de focagem das 2 câmaras. Estas últimas encontram-se posicionadas na horizontal e barrem campos de focagem perpendiculares (Figura 1) com uma frequência muito elevada que pode chegar a 34500 Hz. Desta forma, o equipamento recolhe e regista informação todos os 29 microsegundos (μs).

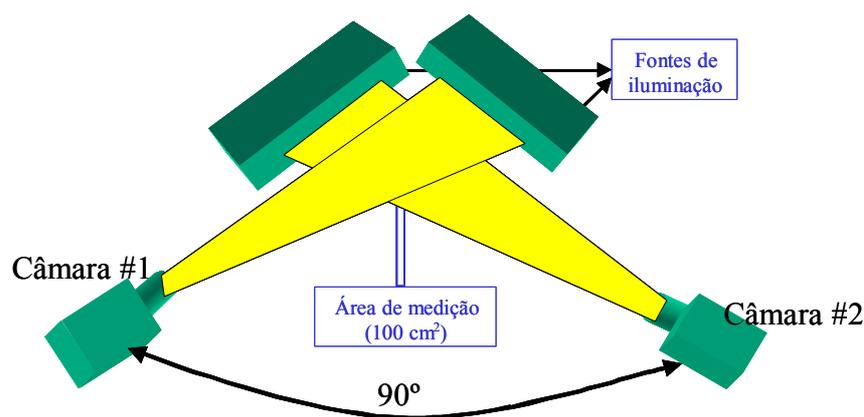


Figura 1 – Representação esquemática do “2D vídeo *distrometer*”.

Apesar da análise da precipitação (chuva), granizo e neve em situações de grandes intensidades constituírem as principais aplicações do *distrometer*, o equipamento possibilita ainda o registo de informações úteis sobre o escoamento bifásico de gotas de retardante em sedimentação na atmosfera. A largada deste produto de uma altitude considerável, resultara num comportamento semelhante à precipitação, com a particularidade de apresentar uma intensidade muito mais elevada, mesmo quando comparada com as chuvadas mais intensas. O *distrometer* permite analisar os seguintes parâmetros (Schonhuber et al., 2000):

- forma frontal e lateral das gotas ao cruzarem o volume de análise;
- velocidade vertical e horizontal das gotas;
- precipitação (em mm.h^{-1}) ao longo do tempo de análise;
- distribuição granulométrica das partículas.

As 2 câmaras recolhem até 40 MB.s^{-1} os dados brutos que são enviados para um computador a fim de serem tratados, comprimidos e armazenados. O processamento da informação através de um software de tratamento de imagem, permite a visualização gráfica dos dados (Figura 2).

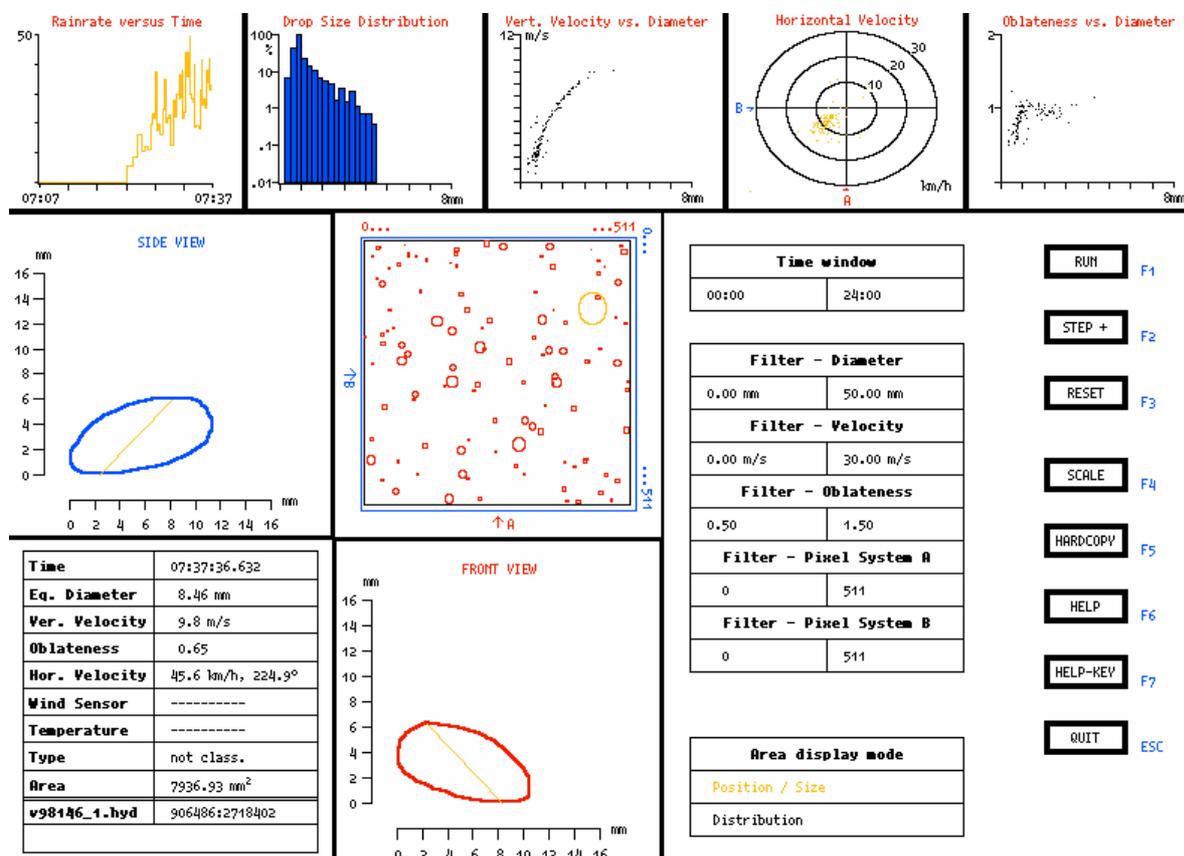


Figura 2 – Exemplo da interface gráfica do 2D Video *distrometer*.