



ISEL

INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA
Departamento de Engenharia Mecânica

Análise de um Sistema de Desenfumagem para a Atenuação do Risco de Incêndio

Sérgio Manuel Cavaleiro de Almeida Costa
(Mestre em Engenharia Mecatrónica)

Trabalho Final de Mestrado para obtenção do grau de Mestre
em Engenharia Mecânica

Orientadores:

Doutora Cláudia Sofia Séneca da Luz Casaca
Mestre Nuno Paulo Ferreira Henriques

Júri:

Presidente: Doutor Silvério João Crespo Marques

Vogais:

Doutora Cláudia Sofia Séneca da Luz Casaca
Doutora Isabel Maria Pereira dos Bastos Malico

Dezembro de 2018

Agradecimentos

Este trabalho é fruto do conhecimento que me foi sendo transmitido ao longo de todo o meu percurso académico. Por esse motivo, quero agradecer aos Professores que no seu altruísmo me permitiram aprender através das suas experiências profissionais e pessoais bem como à minha família e amigos.

Quero agradecer o suporte aos orientadores que me acompanharam na minha tese da Universidade de Évora pois foram e continuam a ser das pessoas que, não só me transmitem muito da vida e do conhecimento, mas que me ajudaram a criar oportunidades para que possa seguir os meus sonhos. Deixo igualmente o meu agradecimento aos meus atuais orientadores, Professora Cláudia Casaca e Professor Nuno Henriques, que me acompanharam no meu percurso académico e na orientação deste trabalho. Ao Professor Nelson Marques e à FSDynamics por me ter possibilitado correr alguns dos cálculos deste trabalho. À Professora Alda Carvalho pela disponibilidade em transmitir os seus conhecimentos e apoiar na realização deste trabalho. De salientar ainda o meu agradecimento ao Professor Chedas Sampaio por acreditar em mim.

Aos meus amigos e colegas, João, Zézé, Ana, Vera, Francisco, Luís Silva João Gonçalves e André que nas aflições das responsabilidades me acompanharam na entreaajuda de realizar as obrigações com amizade e companheirismo.

À minha namorada e à sua mãe, as Telmas da minha vida, por me apoiarem nas maluqueiras para que me atiro.

Aos meus pais e família por tudo.

Resumo

Apesar da segurança contra incêndios ser de uma grande relevância na proteção de bens e pessoas, num parque de estacionamento, o sistema de desenfumagem apresenta uma responsabilidade acrescida na desenfumagem dos gases de escape. Por essa razão, este, tem de ser um sistema, além de eficaz, eficiente na promoção do escoamento orientado à zona de extração.

No contexto deste trabalho foram identificados vários casos de ventilação em parques de estacionamento que se encontravam aparentemente desadequados ao seu funcionamento de forma eficiente. Para atingir esse objetivo desenvolvem-se várias simulações em CFD com recurso ao programa livre FDS.

Muito do conhecimento usado no desenvolvimento das leis e de modelos de apoio à regulação e compreensão dos fenómenos envolvidos num incêndio baseiam-se na experiência acumulada ao longo dos anos. A legislação, em particular, caracteriza a necessidade dos equipamentos, mas não acrescenta sobre a melhor abordagem à sua implementação deixando espaço para que surjam os problemas identificados como a colocação de obstáculos no caminho dos ventiladores de impulso.

Tendo o exposto como motivação, neste trabalho reúne-se, para um caso simplificado, uma série de simulações onde se variam parâmetros que se consideram importantes na categorização da melhor abordagem à colocação dos ventiladores de impulso, quando confrontados com obstáculos no caminho do escoamento promovido pelos mesmos. Dos resultados obtidos com as simulações desenvolveu-se um modelo de regressão multivariada que permitisse apoiar na previsão da qualidade do ar e visibilidade que permita a evacuação de pessoas em segurança. Finalmente, para verificar esse modelo desenvolveu-se um novo caso, mais complexo, para comparar a previsão do modelo com a sua aplicação a casos mais próximos da realidade. Este modelo mostrou-se ineficaz nessa previsão apresentando erros elevados. Uma das razões principais para as discrepâncias encontradas está relacionada com a falta de dados usadas no desenvolvimento do modelo já que a sua realização implicou dificuldades na verificação dos pressupostos necessárias à sua validade.

Palavras Chave: Incêndio, Segurança, CFD, Simulação, Modelação

Abstract

In the context of this work, several cases of ventilation in parking lots that were inadequate to operate efficiently were identified. In this context, several CFD simulations were developed using the free FDS program.

Although fire safety is of great importance in the protection of goods and people in a car park, the smoke control system has increased responsibility of exhausting fumes. For this reason, this has to be a system, efficient in promoting the flow directed to the extraction zone.

Much of the knowledge used in the development of laws and models that support the regulation and understanding of phenomena is based on the experience accumulated over the years. The legislation, in particular, characterizes the needs for the equipment but does not add the best approach to its implementation, leaving room for the problems identified as the placement of obstacles in the way of the impulse fans.

For a simplified case, this work presents a series of simulations with different parameters which were considered relevant in the categorization of the best approach to the placement of the impulse ventilators, when confronted with obstacles in the path of the flow promoted by them. From the results obtained with the simulations, a multivariate regression model was developed to support the prediction of air quality and visibility that allows the evacuation of people in safety. Finally, to verify this model, a new, more complex case was developed to compare the prediction of the model with its application to cases closer to reality. This model proved to be ineffective in this prediction with high errors. One of the main reasons for the discrepancies found is related to the lack of data used in the development of the model since its implementation implied difficulties in verifying the assumptions necessary to its validity.

Keywords: Fire, Safety, CFD, Simulation, Modeling

Índice

Agradecimentos	i
Resumo	iii
Abstract	v
Lista de Acrónimos	xi
1 Introdução	1
1.1 Motivação	2
1.2 Objectivos	4
1.3 Estrutura	5
2 Incêndio	7
2.1 Introdução Conceptual ao Fogo	8
2.2 Detecção de Incêndios	11
2.2.1 Detector Térmico	12
2.2.2 Detector de Fumos	13
2.2.3 Detector de Chamas	13
2.3 Extinção de Incêndio	14
2.3.1 Água	15
2.3.2 Dióxido Carbono (CO ₂)	16
2.3.3 Pó Químico	16
2.3.4 Espumas	16
2.3.5 Hidrocarbonetos Halogenados (Halons)	17
2.4 Comunicação entre deteção e extinção	17
2.5 Enquadramento Legal	18
2.6 Modelação em Incêndios	21
2.6.1 Fogo Localizado	22
2.6.2 Modelo de Zona Singular	25
2.6.3 Modelo Multizona	26
2.6.4 Outros Modelos	27
3 Dinâmica de Fluidos Computacional	29
3.1 Números Adimensionais	29
3.1.1 Número de Reynolds	29
3.1.2 Número de Mach	30

3.1.3	Número de Peclet	31
3.1.4	Número de Damköhler	31
3.1.5	Distância à Parede y^+	32
3.2	Equações de Conservação	33
3.2.1	Conservação de Massa	33
3.2.2	Conservação da Quantidade de Movimento Linear	34
3.2.3	Conservação de Energia	35
3.2.4	Conservação das Espécies Químicas	35
3.2.5	Equação de Estado	38
3.2.6	Forma Geral das Equações	38
3.3	Diferenças Finitas	39
3.3.1	Exemplo de Aplicação	39
3.4	Escoamento Incompressível	42
3.5	Turbulência	43
4	Caso de Estudo	47
4.1	Programação de Interface Python-FDS	48
4.1.1	Estrutura de um ficheiro FDS	48
4.1.2	Python API (<i>Application Program Interface</i>)	50
4.1.3	Exemplo de Utilização	54
4.2	Estudo de um Caso Simplificado	58
4.2.1	Comparação dos Sistemas	62
4.2.2	Modelação Baseada nos Resultados	67
4.3	Verificação do Estudo Simplificado	77
5	Conclusões	81
	Bibliografia	83

Lista de Figuras

1.1	Levantamento realizado em 2016 relativamente aos programas de CFD mais utilizados [2].	1
1.2	Ventiladores de impulso colocados com obstruções como vigas e tubagens. . .	4
2.1	Esquema representativo dos elementos necessários à prevalência de fogo. . . .	9
2.2	Curvas características (adaptado de [14]).	11
2.3	Esquema de medição de distâncias para a modelação da pluma (adaptado de [18]).	22
2.4	Esquema de medição de distâncias para a modelação da temperatura sentida por elementos nas imediações (adaptado de [18]).	24
2.5	Modelo de zona singular (adaptado de [17]).	25
2.6	Modelo de duas zonas (adaptado de [18]).	26
3.1	Tipo de escoamento dado pela distância à parede (adaptado de [8]).	32
3.2	Esquema Explícito, Implícito e Crank-Nicolson (da esquerda para a direita). .	41
3.3	Escalas dos modelos de turbulência [30].	45
4.1	Diagrama de classes em UML do pyFDS.	51
4.2	Resultado da parametrização do carro.	56
4.3	Resultado da parametrização de 9 carros alinhados paralelamente e espaçados de 0.5 metros.	57
4.4	Representação do domínio mais complexo explorado no caso de estudo.	58
4.5	Vista lateral do domínio do caso de estudo simplificado.	59
4.6	Vista de cima do domínio do caso de estudo simplificado.	60
4.7	Resultado de y^+ aos 40 segundos de simulação.	61
4.8	Resultado da simulação aos 35 segundos de simulação.	61
4.9	Resultado da simulação aos 35 segundos de simulação.	62
4.10	Caudal de fuligem expelido a montante do ventilador.	63
4.11	Visibilidade e FED a $z= 2.62$ m de altura no plano de simetria.	65
4.12	Visibilidade e FED a $x= 2.34$ m no plano de simetria ao longo de z	66
4.13	Gráfico de coordenadas paralelas para apoiar na identificação de grupos. . . .	68
4.14	Comparação entre a variável dependentes e independente.	69
4.15	Matriz de correlações.	70
4.16	Gráfico de Scree Plot	71
4.17	Gráfico de análise das componentes principais (PCA).	72
4.18	Comparação entre a variável dependentes e independente.	74
4.19	Dispersão dos resíduos.	75
4.20	Gráficos de caixa (boxplots).	76

4.21	Comparação entre a visibilidade e o valor de FED.	77
4.22	Modelo mais complexo usado na verificação do modelo desenvolvido.	78
4.23	Verificação do modelo com novas simulações.	79
4.24	Fumo que, pela presença de carros é levado para longe do ventilador.	80

Lista de Tabelas

1.1	Adaptado de Anuário de Ocorrências de Protecção Civil - ANPC.	2
1.2	Adaptado de The Geneva Association, Abril 2014.	3
2.1	Fatores Risco das UT (adaptado de [13]).	19
2.2	Categorias de Risco das UT (adaptado de [13]).	20
4.1	Penalização, devido à presença do obstáculo, da fuligem que sai do domínio integrada no tempo de simulação.	64
4.2	Melhores casos para cada variável dependente.	67
4.3	Resultados da PCA.	71
4.4	Análise ANOVA.	73
4.5	Estimativas da qualidade da regressão.	75
4.6	Estimativas da qualidade da nova regressão sem outliers.	76
4.7	Coefficientes da regressão linear.	77
4.8	Resultados da simulação.	79
4.9	Erro relativo obtido da comparação dos novos casos simulados com o modelo desenvolvido.	80

Lista de Acrónimos

AE - Alta Expansão

ANOVA - Análise de Variância

API - Programa de ligação a aplicação (*Application Program Interface*)

AVAC - Aquecimento, Ventilação e Ar Condicionado

BE - Baixa Expansão

CFD - Dinâmica de Fluidos Computacional (*Computational Fluid Dynamics*)

DNS - Simulação Numérica Direta (*Direct Numerical Simulation*)

DSM - Modelos de tensões diferenciais (*Differential Stress Models*)

EVM - Modelo de viscosidade dos vórtices (*Eddy-Viscosity Model*)

FDS - Simulador da Dinâmica de Incêndios (Fire Dynamics Simulator)

FED - Fator de Dose Efetiva (*Factor Effective Dose*)

GTC - Gestão Técnica Centralizada

HC - *Hydrocarbon*

HCM - *Hydrocarbon Modified*

ISO - Organização internacional de normalizações (*International Organization for Standardization*)

LES - Simulação dos grandes vórtices (*Large Eddy Simulation*)

ME - Média Expansão

NIST - Instituto Americano de Normalizações (*National Institute of Standards and Technology*)

NLEVM - Modelo de viscosidade dos vórtices não linear (*Non-Linear Eddy-Viscosity Model*)

NP - Norma Portuguesa

PDE - Equações diferenciais às derivadas parciais (*Partial Differential Equations*)

PIB - Produto Interno Bruto

RABT - do alemão que significa Diretivas na Configuração e Operação de Estradas em Túneis

RANS - Média de Reynolds às equações de Navier-Stokes (*Reynolds-Average Navier-Stokes*)

RJ - Regime Jurídico

RWS - *Rijkswaterstaat*

SADI - Sistema Automático de Detecção de Incêndio

SIMPLE - Método semi-implícito para acoplamento das equações da pressão (*Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations*)

SCIE - Segurança Contra Incêndios em Edifícios

UML - Linguagem de modelação unificada (*Unified Model Language*)

UT - Utilização Tipo

1 Introdução

A norma NP 4540-2015 [1], responsável pelas orientações legais em projectos de ventilação e desenfumagem em parques de estacionamento cobertos, alerta para o facto de que a energia exigida pelos sistemas associados à exploração de parques de estacionamento cobertos podem ser significativos e que, portanto, devem ser consideradas as melhores técnicas na procura da sua minimização sem que para isso sejam violadas as imposições legais associadas à mesma.

Para que sejam atingidas condições de segurança a abordagem ao projeto de segurança pode partir de uma abordagem restritiva ou baseada no desempenho. Geralmente, seguindo a legislação, a abordagem diz-se restritiva já que se vão particularizando as necessidades de segurança através da quantificação das características implícitas do projeto (áreas, efetivo, acessos, localização, entre outras). Por outro lado, é possível seguir uma abordagem que permita avaliar quantitativamente a eficácia das medidas que estão a ser tomadas, o chamado projeto baseado no desempenho. Este, apesar de mais detalhista e rigoroso, geralmente acarreta dificuldades acrescidas na sua formulação já que envolve complexidades maiores como é o caso da utilização do CFD (*Computational Fluid Dynamics*) para o estudo de escoamentos, quantificação de partículas, distribuição de temperaturas, ou outros. A figura 1.1 apresenta alguns dos programas mais populares de CFD.

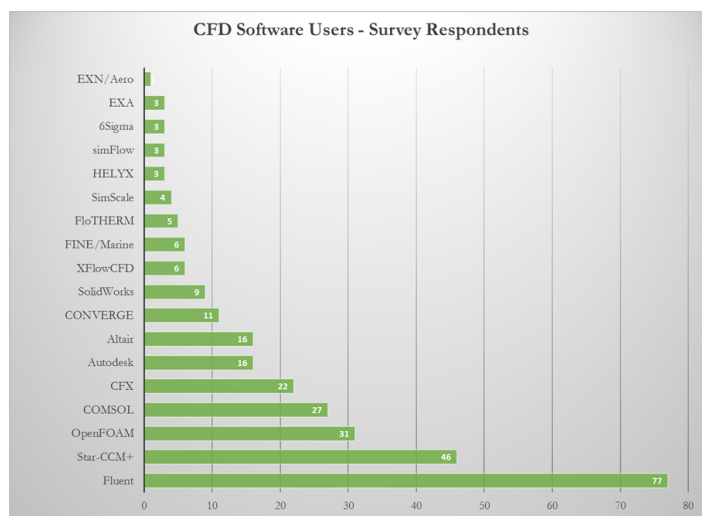


Figura 1.1: Levantamento realizado em 2016 relativamente aos programas de CFD mais utilizados [2].

Além dos programas comerciais existentes como o Fluent, CFX, Star CCM+, COMSOL, para nomear alguns dos mais conhecidos, existem programas livres como o OpenFoam, FDS, SU2,

DualSPHysics, entre outros. A figura 1.1 apresenta um levantamento realizado dos programas de CFD mais utilizados em 2016.

Do levantamento efetuado fica claro que o Fluent é dos programas mais estabelecidos, não obstante, é interessante notar-se que o OpenFoam, sendo um programa livre se encontra em terceiro lugar. Nesta lista não consta o *Fire Dynamic Simulator* (FDS), já que sendo um programa muito direcionado para o caso concreto de fogos em edifícios terá um público alvo reduzido. Não obstante, é reconhecido pela NIST (*National Institute of Standards and Technology*) como um programa válido para a sua utilização em problemas reais, transparecendo a confiança nos modelos por ele utilizados [3]. Por essa razão, neste trabalho, utilizar-se-á o FDS como via para a compreensão dos fenómenos associados aos incêndios em parques de estacionamento. Com base em tais resultados desenvolve-se um modelo que permita colmatar lacunas como as que são explanadas no subcapítulo seguinte.

1.1 Motivação

A segurança contra incêndios é uma temática em ambiente de projecto muitas vezes desvalorizada, quando comparada com outras áreas, e que não tem em conta rigores científicos de relevância, baseando-se em simplificações e empirismos que deixam a questão da sua validade e generalidade. Prova disso são os incêndios que se continuam a verificar e que, além da frequência, são, muitas vezes, a uma escala que levam a perda de vidas e bens avultados, tal como transparecem os dados da Tabela 1.1 e Tabela 1.2.

Tabela 1.1: Adaptado de Anuário de Ocorrências de Protecção Civil - ANPC.

	2006	2007	2008	2009	2010
Edifício de habitação	7000	7300	7200	7200	7439
Estacionamento	65	60	80	60	55
Edifício de Serviço	270	250	167	180	235
Equipamento Escolar	120	130	130	150	161
Equipamento Hospitalar e Lar de Idosos	80	95	65	100	88
Edifício de Espetáculos, Lazer e Culto Religioso	70	80	65	75	69
Hotelaria e Similares	450	490	470	430	448
Edifício Comercial	430	350	300	290	290
Edifício Cultural	20	25	20	30	23
Indústria, Oficina e Armazém	1000	1230	1100	1100	1237
Total	9505	10010	9597	9615	10045

Se por um lado a Tabela 1.1 indica alguma estabilidade nas ocorrências, a Tabela 1.2 apresenta

valores relevantes (já que se encontram em milhões de €). Não obstante, o impacto no PIB do país é diminuto, quando comparado com outros setores, pelo que, talvez por isso, não seja uma área de relevância onde se procure inovação e redução dos impactos associados. Não obstante, estão em causa, também, vidas humanas que devem ser preservadas principalmente porque as faixas etárias afetadas correspondem maioritariamente a idosos e crianças [4], o que conduz a que estes riscos devam ser controlados e minimizados o mais possível.

Tabela 1.2: Adaptado de The Geneva Association, Abril 2014.

	2008	2009	2010	Percentagem do PIB-2008/2010
Alemanha	2850.00	2950.00	2700.00	0.12
Austrália	678.00	647.00	637.00	0.07
Espanha	910.00	-	-	0.08
EUA	12666.0	10132.0	9409.0	0.1
Finlândia	305.00	280.00	330.00	0.17
França	4550.0	-	-	0.2
Holanda	1050.00	925.00	675.00	0.15
Hungria	-	1899.00	684.00	0.02
Itália	3150.0	3750.0	2600.0	0.2
Japão	4341.00	4305.00	3988.00	0.12
Noruega	149.00	-	131.00	0.12
Nova.Zelândia	149.00	-	131.00	0.12
Polónia	346.00	274.00	-	0.09
Reino.Unido	2377.00	2133.00	2133.00	0.13
República.Checa	135.00	89.00	80.00	0.07
Singapura	63.00	66.00	66.00	0.04
Suécia	654.00	610.00	621.00	0.18
Total	34373	28060	24185	-

As ocorrências de incêndios surgem, muitas vezes, por negligência, ausência ou ineficiência dos equipamentos de deteção e a inexistência de meios de extinção [4]. Em particular, o papel dos sistemas de extinção de incêndios em parques de estacionamento, é, muitas vezes, extensível ao controlo de fumos. Assim, estes têm um papel quotidiano de consumos de energia que, se não for convenientemente caracterizado no ato de projeto acarreta custos elevados.

A figura 1.2 mostra um caso real onde se identificou a colocação de sistemas vitais à desenfumagem, como é o caso dos ventiladores de impulso, num local onde existem interferências ao escoamento. Sendo um sistema, a eficiência com que este extrai os fumos não se caracteriza apenas por um elemento, mas pelo seu conjunto. Não obstante, se cada elemento tiver um melhor desempenho, no seu global haverá um impacto positivo.



Figura 1.2: Ventiladores de impulso colocados com obstruções como vigas e tubagens.

Atendendo ao supramencionado, neste trabalho procura-se estudar e complementar o conhecimento relativo à Segurança Contra Incêndios em Edifícios, SCIE.

A legislação recorre a uma categorização estratificada no sentido de uniformizar e simplificar todos os pressupostos que devem ser verificados na SCIE. Isto, muitas vezes, leva a desadequação da legislação pelo esforço excessivo decorrente dessa tentativa o que tem motivado abordagens diferentes em contexto de projeto, como é o caso do *Projeto Baseado no Desempenho*, PBD.

1.2 Objectivos

Dados os problemas e motivações descritos no subcapítulo anterior, neste trabalho, procurar-se-á compreender os fenómenos inerentes ao processo de desenvolvimento de um incêndio, bem como a sua progressão. Mais, tentar-se-á perceber a validade da legislação em vigor bem como os seus fundamentos e dessa forma procurar minimizar o risco de perdas de vidas e bens através de sistemas de desenfumagem adequados.

Para se atingirem os fins propostos, desenvolver-se-á uma ferramenta de *interface* em Python com o programa de CFD, o FDS, para auxiliar o processo de geração dos parâmetros de simulação necessários ao desenvolvimento dos estudos subsequentes. Com base nessa nova ferramenta serão gerados 31 simulações de um caso simplificado que servirá de referência ao desenvolvimento de um modelo baseado numa regressão multivariada na tentativa de prever o impacto da presença de um obstáculo à frente de um ventilador de impulso. Finalmente, exemplifica-se a aplicação do modelo obtido a um caso concreto mais complexo onde se incluem carros, vigas e pilares no domínio de simulação.

1.3 Estrutura

No capítulo Capítulo 1 procede a um enquadramento do trabalho onde se apresentam dados relativos à evolução de ocorrências de incêndios, programas mais utilizados na modelação em CFD e a motivação que levou à realização deste trabalho.

Sendo a segurança contra incêndios dependente de diversos factores, no Capítulo 2 disserta-se sobre o incêndio com foco na descrição conceptual do fogo e das tecnologias de deteção e extinção bem como das forma de comunicação entre as várias fases de um incêndio. No mesmo capítulo apresenta-se ainda um visão sobre o enquadramento legal dos incêndios em edifícios e, no último subcapítulo faz-se uma revisão a alguns dos modelos simplificados encontrados na literatura.

Porque este trabalho incide num programa baseado em CFD, no Capítulo 3 faz-se uma descrição da modelação neste contexto. Começa-se por introduzir alguns números adimensionais úteis na compreensão dos fenómenos envolvidos bem como no apoio à criação das condições de simulação adequadas. Posteriormente, são descritas as equações que regem o escoamento bem como uma metodologia de discretização das equações. Finalmente, descrevem-se alguns problemas que surgem da aproximação à incompressibilidade e das técnicas usadas na modelação de turbulência.

No Capítulo 4 apresenta-se o caso de estudo onde se faz uma descrição do programa de apoio ao FDS desenvolvido em Python e da simulação de vários casos simplificados que serviram de base ao desenvolvimento de um modelo de apoio à compreensão das relações existentes entre as condições dimensionais de projeto e o impacto destas na evacuação de pessoas. Finalmente, para verificação da capacidade de generalização do modelo realiza-se um caso mais complexo onde são incluídos carros e outros obstáculos.

Finalmente, no capítulo 5 são apresentadas as principais conclusões deste trabalho, bem como algumas sugestões para trabalhos futuros.

2 Incêndio

Quando se fala em segurança contra incêndios existem vários factores que se dispersam por diversos âmbitos a ter em conta. Em concreto, a NP 4540-2015 define os requisitos de sistemas de ventilação de impulso em parques de estacionamento cobertos não compartimentados. Segundo a mesma norma, a sequência de eventos a serem considerados no caso de incêndio são:

1. Ignição;
2. Detecção do incêndio;
3. Confirmação do incêndio;
4. Alerta dos bombeiros;
5. Alarme da existência do incêndio;
6. Evacuação de pessoas;
7. Operação do sistema de controlo de fumo;
8. Fim da evacuação do parque;
9. Chegada dos bombeiros;
10. Acesso dos bombeiros à zona sinistrada;
11. Combate do incêndio;
12. Extinção do incêndio;
13. Verificação de vítimas no parque de estacionamento.

E, portanto todos os parâmetros de cada uma das fases associados aos vários eventos resultam de uma fase de projecto onde se tem que ponderar a localização e a equidade dos sistemas a implementar sempre respeitando a legislação em vigor. Para que tal seja feito é necessário que se tenha a compreensão dos fenómenos e das melhores estratégias para cada caso concreto. Nesse sentido, neste capítulo, começa-se por apresentar os conceitos associados à fenomenologia do fogo, no capítulo 2.1. No capítulo 2.2 e capítulo 2.3 disserta-se sobre a deteção e extinção de incêndios, respectivamente.

Para que ambos funcionem em sintonia, há a necessidade de se adotarem estratégias de comunicação que permitam não só encurtar o tempo entre a deteção e a atuação, mas também que estas sejam claras na sua validade e localização (capítulo 2.4).

O enquadramento legal da segurança contra incêndios, com foco nos parques de estacionamento é descrito no capítulo 2.5. Finalmente, no capítulo 2.6 são apresentados alguns modelos simplificados de apoio ao projecto que se baseiam em balanços de massa e energia e que permitem estimar temperaturas a diferentes distâncias do foco de incêndio.

2.1 Introdução Conceptual ao Fogo

A variedade de combustíveis e das condições a que se encontram quando se dá a sua queima tornam o estudo da combustão difícil. Se por um lado os fenómenos que se verificam são muito complexos, variados e fugazes, como a evaporação, ebulição, fusão, sublimação, decomposição, entre outros. Por outro, os materiais não são homogêneos nem na forma nem na composição química. Os fenómenos envolvidos na modelação da combustão implicam a consideração de uma série de conceitos amplos nas suas várias áreas:

- Transferência de massa;
- Transferência de quantidade de movimento;
- Transporte de partículas;
- Cinética química:
 - Velocidade de Reação;
 - Energia de Activação;
- Transferência de calor:
 - Condução;
 - Convecção;
 - Radiação;
- Turbulência:
 - Interação turbulência-química;
- entre outros.

Em particular, a combustão é muito influenciada pela forma como se dá a mistura entre o oxidante e o combustível, assim sendo os processos de combustão são bastante diversos. Alguns exemplos dessa variedade podem ser olhados pela estado em que o combustível se encontra, na forma sólida [5], líquida [6], spray [7], gasosa [8], pulverizada [9–11], entre outras.

Quando se encontra uma atmosfera com condições específicas, nomeadamente na presença de uma fonte de calor, combustível e comburente, dá-se uma reação exotérmica denominado de combustão figura 2.1 [12,13]. Essas três condições são, no entanto, insuficientes para o prevalecimento do fogo, isto é, a reação química inerente ao processo de combustão deve ser capaz de produzir calor suficiente para se auto-sustentar e, portanto, promover a reação em cadeia [12]. De notar que a extinção de um incêndio é proporcionada pela inibição de qualquer um desses fatores, isto é, por exemplo, por abafamento inibe-se a presença de comburente.

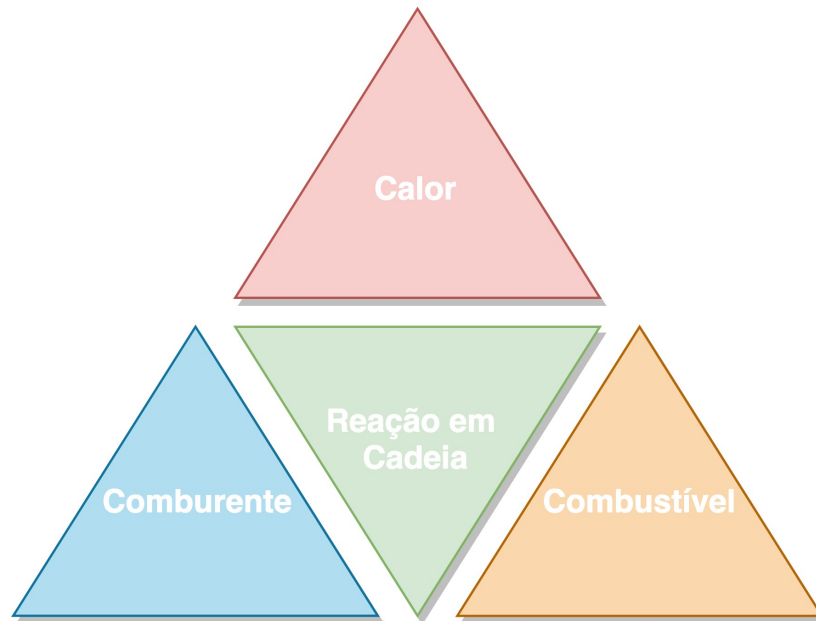


Figura 2.1: Esquema representativo dos elementos necessários à prevalência de fogo.

A norma NP 3874-1 define, entre outros, os conceitos [13]:

- Temperatura de inflamação: temperatura à qual a mistura dos vapores emitidos por líquido combustível com o ar se inflama aquando na presença de uma chama, mas que se apaga quando se remove a fonte de calor;
- Temperatura de combustão: temperatura à qual a libertação dos gases do líquido combustível se misturam com o ar e, com a presença de uma ignição, se inflamam, mas mantém a chama mesmo que se retire a fonte de ignição;
- Temperatura de ignição: temperatura à qual os gases libertados do líquido se misturam com o ar e se auto-inflamam dispensando a presença de qualquer fonte de ignição.

Outro factor importante passa pela diferenciação de como a chama é produzida, isto é, uma chama resultante de um jacto não terá o mesmo comportamento que a chama proveniente de uma fogueira já que além da turbulência a mistura dá-se de uma forma diferente. Aliás, quando a chama resulta, por exemplo, de um incêndio habitacional as forças de impulsão (*buoyancy*) são muito significativas. Assim sendo, modelos como a aproximação de Boussinesq são frequentemente usadas [12].

No caso de uma chama dita natural, isto é proveniente de material a arder espontaneamente, a chama é maioritariamente dominada pela flutuabilidade (convecção natural) pelo que a

influência da inércia do gases voláteis que sobem é pequena [12]. Segundo a NP EN 2-1993 [13] consideram-se quatro classes de fogo, como função do estado do combustível:

- **Classe A** - Fogo resultante da combustão de materiais sólidos (ex: madeira, papel, carvão, etc). A combustão no estado sólido pode tornar-se incandescente e emitir forte radiação visível sem produção de chamas. Podem ser emitidos vapores combustíveis devido à decomposição de produtos voláteis que produzem chamas (pirólise);
- **Classe B** - Fogo derivado de combustíveis líquidos ou de sólidos liquidificáveis (ex: éteres, álcoois, cetonas, vernizes, ceras, etc);
- **Classe C** - Tem por base um gás como combustível (ex: metano, propano, acetileno, etc). As condições de temperatura, pressão, a proporção da mistura e a presença de uma fonte de energia devem ser controladas para que não haja inflamação;
- **Classe D** - Fogo da combustão de metais (ex: sódio, potássio, magnésio, etc)

Em adenda às classificações dispostas, em 2007 considerou-se um quinto elemento classificatório E para fogos derivados de material associado a óleos alimentares [13].

As divisões de classes são importantes não só na perspectiva de perceber a energia envolvida através da fonte combustível em questão, mas também no desenvolvimento das técnicas de extinção. Note-se que apagar um incêndio elétrico com água, por exemplo, tem o risco de colocar a pessoa em contacto com um meio condutor e, portanto, em risco de electrocução. Em tais situações é aconselhável, por exemplo, a utilização de pó químico ou de dióxido de carbono (CO₂).

Uma outra divisão desenvolvida relativamente aos tipos de incêndio encontra-se definida para sistemas mais complexos, sejam carros, comboios, materiais de edificação, entre outros. Esta abordagem define uma curva característica da evolução da taxa de libertação de calor (figura 2.2).

A figura 2.2 apresenta várias curvas nominais standardizadas. A ISO-834 é direccionada para a sua utilização em elementos construtivos (celulósicos). HC (*Hydrocarbon*) refere-se aos hidrocarbonetos e foi desenvolvida por carência da curva ISO-834 na modelação aplicada à indústria petroquímica. Não obstante, a legislação francesa não aceitou a mesma obrigando a geração de uma modificada, a HCM (*Hydrocarbon Modified*). As curvas RABT (do alemão que significa Diretivas na Configuração e Operação de Estradas em Túneis) foram desenvolvidas na Alemanha à luz de uma série de projectos, como é o caso do EUREKA [15], para aplicação a automóveis e comboios. Finalmente, a curva RWS (*Rijkswaterstaat*), foi desenvolvida pelo ministro dos transportes Holandês para aplicação em túneis, partindo dos pressupostos de que

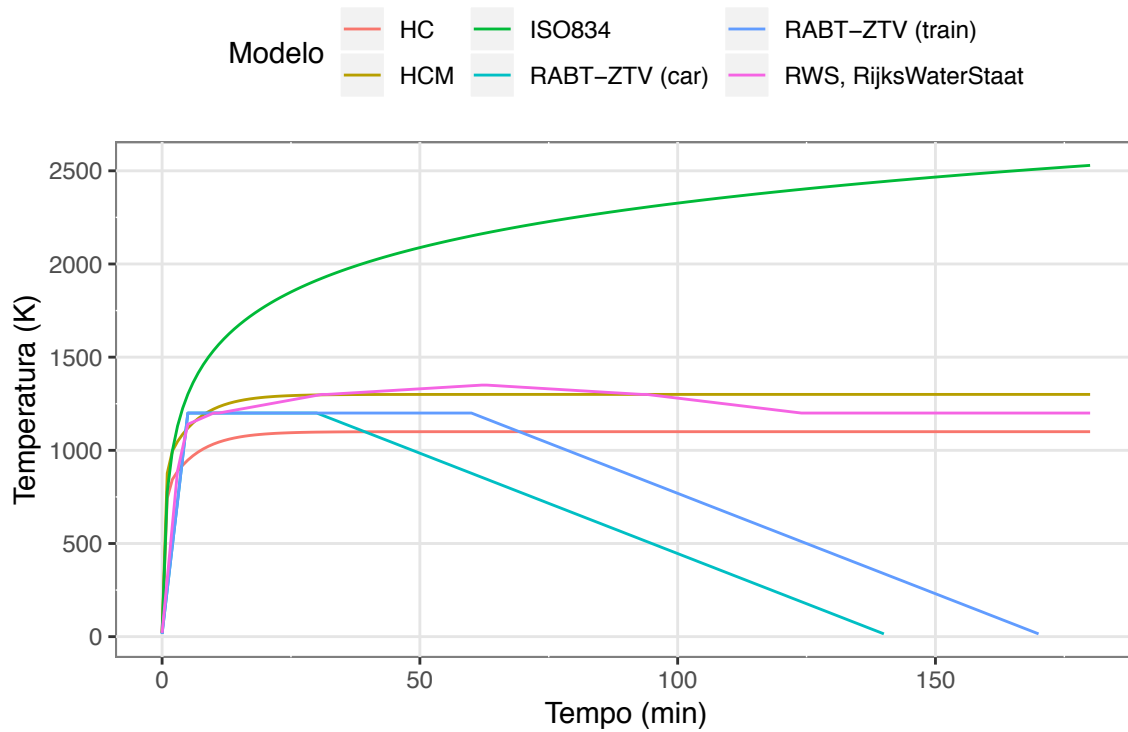


Figura 2.2: Curvas caraterísticas (adaptado de [14]).

existem 50 m^3 de combustível com uma potência disponível de 300 MW e que a sua queima pode durar até 120 minutos [14].

2.2 Detecção de Incêndios

Muitos dos incêndios são colmatados ainda na fase de *pre-flashover* seja por auto-extinção, seja pela actuação precoce no mesmo. Assim sendo, na ocorrência de um incêndio a sua detecção com a máxima celeridade é fulcral para que sejam iniciados todos os procedimentos necessários ao alarme, confinação, extinção e à evacuação das pessoas atenuando os riscos agravados derivados da sua evolução.

Num sistema de detecção, os fenómenos que os equipamentos procuram identificar são [13]:

- Aumento de temperatura;
- Produção de fumos;
- Produção de gases;
- Produção de chamas.

E os sistemas de deteção são caracterizados por:

- Detetores térmicos;
- Detetores de fumos;
- Detetores de chamas;
- Detetores de dupla tecnologia;
- Detetores de gás;
- Detetores laser.

Na ausência de um Sistema Automático de Deteção de Incêndio, SADI, as pessoas são responsáveis pela deteção que geralmente tem por base o cheiro de fumos, aviso por parte de outros ocupantes e/ou ruído. Alguns pormenores que devem ser atendidos por um projectista de segurança contra incêndios são:

- Identificar o local provável em que se poderá despoletar o incêndio;
- Altura do espaço a proteger;
- Temperatura ambiente;
- Exposição a ventos ou ventilação;
- Equidade dos detetores ao meio em que se encontram inseridos;
- Deteção de eventuais elementos presentes que possam gerar falsos positivos.

Os detetores podem ser divididos pela medição que efectuam e pelo tipo de medição como é seguidamente descrito [13].

2.2.1 Detector Térmico

Responsável por detectar uma alteração de temperatura. Podem ser divididos pelo seu tipo:

- Tipo Termostático - São despoletados pela ruptura de um contacto accionado por uma lâmina bimetálica. Responde às altas temperaturas. E detém as seguintes características:
 - Adequado para locais de temperatura estável;
 - Locais com libertação de fumos, gorduras e/ou vapores;
 - Fogos com rápido aumento de temperatura;
 - Locais com pé direito inferior a 7 metros;
 - Locais de muita humidade relativa.

- Tipo Termovelocimétrico - Consiste em dois tubos concêntricos com comportamentos diferentes ao aumento de temperatura que fecham um circuito acionando um alarme. Responde às altas temperaturas. Aplicam-se os mesmos princípios que no caso dos termostáticos.
- Linear de Detecção Contínua - Equipamentos constituídos por uma resistência elétrica que varia fortemente com o aumento de temperatura. Responde a variações de temperaturas na ordem de 7 a 8 graus. A sua aplicação é efetuada tipicamente em:
 - Conduatas;
 - Túneis;
 - Zonas empoeiradas;
 - Locais com potencial de fogos com grande libertação de calor (ex: escritórios).

2.2.2 Detector de Fumos

O seu tipo pode ser dividido pelo recurso às diferentes tecnologias utilizadas.

- Iónicos - Constituídos por uma câmara de ionização onde se encontra uma pequena quantidade de material radioativo e dois eletrodos que medem a diferença de potencial. Devido ao material radioativo, o ar é ionizado e quando na presença do fumo diminui a sua condutância gerando o alerta. É particularmente adaptado para locais onde se verifique combustão lenta com libertação de gases combustíveis invisíveis.
- Ópticos - Possui uma fonte emissora de luz e fotocélulas que, quando na presença de fumo, altera-se a intensidade de luz recebida pelas fotocélulas:
 - Indicados para locais amplos, fechados e/ou com material combustível com libertação de fumos em abundância;
 - Desadequados em zonas com libertação de pós, vapores, gorduras ou com presença de campos elétricos.

2.2.3 Detector de Chamas

Apesar de serem detectores de resposta rápida, a sua utilização faz-se acompanhar de frequentes falsos alarmes quando a sua localização não é apropriada.

- Tipo Ultravioleta - Possuem um filtro de lente que elimina fontes de radiação com comprimentos de onda não desejadas seguida de uma célula fotoelétrica que faz a deteção de infravermelhos nas frequências de 5 a 30 Hz.

- Tipo Infravermelho - Estes são sensíveis à radiação infravermelha e portanto, quando este tipo de radiação puder chegar de outras fontes que não de chamas dar-se-ão falsos alarmes. Têm, no entanto, capacidade de vigiar num ângulo de 360° no plano horizontal ou vertical recorrendo a ecrans reflectores que fazem os raios incidir numa fotocélula.

2.3 Extinção de Incêndio

Após a detecção do incêndio há a necessidade de promover a sua extinção. Para isso existem várias técnicas disponíveis e que devem ser ajustadas à dimensão do edifício, do tipo de ocupação, das cargas de incêndio, da compartimentação interior, entre outros [13]. Os meios de extinção podem ser categorizados como de:

- Primeira intervenção - são meios que proporcionam um ataque ao incêndio o mais cedo possível. De utilização não só por equipas de segurança, mas também por ocupantes do edifício. Exemplos de tais meios são os extintores, as caixas de areia ou as mantas;
- Segunda intervenção - intimamente ligados à atuação das equipas de intervenção como é o caso dos bombeiros que recorrem a redes secas ou húmidas.

A extinção de um incêndio é, como visto, promovida pela inibição de um dos nós do triângulo de fogo, em particular descrevem-se as técnicas:

- Efeito de arrefecimento - promovido pela diminuição da temperatura (água, pó químico seco, dióxido de carbono, espumas, ou outros);
- Efeito de abafamento - meio pelo qual se reduz a quantidade de oxigénio junto ao incêndio para valores inferiores ao necessários para a sua prevalência (em torno de 15%). Algumas das técnicas que promovem esta ação são as mantas, caixas de areia e os extintores de dióxido de carbono;
- Efeito de inibição - a inibição da reação em cadeia é geralmente conseguida pela inserção de elementos químicos que alteram as reações químicas da chama interrompendo-a;
- Efeito de dispersão - processo de separação ou remoção do combustível. Neste caso só faz sentido a sua utilização em fogos sólidos visto que no caso dos líquidos, a sua dispersão aumentaria a área de contacto com o oxigénio proporcionando o efeito contrário ao pretendido.

A equidade do agente extintor é de vital importância já que a sua desadaptação pode não só não proporcionar os efeitos desejados como agravar o incêndio como se verá nos exemplos seguintes.

2.3.1 Água

A água é o agente extintor mais disseminado, não só por ser o mais disponível, mas também pelas suas capacidades extintoras, em particular, nos fogos de **classe A**. Devido à temperatura resultante do incêndio, a água tende a vaporizar; ora esta mudança de fase exige um consumo de energia considerável e que se encontra disponível pelo incêndio provocando um decréscimo da temperatura ambiente e inibindo um dos vértices do triângulo de fogo (figura 2.1), o calor. Um efeito secundário está relacionado com a própria evaporação da água criando uma atmosfera inerte que abafa o fogo.

Além das vantagens enunciadas, a utilização de aditivos na água conferem-lhe características otimizadas. Alguns desses aditivos são:

- Molhantes - atuam na tensão superficial da água permitindo maior área de contato com o combustível e, portanto, maior arrefecimento;
- Emulsores - criam condições ao desenvolvimento de bolhas aumentando igualmente a superfície de contato;
- Viscosificantes - derivados de algas aumentam a viscosidade da água provocando maior aderência, logo o tempo de contato é superior, portanto a atuação prolongada;
- Opacificantes - tornam a água opaca impedindo o atravessamento da radiação infravermelha.

Quanto à sua forma de utilização, pode ser por:

- Jato;
- Nevoeiro;
- Vapor.

Um reves das vantagens da utilização da água prende-se com o fato de ser boa condutora, logo, para fogos onde possam existir riscos elétricos, esta pode acarretar riscos de eletrocussão. Em fogos de **classe B** (combustíveis líquidos ou sólidos mas liquidificáveis) ou **F** (óleos alimentares), por exemplo, pode provocar a dispersão do incêndio dadas as suas características imiscíveis. No caso de fogos de **classe C** (combustíveis gasosos) o risco prende-se com a ebulição dos mesmos a baixas temperaturas.

2.3.2 Dióxido Carbono (CO₂)

Este agente é particularmente apropriado em fogos da **classe B** (combustíveis líquidos ou sólidos mas liquidificáveis) e **C** (combustíveis gasosos) em fogos de dimensões reduzidas. Uma vez que o agente é guardado em reservatórios no estado liquefeito, a sua pressão é alta. Ora, por um lado, quando sai do reservatório, a sua temperatura decai muito provocando um abaixamento de temperatura, e por outro, provoca um abafamento. Não deve, no entanto, ser utilizado em fogos da **classe D** (combustão de metais) quando os mesmos são instáveis, como é o caso de explosivos, nitratos ou outros. Outro cuidado a ter em conta está relacionado com o risco de asfixia quando não manuseado corretamente.

2.3.3 Pó Químico

A maior vantagem destes agentes está ligada ao seu largo espectro de aplicação nos diferentes tipos de fogo. Estes agentes têm adequação à extinção de fogos da **classe A**, **classe B**, **classe C** e **classe D** com diferentes tipos de pó. Entre elas estão as categorias que são auto-explicativas quanto à classe de fogo empregue [13]:

- ABC - constituído à base de fosfato de amónio entre outros aditivos que permitem uma melhoria da sua fluidez e resistência à humidade;
- BC - constituído à base de bicarbonato de sódio e outros aditivos. Apresenta melhores capacidades do que o dióxido de carbono;
- D - vulgarmente utilizado na indústria nuclear, aeronáutica e indústrias de metais no estado puro.

2.3.4 Espumas

As espumas surgiram dos novos desafios inerentes à indústria petroquímica. Estes agentes são uma mistura de água, ar ou CO₂ e emulsores.

Dada a sua baixa densidade permite abafar incêndios em que o combustível é de densidade inferior à da água (como é o caso do petróleo). Deste modo a espuma assenta na superfície do combustível impedindo a interação do oxigénio presente no ar com o combustível e que os subprodutos da combustão atravessem essa fronteira. São, portanto indicados para fogos da **classe A** e **classe B**. Devido à presença de água na sua constituição, estes agentes não devem ser utilizados em fogos elétricos.

As espumas podem ser mecânicas quando resultam da mistura da água com um Líquido Gerador de Espuma (LGE) como o ar, ou químicas quando a sua produção é derivada da reação entre soluções aquosas de sulfato de alumínio e bicarbonato de sódio.

O grau de expansão da espuma é dado pela ponderação entre o seu volume com o volume da solução espumífera original. Dividem-se quanto ao seu grau de expansão em:

- Baixa expansão (BE) - expansões inferiores a 20% o que implica grandes quantidades de água. Dado o seu peso são apropriadas para utilização ao ar livre já que não são tão suscetíveis às condições de vento;
- Média expansão (ME) - expansões entre 20% e 200%. Geralmente utilizadas para fogos com extensão limitada tanto interior como exterior;
- Alta expansão (AE) - expansões superiores a 200%. De utilização em recintos fechados ou confinados.

Como visto, as espumas resultam da sua mistura com um emulsor. Estes podem ser do tipo:

- Proteicos - obtidos por hidrólise de proteínas animais e usados em espumas de baixo grau de expansão;
- Sintéticos - obtidos de alguns hidrocarbonetos e indicados para espumas num largo espetro de graus de expansão;
- Polivalentes - são uma mistura de proteicos, sintéticos e de outros elementos que promovem a resistência das bolhas.

2.3.5 Hidrocarbonetos Halogenados (Halons)

Foram muito usados em incêndios de **Classe B** e **Classe C**; no entanto dada a sua influência pejorativa na camada de ozono têm caído em desuso. Por essa razão foram desenvolvidos os chamados Agentes Limpos como substitutos, mas que se encontram em aplicações muito específicas.

2.4 Comunicação entre deteção e extinção

Um Sistema Automático de Deteção de Incêndio, SADI, é um mecanismo que promove a rapidez de deteção, e providencia os alertas sonoros e/ou ópticos [13]. Há a necessidade de ter em conta que todos os procedimentos subsequentes da deteção devem ser dependentes da fiabilidade da mesma, já que os prejuízos de um falso positivo podem ser bastante danosos,

em determinados casos. No sentido de aumentar a fiabilidade da deteção, os sistemas de deteção necessitam de um período temporal suficiente para despoletar um alarme no sistema da GTC. A equidade do equipamento de deteção ao local onde será colocado é igualmente fundamental para se evitar falsos alarmes, por exemplo, em salas onde procedam soldaduras deve-se evitar detectores que tenham por base a medição de infravermelhos ou de ultravioletas. A má articulação dos sistemas de ar condicionado com os de deteção são igualmente perigosos, no entanto num sentido inverso, isto é, se houver interferência do fluxo de ar do sistema com o sistema de deteção, o alarme pode atrasar-se face à evolução do fogo provocando mais danos e/ou pondo em risco vidas.

2.5 Enquadramento Legal

Para que sejam compreendidos os procedimentos da Segurança Contra Incêndios em Edifícios (SCIE) explanam-se alguns dos conceitos fundamentais definidos na legislação portuguesa. Os princípios legais pelos quais se regem as actividades referentes a um parque de estacionamento são:

- O Decreto-Lei n.º 220/2008, de 12 de Novembro estabelece os princípios legais da segurança contra incêndios em Portugal;
- Seguidamente, a portaria n.º 1532/2008 de 29 de Dezembro adenda às disposições técnicas gerais e específicas da SCIE;
- Mais recentemente o Decreto-Lei n.º 224/2015 de 9 de Outubro revê os pressupostos definidos no Decreto de 2008.

Segundo o disposto na legislação, o tipo de utilização dada a cada edifício potencia um risco associado de incêndio. Assim sendo, tanto no artigo 8.º do Decreto-Lei n.º 220/2008, de 12 de Novembro bem como na sua revisão de 2015 definem-se 12 Utilizações-Tipo, UT:

- UT I - Habitacionais;
- **UT II - Estacionamentos (Corresponde a edificios ou partes de edificios destinados exclusivamente à recolha de veículos e seus reboques, fora da via pública, ou recintos delimitados ao ar livre, para o mesmo fim.);**
- UT III - Administrativos;
- UT IV - Escolares;
- UT V - Hospitalares e lares de idosos;
- UT VI - Espectáculos e reuniões públicas;
- UT VII - Hoteleiros e Restauração;

- UT VIII - Comerciais e Gares de transportes;
- UT IX - Desportivos e Lazer;
- UT X - Museus e Galerias de Arte;
- UT XI - Bibliotecas e Arquivos;
- UT XII - Industrias, Oficinas e Armazéns.

Note-se que, em geral, é frequente a combinação de UT's num só edifício. Nestas situações os edifícios definem-se como de Utilização-Tipo Mista e, segundo o n.3º do art. 8.º do Regime Jurídico (RJ), estão abrangidos pelo disposto relativamente a cada UT exceptuando quando se verificam os pressupostos do n.3º do art. 8.º do RJ. Com base na UT, são definidas categorias de risco tendo por base diferentes dependências à luz da UT aplicável (Tabela 2.1).

Tabela 2.1: Fatores Risco das UT (adaptado de [13]).

Fatores Risco	UT I	UT II	UT III	UT IV	UT V	UT VI	UT VII	UT VIII	UT IX	UT X	UT XI	UT XII
Altura das UT	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	-
Área Bruta	-	o	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Saída Direta ao Exterior	-	-	-	o	o	-	o	-	-	-	-	-
Coberto/ar livre	-	o	-	-	-	o	-	-	o	-	-	o
Efetivo total as UT's	-	-	o	o	o	o	o	o	o	o	o	-
Efetivo local	-	-	-	o	o	-	o	-	-	-	-	-
Nº Pisos abaixo plano de referência	o	o	-	-	-	o	-	o	o	-	o	o
Densidade de Carga de Incêndio	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	o	o

Para o caso em estudo, e a título de exemplo, note-se que a categoria de UT-II é categorizada por interdependência da Altura da UT, Área Bruta, Cobertura e n.º de pisos abaixo do plano de referência. Assim sendo, definem-se cada um dos termos à luz do RJ [13]:

- A alínea a) do art. 2.º do RJ define que a **altura da UT** é,

a diferença de cota entre o plano de referência e o pavimento do último piso acima do solo, susceptível de ocupação por essa utilização-tipo.
- A alínea b) do art. 2.º do RJ define que a **área bruta** é,

a superfície total de um dado piso ou fracção, delimitada pelo perímetro exterior das paredes exteriores e pelo eixo das paredes interiores separadoras dessa fracção, relativamente às restantes.

- A alínea p) do art. 2.º do RJ define que o **plano de referência** da UT é,

o plano de nível, à cota de pavimento do acesso destinado às viaturas de socorro, medida na perpendicular a um vão de saída directa para o exterior do edifício.

Com base nos parâmetros inerentes a cada um dos factores de risco considerados para a UT são definidas **categorias de risco**, isto é, segundo a alínea e) do art. 2.º do RJ, categoria de risco da UT é [13],

a classificação em quatro níveis de risco de incêndio de qualquer utilização-piso de um edifício e recinto, atendendo a diversos factores de risco, como a sua altura, o efectivo, o efectivo em locais de risco, a carga de incêndio e a existência de pisos abaixo do plano de referência, nos termos previstos no artigo 12.º.

No caso concreto de UT-II, a tabela 2.2, descreve o nível da categoria de risco.

Tabela 2.2: Categorias de Risco das UT (adaptado de [13]).

Categoria Risco	Altura	Área Bruta Ocupada	Numero Pisos abaixo do PR	Ao Ar Livre
1. ^a	≤ 9 m	≤ 3200 m ²	≤ 1	Sim/Não
2. ^a	≤ 28 m	≤ 9600 m ²	≤ 3	Não
3. ^a	≤ 28 m	≤ 32000 m ²	≤ 5	Não
4. ^a	> 28 m	> 32000 m ²	> 5	Não

Todos os locais da UT devem estar definidos segundo a natureza do risco de incêndio nele contido à excepção dos interiores dos fogos e das vias de evacuação. Esta categorização é desenvolvida com base nos pressupostos:

- Local de risco A - *Locais que não apresenta riscos especiais, no qual se verifiquem simultâneamente as seguintes condições:*
 - i) *O efetivo não exceda 50 pessoas;*
 - ii) *O efetivo de público não exceda 50 pessoas;*
 - iii) *Mais de 90% dos ocupantes não se encontrem limitados na mobilidade ou nas capacidades de percepção e reacção a um alarme;*

- iv) *As actividades nele exercidas ou os produtos, materiais e equipamentos que contém não envolvam riscos agravados de incêndio.*
- Local de risco B - *Local acessível ao público ou pessoal afeto ao estabelecimento, com um efetivo superior a 100 pessoas ou um efetivo de público superior a 50 pessoas, no qual se verifiquem simultaneamente as seguintes condições:*
 - i) *Mais de 90% dos ocupantes não se encontrem limitados na mobilidade ou nas capacidades de percepção e reação a um alarme;*
 - ii) *As atividades nele exercidas ou os produtos, materiais e equipamentos que contém não envolvam riscos agravados de incêndio.*
- **Local de risco C** - *Local que apresenta riscos agravados de explosão e de desenvolvimento de incêndio devido, quer às atividades nele desenvolvidas, quer às características dos produtos, materiais ou equipamentos nele existentes, designadamente à carga de incêndio.*
- Local de risco D - *Local de um estabelecimento com permanência de pessoas acamadas ou destinado a receber crianças com idade não superior a seis anos ou pessoas limitadas na mobilidade ou nas capacidades de percepção e reação a um alarme.*
- Local de risco E - *Local de um estabelecimento destinado a dormida, em que as pessoas não apresentem as limitações indicadas nos locais de risco D.*
- Local de risco F - *Local que possua meios e sistemas essenciais à continuidade de atividades sociais relevantes, nomeadamente os centros neurálgicos de comunicação, comando e controlo.*

Ora, num parque de estacionamento, dada a presença de material inflamável, quer os combustíveis como a gasolina ou o diesel quer, tendencialmente, as baterias, acarretam um incremento no risco não só no despoletar de um incêndio, mas também nas dimensões que o mesmo poderá atingir dada a energia nela contida. Assim sendo, o espaço de estacionamento de uma UT II insere-se num local de risco do tipo C. Estas caracterizações apresentadas anteriormente de UT, CR e LR são de fulcral importância na seleção dos métodos e estratégias a adotar e que se encontram descritas no RJ.

2.6 Modelação em Incêndios

O controlo de fumos, em espaços, é essencial para se garantir a segurança das pessoas dando-lhes tempo para se colocarem em segurança. Nesse sentido, o projecto de sistemas de

desenfumagem deve garantir a eficiência adequada para que não exista acumulação de camadas de fumo que ponham em risco a capacidade das pessoas de se colocarem em segurança.

Para auxiliar ao projecto de tais sistemas, foram desenvolvidos diferentes modelos. Os primeiros, baseavam-se em zonas individuais e foram desenvolvidos por Pettersson, Magnusson e Thor em 1976, depois, em 1978, Babrauskas e Williamson apresentaram novos modelos de zona [16]. Tais modelos, baseiam-se na conservação de massa e energia dos diferentes compartimentos. Para tal, têm em consideração a taxa de libertação de calor dos materiais combustíveis, as plumas do incêndio, o escoamento, o movimento dos fumos e temperaturas de gás. Nos subcapítulos seguintes descrevem-se estes, e alguns dos outros modelos mais comuns na compreensão de incêndios em edifícios.

2.6.1 Fogo Localizado

Estes modelos são comumente usados quando é improvável a ocorrência de *flash-over* [17]. Nestes modelos procuram-se perceber quais as temperaturas sentidas por elementos a alturas (figura 2.3) e distâncias distintas (figura 2.4).

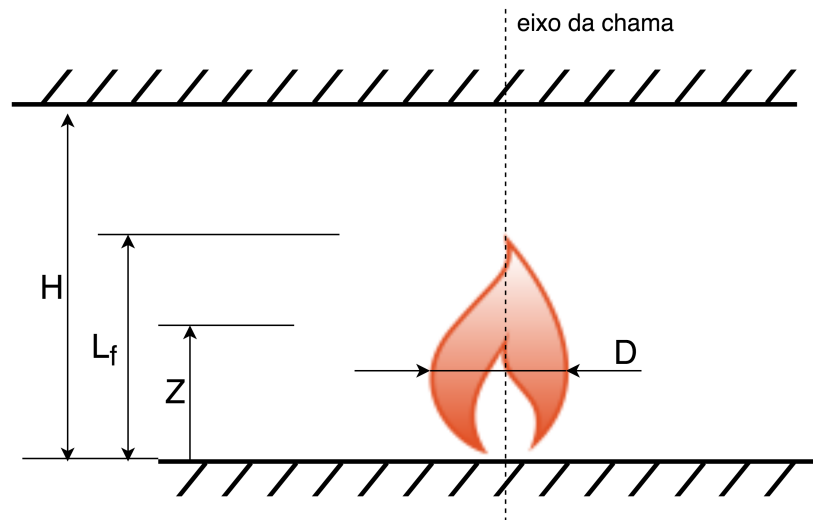


Figura 2.3: Esquema de medição de distâncias para a modelação da pluma (adaptado de [18]).

Atendendo a que:

H - é a distância da fonte de incêndio ao teto em metros;

Z - é a distância no eixo da chama em metros;

D - é o diâmetro do fogo em metros;

Q - é a taxa de libertação de calor da chama em Watt;

Q_c - é o termo convectivo da libertação de calor (geralmente assumido de $Q_c = 0.8Q$) em Watt.

Tem-se que, para $L_f < H$, isto é, a pluma não incide no teto, a altura da pluma é dada por,

$$L_f = -1.02D + 0.0148Q^{2/5} \quad (1)$$

E a temperatura, para valores inferiores a 900°C , como função da altura Z é,

$$\Theta(Z) = 20 + 0.25Q_c^{2/3}(Z - Z_0)^{-5/3} \quad (2)$$

onde Z_0 é definido como a origem virtual do eixo e é calculado por,

$$Z_0 = -1.02D + 0.00524Q^{2/5} \quad (3)$$

No caso em que se obtém $L_f > H$ então a pluma está a interagir diretamente com o teto e, portanto, a abordagem terá de ser distinta (figura 2.4).

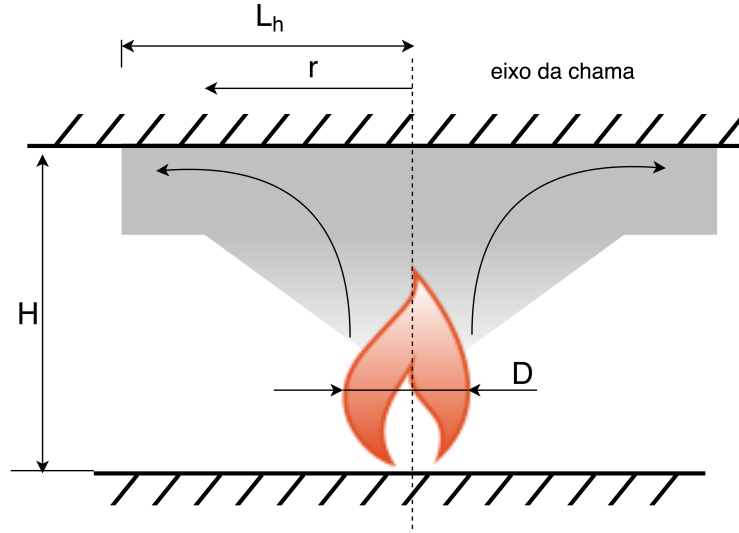


Figura 2.4: Esquema de medição de distâncias para a modelação da temperatura sentida por elementos nas imediações (adaptado de [18]).

Neste caso, o fluxo de calor transferido devido à exposição por área de superfície $\dot{h}(W/m^2)$,

$$\begin{cases} \dot{h} = 100000, & y \leq 0.30 \\ \dot{h} = 136300 - 121000y, & 0.30 < y < 1.0 \\ \dot{h} = 15000y^{-3.7}, & y \geq 1.0 \end{cases} \quad (4)$$

onde y caracteriza, de forma normalizada, a distância atingida pela pluma defletida lateralmente pelo teto relativamente ao eixo vertical e é dado por,

$$y = \frac{r + H + z'}{L_h + H + z'} \quad (5)$$

Atendendo a que r é a distância radial ao eixo da fonte de incêndio, junto ao teto, onde se está a determinar o fluxo de calor, a distância a que a chama chega L_h horizontalmente será dada por,

$$L_h = (2.9H(\dot{Q}_h))^{0.33} - H \quad (6)$$

onde \dot{Q}_h descreve a taxa de libertação de calor adimensionalmente,

$$\dot{Q}_h = \frac{Q}{1.11 \times 10^6 H^{2.5}} \quad (7)$$

e z' é a posição virtual vertical onde se encontra a fonte de calor e é dada por,

$$\begin{cases} z' = 2.4D(\dot{Q}_D^{2.5} - \dot{Q}_D^{2/3}), & \dot{Q}_D < 1.0 \\ z' = 2.4D(1.0 - \dot{Q}_D^{2/5}), & \dot{Q}_D \geq 1.0 \end{cases} \quad (8)$$

onde,

$$\dot{Q}_D = \frac{Q}{1.11 \times 10^6 D^{2.5}} \quad (9)$$

2.6.2 Modelo de Zona Singular

Os modelos de zona singular são dirigidos ao estudo do incêndio após se dar o *flash-over*.

De uma forma geral assume-se [17],

$$P_{int} = \rho_g R T_g \quad (10)$$

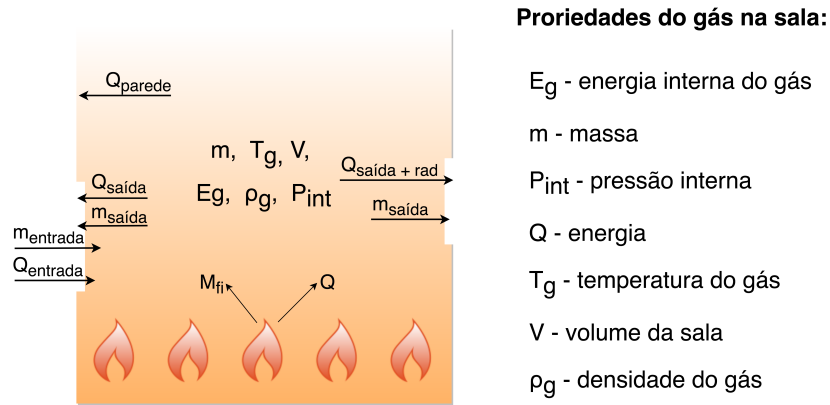


Figura 2.5: Modelo de zona singular (adaptado de [17]).

ou seja, a pressão da zona pode ser descrita pela equação dos gases perfeitos onde o subscrito g se refere ao gás no que diz respeito à massa volúmica, ρ_g e à temperatura, T_g , e, R , é a

constante universal dos gases. Por outro lado, o balanço de massa da sala pode ser definido como,

$$\frac{\partial m}{\partial t} = \dot{m}_{entrada} - \dot{m}_{saida} + \dot{m}_{fi} \quad (11)$$

o mesmo é dizer que a quantidade de massa de gás no compartimento em cada instante é dada pela diferença de caudal de massa que entra pelo que sai, $\dot{m}_{entrada}$ e \dot{m}_{saida} , respetivamente. Devido à queima de material dá-se um fenómeno denominado de pirólise que consiste em mais um incremento na quantidade de gás produzida na zona, \dot{m}_{fi} .

A equação 12 apresenta o balanço de energia que se efetua no modelo de zona apresentado na 2.5.

$$\frac{\partial E_g}{\partial t} = Q - Q_{saida} + Q_{entrada} - Q_{parede} - Q_{rad} \quad (12)$$

2.6.3 Modelo Multizona

Dadas as limitações dos modelos apresentados, rapidamente se desenvolveram outros que tinham em consideração a adjacência das zonas, os chamados modelos de multi-zona. Entre alguns desses modelos estão, por exemplo, o modelo de duas camadas [19]. A base de tais modelos assenta no pressuposto de que se dá uma estratificação dos gases onde o fumo tem tendência a se manter junto ao teto (figura 2.6).

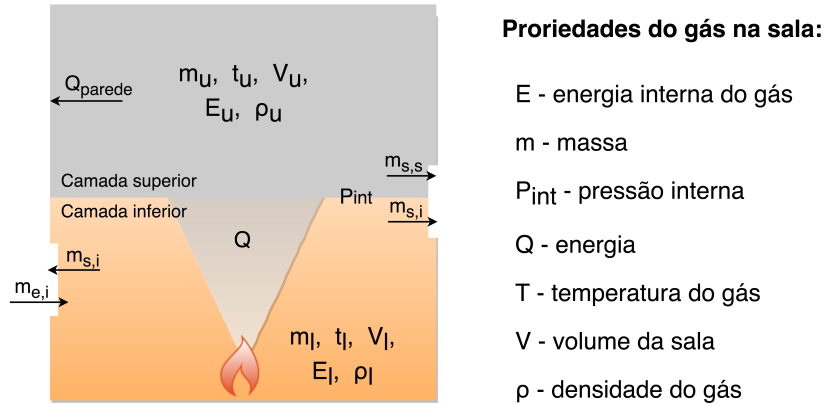


Figura 2.6: Modelo de duas zonas (adaptado de [18]).

Outros modelos podem ser encontrados em [21], alguns deles, com solução analítica outros com formulação experimental de tentativa e erro que visam a simplificação do problema. Os modelos de duas camadas não são apenas frequentemente usados [21] como estão em constante revisão já que são computacionalmente acessíveis e proporcionam respostas com alguma rapidez e fiabilidade com vista à sua aplicação prática como no dimensionamento dos sistemas inerentes.

2.6.4 Outros Modelos

Em geral, os modelos em compartimentos, têm como variáveis de entrada a geometria do compartimento, as propriedades das superfícies de contorno (condução térmica, capacidade térmica, ou outras, das paredes, tecto, etc.), a localização de objetos, a presença de ventilação e suas características e os dados do próprio incêndio. Relativamente ao incêndio, existem várias abordagens à inclusão da informação no modelo, onde o caso mais simples passa pela definição da taxa de libertação de calor (*Heat Release Rate*, HRR) com uma dada duração e local e depois findada. Outras alternativas passam pela variação da HRR no tempo, pela contemplação de variação na combustão do combustível entre incandescente e chama e a incorporação da propagação do incêndio a meios combustíveis próximos por ignição espontânea.

Em 1992 Raymond Friedman desenvolveu uma revisão alargada dos modelos existentes na modelação de incêndios [22]. Dessa revisão resultaram 74 modelos de 10 países distintos agrupados em modelos de zona para compartimentos de incêndio, modelos de campo para incêndios em compartimentos, submodelos para resistência ao fogo, submodelos para evacuação de edifícios, submodelos para atuação de detectores térmicos, modelos de interação contra incêndio e aspersão, e outros modelos. No mesmo trabalho é feita a distinção entre modelo de campo - modelo onde o domínio é dividido em milhares de células ou elementos e que requer computadores com recursos exigentes (CFD) - de modelos de zona - modelo principalmente unidimensional e que se limita a dividir o domínio de estudo em apenas algumas zonas e, portanto, de relativa fácil computação. Em 2003, é feita uma atualização ao mesmo artigo por Olenick et al. [23] onde se reúnem 168 modelos. Neste trabalho são associados novas categorizações aos modelos pré-definidos, isto é, em adenda aos modelos de zona e aos modelos de campo são agrupados os detector modelos de resposta, modelos de saída, modelos de resistência ao fogo e outros modelos. Em ambos os trabalhos, muitos dos modelos focam-se em zonas específicas do período de incêndio.

Além da temperatura, das taxas de transferências de calor para os elementos estruturais e a visibilidade a que as pessoas estão sujeitas, numa eventual fuga, as concentrações dos subprodutos provenientes da combustão são muitas vezes, também elas fontes incapacitantes

da evacuação. A *Fractional Effective Dose* (FED) quantifica a dose ponderada de vários elementos inabilitantes vulgarmente encontrados em incêndios em edifícios [24].

$$FED_{tot} = (FED_{CO} + FED_{NO_x} + FLD_{irr}) \times HV_{CO_2} + FED_{O_2} \quad (13)$$

Onde, na equação 13, os termos FED parciais de cada um dos elementos são quantificados integrando no tempo a exposição aos mesmos, FLD refere-se à dose letal (*Fractional Lethal Dose*) e HV é um factor de hiperventilação [25].

Não obstante, os modelos de CFD são, sem dúvida, das ferramentas que permitem atingir um maior detalhe. Em [26] é feita a comparação entre os resultados obtidos de vários modelos simplificados e de CFD usando o FDS. Este detalhe é alcançado à custa do aumento da complexidade matemática e numérica inerente à resolução das equações. O capítulo seguinte dará uma introdução ao que é o CFD e como se desenvolve a aplicação do mesmo a casos concretos.

3 Dinâmica de Fluidos Computacional

O CFD aborda métodos de aproximação à solução das Equações Diferenciais às Derivadas Parciais (PDE, *Partial Differential Equations*) que regem os escoamentos de fluidos, através da sua transformação em equações algébricas [27]. Esta aproximação resulta da dificuldade ou, na maior parte das vezes, impossibilidade de se resolverem as PDE e, desta forma se obter conhecimento de um campo de temperatura, velocidade, etc, num problema complexo e com um erro aceitável.

Neste capítulo, começar-se-á por fazer uma revisão a alguns dos coeficientes adimensionais relevantes para o desenvolvimento do estudo (capítulo 3.1). Estes têm um papel relevante não só na preparação de trabalhos e escolha de modelos como na interpretação de resultados apoiando à verificação dos resultados produzidos. Seguidamente, são apresentadas as equações que regem o escoamento no capítulo 3.2. No capítulo seguinte (capítulo 3.3) é feita uma introdução à discretização das equações usando as diferenças finitas com o apoio de um exemplo da condução de calor.

No capítulo 3.4 são apresentadas as motivações à aproximação de um modelo incompressível bem como as implicações de tal decisão.

Finalmente, no capítulo 3.5 são descritos os motivos da utilização dos modelos de turbulência bem como a introdução do modelo *Large-Eddy Simulation*, LES e que é usado pelo programa FDS.

3.1 Números Adimensionais

Os números adimensionais descritos nos subcapítulos seguintes são de uso fulcral à compreensão dos fenómenos expectáveis de serem encontrados num determinado estudo. É com base nas conclusões depreendidas dos mesmos que muitos dos modelos são caracterizados, desde a incompressibilidade do fluido, passando pelos modelos de turbulência, de reação química até à própria discretização do domínio. Nesse sentido, a sua compreensão bem como as implicações deles provenientes é de extrema importância.

3.1.1 Número de Reynolds

O número de Reynolds (Eq. 14), Re , compara as forças de inércia do escoamento com as forças viscosas.

$$\text{Re} = \frac{\rho u L}{\mu} \quad (14)$$

Onde:

ρ - massa volúmica do fluido ($kg.m^{-3}$);

u - velocidade característica do escoamento (m/s);

L - dimensão característica (m);

μ - viscosidade dinâmica ($Pa.s$).

Esta comparação fornece informação sobre a turbulência do escoamento, isto é para velocidades baixas e/ou viscosidades altas um escoamento terá um comportamento laminar, pelo contrário, para altos valores de Re, o escoamento diz-se turbulento.

Uma vez que a escala dos fenómenos diminui com o aumento do número de Re, em geral, a dimensão da malha também deve ser reduzida. Este facto, acarreta um custo computacional que é muitas vezes impossibilitante de ser resolvido diretamente (*Direct Numerical Simulation*, DNS) obrigando ao recurso a modelos de turbulência que permitem relaxar o problema com o aumento da dimensão da malha através de simplificações que permitem modelar a turbulência em escalas maiores. Regra geral, a dimensão da malha cresce com $\text{Re}^{9/4}$.

3.1.2 Número de Mach

O número de Mach, Ma, é uma medida da distância a que um escoamento se encontra da velocidade do som, isto é,

$$\text{Ma} = \frac{u}{c} \quad (15)$$

Onde:

c - é a velocidade do som e é dada por,

$$c = \sqrt{\gamma \frac{R}{M} T} \quad (16)$$

Onde:

γ - índice adiabático, $\gamma \approx 1.4$ para o ar;

M - massa molar kg/mol;

R - constante universal dos gases perfeitos, $R = 8.3144621 J.kg^{-1}.K^{-1}$.

Para números de Ma inferiores a 0.3 diz-se que o escoamento é incompressível visto que os efeitos difusivos são dominantes face aos de compressibilidade [8].

3.1.3 Número de Peclet

O número de Peclet avalia a intensidade difusiva face à convectiva.

$$Pe = \frac{\rho u}{\Gamma/L} \quad (17)$$

Onde:

Γ - é o coeficiente difusivo.

Assim, para $Pe \gg 0$, o escoamento será maioritariamente convectivo. Por outro lado, no limite, se $Pe \rightarrow 0$ o escoamento será puramente difusivo. Este número permite assim, por exemplo, assumir simplificações e reduzir o custo computacional associado à resolução das equações aquando o mesmo toma valores extremos.

3.1.4 Número de Damköhler

A velocidade de uma reação química diz-se rápida quando o que a limita é a capacidade com que os fenómenos de transporte acontecem, por outro lado, dizem-se lentas se a própria cinética da reação química for o elemento condicionante. O número que quantifica a velocidade de reação é o número adimensional de Damköhler, Da , e que é definida pela razão entre a taxa dos fenómenos de transporte pela taxa a que dá a reação química (Equação 18}).

$$Da = \frac{\text{taxa de reação}}{\text{taxa dos fenómenos de transporte}} \quad (18)$$

Assim sendo, quando $Da \ll 1$ tem-se uma reação rápida e portanto a taxa de mistura tem de ser muito superior à da reação química, por outro lado se $Da \gg 1$ tem-se uma reação lenta e portanto dominada pela velocidade da reação química.

3.1.5 Distância à Parede y^+

Junto a elementos sólidos as tensões viscosas são elevadas devido à variação das distâncias entre as linhas de corrente bem como da velocidade efetiva do escoamento nessas zonas que promovem um comportamento laminar. Assim sendo, o comportamento do fluido nesses locais distancia-se do que se encontra no seio do escoamento onde os efeitos de turbulência são bastante mais notáveis. Por essa razão, em proximidades aos meios sólidos, os modelos de turbulência deixam de ser válidos e há a necessidade de se contemplarem as chamadas funções de parede. Nestas circunstâncias surge o designado parâmetro adimensional y^+ que providencia meios de se conhecer a distância normal à parede a partir da qual o comportamento muda. A figura 3.1 descreve os diferentes comportamentos do escoamento à medida que a distância ao meio de interação aumenta.

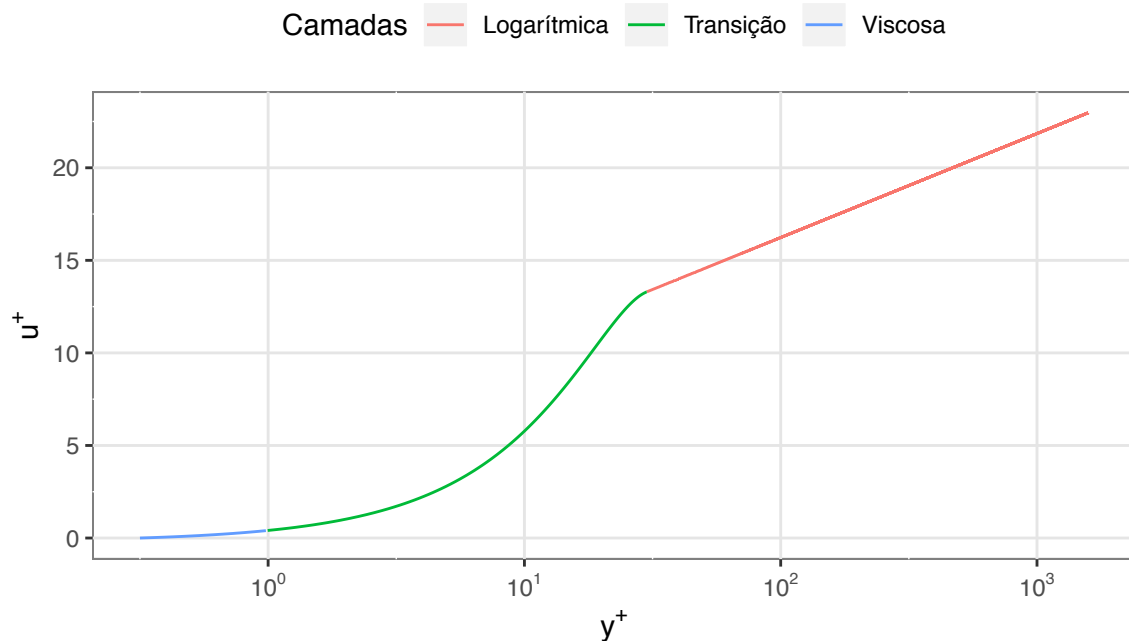


Figura 3.1: Tipo de escoamento dado pela distância à parede (adaptado de [8]).

Como enunciado, existe uma primeira fase, a subcamada viscosa, junto à parede, onde o comportamento é dominado pelas forças viscosas. Esta é seguida por uma zona de transição

(Transição) e, finalmente, uma outra onde a velocidade cresce de forma logarítmica (Logarítmica). Na última, os efeitos inerciais são superiores e os viscosos menores (quando comparados com efeitos junto à parede) e, portanto, os modelos de turbulência tornam-se válidos.

Diferentes funções de parede requerem valores de y^+ distintos. Este valor, é determinado por,

$$y^+ = \frac{\Delta y_p}{\nu} \sqrt{\frac{\tau_p}{\rho}} \quad (19)$$

onde;

Δy_p - é a distância do primeiro ponto à parede;

ν - é a viscosidade cinemática;

τ_p - é a tensão de corte na parede.

Se o valor de $y^+ \leq 11.63$ verifica-se que o escoamento junto à parede é laminar e, portanto, aí o escoamento é completamente dominado pelas forças viscosas. Em contrapartida, se $y^+ \geq 11.63$ o ponto mais perto da parede já não está na sub-camada viscosa [8].

De notar que a definição do valor de y^+ é dependente do conhecimento das tensões viscosas sendo, portanto, preciso resolver o modelo de CFD para se obter tal conhecimento, tornando-se, por isso, uma tarefa recursiva.

3.2 Equações de Conservação

A descrição dos modelos que regem um escoamento são baseados em princípios de conservação. Em geral, resumem-se à conservação de massa, à conservação de quantidade de movimento linear, à conservação de energia e à conservação de das espécies químicas. Neste subcapítulo apresenta-se a forma como cada um dos termos contribui para o balanço global de conservação e as formas como se apresentam na literatura.

3.2.1 Conservação de Massa

A quantidade de massa presente num determinado volume de controlo infinitesimal ao longo do tempo corresponde ao somatório de toda a massa que atravessa a superfície delimitadora desse volume de controlo em cada instante infinitesimal, isto é,

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{U}) = 0 \quad (20)$$

Onde:

ρ - é a massa volúmica da mistura em kg/m^3 ;

\vec{U} - é o vetor de velocidades em m/s em cada um dos eixos ordenados.

A equação traduz que a variação de massa, num elemento de volume, num dado instante, somada à massa que atravessa as fronteiras desse elemento de volume deve permanecer nula.

3.2.2 Conservação da Quantidade de Movimento Linear

A segunda lei de Newton postula que a variação de quantidade de movimento de uma partícula de fluido se iguala à soma de todas as forças que actuam nessa partícula. Geralmente, são ainda distinguidos dois tipos de forças, as de superfície (de pressão, viscosas, ou outras) e forças de volume (eletromagnética, a gravítica, ou outras). Assim, tem-se que,

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u \vec{U}) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \nabla \cdot (\rho \mu \nabla u) + S_{Mx} \quad (21)$$

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho v \vec{U}) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \nabla \cdot (\rho \mu \nabla v) + S_{My} \quad (22)$$

$$\frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho w \vec{U}) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \nabla \cdot (\rho \mu \nabla w) + S_{Mz} \quad (23)$$

Onde:

p - se refere à pressão em Pa ;

S_{M_i} , $i = x, y, z$ - às forças externas segundo a direção i ;

u, v, w - velocidades em cada uma das direções.

3.2.3 Conservação de Energia

A equação que postula a conservação de energia pode assumir várias formas, isto é, pode ser abordada do ponto de vista da energia específica, mas também da temperatura. De seguida apresenta-se a perspectiva da energia específica, e , da equação,

$$\frac{\partial \rho e}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho e \vec{U}) = -p \nabla \cdot \vec{U} + \nabla \cdot (k \nabla T) + \Phi + S_e \quad (24)$$

Onde k é o coeficiente difusivo que no caso da equação de calor é conhecido como o coeficiente de condução de calor e Φ ,

$$\Phi = \mu \left\{ 2 \left[\left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 \right] + \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right)^2 \right\} - \frac{2}{3} \mu (\nabla \vec{U})^2 \quad (25)$$

3.2.4 Conservação das Espécies Químicas

O balanço que garante a conservação das espécies químicas baseia-se na quantificação da fração mássica, Y_i , da espécie i .

$$\frac{\partial (\rho Y_i)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho Y_i \vec{U}) = \nabla \cdot (\rho D_i \nabla Y_i) + R_i + S_i \quad (26)$$

Onde D_i é o coeficiente de difusão da espécie i e R_i é o termo de fonte da reação e é dado por:

$$R_i = M_{w,i} \sum_{r=1}^{N_R} R'_{i,r} \quad (27)$$

em que:

$M_{w,i}$ - é a massa molar da espécie i ;

$R'_{i,r}$ - é a taxa de criação/destruição da espécie i na reação r .

Assim sendo, para a reação r tem-se que,



Em que:

\mathcal{M}_i - é a representação da espécie i ;

N - é o número total de espécies químicas envolvidas;

$v'_{i,r}$ - é o coeficiente estequiométrico do reactante i na reação r ;

$v''_{i,r}$ - é o coeficiente estequiométrico do produto i na reação r .

E a taxa à qual se dá a reação $R'_{i,r}$,

$$R'_{i,r} = \Gamma (v''_{i,r} - v'_{i,r}) \left(k_{f,r} \prod_{j=1}^{N_r} [C_{j,r}]^{\eta'_{j,r}} - k_{b,r} \prod_{j=1}^{N_r} [C_{j,r}]^{\eta''_{j,r}} \right) \quad (29)$$

Em que:

$C_{j,r}$ - é a concentração molar de cada reagente e produto da espécie j da reação r .

Γ - representa a influência de terceiros na taxa de reação com é o caso de catalisadores.

$$\Gamma = \sum_j^{N_r} \gamma_{j,r} C_j \quad (30)$$

Em que:

$\gamma_{j,r}$ - é a eficiência que o terceiro elemento tem na reação com a espécie j .

$\eta'_{j,r}$ - é definido como o expoente que potencia o avanço da reação;

$\eta''_{j,r}$ - como o que promove a retrocesso da reação.

A taxa à qual se dá a reação ($k_{f,r}$ e $k_{b,r}$) é fruto de diversos factores, no entanto o que tem maior preponderância é o da temperatura. Esta relação pode ser dada pela equação de Arrhenius,

$$k_{f,r} = A_r e^{\beta} \quad (31)$$

Onde o expoente é denominado de número de Zel'dovich (em combustão toma valores entre 8 e 20),

$$\beta = \frac{E_r}{RT} \alpha \quad (32)$$

E_r é a energia de ativação e α , o parâmetro de libertação térmica,

$$\alpha = \frac{T_f - T_0}{T_f} \quad (33)$$

que, em combustão, assume, geralmente, valores compreendidos entre 0.7 e 0.9. Em que T_f é a temperatura de chama e T_0 a temperatura do material não ardido.

Caso se verifique reversibilidade na reação, tem-se que,

$$k_{b,r} = \frac{k_{f,r}}{K_r} \quad (34)$$

Onde:

K_r - é a constante de equilíbrio da reação.

Uma alternativa mais recente à abordagem de Arrhenius passa pela equação de Eyring-Polanyi,

$$k_{f,r} = \frac{\kappa k_B T}{h} e^{-\frac{\Delta G}{RT}} \quad (35)$$

Este modelo procura aproximar-se mais dos fenómenos envolvidos do que a equação de Arrhenius, uma aproximação mais empírica e com menos significado físico. Note-se que os parâmetros ΔG (variação de energia de activação de Gibbs), κ (factor de transmissão), k_B (constante de Boltzmann) e h (constante de Planck) têm uma conotação física directa, contrariamente aos presentes na equação de Arrhenius.

3.2.5 Equação de Estado

Para se fechar o sistema é necessário ter-se uma equação para a pressão. Esta equação chega pela resolução de uma equação de estado. A mais frequentemente encontrada é a que assume um gás perfeito,

$$P = \rho \frac{R}{M} T \quad (36)$$

onde:

$R = 8.3144621 \text{ Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$ - é a constante universal dos gases ideais;

M - é a massa molar em kg/mol

3.2.6 Forma Geral das Equações

Convenientemente, verifica-se que o formalismo das equações é o mesmo, independentemente da conservação em causa. Essa forma pode ser descrita pela seguinte PDE,

$$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho\phi\vec{V}) = \nabla \cdot (\Gamma\nabla\phi) + S_\phi \quad (37)$$

Note-se que os termos não coincidentes entre equações são introduzidos como termos de fonte (por exemplo, é o caso da pressão que é inserida como força de superfície).

Integrando num volume de controlo,

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\int_{CV} \rho\phi dV \right) + \int_{CV} \nabla \cdot (\rho\phi\vec{V}) dV = \int_{CV} \nabla \cdot (\Gamma\nabla\phi) dV + \int_{CV} S_\phi dV \quad (38)$$

e aplicando o teorema de Gauss,

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\int_{CV} \rho\phi dV \right) + \int_A (\rho\phi\vec{V}) \cdot \vec{n} dA = \int_A (\Gamma\nabla\phi) \cdot \vec{n} dA + \int_{CV} S_\phi dV \quad (39)$$

Ou, em termos práticos,

A Variação no tempo + convecção = difusão + geração no volume de controlo

A equação 39 é bastante útil na aplicação direta do método dos volumes finitos, onde a integração é substituída por um método numérico de integração. Além disso, sendo uma forma genérica essa implementação é independente da lei conservativa em causa.

Não obstante, no caso do software FDS, o método de integração utilizado é o das diferenças finitas e, portanto, a equação (37) é mais útil para a aplicação direta desse método de discretização.

3.3 Diferenças Finitas

As diferenças finitas são um resultado das conclusões obtidas na expansão em série de Taylor que diz que [28],

$$f(x + \Delta x) = f(x) + \frac{\partial f(x)}{\partial x} \Delta x + \frac{\partial^2 f(x)}{\partial x^2} \frac{\Delta x^2}{2!} + \dots + \frac{\partial^n f(x)}{\partial x^n} \frac{\Delta x^n}{n!} \quad (40)$$

Dado que expansão completa é impraticável em termos de computação, o procedimento passa por se truncar esse cálculo até determinado número de termos. Assume-se assim um erro de ordem k que se escreve (O^k). Note-se que truncando após o primeiro termo e reescrevendo em ordem à derivada, tem-se,

$$\frac{\partial f(x)}{\partial x} \simeq \frac{f(x + \Delta x) - f(x)}{\Delta x} + (O^1) \quad (41)$$

Por substituição da equação (41) na equação (37) tem-se uma expressão algébrica o que permite a resolução (aproximada) das equações de conservação.

3.3.1 Exemplo de Aplicação

Dada a complexidade na discretização da equação (37), atente-se a um exemplo mais simples como é o da condução de calor unidimensional, definida por [28],

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (42)$$

Aplicando diretamente a equação (41) tem-se que o termo temporal pode ser definido por,

$$\frac{\partial T}{\partial t} \simeq \frac{T_i^{n+1} - T_i^n}{\Delta t} + (O^1) \quad (43)$$

Relativamente ao termo espacial tem-se uma segunda derivada. Neste caso, truncando a expansão de Taylor no termo correspondente e reescrevendo em ordem à segunda derivada, tem-se,

$$\frac{\partial^2 f(x)}{\partial x^2} \simeq \left[f(x + \Delta x) - f(x) - \frac{\partial f(x)}{\partial x} \Delta x \right] \frac{2!}{\Delta x^2} + (O^2) \quad (44)$$

Reiterando a equação (41) a primeira derivada á conhecida, note-se, no entanto, que assumindo que $f(x)$ é contínua, então a derivada à esquerda e à direita é igual. Isto implica que,

$$\frac{\partial f(x)}{\partial x} \simeq \frac{f(x + \Delta x) - f(x)}{\Delta x} = \frac{f(x) - f(x - \Delta x)}{\Delta x} \quad (45)$$

Apesar de, no ponto de vista do cálculo, esta afirmação ser verdadeira, no caso numérico a mesma assume repercursões importantes. Note-se que a mesma será tão mais verdadeira quanto mais próximo $\Delta x \rightarrow 0$. Estas definições conhecem-se como *feedforward* e *feedback*, respetivamente.

Substituindo a última igualdade da equação (45) na equação (44) tem-se,

$$\frac{\partial^2 f(x)}{\partial x^2} \simeq \left[f(x + \Delta x) - f(x) - \frac{f(x) - f(x - \Delta x)}{\Delta x} \Delta x \right] \frac{2!}{\Delta x^2} + (O^2) \quad (46)$$

Finalmente, simplificando, tem-se que a segunda derivada será dada por,

$$\frac{\partial^2 f(x)}{\partial x^2} \simeq \frac{f(x + \Delta x) - 2f(x) - f(x - \Delta x)}{\Delta x^2} + (O^2) \quad (47)$$

Note-se que o fator de 2 pode ser retirado sem perda de generalidade visto estar a ser dividido por Δx e que deve ser escolhido de acordo com o caso.

Neste caso, visto haver um cruzamento entre os métodos de *feedforward* e *feedback*, a este tipo de diferenças finitas chamam-se centrais. Substituindo na equação de calor tem-se, para o termo espacial,

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \frac{T_{i+1}^n - 2T_i^n + T_{i-1}^n}{\Delta x^2} \quad (48)$$

Similarmente ao exposto relativamente à igualdade das derivadas à esquerda e direita tem-se que a equação anterior também pode ser escrita em $n + 1$,

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \frac{T_{i+1}^{n+1} - 2T_i^{n+1} + T_{i-1}^{n+1}}{\Delta x^2} \quad (49)$$

Quando o valor seguinte está explicitamente identificado à custa do conhecimento já detido (caso do cálculo em n) diz-se que o esquema é explícito, em oposição diz-se que o esquema é implícito quando descrito em $n + 1$ o que obriga à resolução de um sistema acoplado. Neste último caso a estabilidade numérica na integração não é um fator relevante, mas os resultados podem-se afastar da solução exata quando os termos de Δt e Δx são escolhidos de forma desadequada.

Em particular a condição de Courant–Friedrichs–Lewy descreve a adequação de tais parâmetros por forma a se concretizar convergência na integração numérica,

$$C = \frac{u\Delta t}{\Delta x} \leq C_{max} \quad (50)$$

Em que C_{max} é função do esquema usado. Regra geral, para os métodos explícitos, o valor deve ser inferior a 1, no entanto, para métodos implícitos, este valor pode ser superior (apesar de com erros maiores).

Agregando as discretizações tem-se que a equação de calor (de forma geral) pode ser escrita como,

$$T_i^{n+1} = T_i^n + \alpha \left[m \frac{T_{i+1}^n - 2T_i^n + T_{i-1}^n}{\Delta x^2} + (1 - m) \frac{T_{i+1}^{n+1} - 2T_i^{n+1} + T_{i-1}^{n+1}}{\Delta x^2} \right] \quad (51)$$

Em que se $m = 0$ se tem o esquema implícito, se $m = 1$ o método diz-se explícito e, caso $m = 0.5$ se obtém o conhecido método de Crank–Nicolson. Na figura 3.2 apresenta-se um esquema para cada um dos vários métodos.

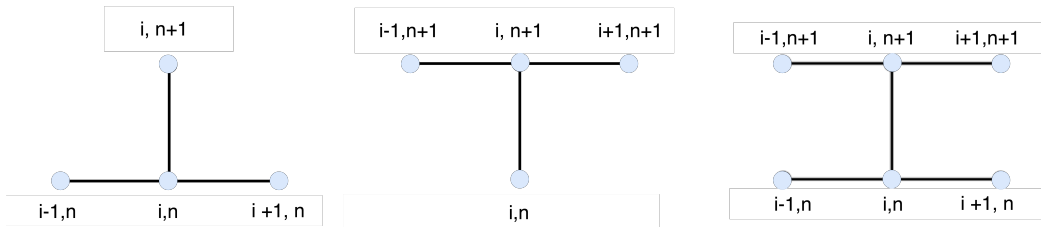


Figura 3.2: Esquema Explícito, Implícito e Crank-Nicolson (da esquerda para a direita).

Na figura 3.2 percebe-se a interdependência entre os vários pontos discretizados para cada um

dos esquemas numéricos enunciados.

3.4 Escoamento Incompressível

Como mencionado, o número de Mach permite ter uma ideia da dimensão dos fenômenos de compressibilidade envolvidos e, descartá-los, como aproximação, aquando pequenos. No caso de incêndio num parque de estacionamento, considerando uma velocidade máxima de 20 m/s e uma temperatura ambiente de 25°C obtém-se um número de Mach de 0.19 pelo que ainda se encontra bastante distante do valor de 0.3, a partir do qual se consideram efeitos de compressibilidade.

De notar a distinção entre fluido incompressível e escoamento incompressível. Se o primeiro implica massa volúmica constante em todos os pontos do domínio, o segundo significa que os efeitos de compressibilidade devido à pressão são negligenciáveis, não inviabilizando a sua alteração, por efeitos de temperatura, por exemplo (Aproximação de Boussinesq).

Apesar da validade das equações que assumem a compressibilidade em problemas ditos incompressíveis, do ponto de vista numérico surgem problemas de rigidez (*stiff*) na integração temporal obrigando a passos de tempo impraticáveis na obtenção de resultados em tempo útil (utilizando métodos explícitos). Por esse motivo, desenvolveram-se métodos alternativos que relaxassem a integração numérica. Um desses métodos passa pela integração numérica de forma semi-implícita. Este algoritmo, *Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations* (SIMPLE) usa uma abordagem de previsão-correção do valor da pressão. Com base nesse método desenvolvido por Patankar e Spalding em 1972 outros foram desenvolvidos na tentativa de tornar o método computacional menos exigente. Alguns desses algoritmos são o SIMPLER, o SIMPLEC e o PISO. Quando comparados em termos de eficiência computacional, no entanto, conclui-se que a aplicabilidade de cada um dos métodos é dependente do problema que se está a resolver [8] já que a eficiência resulta, muitas vezes, de maiores taxas de convergência e não do número de operações associados ao algoritmo.

A dificuldade que chega da consideração de um fluido incompressível resulta da perda da equação de estado. Note-se que se ρ é constante, o número de equações passa a ser menor que o número de incógnitas ficando um sistema indeterminado. Por esse motivo, muitos outros métodos se baseiam na derivação e posterior manipulação, seja da equação da continuidade, seja da equação da quantidade de movimento (como é o caso do FDS). Esta é uma forma prática de se obter a equação que falta para a fecho do sistema de equações.

3.5 Turbulência

Apesar de não haver uma definição taxativa para a turbulência, esta pode ser descrita por intermédio de vários fenómenos identificados [29]:

- i) Irregularidade - a turbulência é irregular, aleatória e caótica. No escoamento podem ser identificadas diferentes escalas (dimensão do turbilhão) onde as maiores são da dimensão do escoamento e as mais pequenas que são, devido às forças viscosas, dissipativas transformando-se em energia interna. Apesar de caótica, a turbulência é determinística e pode ser identificada pelas equações de Navier-Stokes;
- ii) Difusividade - com a turbulência ter-se-ão sempre maiores difusividades. A turbulência aumenta a interação de quantidade de movimento linear com os meios vizinhos, atrasa a separação de camada limite e aumenta a resistência ao avançar do escoamento em meios interiores (tal como em tubagens ou canais);
- iii) Altos Re - quando os números de Reynolds excedem 2300 em meios interiores ou 100000 em exteriores a turbulência tem preponderância no escoamento;
- iv) Tridimensionalidade - um escoamento turbulento tem sempre efeitos no escoamento na terceira dimensão;
- v) Dissipativos - Nos turbilhões de escalas menores a energia cinética do escoamento é convertida em energia interna. Esta energia chega dos turbilhões maiores que se vão dividindo em turbilhões cada vez mais pequenos (processo de cascata);
- vi) Continuidade - Apesar de se encontrarem escalas pequenas de turbilhões, estas ainda são muito superiores do que a escala molecular continuando a ser válida, por isso, o pressuposto de meio contínuo.

Quando a discretização o permite a turbulência emerge da resolução numérica das equações que governam o escoamento, DNS (*Direct Numerical Simulation*), no entanto, este é um método muitas vezes inviabilizado pelos recursos computacionais disponíveis. O método DNS necessita que a menor escala dissipativa, a escala de Kolmogorov (equação 53), seja contemplada,

$$\eta = \left(\frac{\nu^3}{\epsilon} \right)^{1/4} \quad (52)$$

portanto a célula da malha terá de ter uma dimensão h ,

$$h \leq \eta \tag{53}$$

No sentido de contornar este problema, algumas das estratégias desenvolvidas mais frequentemente encontradas na literatura são:

- RANS;
- k- ϵ ;
- k- ω ;
- LES.

A abordagem a estes modelos de turbulência parte da decomposição de Reynolds onde as variáveis apropriadas são consideradas como um resultado de um valor médio somado a uma perturbação, de média nula,

$$\phi(x, y, z, t) = \bar{\phi}(x, y, z, t) + \phi'(x, y, z, t) \tag{54}$$

Outra perspectiva inerente à equação que é útil na sua compreensão, é a de que a propriedade $\phi(x, y, z, t)$ é descrita por um valor preponderante, $\bar{\phi}(x, y, z, t)$, e descritível pelo modelo à dimensão da malha somado a outro de menor escala que já não é quantificável diretamente, $\phi'(x, y, z, t)$. Tal como descrito, as perturbações inferiores a determinada escala não são captadas pela dimensão da malha surgindo assim modelos de turbulência responsáveis pela sua geração (figura 3.3).

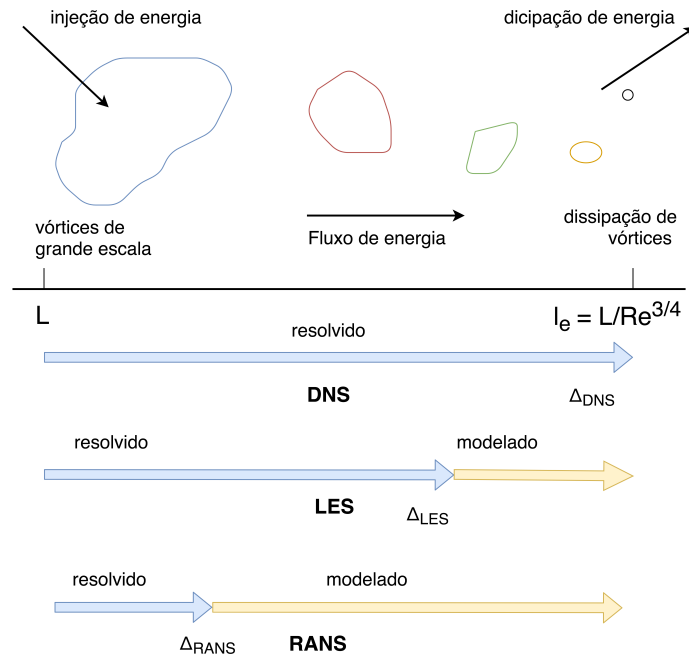


Figura 3.3: Escalas dos modelos de turbulência [30].

Geralmente, os modelos podem ser classificados em:

- *Reynolds-Averaged Navier-Stokes (RANS)*:
 - **Eddy-viscosity Models (EVM)** - Assume-se que as tensões de Reynolds são proporcionais à taxa média de deformação. Além disso, a viscosidade turbulenta é obtida das equações de transporte turbulentas. Geralmente é dada por k (intensidade turbulenta) mais outra quantidade.
 - **Non-linear Eddy-viscosity Models (NLEVM)** - As tensões de Reynolds são modeladas com uma função não linear resultante dos gradientes das velocidades médias. Geralmente é dada por k mais outra quantidade.
 - **Differential Stress Models (DSM)** - Consiste nos Reynolds-Stress Transport Models (RSTM) ou Second-Order Closure Models (SOC).
- Computação de quantidades Flutuantes:
 - **Direct Numerical Simulation (DNS)** - Não é usado um modelo de turbulência, em vez disso, as escalas de discretização são pequenas o suficiente para captarem os fenômenos.
 - **Large-Eddy Simulations (LES)** - Neste modelo aplica-se um filtro que permite separar as grandes escalas, ou seja, as estruturas de turbulência maiores e que transportam grande parte da energia e quantidade de movimento, das pequenas

escalas. Desta forma permite-se resolver as maiores escalas de forma similarmente ao DNS e resolver de forma mais simplificada as escalas mais pequenas.

O formalismo associado à equação de LES,

$$\phi(x, y, z, t) \equiv \int_V G(x, x', y, y', z, z', \Delta) \phi(x', y', z', t) dV \quad (55)$$

é baseada aplicando um filtro passa baixo em cada célula às equações de transporte de massa, quantidade de movimento e de energia. Onde:

Δ - é a largura da banda de corte do filtro;

$G(x, x', y, y', z, z', \Delta)$ - é uma função de filtro, e, portanto deve ser ortonormada.

As funções tipicamente utilizadas são o filtro de caixa,

$$G(x, x', y, y', z, z', \Delta) = \begin{cases} 1/\Delta^3 & \sqrt{(x-x')^2 + (y-y')^2 + (z-z')^2} \leq \Delta/2 \\ 0 & \sqrt{(x-x')^2 + (y-y')^2 + (z-z')^2} > \Delta/2 \end{cases} \quad (56)$$

o filtro Gaussiano,

$$G(x, x', y, y', z, z', \Delta) = \left(\frac{\gamma}{\pi \Delta^2} \right)^{3/2} e^{-\gamma \frac{(\sqrt{(x-x')^2 + (y-y')^2 + (z-z')^2})^2}{\Delta^2}} \quad (57)$$

onde, geralmente, $\gamma = 6$. Uma vez que cada célula detém as propriedades num ponto, a definição de superior à da mesma é desnecessária. Assim sendo, é frequente definir-se [8],

$$\Delta = \sqrt[3]{\Delta x \Delta y \Delta z} \quad (58)$$

4 Caso de Estudo

Tal como descrito no capítulo 1, foram identificados casos em que a colocação dos ventiladores de impulso se encontravam em posições que não parecem ser as mais adequadas ao seu funcionamento já que as suas saídas se encontravam obstruídas por vigas, tubagens e canos. Ora este fato tem impacto, não só em caso de incêndio, mas também na desenfumagem de espaços críticos, como são os parques de estacionamento, onde existe libertação de gases nocivos de forma quase permanente. Assim sendo, esta desadequação apresenta uma deficiência na promoção do escoamento com acréscimo de consumos energéticos. Por tais motivos, a utilização de ferramentas como o FDS podem auxiliar na compreensão do impacto dessas interferências.

Apesar de o ficheiro de *inputs* do FDS ser de fácil compreensão, há situações em que, pela sua extensão, pode-se tornar complexo e de levar a erros que podem ser difíceis de identificar. Por esse motivo, o início deste trabalho consiste na elaboração de um programa que sirva de interface entre o FDS e o Python (capítulo 4.1). Sendo uma linguagem orientada a objetos, a sua implementação, neste contexto, torna-se mais simples, organizada e rápida quando comparada com outros paradigmas da programação.

Posteriormente, com a implementação de um 31 caso simplificados, no capítulo 4.2, procura-se a compreensão dos fenómenos presentes. Neste contexto simula-se um incêndio que servirá de fonte de fuligem para verificar a eficácia de um ventilador impulsionar esses produtos para jusante do domínio computacional quando confrontado com um elemento de viga na interferência do jato por ele promovido. Destas simulações utilizam-se dados considerados relevantes à análise de segurança na evacuação de pessoas como é o caso da visibilidade, fumo removido da zona de incêndio e o FED, um parâmetro relacionado com a capacidade de respirar o ar contaminado pelos subprodutos do incêndio. Com estes dados explora-se a capacidade de previsão através de uma regressão linear e regressão multivariada. Na sequência deste trabalho pode ser encontrado em [31] a publicação de resultados obtidos do decorrer deste trabalho.

Finalmente, no capítulo 4.3 procede-se à simulação de dois casos mais próxima do real. Para tal são incluídos elementos que se encontram em parques de estacionamento como é o caso de carros, vigas e colunas. Numa primeira simulação utilizam-se os parâmetros coincidentes com o caso ótimo simulado em capítulo 4.2. Numa segunda simulação procura-se desviar os parâmetros dos utilizados para o desenvolvimento da regressão multivariada. Estas simulações procuram exemplificar o procedimento e verificar a qualidade de previsão do modelo obtido.

4.1 Programação de Interface Python-FDS

O programa *Fire Dynamic Simulator*, FDS, é *open source*, desenvolvido pela NIST para simulação CFD de incêndios. Este software é uma ferramenta de simulação e estudo de incêndios em edifícios com a inclusão de capacidades de simulação de fenómenos associados de deteção e extinção de incêndios como sprinklers, sistemas de AVAC (Aquecimento, Ventilação e Ar Condicionado), detectores de fumos, detectores de temperatura, entre outros. Este é um programa de fácil inserção das condições necessárias ao processo de simulação em casos simples através de um ficheiro de *input*, no entanto, quando o domínio é detentor de geometrias mais complexas e/ou repetitivas, a geração quer dos objetos, quer da malha tem de ser cuidada o que levanta novas dificuldades na compatibilização dos seus parâmetros.

Das dificuldades reconhecidas, como a compatibilização da malha, o refinamento da mesma em locais estratégicos, na geração de obstáculos complexos, entre outros, sentiu-se a necessidade de desenvolver uma sistematização do tratamento de informação para a geração do ficheiro de *input*. Estas dificuldades foram colmatadas com recurso ao desenvolvimento, neste trabalho, de um programa em Python que permite aliar a simplicidade, encapsamento, herança, composição, delegação e polimorfismo da programação de alto nível e orientada por objectos com a complexidade alcançada no ficheiro de *input*.

4.1.1 Estrutura de um ficheiro FDS

Um ficheiro de *input* do FDS é um ficheiro ASCII que deve respeitar a formatação descrita nos guias do software [25]. Este ficheiro não é mais que uma lista de instruções que descrevem as propriedades necessárias à realização da simulação. Cada instrução inicializa-se com o caractere “&” e finaliza-se com “/”. Cada uma das instruções tem ainda parâmetros que a caracterizam e que se encontram separadas por “,”. Repare-se no exemplo seguinte para a definição do intervalo de tempo de simulação:

```
&TIME T_BEGIN=0, T_END=3600 / Intervalo de tempo de simulação
```

A instrução, no exemplo apresentado, define o intervalo de simulação entre 0 s e 3600 s. Mais se acrescenta um comentário no fim da instrução e que não é considerado visto se encontrar fora dos caracteres que definem cada instrução “&” e “/”. Existem ainda outros parâmetros que podem ser incluídos na parametrização do tempo, no entanto, porque não são especificadas na instrução usam-se os pré-definidos pelo programa.

Existem 32 instruções principais denominadas de *namelist* que se dividem em:

1. Configurações gerais:
 - a. HEAD (Header Parameters);
 - b. TIME (Time Parameters);
 - c. MISC (Miscellaneous Parameters);
 - d. REAC (Reaction Parameters);
 - e. RADI (Radiation Parameters);
 - f. PRES (Pressure Solver Parameters);
 - g. PROF (Wall Profile Parameters);
 - h. TABL (Table Parameters);
 - i. MULT (Multiplier Function Parameters);
 - j. CLIP (Clipping Parameters).
2. Domínio Computacional:
 - a. MESH (Mesh Parameters);
 - b. TRNX, TRNY, TRNZ (MESH Transformations);
 - c. INIT (Initial Conditions).
3. Propriedades:
 - a. MATL (Material Properties);
 - b. SPEC (Species Parameters);
 - c. PART (Lagrangian Particles/Droplets);
 - d. SURF (Surface Properties);
 - e. WIND (Wind and Atmospheric Parameters);
 - f. ZONE (Pressure Zone Parameters).
4. Geometrias Sólidas:
 - a. OBST (Obstruction Parameters);
 - b. VENT (Vent Parameters);
 - c. HOLE (Obstruction Cutout Parameters).
5. Logica de Controlo:
 - a. PROP (Device Properties);
 - b. DEVC (Device Parameters);
 - c. CTRL (Control Function Parameters);
 - d. HVAC (HVAC System Definition);
 - e. RAMP (Ramp Function Parameters).
6. Outputs:
 - a. DEVC (Device Parameters);
 - b. SLCF (Slice File Parameters);
 - c. BNDF (Boundary File Parameters);
 - d. ISOF (Isosurface Parameters);

- e. CSVF (Comma Separated VelocityFiles);
- f. DUMP (Output Parameters).

Cada uma dessas instruções é ainda seguida de propriedades e parametrizações que complementam a mesma.

4.1.2 Python API (*Application Program Interface*)

Atendendo que o FDS tem na sua raiz a estrutura descrita anteriormente, é natural que se siga um desenvolvimento semelhante na geração de código que permita a ligação entre ambos. Ora o Python, sendo uma linguagem de programação orientada por objectos, (OOP), permite a criação de classes de onde se relacionam descendências, e ascendência, nas dependências entre instruções e as parametrizações que os caracterizam (figura 4.1).

A figura 4.1 apresentada é um esquema, seguindo a norma da *Unified Model Language* (UML). A UML é uma linguagem padronizada de criação de diagramas não só orientada para organização de *software*, mas que já se estendeu à modelação de sistemas mecânicos complexos (SysML), como é o caso da Estação Espacial Europeia. Nesta estrutura são definidos vários diagramas que se dividem entre diagramas:

- Estruturais:
 - Diagrama de Perfil;
 - Diagrama de Classes;
 - Diagrama de Estruturas Compostas;
 - Diagrama de Componentes;
 - Diagrama de Implantação;
 - Diagrama de Objetos;
 - Diagrama de Pacotes.
- Comportamentais:
 - Diagrama de Atividade;
 - Diagrama de Interação;
 - Diagrama de Casos de Uso;
 - Diagrama de Máquinas de Estados.

Na figura 4.1 apresenta-se um diagrama de classe com a descrição dos principais componentes do programa desenvolvido.

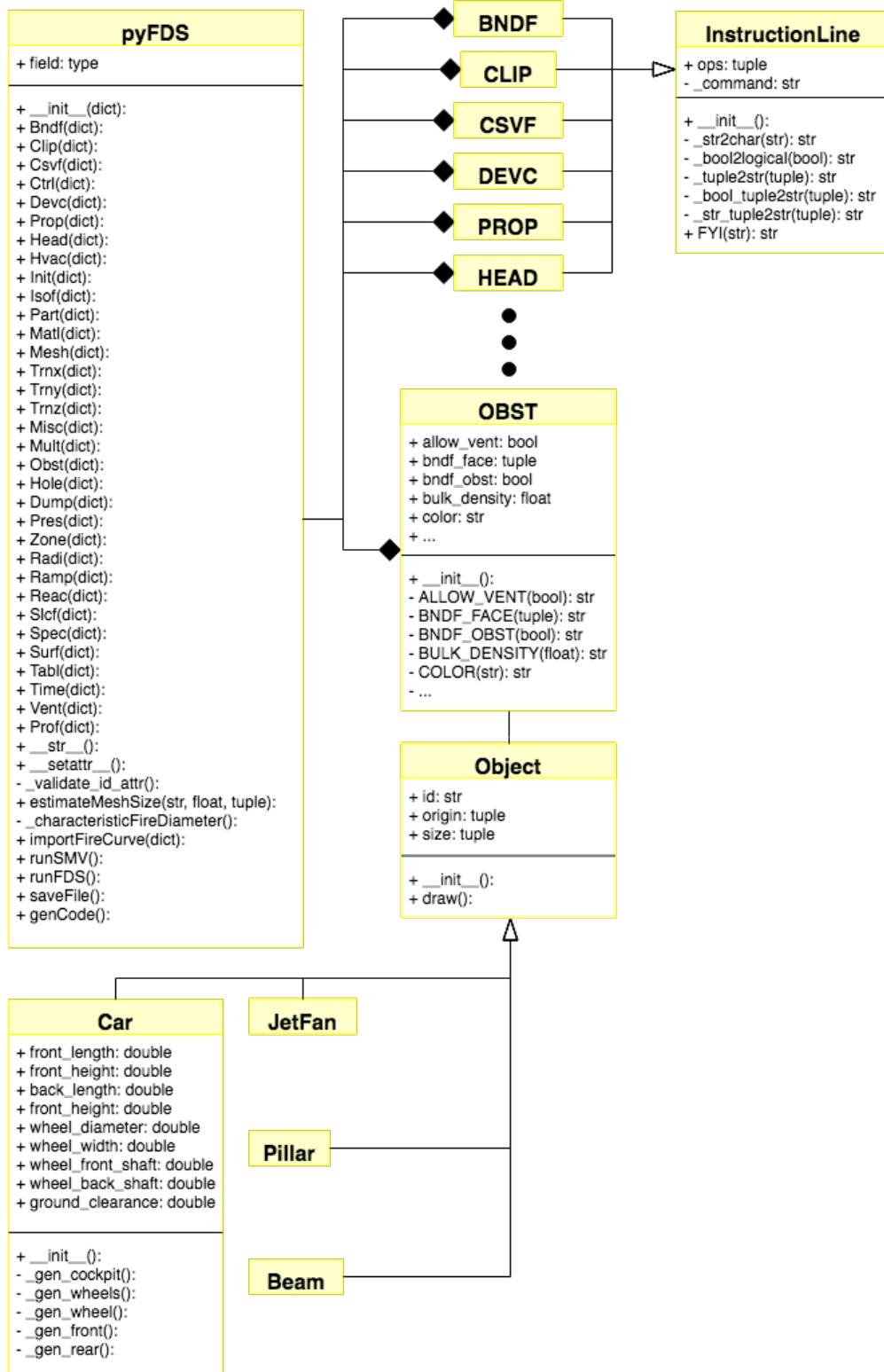


Figura 4.1: Diagrama de classes em UML do pyFDS.

Existe uma classe principal, a `pyFDS` que possui uma série de métodos. Muitos deles estão diretamente relacionados com as instruções do FDS, mas outros, estendem as capacidades do software com funções de apoio como é o caso de `estimateMeshSize()` que permite intuir a dimensão da malha recomendada tendo por base os modelos sugeridos em [25]. Este modelo baseia-se em estimar um diâmetro característico de incêndio dado por,

$$D^* = \left(\frac{\dot{Q}}{\rho_\infty c_p T_\infty \sqrt{g}} \right)^{2/5} \quad (59)$$

em que posteriormente pode ser usado para estimar a dimensão da malha por,

$$\left\{ \begin{array}{ll} \frac{D^*}{\Delta x} = 4, & \text{malha grosseira} \\ \frac{D^*}{\Delta x} = 10, & \text{malha média} \\ \frac{D^*}{\Delta x} = 16, & \text{malha fina} \end{array} \right. \quad (60)$$

onde:

Δx - é a dimensão máxima do elemento de malha;

g - é a aceleração da gravidade;

T_∞ e ρ_∞ - são a temperatura e a massa volúmica longe da fonte de incêndio;

c_p é o calor específico do fluido.

Desta forma, o utilizador pode, simplesmente passar como argumento o tipo de malha pretendido *coarse*, *moderate* ou *fine* já que as restantes propriedades são fruto das definições do problema e o próprio programa ajustará a dimensão da malha a essas necessidades.

Outra funcionalidade do software passa por importar curvas de incêndio com facilidade apenas chamando a função `importFireCurve()` e passando o endereço do ficheiro com os dados.

De notar ainda que existe uma classe `InstructionLine` que serve de base à criação das restantes referentes às instruções do FDS mas que tem a responsabilidade de transformar os dados no seu formato em Python para *strings* no sentido de posteriormente a ser possível gerar o ficheiro de *input* do FDS.

Exemplo de uma classe que herda as propriedades e os métodos da classe `InstructionLine` é a instrução *HEAD*.

```

class HEAD(InstructionLine):
    def __init__(self, **kwargs):
        super().__init__()
        ''' Criação das variáveis chid e title e atribuição dos seus valores
        caso sejam passadas na criação do objecto, caso contrário é atribuído
        o valor None. '''
        self.chid = kwargs['chid'] if ('chid' in kwargs) else None
        self.title = kwargs['title'] if ('title' in kwargs) else None
        self._command += self._ops['startChar'] + 'HEAD '
    def CHID(self, chid: str = 'output'):
        ''' Atribuição do valor chid e criação da string correspondente na estrutura
        do ficheiro de input do FDS. '''
        self.chid = chid
        self._command += "CHID=" + \
            self._str2txt(chid) + \
            self._ops['separator']
    def TITLE(self, title: str):
        ''' Atribuição do valor title e criação da string correspondente na estrutura
        do ficheiro de input do FDS. '''
        self.title = title
        self._command += "TITLE=" + \
            self._str2txt(title) + \
            self._ops['separator']
    def __str__(self):
        ''' Apoio à visualização da instrução completa definida em dado instante
        do código. '''
        return self._command[:-2] + self._ops['endChar']
    def genCode(self):
        ''' Geração da instrução completa para str. '''
        self.CHID(chid=self.chid)
        if not (self.title is None): self.TITLE(title=self.title)
        return self.__str__()

```

Note-se que esta classe é descendente da anterior (`class HEAD(InstructionLine)`) herdando, portanto, as funções nela definidas. Neste caso, *HEAD* tem como propriedades *CHID* e *TITLE*, ambas recebem *strings* e *CHID* está inicializada com o valor 'output'. Em cada um dos métodos a variável é recebida e é feita a concatenação da instrução com a variável na reformatação necessária e com o separador.

Para se proceder ao cálculo e iniciar a visualização tem-se na classe `pyFDS` três métodos

de apoio a função *saveFile()* que procede à geração do ficheiro de input, a *runFDS()* inicia os cálculos e *runSMV()* que inicia o software de pós-processamento. Para que ambos os softwares sejam iniciados foram criados ficheiros **shell script** de apoio e que são a última linha de ligação entre o python e os respectivos programas.

```
#!/bin/sh

sourceFile="$1"
destinyFolder="$2"

cd "$destinyFolder"

fds "$sourceFile" > "./output"
```

```
#!/bin/sh

sourceFolder="$1"
sourceFile="$2"

cd "$sourceFolder"

smokeview "$sourceFile".smv
```

Nestes são captadas duas instruções "\$1" e "\$2" que são passadas do Python para o *shell script* e atribuídas às respectivas variáveis que depois são usadas para navegar para as pastas de destino e/ou onde os ficheiros se encontram e inicia-se o processo correspondente, seja de cálculo *fds* ou de pós-processamento *smokeview*.

4.1.3 Exemplo de Utilização

Outra classe que se pode encontrar na figura 4.1 é a *Object*. Este é responsável por gerar uma comunicação entre a classe *Obst* e os objetos que se podem pré-definir como foi o caso de ventiladores (*JetFan*), pilares (*Pillar*), vigas (*Beam*) ou elementos mais complexos como um carro (*Car*).

A título de exemplo de utilização da interface criou-se um caso de um parque de estacionamento com obstáculos dispersos com esses elementos e que servirá de base de validação para caso simplificado que se estudará no capítulo 4.2.

Utilizando o *software* desenvolvido a criação de objecto *Car* resume-se a,

```

car = Car(objName='car_0',
          x0=1, y0=1, z0=0,
          dx=4.0, dy=2.5, dz=1.7,
          front_length=1.7, front_height=1,
          back_length=1.2, back_height=1,
          wheel_diameter=0.5, wheel_width=0.3,
          wheel_front_shaft=1., wheel_back_shaft=0.8,
          fenders_space=0.0, ground_clearance=0.2)

```

```

fds = car.draw(fds)

```

que, não é mais, que chamar uma função *Car* e passar os argumentos a ele relacionados como é o caso de comprimentos, alturas e larguras ou distâncias de eixos. Além de o código ser auto-explicativo, com a utilização de IDE (Integrated Development Environment), ou seja, editores de apoio à programação, adequados têm-se ferramentas de *autocompletion* que sugerem as variáveis que podem/devem ser passadas como argumentos. Em oposição, se o mesmo se quisesse gerar num ficheiro do FDS, ter-se-ia de escrever,

```

&OBST ID='car_0_cockpit', COLOR='AQUAMARINE',
      XB=2.7,3.8,1,3.5,0.2,1.9 /
&OBST ID='car_0_wheel_0', COLOR='DIM GRAY',
      XB=1.75,2.25,1,1.3,0,0.5 /
&OBST ID='car_0_wheel_1', COLOR='DIM GRAY',
      XB=1.75,2.25,3.2,3.5,0,0.5 /
&OBST ID='car_0_wheel_2', COLOR='DIM GRAY',
      XB=3.95,4.45,1,1.3,0,0.5 /
&OBST ID='car_0_wheel_3', COLOR='DIM GRAY',
      XB=3.95,4.45,3.2,3.5,0,0.5 /
&OBST ID='car_0_front', COLOR='AQUAMARINE',
      XB=1,2.7,1.3,3.2,0.2,1 /
&OBST ID='car_0_FLF_fender', COLOR='AQUAMARINE',
      XB=1,1.75,1,1.3,0.2,1 /
&OBST ID='car_0_FLR_fender', COLOR='AQUAMARINE',
      XB=2.25,2.7,1,1.3,0.2,1 /
&OBST ID='car_0_FLT_fender', COLOR='AQUAMARINE',
      XB=1.75,2.25,1,1.3,0.5,1 /
&OBST ID='car_0_FRF_fender', COLOR='AQUAMARINE',
      XB=1,1.75,3.2,3.5,0.2,1 /
&OBST ID='car_0_FRR_fender', COLOR='AQUAMARINE',
      XB=2.25,2.7,3.2,3.5,0.2,1 /

```

```

&OBST ID='car_0_FRT_fender', COLOR='AQUAMARINE',
XB=1.75,2.25,3.2,3.5,0.5,1 /
&OBST ID='car_0_rear', COLOR='AQUAMARINE',
XB=3.8,5,1.3,3.2,0.2,1 /
&OBST ID='car_0_RLF_fender', COLOR='AQUAMARINE',
XB=3.8,3.95,1,1.3,0.2,1 /
&OBST ID='car_0_RLR_fender', COLOR='AQUAMARINE',
XB=4.45,5,1,1.3,0.2,1 /
&OBST ID='car_0_RLT_fender', COLOR='AQUAMARINE',
XB=3.95,4.45,1,1.3,0.5,1 /
&OBST ID='car_0_RRF_fender', COLOR='AQUAMARINE',
XB=3.8,3.95,3.2,3.5,0.2,1 /
&OBST ID='car_0_RRR_fender', COLOR='AQUAMARINE',
XB=4.45,5,3.2,3.5,0.2,1 /
&OBST ID='car_0_RRT_fender', COLOR='AQUAMARINE',
XB=3.95,4.45,3.2,3.5,0.5,1 /

```

Desta forma evitam-se erros no cálculo das coordenadas bem como rapidez na parametrização. A figura 4.2 apresenta o resultado da parametrização definida anteriormente.

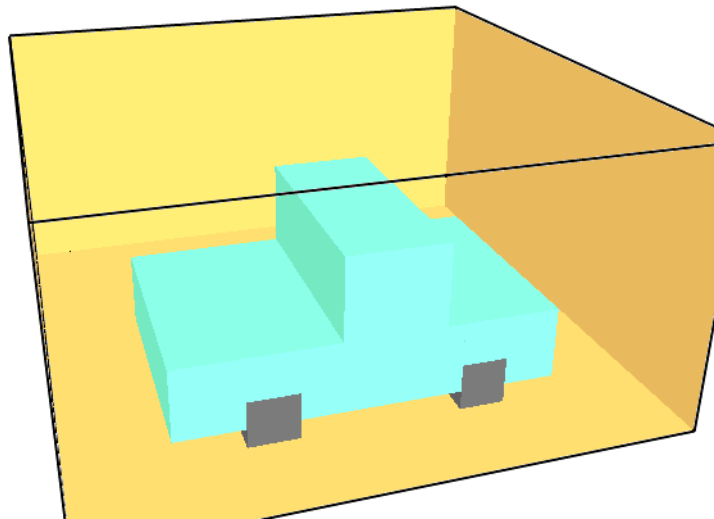


Figura 4.2: Resultado da parametrização do carro.

Estando a interface embebida numa linguagem de programação, a criação de vários

objetos pode ser rapidamente estendida bastando inserir a criação de `Car` num ciclo, segundo o critério que se pretenda. A título de exemplo, veja-se a geração de um corredor de 9 carros espaçados por 0.5 metros.

```
dy = 2.5
car = []
for i in range(9):
    car.append(Car(objName='car_' + str(i),
                   x0=1, y0=1 + (dy + 0.5) * i, z0=0,
                   dx=4.0, dy=dy, dz=1.7,
                   front_length=1.7, front_height=1,
                   back_length=1.2, back_height=1,
                   wheel_diameter=0.5, wheel_width=0.3,
                   wheel_front_shaft=1., wheel_back_shaft=0.8,
                   fenders_space=0.0, ground_clearance=0.2))
fds = car[-1].draw(fds)
```

A figura 4.3 apresenta o resultado da parametrização enunciada anteriormente.

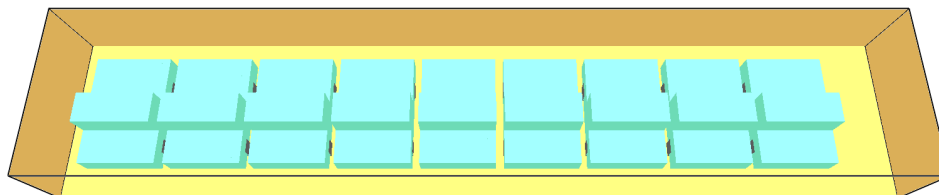


Figura 4.3: Resultado da parametrização de 9 carros alinhados paralelamente e espaçados de 0.5 metros.

Assim, procedendo da mesma forma é possível a criação de vigas (a branco), pilares (a cinzento) e ventiladores (a encarnado) no sentido de gerar o domínio de estudo pretendido. Apresenta-se um dos domínios estudados na figura 4.4.

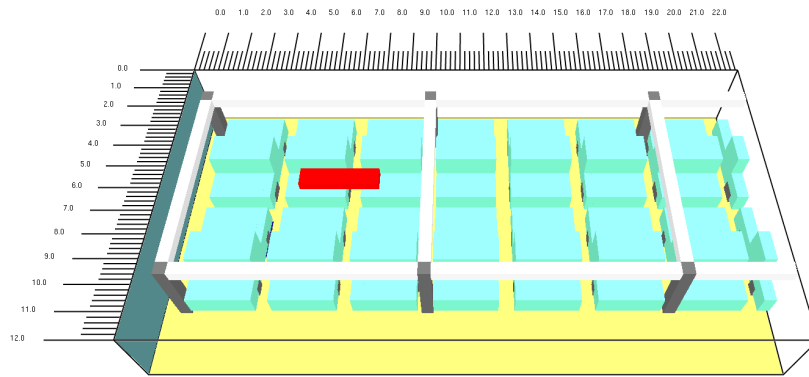


Figura 4.4: Representação do domínio mais complexo explorado no caso de estudo.

4.2 Estudo de um Caso Simplificado

Muitas vezes, devido à falta de espaço, existe uma disposição indevida dos equipamentos de ventilação e desenfumagem em parques de estacionamento. Ainda mais porque a legislação obriga à colocação dos meios de proteção, mas pouco acrescenta sobre a forma como deve ser realizada. Em parte, porque os procedimentos a tomar são de difícil generalização. Não obstante existe a possibilidade de se efetuarem estudos que, desde que justificados, podem servir de base ao projecto, isto é, o projecto pode ser baseado no desempenho. Por um lado, este é um método de desenvolvimento dos projectos que encarece o seu desenvolvimento, dado que obriga ao desenvolvimento de trabalhos geralmente demorados e exigentes do ponto de vista do conhecimento da área, mas por outro permitem um nível de rigor inalcançáveis quando se seguem metodologias generalistas.

No desenvolvimento do projecto, existem assim, modelos reconhecidos e legalmente aceitáveis de desenvolvimento do mesmo que se encontram num meio termo entre a exigência do CFD e as aproximações baseadas em tópicos da legislação que, quando respeitadas as premissas que os geraram, são de extrema utilidade.

Com base no exposto anteriormente, neste capítulo estuda-se a influência de obstáculos à movimentação dos subprodutos da combustão de um incêndio num parque de estacionamento. Para que tal seja possível criou-se um domínio de base que apoiará ao desenvolvimento desse trabalho (figura 4.5).

Tal como definido na imagem existem 4 parâmetros que se consideram para a análise da influência da viga (a cinzento) no escoamento promovido pelo ventilador de impulso (a vermelho):

- Bd - distância da viga relativamente ao ventilador (*Beam distance*). Simulam-se os casos $Bd=(1,1.5,2)$;
- Ja - ângulo de saída do escoamento do ventilador (*Jet angle*). Simulam-se os casos $Ja=(0^\circ,6^\circ,12^\circ)$;
- Jh - altura a que se encontra o ventilador (*Jet height*). Simulam-se os casos $Jh=(2.6,2.4,2.2)$;
- Bw - espessura da viga (*Beam width*). Simulam-se os casos $Bw=(0.1,0.3,0.5)$.

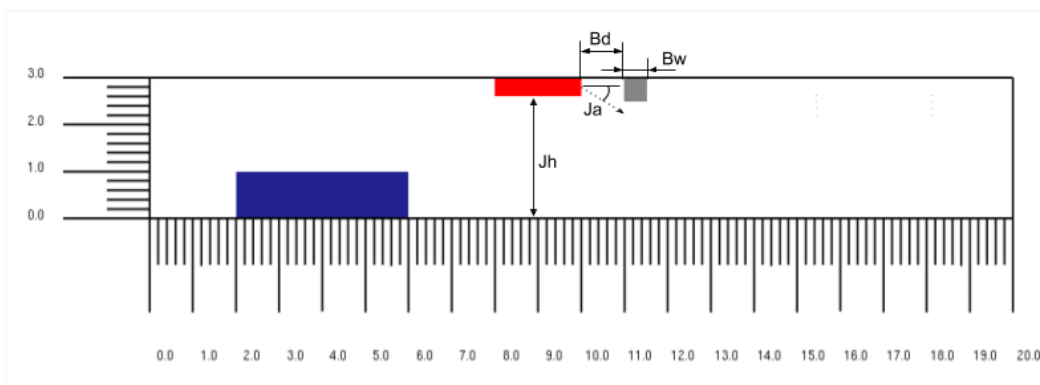


Figura 4.5: Vista lateral do domínio do caso de estudo simplificado.

Para a identificação do caso, faz-se uma composição que identifica a variável e a sua posição no vetor correspondente, por exemplo, $Bd0_Ja0_Jh0_Bw1$ refere-se à distância da viga de 1 m (Bd_0) com um ângulo na saída do ventilador de 0° (Ja_0) a uma altura do chão de 2.6 m (Jh_0) e com uma viga de espessura de 0.3 m (Bw_0).

O domínio tem um comprimento de 20 m por uma largura de 2 m e considera-se uma altura de pé direito de 3 m (figuras 4.5 e 4.6).

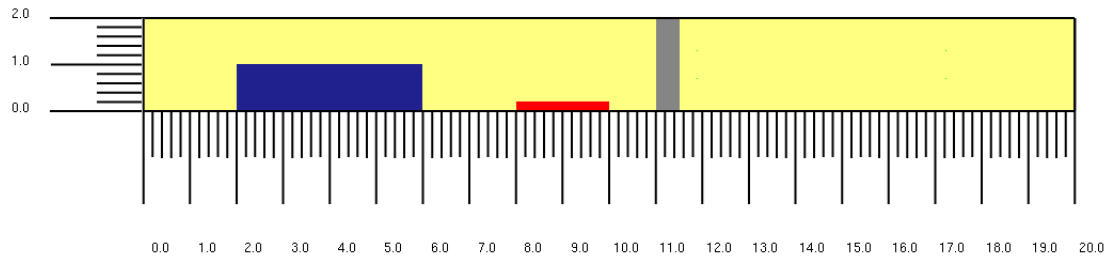


Figura 4.6: Vista de cima do domínio do caso de estudo simplificado.

Note-se ainda que se coloca uma caixa a azul representativa da existência de um carro simplificado onde a sua superfície superior será considerada a fonte de incêndio e que se encontra no mesmo local do domínio em todas as simulações.

No plano vertical superior da 4.6 coloca-se uma superfície aberta. Na face onde se encontra o ventilador coloca-se uma condição de fronteira de simetria com um *outlet* na admissão e uma velocidade imposta de 20 m/s com as mesmas propriedades do fluido aquando admitido na saída, modela-se, portanto, apenas metade do ventilador. No teto e no chão considera-se uma condição de não escorregamento. Finalmente na fronteira a montante do ventilador assume-se um escoamento de entrada com uma velocidade de 2 m/s para representar o escoamento que seria promovido por um sistema composto por vários ventiladores e a jusante uma condição de saída do escoamento onde se realizarão medições do fumo que por ela sai.

A abordagem para avaliar as condições de operação do sistema baseia-se em avaliar o caudal de fuligem que sairá pela superfície que se encontra a montante do ventilador e nas propriedades de visibilidade e FED numa malha de pontos colocada após a viga.

No sentido de se verificar que a dimensão da malha cumpre com os requisitos de y^+ analisa-se aquele caso que se considera mais crítico, isto é, o que proporciona maiores velocidades junto às superfícies sólidas. Este caso verifica-se que é o `Bd0_Ja0_Jh0_Bw0` (figura 4.7).

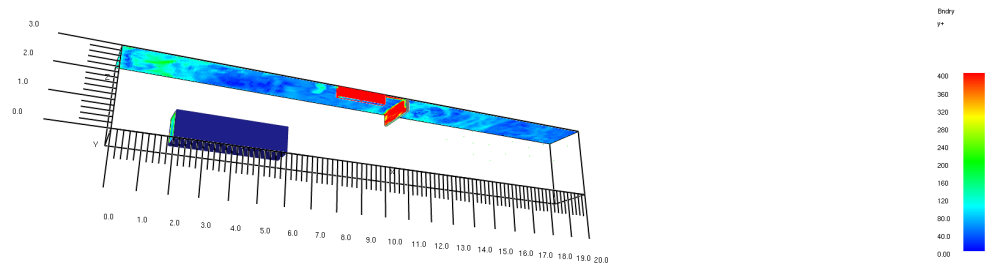


Figura 4.7: Resultado de y^+ aos 40 segundos de simulação.

Atendendo que os limites aconselhados para o modelo pré-definido de tratamento do escoamento junto à parede se encontra entre os 30 e 1000, assume-se aceitável um valor máximo de 400 até porque este valor se encontra numa região pequena do escoamento. Sendo este um parâmetro intrinsecamente ligado ao número de volumes e que com o seu aumento se necessita de mais tempo de computação, toma-se aceitável para as capacidades de computação disponíveis. Além disso, divide-se a malha em 14 blocos com um número de volumes de 1.25 mil cada, à excepção dos extremos do domínio, por forma a se paralelizar o cálculo de forma equilibrada, num total de 1.5 milhões de volumes. Este número de volumes, além do exposto anteriormente, é necessário para garantir a estabilidade da integração temporal uma vez que é tanto mais instável quanto maiores as velocidades.

A título de exemplo do escoamento encontrado nas simulações, apresenta-se a figura 4.8 onde são se apresentadas as magnitudes de velocidade bem como uma representação da dispersão do fumo e da chama presentes.

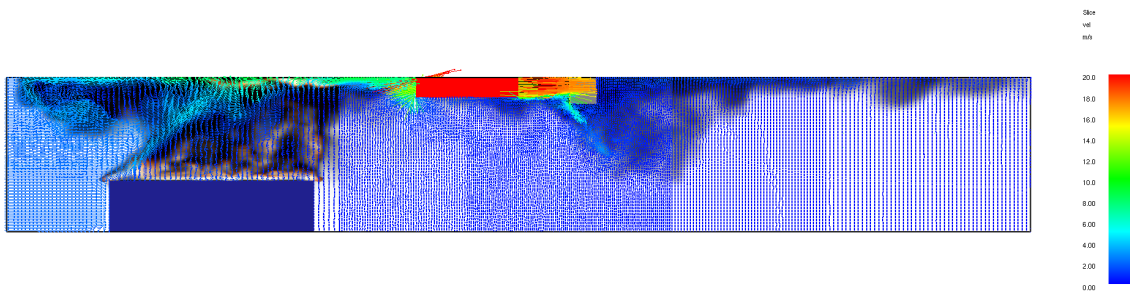


Figura 4.8: Resultado da simulação aos 35 segundos de simulação.

Como se impôs uma condição de fronteira, à esquerda, com uma velocidade de 2 m/s , o incêndio é desviado ligeiramente para a direita. Não obstante, porque a

velocidade imposta é inferior à dita velocidade crítica, junto ao teto dá-se uma deflexão redirecionando o fumo no sentido oposto ao preferencial (para a esquerda).

Observa-se que o fumo é admitido à esquerda pelo ventilador e impulsionado para a direita com uma velocidade de 20 m/s . Como o caso representado se refere ao Bd0_Ja0_Jh0_Bw2, a presença da viga tão próxima proporciona uma barreira ao escoamento sendo defletido. Esta dificuldade ao escoamento identifica-se não só na figura 4.8, mas também na figura 4.9. Em particular, na figura 4.9 é apresentada a magnitudes de velocidade a 20 cm do teto bem como uma representação da dispersão fumo presente.

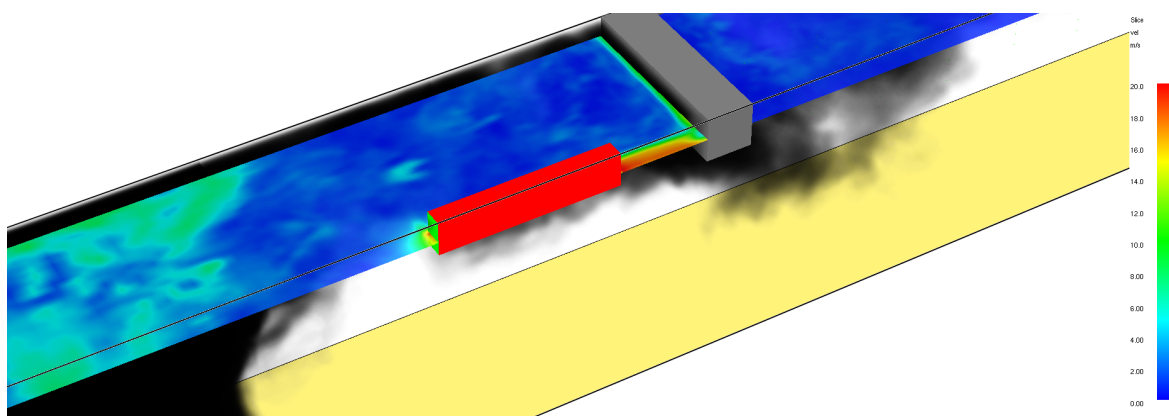


Figura 4.9: Resultado da simulação aos 35 segundos de simuação.

A deflexão identificada na figura 4.9, é muito mais gravosa que na anterior já que não só anula por completo a orientação do escoamento desejado para a remoção do fumo, mas também pode promover a recirculação do fumo levando a uma maior dispersão do fumo acarretando riscos para a evacuação. Outro problema associado está relacionado com transferência de calor promovida pela extensão do tempo de contato entre a fuligem que está a uma temperatura mais alta com um elemento estrutural pondo em causa a sua integridade.

4.2.1 Comparação dos Sistemas

Como visto, um dos problemas com a presença da viga passa por incapacitar a eficiente promoção do escoamento no sentido de retirar o fumo. Por esse motivo, uma das medidas escolhidas para quantificar a equidade do sistema passa pela quantidade de fumo expulso do domínio pela fronteira a montante do ventilador. Tanto a Visibilidade

como a respirabilidade do ar (FED) são igualmente importantes de se manterem entre valores aceitáveis para que se garanta a evacuação em condições de segurança. Por essa razão também elas serão consideradas como variáveis de controle da qualidade do sistema. A figura 4.10 apresenta cada uma dessas variáveis ao longo do tempo.

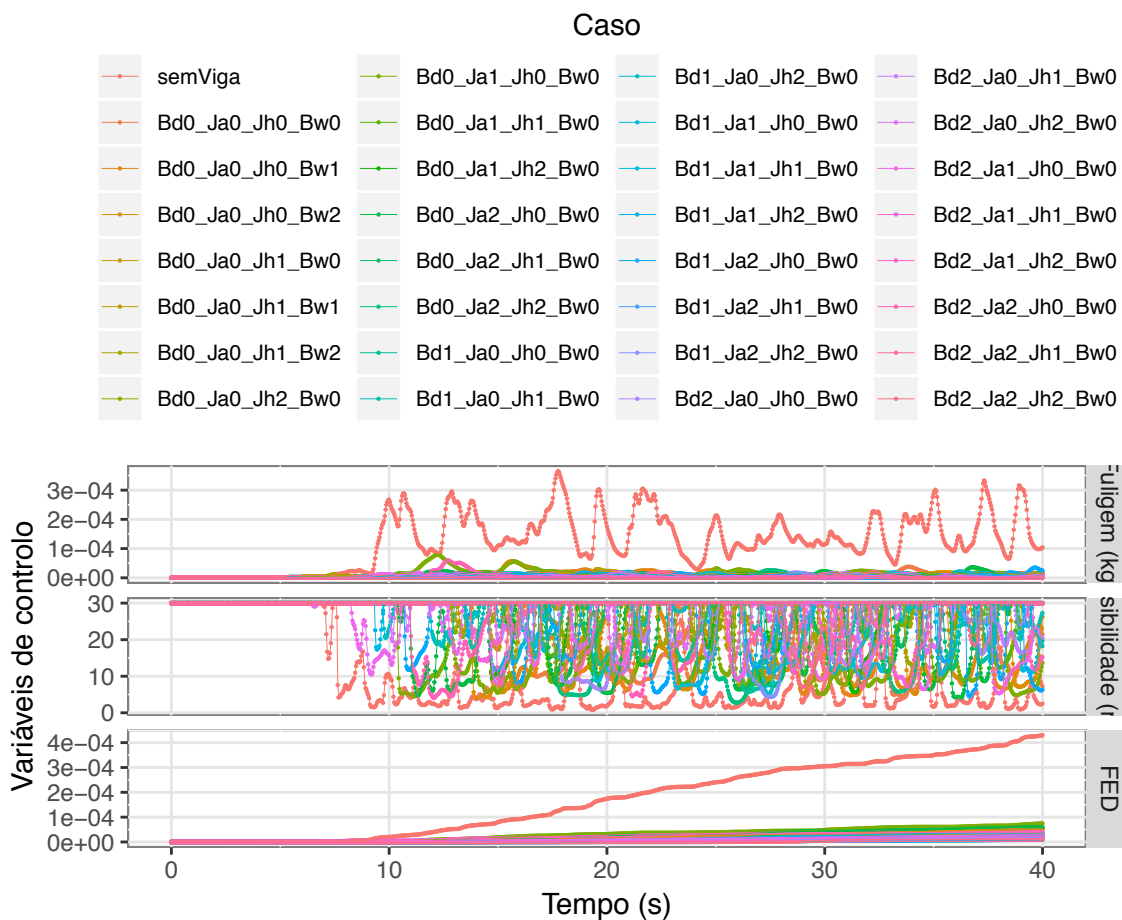


Figura 4.10: Caudal de fuligem expelido a montante do ventilador.

É imediatamente notável a diferença na quantidade de fumo que é possível extrair quando não se têm constrangimentos ao escoamento. Como expetável, durante o período inicial a fuligem não teve tempo de chegar aos pontos de medição e portanto o gráfico apresenta valores nulos nessa primeira fase.

Do ponto de vista da visibilidade, apesar de todos terem comportamentos bastante inconstantes é ainda notável que sem viga se atingem menores distancias de visibilidade. Estes resultados fazendo-se acompanhar pelo declive acentuado do valor de FED sugere a existência de uma relação entre a quantidade de fumo expelido do domínio com os

restantes parâmetros. Porque não ficam claras as diferenças nos diversos casos, a tabela 4.1 visa quantificar, no tempo total de simulação, as quantidades de fumo extraídas. Para isso os resultados são integrados no tempo e comparados relativamente ao caso ideal em que não se tem a presença da viga.

Tabela 4.1: Penalização, devido à presença do obstáculo, da fuligem que sai do domínio integrada no tempo de simulação.

Caso	Penalização
semViga	4.958e-03 kg
Bd0_Ja0_Jh0_Bw0	-9.427e+01%
Bd0_Ja0_Jh0_Bw1	-9.395e+01%
Bd0_Ja0_Jh0_Bw2	-9.297e+01%
Bd0_Ja0_Jh1_Bw0	-9.652e+01%
Bd0_Ja0_Jh1_Bw1	-9.527e+01%
Bd0_Ja0_Jh1_Bw2	-9.652e+01%
Bd0_Ja0_Jh2_Bw0	-9.602e+01%
Bd0_Ja1_Jh0_Bw0	-8.887e+01%
Bd0_Ja1_Jh1_Bw0	-9.754e+01%
Bd0_Ja1_Jh2_Bw0	-9.713e+01%
Bd0_Ja2_Jh0_Bw0	-9.285e+01%
Bd0_Ja2_Jh1_Bw0	-9.842e+01%
Bd0_Ja2_Jh2_Bw0	-9.707e+01%
Bd1_Ja0_Jh0_Bw0	-9.866e+01%
Bd1_Ja0_Jh1_Bw0	-9.731e+01%
Bd1_Ja0_Jh2_Bw0	-9.629e+01%
Bd1_Ja1_Jh0_Bw0	-9.531e+01%
Bd1_Ja1_Jh1_Bw0	-9.736e+01%
Bd1_Ja1_Jh2_Bw0	-9.892e+01%
Bd1_Ja2_Jh0_Bw0	-9.521e+01%
Bd1_Ja2_Jh1_Bw0	-9.870e+01%
Bd1_Ja2_Jh2_Bw0	-9.876e+01%
Bd2_Ja0_Jh0_Bw0	-9.800e+01%
Bd2_Ja0_Jh1_Bw0	-9.784e+01%
Bd2_Ja0_Jh2_Bw0	-9.631e+01%
Bd2_Ja1_Jh0_Bw0	-9.502e+01%
Bd2_Ja1_Jh1_Bw0	-9.749e+01%
Bd2_Ja1_Jh2_Bw0	-9.885e+01%
Bd2_Ja2_Jh0_Bw0	-9.521e+01%
Bd2_Ja2_Jh1_Bw0	-9.869e+01%
Bd2_Ja2_Jh2_Bw0	-9.920e+01%

Todos os casos apresentam uma penalização na extração do fumo de quase 100% relativamente ao caso sem viga. Demonstra-se assim o poder incapacitante da presença de obstáculos. Além disso, pelos resultados apresentados, considerando apenas o fumo

extraído, o melhor caso seria Bd0_Ja1_Jh0_Bw0. Atendendo à inevitabilidade da presença do obstáculo, acredita-se que esta solução é ideal porque se encontra numa posição intermédia de ângulo do jato o que permite promover a captação de mais fumo por estar a um nível superior e ter uma velocidade adequada para permitir a passagem de mais fumo por baixo da viga dada a distância da mesma.

Considerando-se a visibilidade e o valor de FED outros dos fatores influenciadores na capacidade de as pessoas evacuarem um parque de estacionamento, este parâmetro é analisado aos 40 segundos de simulação ao longo do eixo x desde 1 até 9.9 m a uma altura de 2.62 m (figura 4.11).

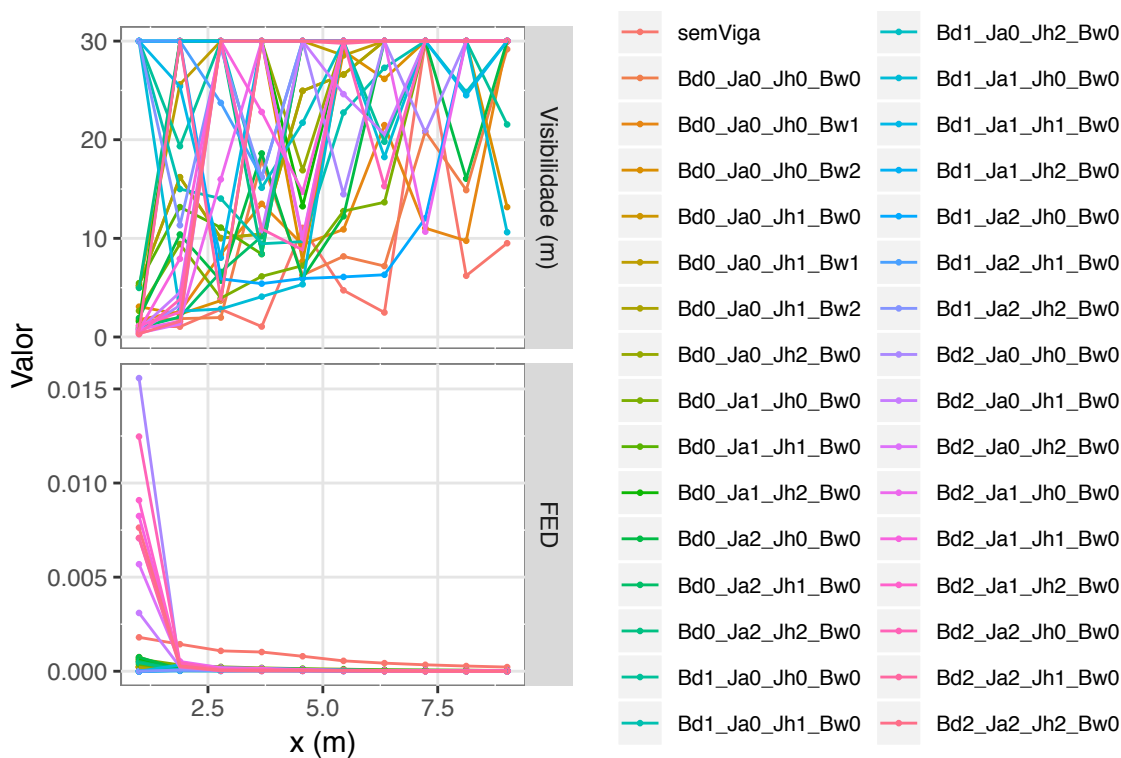


Figura 4.11: Visibilidade e FED a $z = 2.62$ m de altura no plano de simetria.

Neste caso, a figura vai ao encontro das conclusões obtidas com a figura 4.10 na perspectiva de que o caso sem viga apresenta-se com notabilidade relativamente aos restantes. No que diz respeito à visibilidade apresenta-se muitas vezes com maior degradação comparativamente às restantes. Por outro lado, quanto à variável FED, o seu comportamento é inferior inicialmente, mas permanece superior a maiores distâncias. Estes resultados sugerem ainda que se o jato estiver num local que permita a passagem

de pelo menos parte do escoamento por abaixo da viga, então a visibilidade não é tão afetada já que para os casos **Jh1** a visibilidade raramente é colocada em causa.

A figura 4.12 apresenta uma análise semelhante ao longo de uma linha vertical em $x=6.34$ m no plano de simetria.

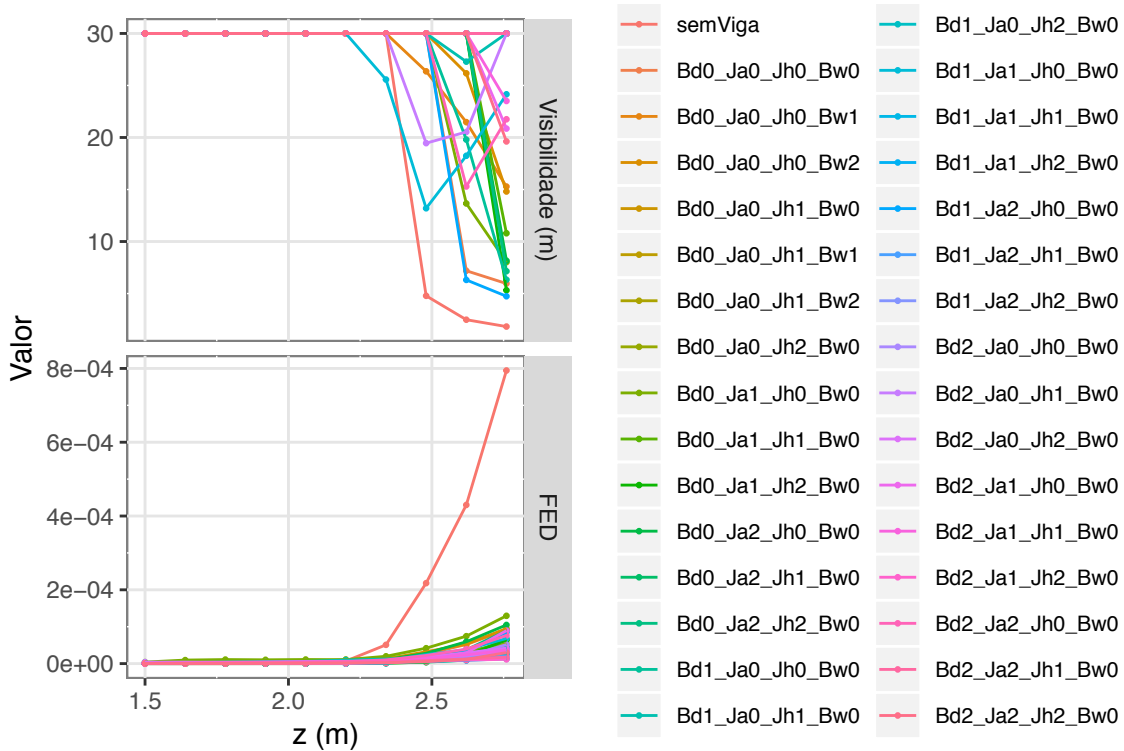


Figura 4.12: Visibilidade e FED a $x= 2.34$ m no plano de simetria ao longo de z .

A figura 4.12 mostra uma redução de visibilidade acrescida comparada às restantes no caso sem viga, isto sucede porque existe um maior arrastamento do fumo, no entanto, além de ser maior, atinge alturas inferiores, o que por si pode acarretar riscos acrescidos. Isto sugere uma contradição, se por um lado é possível retirar mais fumo da zona de incêndio, por outro, ao fazê-lo pode-se estar a pôr em causa a segurança da evacuação. Tem de existir, portanto, um compromisso entre a extração eficiente do fumo e a garantia da segurança.

Para que se encontre um compromisso aceitável, no subcapítulo seguinte procura-se desenvolver um modelo que relacione as variáveis de controlo (Bd , Ja , Jh e Bw) como função das variáveis escolhidas para quantificar a eficácia na ventilação (Visibilidade, FED e Fuligem).

4.2.2 Modelação Baseada nos Resultados

Idealmente encontrar-se-ia um caso para o qual todos os parâmetros seriam ideais, isto é, a visibilidade seria máxima e ambos FED e Fuligem seriam os mínimos possíveis. A tabela 4.2 apresenta os casos ideais considerando individualmente as variáveis.

Tabela 4.2: Melhores casos para cada variável dependente.

	Visibilidade	FED	Fuligem	Melhor em
Bd0_Ja0_Jh0_Bw0	30	2.61e-05	0.0049585	Visibilidade
Bd0_Ja0_Jh0_Bw2	30	3.21e-05	0.0003001	Visibilidade
Bd0_Ja0_Jh1_Bw0	30	1.42e-05	0.0003485	Visibilidade
Bd0_Ja0_Jh1_Bw1	30	2.33e-05	0.0001725	Visibilidade
Bd0_Ja0_Jh1_Bw2	30	1.42e-05	0.0002346	Visibilidade
Bd0_Ja0_Jh2_Bw0	30	2.15e-05	0.0001725	Visibilidade
Bd0_Ja1_Jh0_Bw0	30	4.18e-05	0.0001972	Visibilidade
Bd0_Ja1_Jh1_Bw0	30	3.90e-06	0.0005516	Visibilidade e FED
Bd0_Ja1_Jh2_Bw0	30	1.33e-05	0.0001217	Visibilidade
Bd0_Ja2_Jh0_Bw0	30	2.81e-05	0.0001422	Visibilidade
Bd0_Ja2_Jh1_Bw0	30	4.00e-06	0.0003543	Visibilidade
Bd0_Ja2_Jh2_Bw0	30	1.48e-05	0.0000784	Visibilidade
Bd1_Ja0_Jh0_Bw0	30	1.55e-05	0.0001450	Visibilidade
Bd1_Ja0_Jh1_Bw0	30	1.71e-05	0.0000666	Visibilidade
Bd1_Ja0_Jh2_Bw0	30	1.35e-05	0.0001333	Visibilidade
Bd1_Ja1_Jh1_Bw0	30	1.11e-05	0.0002324	Visibilidade
Bd1_Ja1_Jh2_Bw0	30	6.00e-06	0.0001310	Visibilidade
Bd1_Ja2_Jh0_Bw0	30	8.70e-06	0.0000538	Visibilidade
Bd1_Ja2_Jh1_Bw0	30	6.90e-06	0.0002374	Visibilidade
Bd1_Ja2_Jh2_Bw0	30	8.60e-06	0.0000646	Visibilidade
Bd2_Ja0_Jh0_Bw0	30	8.70e-06	0.0000616	Visibilidade
Bd2_Ja0_Jh2_Bw0	30	1.81e-05	0.0001071	Visibilidade
Bd2_Ja1_Jh0_Bw0	30	7.90e-06	0.0001830	Visibilidade
Bd2_Ja1_Jh1_Bw0	30	1.40e-05	0.0002469	Visibilidade
Bd2_Ja1_Jh2_Bw0	30	6.70e-06	0.0001242	Visibilidade
Bd2_Ja2_Jh0_Bw0	30	2.20e-05	0.0000569	Visibilidade
Bd2_Ja2_Jh1_Bw0	30	8.00e-06	0.0002375	Visibilidade
Bd2_Ja2_Jh2_Bw0	30	5.50e-06	0.0000651	Visibilidade

Como se pode verificar, dependendo das condições simuladas resultam situações ideais

distintas. Ora isto, prova que a solução ideal não será dada por um caso concreto, mas por uma combinação dos mesmos. Existe ainda a possibilidade de existirem vários casos ótimos pelo que a figura 4.13 apoia na identificação, caso existam, de grupos. Como o caso sem viga é bastante dispar dos restantes, este é retirado das análises subsequentes.

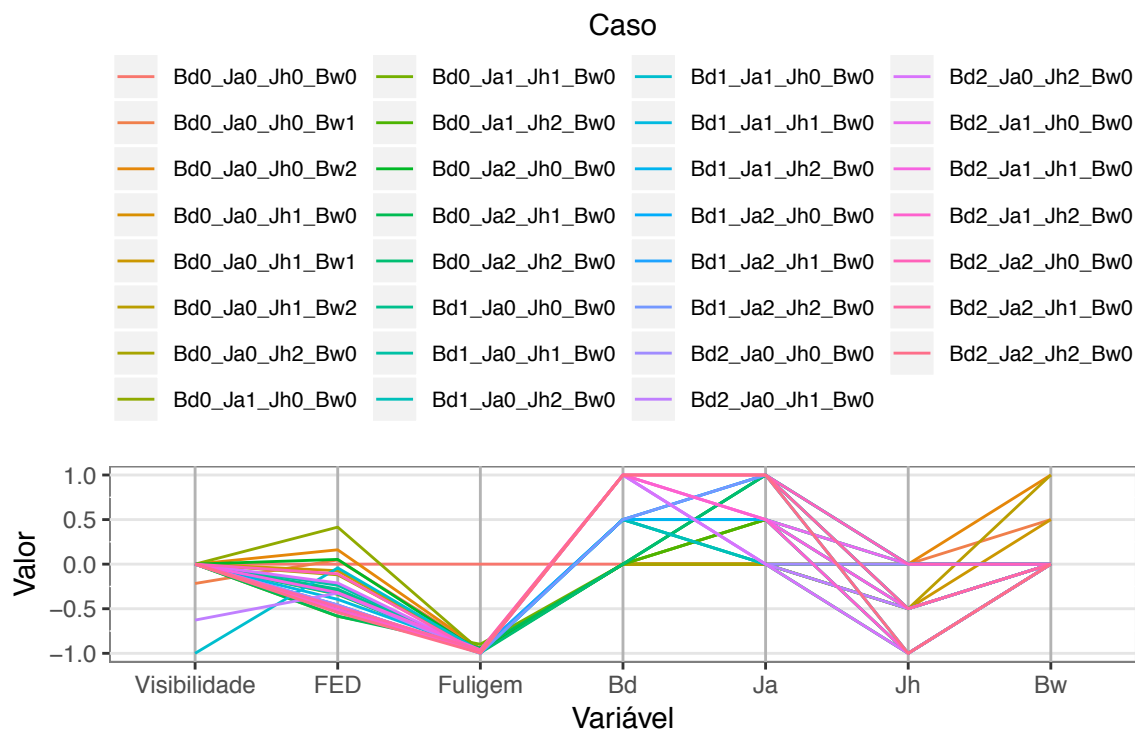


Figura 4.13: Gráfico de coordenadas paralelas para apoiar na identificação de grupos.

A figura 4.13 apresenta no eixo horizontal as variáveis em análise, no eixo vertical encontram-se os valores correspondentes para cada um dos casos normalizados e centrados pelo máximo e mínimo de cada variável. O comportamento esperado de ser encontrado em casos em que existam grupos é o identificável nas variáveis dependentes (*Visibilidade*, *FED* e *Fuligem*). Neste caso, porque cada uma das variáveis foi escolhida para simular em 3 casos concretos, existe um agrupamento, para todos os casos, em três pontos específicos para cada uma dessas variáveis. Por outro lado, no caso das variáveis dependentes, o comportamento é mais disperso, sugerindo assim a convexidade das relações.

Seguidamente, na figura 4.14 são apresentados gráficos em que se compara o comportamento dos vários casos para cada combinação de variáveis. Uma vez que a variável Bw tem poucos casos corridos, opta-se por retirar os casos em que a mesma foi variada já

que, pelo reduzido números de simulações é pouco explicativa para o propósito geral deste trabalho.

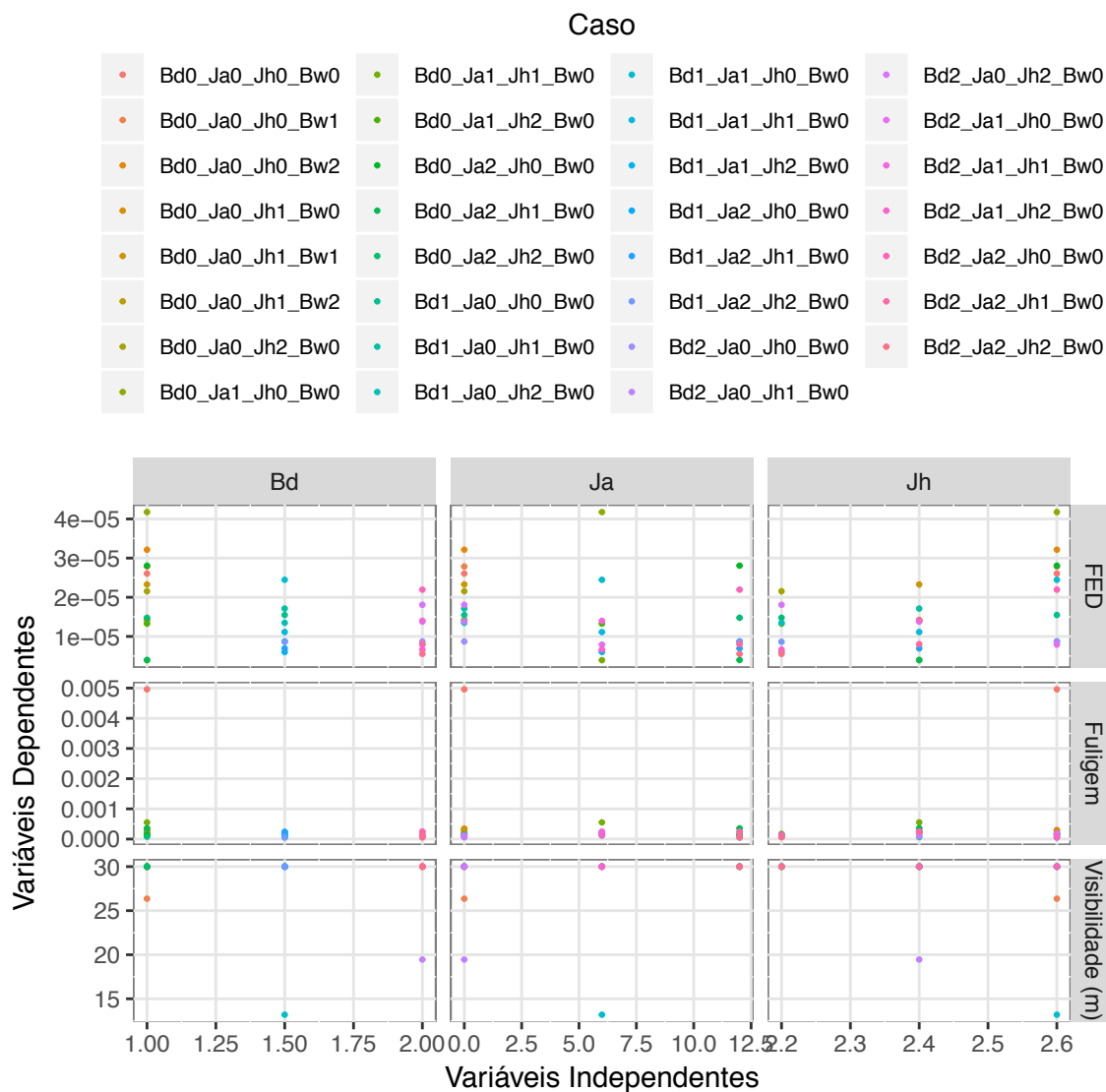


Figura 4.14: Comparação entre a variável dependentes e independente.

Analisando a figura 4.14 pode-se identificar, destacadamente, o caso em que não existe viga a cor de laranja. Neste caso tem-se um valor de FED maior que os restantes o que vai ao encontro do concluído na figura 4.12. Por outro lado, é identificável um capotamento categórico dos dados dispersos por três colunas que se referem aos casos escolhidos para simular e com uma dispersão vertical. Ora este comportamento nos dados dificulta a interpolação. Note-se que este é um forte motivo para as baixas

correlações encontradas e expostos na figura 4.15.

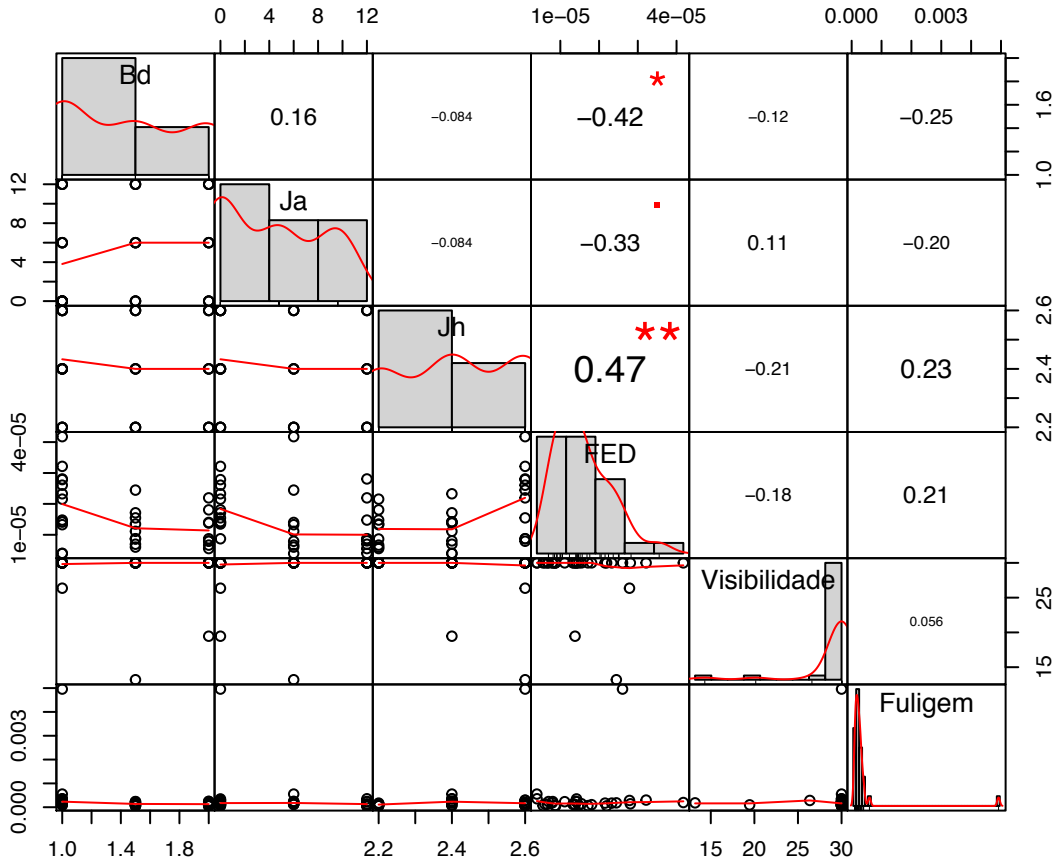


Figura 4.15: Matriz de correlações.

Atendendo à figura 4.15, torna-se difícil desenvolver um modelo com significado que relacione as variáveis dependentes com as independentes. Assim sendo, procurar-se-á relaxar o problema procurando o contributo de cada uma das variáveis independentes para a explicação das dependentes. Note-se que a variável FED é a que tem maiores coeficientes de correlação com as diferentes variáveis independentes com -0.42 relativamente ao Bd, -0.33 com o Ja e 0.47 com o Jh.

A análise das componentes principais (*Principal Component Analysis*, PCA) é uma forma de decompor os contributos de cada uma das variáveis de tal forma que se transformam os dados para que sejam ortogonais entre si, isto é, obtém-se independência entre eles. O gráfico 4.16 ajuda na compreensão no número de variáveis importantes para a explicação dos dados em que na horizontal se encontram cada uma das componentes

principais e na vertical a quantificação do contributo, em %, de cada uma dessas componentes.

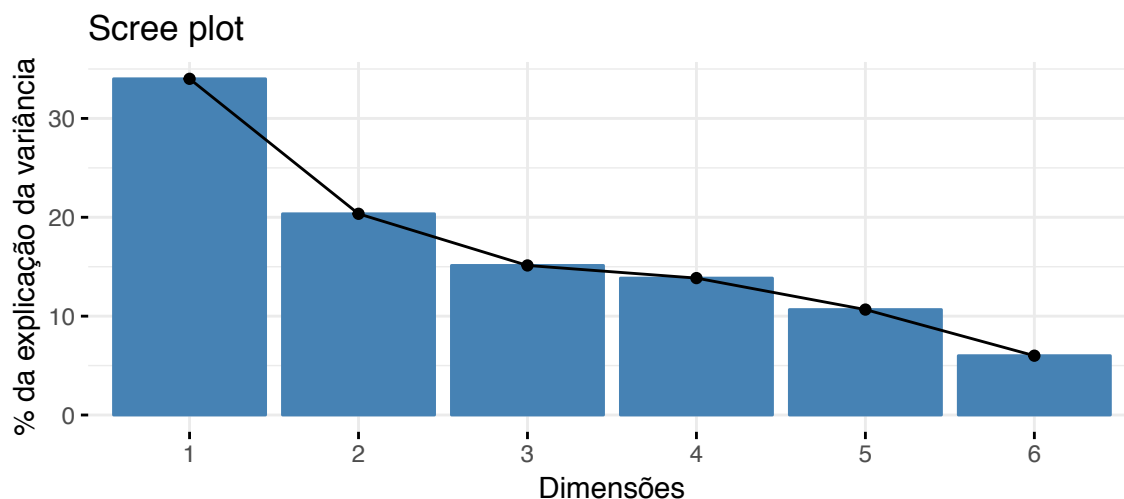


Figura 4.16: Gráfico de Scree Plot

Atendendo que é aconselhado uma explicação mínima de 70% seriam precisas pelo menos as três primeiras componentes principais para se explicar a variabilidade. Assim sendo, pode-se escolher, nas componentes principais, as variáveis que apresentam valores mais dispare. A tabela 4.3 apresenta os resultados da análise PCA.

Tabela 4.3: Resultados da PCA.

	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5	PC6
Bd	0.399	-0.487	0.006	0.508	-0.404	-0.426
Ja	0.374	-0.021	-0.794	-0.241	0.336	-0.242
Jh	-0.441	-0.347	-0.541	0.090	-0.405	0.470
FED	-0.582	-0.076	-0.024	-0.346	-0.171	-0.711
Visibilidade (m)	0.166	0.734	-0.192	0.020	-0.626	-0.068
Fuligem	-0.373	0.312	-0.200	0.745	0.371	-0.173

Analisando a tabela 4.3 pode-se concluir que, para se explicar a primeira componente, podem-se escolher valores distantes, isto é, Bd e FED. Relativamente à segunda componente, seguindo o mesmo raciocínio, tem-se a Visibilidade e Bd, no entanto como o último já foi escolhido, tem-se Jh. Finalmente, para a terceira componente, escolhe-se Ja.

A figura 4.17 representa cada um dos eixos principais referentes às variáveis em questão.

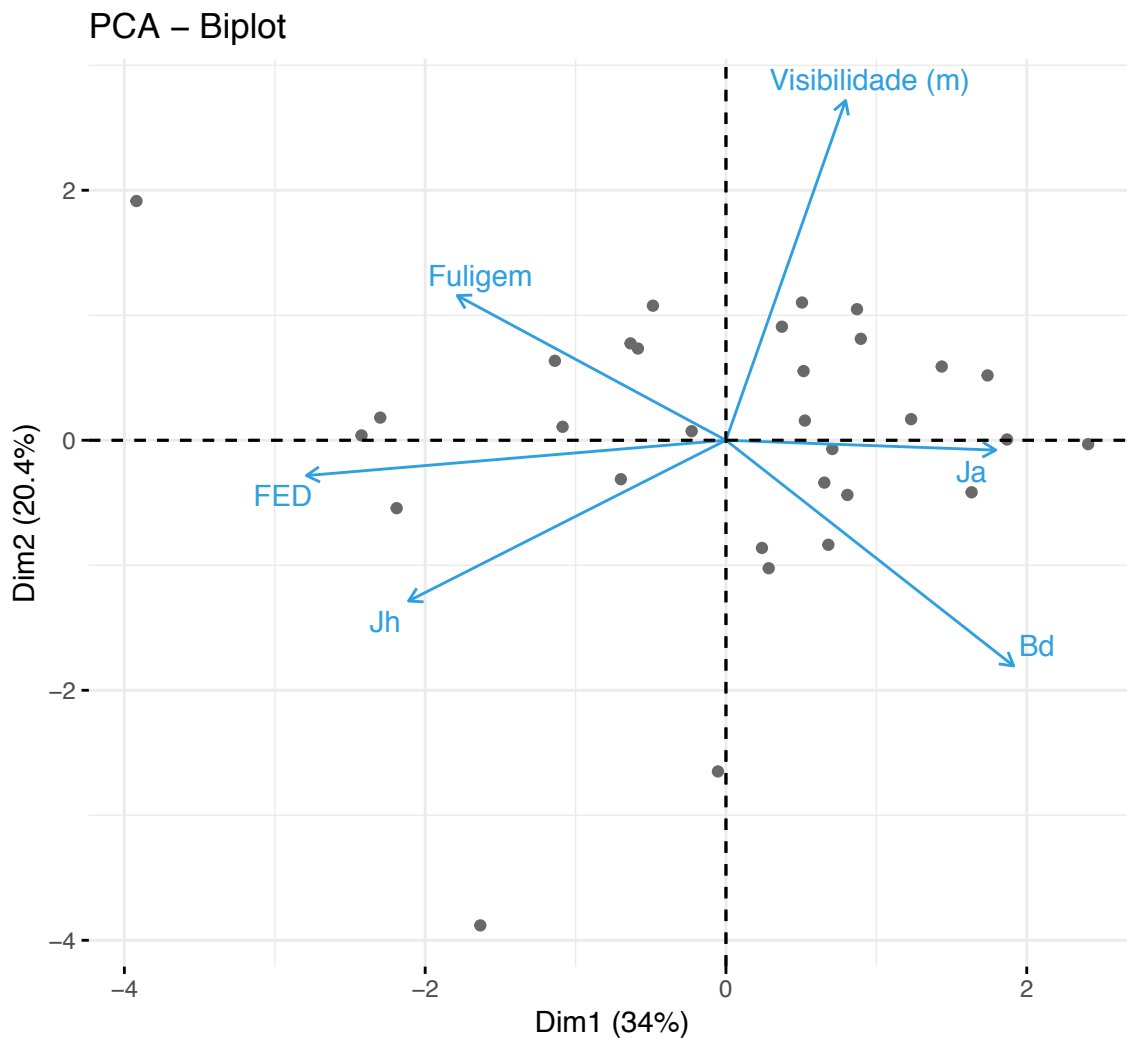


Figura 4.17: Gráfico de análise das componentes principais (PCA).

A figura 4.17 permite identificar relações entre variáveis, por exemplo, a distância à viga pode ser explicada à custa do ângulo de saída do ventilador e da Fuligem já que as suas direções são muito semelhantes. Ora, o fato de Ja e Bd estarem tão intimamente relacionadas também dificulta a modelação do problema, já que é preferencial a independência das variáveis independentes. Note-se que as variáveis encontradas para explicar as três primeiras componentes são bastante disparees entre si, com o intuito de cobrir o espaço com o número mínimo de variáveis. Pela figura 4.17 identifica-se uma relação próxima entre a Fuligem que sai do domínio e o FED, ou seja, poder-se-ia usar o FED em vez da Fuligem para se analisar a eficácia do sistema. Inesperadamente, a Visibilidade tem uma independência dessas o que significa que o

comportamento da visibilidade é dispar das primeiras.

Finalmente, desenvolve-se uma análise de variância (ANOVA) com o intuito de perceber a interinfluência de cada uma das variáveis independentes na explicação das dependentes. A tabela 4.4 apresenta um quadro resumo dos resultados da análise.

Tabela 4.4: Análise ANOVA.

Variável	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
Visibilidade (m)					
Bd	3	5.82e+02	1.94e+02	14.301	1.50e-05
Ja	2	1.70e+01	8.51e+00	0.627	5.42e-01
Jh	2	1.95e+01	9.74e+00	0.718	4.98e-01
Resíduos	24	3.26e+02	1.36e+01	NA	NA
FED					
Bd	3	4.03e-08	1.34e-08	276.834	9.58e-19
Ja	2	1.61e-10	8.03e-11	1.655	2.12e-01
Jh	2	6.59e-10	3.29e-10	6.791	4.60e-03
Resíduos	24	1.16e-09	4.85e-11	NA	NA
Fuligem					
Bd	3	1.78e-06	5.93e-07	0.742	5.37e-01
Ja	2	5.85e-07	2.93e-07	0.366	6.97e-01
Jh	2	9.95e-07	4.98e-07	0.623	5.45e-01
Resíduos	24	1.92e-05	7.99e-07	NA	NA

A tabela 4.4 divide a análise em três partes para cada uma das variáveis dependentes. Dela conclui-se que a distância da viga é significativa na explicação da visibilidade e do FED, já que o p-value apresenta-se como um valor próximo de zero. Por outro lado, a altura do ventilador, com menor significância (p-value está mais distante de zero que a visibilidade), tem influência na explicação do FED. Conclui-se ainda que a medida da fuligem é pouco influenciada pelas variáveis escolhidas.

A figura 4.18 descreve uma regressão linear para cada par de variáveis.

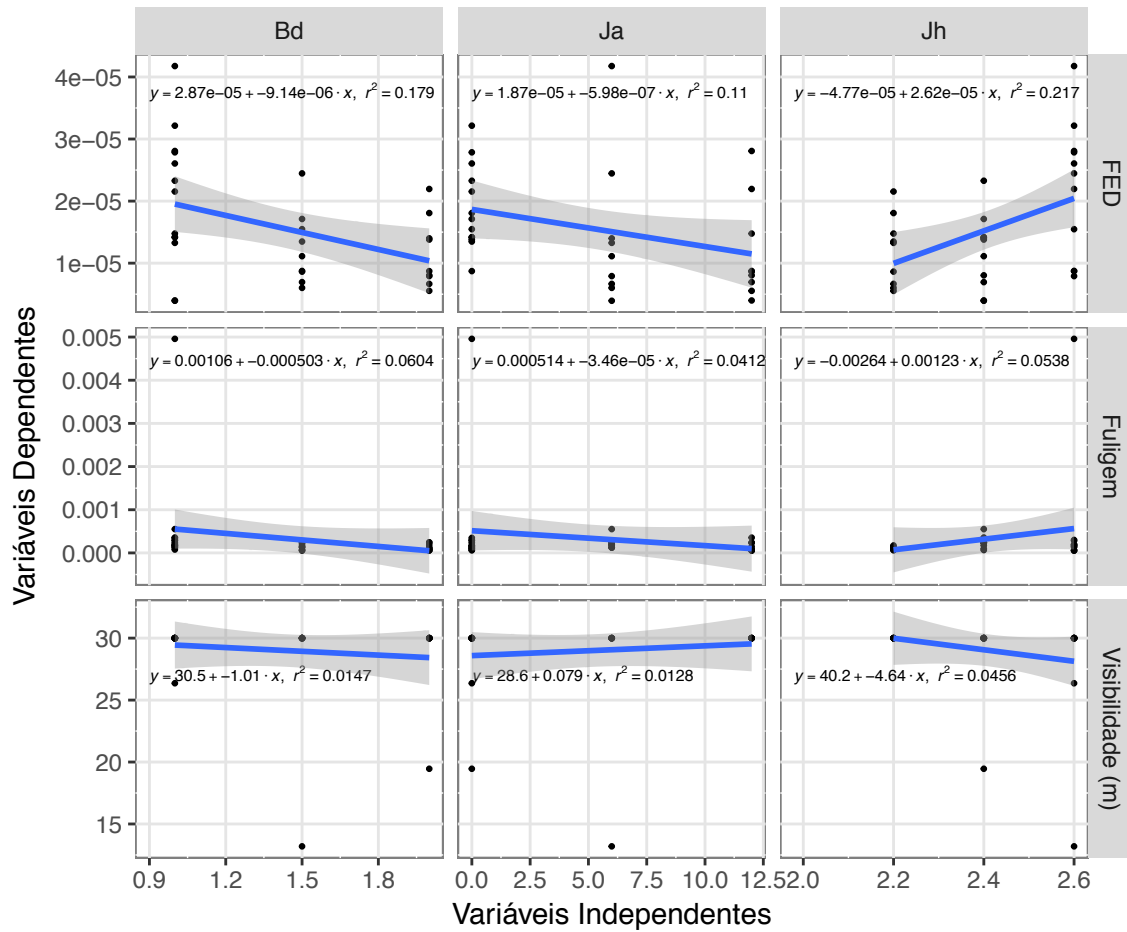


Figura 4.18: Comparação entre a variável dependentes e independente.

Como se pode concluir, pelos valores de r^2 , esta abordagem não permite ter qualidade nas regressões, o que vai ao encontro do concluído com a figura 4.15. Assim sendo, com base nas conclusões anteriores relativas às diversas relações das variáveis desenvolve-se um modelo de regressão multivariada na forma da equação (61),

$$\begin{cases} \text{Visibilidade}(Bd, Ja, Jh) = \beta_{11}Bd + \beta_{12}Ja + \beta_{13}Jh + \beta_{14} + \epsilon_1 \\ \text{FED}(Bd, Ja, Jh) = \beta_{21}Bd + \beta_{22}Ja + \beta_{23}Jh + \beta_{24} + \epsilon_2 \end{cases} \quad (61)$$

Para esta regressão multivariada obtém-se um $r^2 = 0.9743395$ que é muito superior ao caso em que a regressão linear é feita em pares. A tabela 4.5 apresenta as estimativas da qualidade da regressão.

Tabela 4.5: Estimativas da qualidade da regressão.

	Estimação	Erro Standardizado	T-values	Pr(>F)
Ordenada na Origem	44.66	9.224	4.841	4.28e-05
Bd	-2.33	0.471	-4.950	3.18e-05
Ja	0.10	0.127	0.786	4.38e-01
Jh	-5.33	3.894	-1.368	1.82e-01

Note-se que, uma vez mais, a variável referente à visibilidade apresenta p-values inferiores confirmando que este é, para os dados disponíveis, a variável com maior significância na análise. Além disso, o coeficiente referente à ordenada na origem apresenta um p-value igualmente baixo. A figura 4.19 mostra a análise de resíduos obtidos da regressão linear.

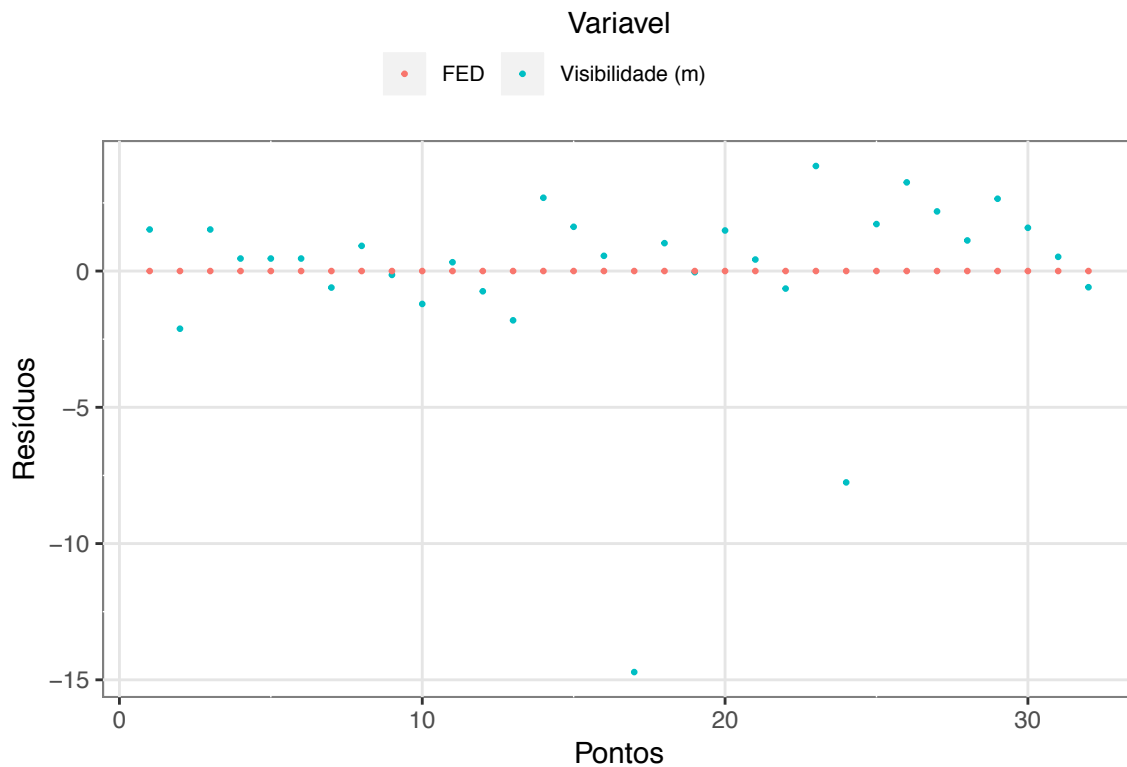


Figura 4.19: Dispersão dos resíduos.

Como se pode concluir a dispersão tem um comportamento aleatório em torno de zero, no entanto aparentam existir valores discrepantes da amostra (*outliers*). Para confirmar, no gráfico 4.20 são apresentados os resíduos relativamente à Visibilidade e ao FED com todos os dados e com a remoção de *outliers*.

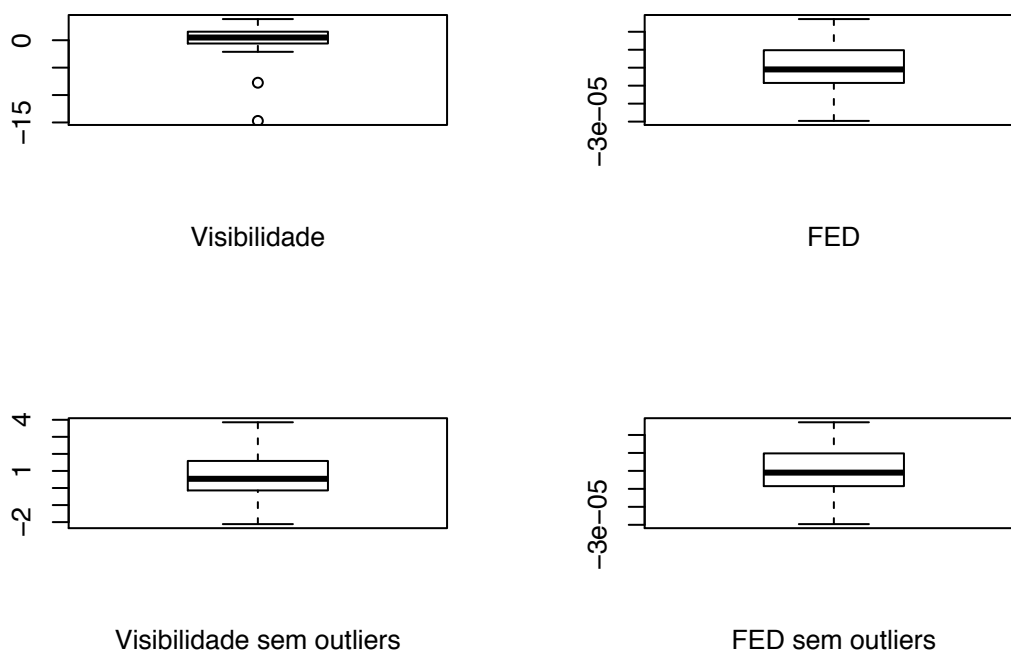


Figura 4.20: Gráficos de caixa (boxplots).

Tal como os dados sugeriam existem dois *outliers* no caso da visibilidade, assim sendo, estes serão retirados da amostra no sentido de compatibilizar os dados com os pressupostos necessários à validade da regressão multivariada, isto é, os resíduos devem apresentar linearidade, média nula, independência, normalidade e igual variância [32].

Tabela 4.6: Estimativas da qualidade da nova regressão sem outliers.

	Estimação	Erro Standardizado	T-values	Pr(>F)
Ordenada na Origem	38.9393	3.7213	10.46	8.18e-11
Bd	-2.5256	0.1870	-13.51	2.91e-13
Ja	0.0751	0.0511	1.47	1.54e-01
Jh	-2.4718	1.5720	-1.57	1.28e-01

Os novos coeficientes da regressão linear multivariada são apresentados na tabela 4.7.

Fica assim definido o modelo que relaciona a distância da viga, a altura do ventilador e o ângulo de saída do ventilador com a visibilidade e a dose letal de subprodutos da combustão.

Tabela 4.7: Coeficientes da regressão linear.

	Visibilidade (m)	FED
Intersepção na Origem	38.9393493	-9.68e-05
Bd	-2.5255911	1.87e-05
Ja	0.0750743	-1.00e-06
Jh	-2.4717790	3.79e-05

4.3 Verificação do Estudo Simplificado

Em contexto de projeto, a utilização de um modelo que apresente melhores capacidades preditivas poderia ser usado na estimativa das variáveis de interesse. Apesar da regressão multivariada ter apresentado melhores resultados comparativamente à regressão linear, como se verá ainda não tem a capacidade de previsão desejada, não obstante fica o exemplo de aplicação de um modelo deste tipo a um problema que se aproxima mais ao de um parque de estacionamento, isto é, serão colocados veículos, pilares e vigas como a figura 4.4 demonstra, para as mesmas condições de incêndio.

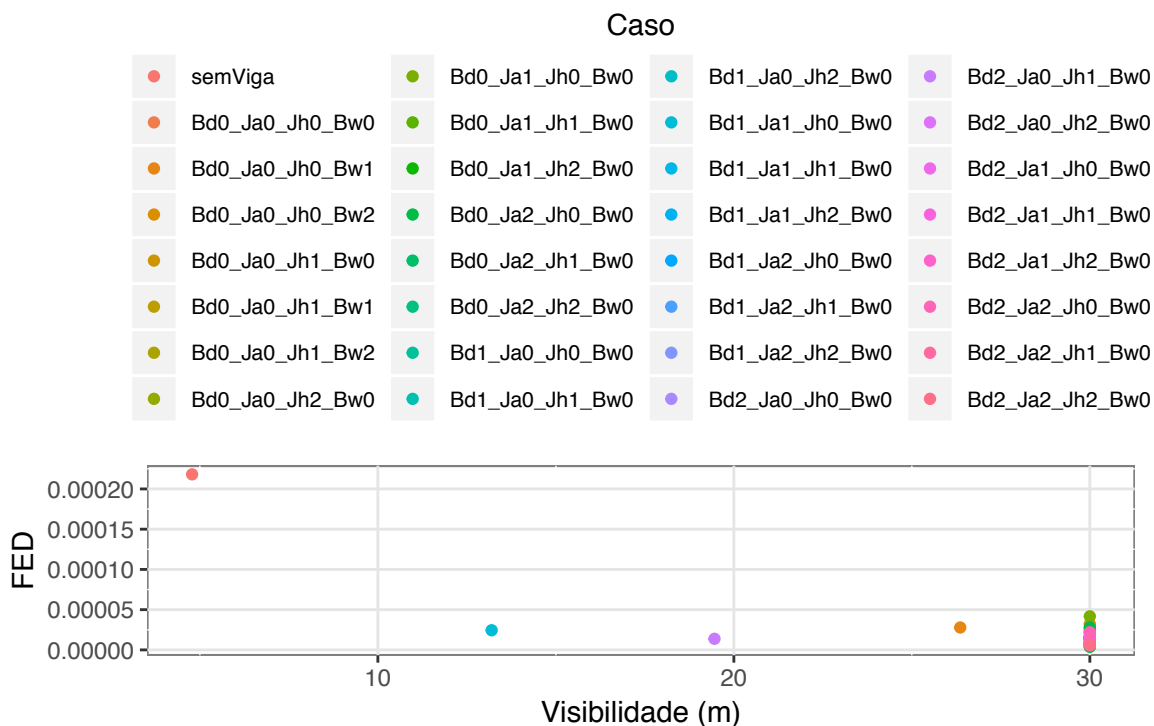


Figura 4.21: Comparação entre a visibilidade e o valor de FED.

Com base no subcapítulo anterior as duas variáveis preponderantes na análise do sistema são a visibilidade e o FED. Nesse sentido, porque quando sujeita a constrangimentos espaciais, a solução pode não ser a ideal, mas não deixar de ser ótima dadas as condicionantes. A figura 4.21 apresenta o compromisso entre as variáveis independentes como função das condições geométricas e de operação (variáveis independentes). Este tipo de gráfico permite estabelecer um compromisso (*trade-off*), isto é, fazer uma escolha em detrimento de outra. Esta análise implica um conflito de escolha e uma consequente relação de compromisso entre as condições possíveis e as que se obterão por sacrifício da primeira. Neste caso o ponto ideal passa por se ter a máxima visibilidade com o mínimo de FED. Ora, neste caso, esse ponto também é mínimo no FED, como se constata pela figura 4.21. Além disso, esse ponto corresponde ao caso Bd0_Ja1_Jh1_Bw0. Esta análise não deixa de ser um contrassenso com o assumido que o caso sem viga era o ponto ótimo. De fato a ausência da viga permitiu expelir o dobro da fuligem presente no domínio como confirmado na tabela 4.1, no entanto, o revez desta eficácia é a promoção da dispersão da fuligem.

Para se proceder à verificação do modelo procede-se à realização de dois novos casos num contexto mais complexo como apresentado na figura 4.22.

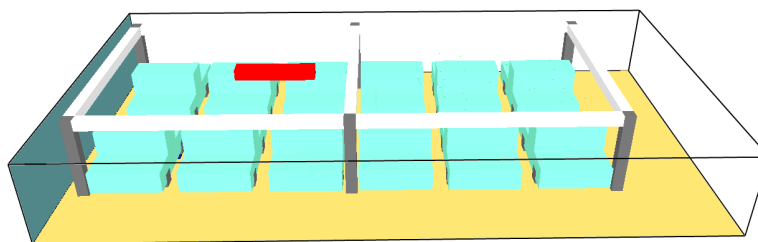


Figura 4.22: Modelo mais complexo usado na verificação do modelo desenvolvido.

São simuladas duas novas condições, uma onde as variáveis independentes utilizadas são coincidentes com as ótimas (Bd0_Ja1_Jh1_Bw0) e um segundo, onde não são coincidentes (4.23). Para cada um dos casos apresentam-se os resultados da simulação na tabela 4.8. Na figura 4.23 são apresentados os resultados obtidos comparativamente ao modelo desenvolvido.

Tabela 4.8: Resultados da simulação.

	Bd	Ja	Jh	Visibilidade	FED
Simulado (coincidente)	1.00	0.1047198	2.4	20.00977	8.30e-06
Simulado (não coincidente)	1.25	0.0523599	2.5	30.00000	1.06e-05

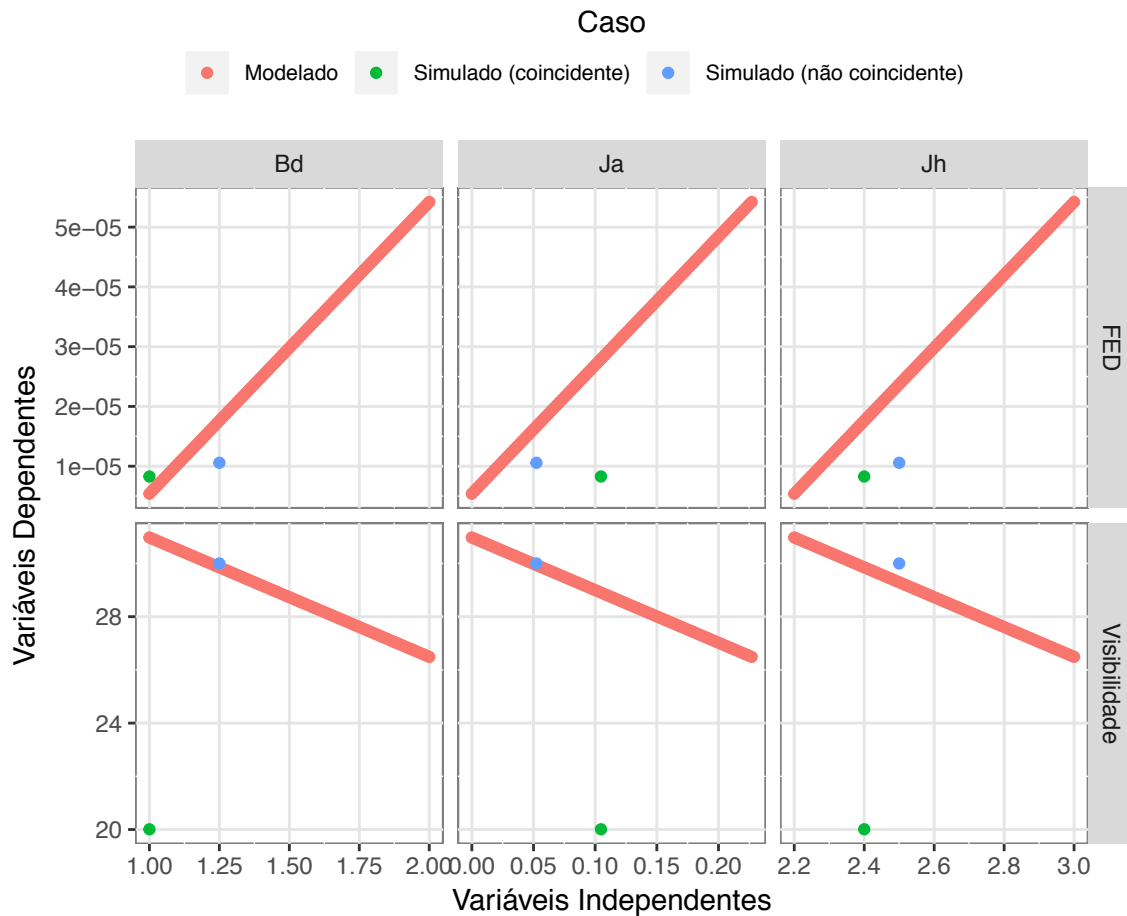


Figura 4.23: Verificação do modelo com novas simulações.

Pela figura 4.23 conclui-se que os dados apresentam uma grande disparidade, principalmente no caso coincidente. Para quantificar o desvio de cada uma das variáveis independentes, a tabela 4.9 resume o erro relativo da regressão relativamente a cada um dos novos casos.

Por outro lado, a existência de novos obstáculos levou a um comportamento diferente (figura 4.24) do fumo.

Tabela 4.9: Erro relativo obtido da comparação dos novos casos simulados com o modelo desenvolvido.

	Visibilidade	FED
Coincidente	52.372%	55.64%
Não coincidente	1.311%	102.40%

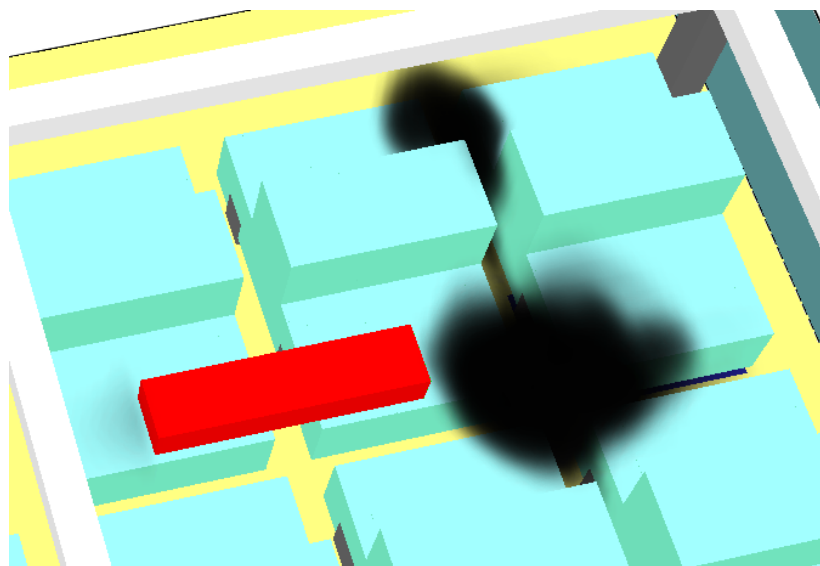


Figura 4.24: Fumo que, pela presença de carros é levado para longe do ventilador.

Dado o tempo elevado de computação das simulações, o número de pontos utilizados nas mesmas pode não ter sido o suficiente para demonstrar com maior eficácia a robustez do modelo. A presença de carros, e, porque parte da fonte de chama se encontra debaixo de um carro, a dinâmica do fumo/fogo é diferente da encontrada inicialmente para a modelação desenvolvida. O fumo ao ser desviado da zona central, onde seria encaminhado para o ventilado, escapa do confinamento natural que se obteria pela presença de vigas em volta dessa zona. Este foi um fenómeno inesperado que trouxe dificuldades à verificação do modelo de forma consistente. Além disso, a presença dos carros, promove um escoamento diferente o que pode majorar os desvios.

5 Conclusões

Dados os constrangimentos espaciais em parques de estacionamento, muitas vezes são encontradas disposições possíveis dos equipamentos de proteção sem preocupação com a sua eficácia. Isto resulta não só num risco para a segurança, mas, no casos dos parques de estacionamento, também para o consumo de energia. Note-se que os ventiladores de impulso são responsáveis não só por apoiar em caso de incêndio, mas têm uma voz ativa em manter o ar em condições respiráveis. Nesse sentido, para que haja poupança energética, não só o equipamento tem de ser eficiente como a própria ventilação tem de ter condições de escoamento eficientes.

O Python demonstrou-se ser uma ferramenta de programação muito versátil ao permitir, com programação orientada por objetos, reorganizar a estrutura de dados recebida pelo FDS num paradigma modelável. Isto permitiu não só agilizar o processo de geração de ficheiros de configuração da simulação do FDS, mas também acrescentar funcionalidades que de outra forma teriam de ser feitas separadamente, é o caso do modelo para estimar a dimensão da malha com base no calor libertado pelo fogo. Tentou-se ainda implementar um algoritmo que permitisse com base no valor de y^+ obter a resolução da malha junto das fronteiras sólidas, no entanto, os ficheiros de dados que resultam da exportação de tais parâmetros não são acessíveis de forma simples o que inviabilizou essa abordagem. Outra vantagem em usar a abordagem do python prende-se com o a facilidade que ficou disponível em criar objetos (como carros, ventiladores, pilares, vigas ou outros) e replicá-los no domínio de computação sem dificuldade acrescida. Isto permitiu reduzir grandemente a dimensão do código a programar para que se consiga definir o domínio computacional da simulação.

Relativamente ao CFD, os outputs do FDS são de difícil manuseio e muitos deles são dependentes da sua especificação antes de iniciar a simulação, logo, se for necessária informação que não foi previamente definida será necessário correr a simulação novamente. Por outro lado, a malha, ao ser estruturada permite a criação de malhas de forma simples e com melhores resultados numéricos, no entanto obriga a ter muitos mais volumes, muitas vezes propagados na secção do domínio de uma zona onde se quer mais refinamento. Isto acrescenta um custo computacional muitas vezes desnecessário mas inevitável. Uma solução passa pela paralelização da simulação, o que é muito útil, mediante a divisão do domínio em várias malhas o que acelera o processo de cálculo. No entanto, a compatibilização dos resultados na interface da malha nem

sempre consegue garantir bons resultados sendo essa incompatibilidade tanto maior quanto maiores sejam as velocidades nessa zona. Uma alternativa que se acredita resolver esse problema passa pela sobreposição de volumes nessas fronteiras, mas tal não foi experimentado neste trabalho. Apesar de se ter recorrido à paralelização, o tempo de computação demonstrou-se ser demorado o que impossibilitou a geração de mais dados para analisar comprometendo de certa maneira as conclusões obtidas. Nesse sentido, a geração de mais resultados é imperativo para a verificação das tendências identificadas neste trabalho. Além disso, a geração de simulações com base em parametros gerados aleatoriamente pode ajudar na regressão linear, caso seja o modelo pretendido a seguir. O fato de se terem usados três posições fixas levou a uma categorização dos dados que pioraram a robustez do modelo.

Seria interessante testar a análise em localizações diferentes para diferentes medidas, isto é, tanto a visibilidade como o FED são importante abaixo dos 2 m porque é altura à qual as pessoas poderão começar a ser afetadas pelo fumo. Por outro lado, o FED, pelo concluído neste trabalho, pode ser igualmente quantificador da eficácia em transportar o fumo para fora do domínio. É o caso analisado sem viga onde apesar de o FED ser maior este encontra-se a alturas acima dos 2 m pelo que não afetaria as pessoas. Assim sendo o FED poderia ser usado como medida para a eficácia da ventilação a alturas próximas do teto e como medida de segurança a alturas abaixo dos 2 m.

Este é um tema pertinente e que carece de mais compreensão para que se possa legislar em consciência das implicações envolvidas. Com este trabalho a questão da modelação fica em aberto, mas abre caminho sobre abordagens a serem tomadas no sentido de capacitar projetistas e legisladores a alcançarem maior consciência na segurança contra incêndios em edifícios e, em particular, na localização de ventiladores de impulso.

Bibliografia

- [1] (2018) <https://dre.pt/web/guest/home/-/dre/67085364/details/9/maximized?serie=II&dreId=67082287>.
- [2] (2016) <https://www.resolvedanalytics.com/theflux/comparing-cfd-software>.
- [3] (2018) <https://www.nist.gov/services-resources/software/>.
- [4] Kobes, M. and BBE, M. (2009) Consumer fire safety: European statistics and potential.
- [5] Schnell, U. (2001) Numerical modelling of solid fuel combustion processes using advanced cfd-based simulation tools. *Progress in Computational Fluid Dynamics, an International Journal*, 1(4), 208–18.
- [6] Senecal, P., Pomraning, E., Richards, K., Briggs, T., Choi, C., McDavid, R. et al. (2003) Multi-dimensional modeling of direct-injection diesel spray liquid length and flame lift-off length using cfd and parallel detailed chemistry. *SAE Technical Paper*,
- [7] Beck, J. and Watkins, A. (2004) The simulation of fuel sprays using the moments of the drop number size distribution. *International Journal of Engine Research*, 5(1), 1–21.
- [8] Versteeg, H.K. and Malalasekera, W. (2007) An introduction to computational fluid dynamics: The finite volume method. 2nd ed. Pearson Education Ltd., Harlow, England.
- [9] Lockwood, F., Salooja, A. and Syed, S. (1980) A prediction method for coal-fired furnaces. *Combustion and Flame*, 38, 1–15.
- [10] Godoy, S., Hirji, K. and Lockwood, F.C. (1988) Combustion measurements in a pulverised coal-fired furnace. *Combustion Science and Technology*, 59(1-3), 165–82.
- [11] Williams, A., Pourkashanian, M. and Jones, J. (2001) Combustion of pulverised coal and biomass. *Progress in Energy and Combustion Science*, 27(6), 587–610.
- [12] Yeoh, G.-H. and Yuen, K.K. (2009) Computational fluid dynamics in fire engineering:

Theory, modelling and practice. Butterworth-Heinemann.

- [13] Coelho, A.L. (2010) Incêndios em edifícios. Edições Orion, Lisboa.
- [14] (2018) <https://www.promat-tunnel.com/en/advice/fire-protection/fire>.
- [15] structures., P. of the iabse colloquium held stockholm 1998-Tunnel, editor. (1998) Fire protection in traffic tunnels: Results of eureka research project eu 499 firetun.
- [16] (2018) <http://www.mace.manchester.ac.uk/project/research/structures/strucfire/>.
- [17] EN 1991-1-2 (2002) (english): Eurocode 1: Actions on structures - part 1-2: General actions - actions on structures exposed to fire [authority: The european union per regulation 305/2011, directive 98/34/ec, directive 2004/18/ec].
- [18] Alpert, R.L. (2016) SFPE handbook of fire protection engineering. Springer.
- [19] Fu, &H., Z. (2000) A two-zone fire growth and smoke movement model for multi-compartment buildings. *Fire Safety Journal*, 34(3), 257–85.
- [20] Suzuki, K., Harada, K. and Tanaka, T. (2003) A multi-layer zone model for predicting fire behavior in a single room. *Fire Safety Science*, 7, 851–62.
- [21] Tanaka, T. and Yamana, T. (1985) Smoke control in large scale spaces. *Fire Science and Technology*, 5(1), 31–40.
- [22] Friedman, R. (1992) An international survey of computer models for fire and smoke. *Journal of Fire Protection Engineering*, 4(3), 81–92.
- [23] Olenick, S.M. and Carpenter, D.J. (2003) An updated international survey of computer models for fire and smoke. *Journal of Fire Protection Engineering*, 13(2), 87–110.
- [24] Purser, D.A. (2002) SFPE handbook of fire protection engineering, chapter toxicity assessment of combustion products. National Fire Protection Association, Quincy, Massachusetts.
- [25] McGrattan, K., Klein, B., Hostikka, S. and Floyd, J. (2010) Fire dynamics simulator (version 5), user’s guide. *NIST Special Publication*, 1019(5), 1–186.
- [26] Tavelli, S., Rota, R. and Derudi, M. (2014) A critical comparison between cfd and zone models for the consequence analysis of fires in congested environments. *Chemical*

Engineering, 36.

[27] Zikanov, O. (2010) Essential computational fluid dynamics. Wiley, Hoboken, N.J.

[28] Anderson, D.A., Pletcher, R.H. and Tannehill, J.C. Computational fluid mechanics and heat transfer [Internet]. Third edition.

[29] Tennekes, H. and Lumley, J.L. (1972) A first course in turbulence. MIT Press, Cambridge, Mass.

[30] Anderson, J., Degrez, G., Dick, E. and Grundmann, R. (1992) Computational fluid dynamics - an introduction. Springer.

[31] Costa, S.C., Casaca, C. and Henriques, N. (2018) On the influence of obstructions on the car parks ventilation. Lisboa, Portugal. pp. 3rd International Conference Safety Design Performance-Based Fire.

[32] Montgomery, D.C. and Runger, G.C. (2003) Applied statistics and probability for engineers. Jhon Wiley & Sons.