



Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Ana Marta Moreira Carneiro

**Simulação *CFD* do processo de
desenfumagem de um parque de
estacionamento**



Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Ana Marta Moreira Carneiro

**Simulação *CFD* do processo de
desenfumagem de um parque de
estacionamento**

Dissertação de Mestrado
Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica

Trabalho efetuado sob a orientação de:

**Professor Doutor Pedro Alexandre Moreira
Lobarinhas**

**Professora Doutora Senhorinha de Fátima Capela
Fortunas Teixeira**

DIREITOS DE AUTOR E CONDIÇÕES DE UTILIZAÇÃO DO TRABALHO POR TERCEIROS

Este é um trabalho académico que pode ser utilizado por terceiros desde que respeitadas as regras e boas práticas internacionalmente aceites, no que concerne aos direitos de autor e direitos conexos.

Assim, o presente trabalho pode ser utilizado nos termos previstos na licença abaixo indicada.

Caso o utilizador necessite de permissão para poder fazer um uso do trabalho em condições não previstas no licenciamento indicado, deverá contactar o autor, através do RepositóriUM da Universidade do Minho.

Licença concedida aos utilizadores deste trabalho



Atribuição-NãoComercial

CC BY-NC

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>

AGRADECIMENTOS

A realização desta dissertação não teria sido possível sem a ajuda de todas as pessoas que contribuíram direta ou indiretamente para o desenvolvimento do trabalho.

Em primeiro lugar, gostaria de agradecer aos meus orientadores. Ao Professor Pedro Lobarinhas pela disponibilidade e ajuda prestada no decorrer de todo o trabalho e à Professora Senhorinha Teixeira pelos conselhos, empenho e constante apoio prestado.

Também gostaria de agradecer ao Doutor Nelson Rodrigues, ao João Silva, à Inês Gonçalves e à Inês Teixeira pela assistência, incentivo e colaboração neste projeto.

Agradecer ainda à empresa, em especial ao Engenheiro André Silva, que propôs este projeto e sempre se mostrou disponível para ajudar.

Por fim, gostaria de agradecer à minha família pela confiança depositada e apoio dado ao longo destes anos, quer a nível académico e não académico, e aos meus amigos e parceiro por acreditarem em mim e me motivarem a chegar mais longe.

Muito obrigada a todos!

DECLARAÇÃO DE INTEGRIDADE

Declaro ter atuado com integridade na elaboração do presente trabalho académico e confirmo que não recorri à prática de plágio nem a qualquer forma de utilização indevida ou falsificação de informações ou resultados em nenhuma das etapas conducente à sua elaboração.

Mais declaro que conheço e que respeitei o Código de Conduta Ética da Universidade do Minho.

RESUMO

Com o crescimento da densidade populacional, o aumento da afluência de veículos aos grandes centros origina problemas a nível organizacional. Devido à escassez de espaços que permitem o estacionamento de veículos, o número de parques de estacionamento subterrâneos tem aumentado significativamente. Geralmente, estes parques são construídos debaixo de edifícios de habitação ou de edifícios comerciais, de modo a promover uma boa acessibilidade e comodidade aos utilizadores destes espaços. Apesar das diversas vantagens que estas construções proporcionam, algumas características destas estruturas devem ser estudadas para evitar determinados problemas. Pelo facto destes espaços serem totalmente cobertos, a ocorrência de um incêndio pode dificultar a evacuação devido à grande libertação de fumo e à rápida subida da temperatura.

O principal objetivo desta dissertação é efetuar a simulação *CFD* da desenfumagem de um parque de estacionamento subterrâneo totalmente coberto, no caso de ocorrer um incêndio, para prever o comportamento do escoamento e verificar se o processo é eficaz. Assim, o estudo efetuado foi dividido em duas etapas, uma sem a fonte de calor e outra com a implementação desta, para que nesta última o incêndio fosse representado. A ferramenta utilizada para realizar as simulações em questão foi o *software Ansys Fluent*.

No que diz respeito aos parâmetros estudados, a análise do contorno de velocidade obtido permite prever o escoamento quando o sistema de desenfumagem é ativado. Os resultados relativos à temperatura representam o desenvolvimento do incêndio, sendo assim possível concluir que, para o caso definido, o sistema de desenfumagem é eficaz. No entanto, a alteração da representação do incêndio pode afetar a eficácia do sistema de desenfumagem em estudo.

Palavras-Chave

Parque de estacionamento; Desenfumagem; Simulação *CFD*; Escoamento; *Ansys Fluent*.

ABSTRACT

With the growth in population density, the increased affluence of vehicles to large centres causes organizational problems. Due to the scarcity of spaces that allow the parking of vehicles, the number of underground parking lots has been increasing significantly. Generally, these parks are built under residential or commercial buildings, in order to provide good accessibility and convenience to the users of these spaces. Despite the several advantages that these constructions provide, some characteristics of these structures should be studied to avoid certain problems. Because these spaces are completely covered, the occurrence of a fire can make evacuation difficult due to the large release of smoke and the rapid rise in temperature.

The main goal of this dissertation is to perform a CFD simulation of the smoke removal of a fully covered underground car park, in the event of a fire, in order to predict the flow behaviour and verify whether the process is effective. Thus, the study carried out was divided in two stages, one without the heat source and another with its implementation, so that in the latter the fire is represented. The tool used to perform the simulations in question was the Ansys Fluent software.

Regarding the parameters studied, the analysis of the velocity contour obtained allows the prediction of the flow behaviour when the smoke removal system is activated. The temperature results represent the development of the fire. It can therefore be concluded that, for this particular case, the smoke removal system is effective. However, changing the representation of the fire may affect the performance of the smoke removal system under study.

Keywords

Parking lot; Smoke removal; CFD simulation; Flow, Ansys Fluent

ÍNDICE

Agradecimentos.....	ii
Resumo.....	iv
Abstract.....	v
Índice.....	vi
Índice de Figuras.....	viii
Índice de Tabelas.....	x
Lista de Símbolos.....	xi
1. Introdução.....	1
1.1. Enquadramento do tema.....	1
1.2. Objetivos da dissertação.....	1
1.3. Estrutura da dissertação.....	2
2. Ventilação em parques de estacionamento.....	3
2.1. Fumos.....	3
2.2. Desenfumagem.....	4
2.3. Revisão da literatura.....	5
3. Legislação e Regulamentos Técnicos.....	8
3.1. Regulamento de Segurança Contra Incêndio em Parques de Estacionamento Cobertos – Decreto-Lei n.º 66/95 – 8 de abril.....	8
3.2. Regime Jurídico da Segurança Contra Incêndio em Edifícios – Decreto – Lei n.º 220/2008 – 12 de novembro.....	10
3.3. Regulamento Técnico de Segurança Contra Incêndio em Edifícios – Portaria n.º 1532/2008 – 29 de dezembro.....	12
3.4. Regulamento Técnico de Segurança Contra Incêndio em Edifícios – Portaria n.º 135/2020 – 2 de junho.....	13
4. Caso de estudo.....	15
4.1. <i>Layouts</i>	15

4.1.1.	Piso -1.....	15
4.1.2.	Piso -2 e Piso -3.....	18
4.2.	Pontos de poluição.....	20
4.3.	Pontos de captação.....	20
4.4.	Potenciais pontos críticos	21
5.	Simulações <i>CFD</i>	22
5.1.	Computação Dinâmica de Fluidos	22
5.1.1.	Equações de Conservação	22
5.1.2.	Modelos de Turbulência.....	25
5.1.3.	Método dos Volumes Finitos	26
5.2.	Funcionamento do <i>software Ansys Fluent</i>	26
5.3.	Simulação sem a fonte de calor.....	29
5.3.1.	Geometria	29
5.3.2.	Malha.....	30
5.3.3.	<i>Setup</i>	32
5.3.4.	<i>Solver</i>	37
5.3.5.	Resultados e Discussão	38
5.4.	Simulação com a fonte de calor.....	41
5.4.1.	Geometria e Malha	41
5.4.2.	<i>Setup e Solver</i>	42
5.4.3.	Resultados e Discussão	44
6.	Considerações finais	50
6.1.	Conclusões	50
6.2.	Trabalhos Futuros	51
Anexo A: Ficha técnica do ventilador de indução		52
Bibliografia		53

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Fases de desenvolvimento de um incêndio: 1 – fase de ignição; 2 – fase de aquecimento; 3 – ponto máximo; 4 – fase de arrefecimento (Bernardo & Pessoa, 2022).	3
Figura 2 - Categorias de risco da utilização-tipo II.	11
Figura 3 - <i>Layout</i> do piso -1: zona A - entrada para o parque e circulação de veículos, zona B - armazém; 1 - rampa de ligação ao piso -2, 2 - portão de entrada para o parque, 3 - portão que liga as zonas do piso -1, 4 - vias de evacuação vertical; linha vermelha – parede que divide a zona A da zona B.....	16
Figura 4 - Indicação dos equipamentos presentes no piso -1: 1 e 3 - ventiladores de insuflação, 2 e 4 - ventiladores de extração, 5 - ventiladores de indução; setas verdes – direção dos ventiladores de indução; linha vermelha – parede que divide a zona de circulação de veículos da zona de armazém.	17
Figura 5 - Desenho sem ruído da zona de entrada e circulação de veículos do piso -1.....	18
Figura 6 - <i>Layout</i> do piso -2: 1 – ventilador de insuflação, 2 – ventilador de extração, 3 – ventiladores de indução, A – rampa de ligação aos outros pisos, B – vias de evacuação vertical.	18
Figura 7 - <i>Layout</i> do piso -3: 1 – ventilador de insuflação, 2 – ventilador de extração, 3 – ventiladores de indução, A – rampa de ligação ao piso -2, B – vias de evacuação vertical.	19
Figura 8 - Potenciais pontos críticos.	21
Figura 9 - Etapas de uma simulação.	27
Figura 10 - Desenho do piso -1 do parque de estacionamento com as colunas a preto e os ventiladores de indução a verde.	29
Figura 11 - Malha com tamanho de elemento de 0,4 metros.	30
Figura 12 - Desenho com a indicação das zonas a considerar na simulação.	32
Figura 13 - Parâmetros gerais do <i>setup</i> da simulação.	33
Figura 14 - Definição das condições de entrada como <i>velocity-inlet</i>	35
Figura 15 - Definição das condições de saída.	36
Figura 16 - Definição das condições da parede.	36
Figura 17 - Definição das condições de entrada como <i>pressure-inlet</i>	37
Figura 18 - Contorno da velocidade - entrada como <i>velocity-inlet</i>	38
Figura 19 - Contorno da turbulência - entrada como <i>velocity-inlet</i>	39
Figura 20 - Contorno da pressão - entrada como <i>velocity-inlet</i>	40
Figura 21 - Contorno da pressão - entrada como <i>pressure-inlet</i> com pressão.	41
Figura 22 - Desenho com a indicação das zonas principais.	42

Figura 23 - Energia libertada pela fonte de calor ao longo do tempo. 43

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Revisão da literatura.	6
Tabela 2 - Valores médios de CO em função do tempo.	9
Tabela 3 - Termos e respectivas definições do Decreto-Lei 220/2008.	10
Tabela 4 - Modelos de turbulência.	25
Tabela 5 – Parâmetros de avaliação da qualidade da malha (ANSYS Inc., 2022c).	28
Tabela 6 - Valores calculados para a otimização da malha.	31
Tabela 7 - Parâmetros da qualidade da malha com tamanho de elemento de 0,1 metros.	31
Tabela 8 - Valores de velocidade à entrada e saída dos ventiladores.	39
Tabela 9 - Contornos da velocidade em função do instante de tempo.	45
Tabela 10 - Contornos da turbulência em função do instante de tempo.	46
Tabela 11 - Contornos da pressão em função do instante de tempo.	47
Tabela 12 - Contornos da temperatura em função do instante de tempo.	48

LISTA DE SÍMBOLOS

A	área	m^2
D	diâmetro	m
E	energia	J
I	intensidade de turbulência	%
m	massa	kg
p	pressão estática	Pa
Q	caudal	m^3/hora
Re	número de Reynolds	-
S_E	termo da fonte de energia	-
S_{Mx}	termo da fonte de força	-
t	tempo	s
T	temperatura	K
u ou v	velocidade	m/s

Símbolos gregos

μ	viscosidade dinâmica	kg/m.s
ρ	massa volúmica	kg/m^3
τ	tensão de corte	Pa

Lista de abreviaturas

2D	Duas dimensões
3D	Três dimensões
<i>CFD</i>	<i>Computational Fluid Dynamics</i>
<i>DES</i>	<i>Detached Eddy Simulation</i>
<i>FDS</i>	<i>Fire Dynamics Simulator</i>
<i>LES</i>	<i>Large Eddy Simulation</i>
MVF	Método dos Volumes Finitos

ppm	partes por milhão
<i>RNG</i>	<i>Re-Normalization Group</i>
<i>RSM</i>	<i>Reynolds Stress Model</i>
<i>SAS</i>	<i>Scale Adaptive Simulation</i>
SCIE	Segurança Contra Incêndio em Edifícios
<i>SST</i>	<i>Shear-Stress Transport</i>
<i>UDF</i>	<i>User-Defined Function</i>
UT	Utilização - Tipo

1. INTRODUÇÃO

1.1. ENQUADRAMENTO DO TEMA

O aumento do número de veículos a entrar nas grandes cidades conduz a diversos problemas, entre eles a falta de locais de estacionamentos. Atualmente, este problema tem sido resolvido com a construção de parques de estacionamento subterrâneos. As vantagens destas construções são inegáveis, mas algumas das suas características devem ser analisadas, de forma a evitar tragédias. A segurança das pessoas presentes nestes espaços é uma prioridade e, para que tal seja garantida, determinados estudos devem ser efetuados para simular diferentes situações de perigo.

Um parque de estacionamento totalmente coberto deve ser projetado tendo sempre em atenção as possíveis situações de perigo que nele possam ocorrer. A libertação excessiva de fumos e a ocorrência de um incêndio inserem-se na categoria das situações de perigo, pois a extração de fumo não pode ser efetuada naturalmente. Assim, o sistema de desenfumagem deve seguir certas especificações que se encontram legisladas. É também fundamental que durante a fase de projeto sejam contempladas certas características que o edifício deve reunir, de modo a garantir a segurança dos ocupantes, a sua evacuação eficaz e a proteção dos bens que se encontram nesses locais.

Recentemente, foi construído um edifício onde existe um parque de estacionamento que se desenvolve em três pisos, todos eles subterrâneos. O facto de todos os pisos serem totalmente cobertos demonstra a importância do estudo do processo de desenfumagem no caso de ocorrer um incêndio. Uma vez que o parque já foi construído e o sistema de desenfumagem pode ser ativado em caso de emergência, um estudo sobre o funcionamento deste sistema deve ser realizado para perceber o seu comportamento e a sua eficácia. Este tipo de estudos permite encontrar determinados aspetos que podem ser melhorados, com o objetivo de otimizar o processo de desenfumagem.

1.2. OBJETIVOS DA DISSERTAÇÃO

O objetivo desta dissertação é efetuar uma simulação *CFD* do processo de desenfumagem do parque de estacionamento, de modo a analisar a forma como este irá decorrer. Assim, torna-se necessário identificar os equipamentos presentes no local e a sua disposição, bem como analisar a geometria e conhecer os possíveis locais com menor varrimento.

Para realizar esta simulação recorreu-se ao *software Ansys Fluent*, que é conhecido pelas suas avançadas capacidades de modelação e pela sua precisão. Pretende-se também verificar o funcionamento do processo de desenfumagem segundo as especificações previstas na Portaria n.º 135-2020 (2020), documento que apresenta a legislação em vigor relativa ao controlo de fumo.

1.3. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

O presente relatório encontra-se dividido em cinco capítulos, além da introdução.

O segundo capítulo é relativo ao enquadramento do projeto e à revisão da literatura. Neste, aborda-se a questão dos fumos libertados pelos incêndios, o processo de desenfumagem e aborda-se a temática da computação dinâmica de fluidos. Este capítulo também contempla a revisão da literatura, onde se apresenta um resumo de vários artigos sobre incêndios em parques de estacionamento.

O terceiro capítulo aborda a evolução da legislação e realça os aspetos mais importantes dos diferentes regulamentos.

No capítulo quatro é apresentado o caso em questão. Assim, neste capítulo, é possível analisar os desenhos dos *layouts* dos pisos do parque de estacionamento e retirar conclusões relativamente aos pontos de captação, pontos de poluição e potenciais pontos críticos.

O capítulo cinco apresenta a aplicação da simulação *CFD* ao caso em estudo. Para tal, é feita uma breve introdução ao *software* utilizado e, de seguida, é demonstrado o trabalho realizado que conduziu aos resultados obtidos. Neste capítulo são ainda analisados e discutidos os resultados obtidos nas simulações previamente efetuadas.

Por fim, no capítulo seis são feitas algumas considerações finais e são ainda referidos alguns estudos que podem ser realizados como trabalho futuro, com o intuito de otimizar o sistema de desenfumagem.

2. VENTILAÇÃO EM PARQUES DE ESTACIONAMENTO

2.1. FUMOS

A combustão é uma reação química exotérmica que resulta da junção de um combustível, substância que é oxidada e arde, de oxigênio, que é o comburente, e de calor, que funciona como energia de ativação, necessária para iniciar o processo. Estes fatores apenas promovem o início da combustão, mas para que esta se desenvolva é necessária a existência de uma energia de reativação. É de notar que a diminuição ou mesmo a eliminação de um destes componentes tem como consequência a extinção do fogo (Vilar, 2010).

A combustão pode dar início a um incêndio que liberta produtos como fumos e gases quentes. Em espaços fechados, estes produtos são prejudiciais para os ocupantes desse espaço e, por esta razão, o seu controlo é fundamental para que a evacuação seja rápida e sem consequências fatais.

Um incêndio pode ser analisado por fases, sendo que a perigosidade do fumo varia de acordo com a sua evolução. Na Figura 1 é possível observar essas mesmas etapas.

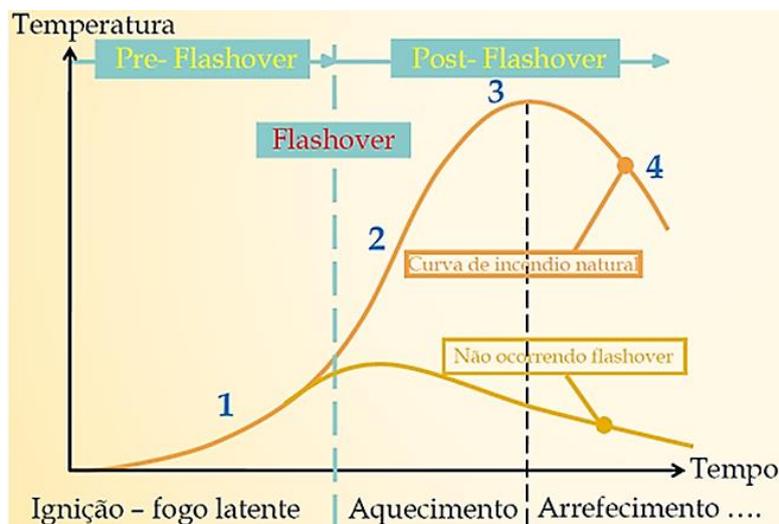


Figura 1 - Fases de desenvolvimento de um incêndio: 1 – fase de ignição; 2 – fase de aquecimento; 3 – ponto máximo; 4 – fase de arrefecimento (Bernardo & Pessoa, 2022).

A primeira fase é relativa à ignição do incêndio e à sua deteção. Caso não haja uma ação imediata que possibilite a sua extinção, o incêndio vai aumentar, ou seja, as chamas vão-se propagar até atingir um ponto em que este se encontre totalmente desenvolvido. Quando o combustível começa a escassear, inicia-se a fase de declínio na qual o incêndio vai sendo extinto, o que corresponde a uma fase de arrefecimento.

Os fumos são partículas voláteis que se desprendem do corpo em combustão, sendo consequência de combustões incompletas. De acordo com a cor, tamanho e quantidade das partículas em suspensão, os fumos podem dificultar o combate a um incêndio por diversas razões (Vilar, 2010).

Durante um incêndio, fatores associados ao fumo como a toxicidade, a temperatura, a opacidade e a corrosividade contribuem para o aumento do perigo para as pessoas. A toxicidade tem um impacto bastante negativo na saúde dos ocupantes porque o oxigénio começa a escassear e dá-se a inalação de gases tóxicos, como o CO e o NO_2 e de gases sufocantes, como o CO_2 . A visibilidade é afetada, dificultando a evacuação e começa a notar-se alguma irritabilidade dos olhos e da parte respiratória. O calor gerado pode também causar queimaduras que, conforme o tempo de exposição, podem ter maior ou menor gravidade.

Desta forma, torna-se fundamental o estudo do controlo do fumo, uma vez que a segurança dos ocupantes deve ser sempre garantida (Bernardo & Pessoa, 2022).

2.2. DESENFUMAGEM

O controlo de fumo tem como propósito proteger a vida humana, o ambiente e os bens que possam ser afetados. Para que tal seja possível, o controlo de fumo deve garantir a evacuação rápida e de forma segura dos ocupantes, evitar a intoxicação por inalação de fumos, limitar a propagação do incêndio e facilitar a intervenção dos meios de socorro. Tudo isto contribui para que o controlo de fumo seja bem-sucedido. Porém, este processo só é eficaz quando apenas um compartimento é afetado, a estratificação do fumo é respeitada, o varrimento do local é assegurado, os meios de socorro e os ocupantes não se deparam com problemas e obstáculos e quando há um mínimo de conforto térmico que possibilite uma evacuação menos perigosa. É de notar que este processo é influenciado por fatores como o tipo de espaço em questão, a respetiva altura, a área ocupada e o número de ocupantes.

Assim, quando ocorre um incêndio, o controlo de fumo, ou desenfumagem, é essencial para a evacuação em segurança dos ocupantes. Existem duas maneiras de controlar o fumo libertado num incêndio, por varrimento ou por pressurização. O varrimento é o processo de admissão de ar novo e extração de fumos, que cria uma corrente de ar que conduz a camada de fumo na direção desejada. Por sua vez, a pressurização consiste no estabelecimento de uma hierarquia relativa de pressões, com subpressão do local sinistrado, evitando a contaminação das zonas adjacentes.

Geralmente, como os parques de estacionamento possuem determinados atributos, a desenfumagem é muitas vezes feita por varrimento, sendo que as características do espaço ditam se este varrimento é efetuado por extração de fumos ou por ventilação horizontal.

A extração de fumos baseia-se num sistema que permite extrair o fumo gerado durante um incêndio. Este é utilizado quando o pé direito do espaço é suficiente para se criarem zonas livres de fumos. Este sistema deve ser dimensionado segundo o número de renovações de ar ou de acordo com a taxa de extração. A ventilação horizontal é empregue caso o pé direito não possibilite zonas livres de fumos. Com este processo o objetivo é criar duas zonas horizontais livres de fumo e realizar o varrimento horizontal (Bernardo & Pessoa, 2022).

A desenfumagem de um espaço pode ser realizada de forma passiva ou de forma ativa, dependendo do espaço. Quando se efetua a desenfumagem por tiragem térmica natural, então esta é considerada passiva. Neste caso, as instalações apresentam aberturas para admissão de ar e aberturas para libertação de fumo. É de realçar que em locais cobertos a desenfumagem passiva não é permitida. A desenfumagem ativa caracteriza-se pela utilização de meios mecânicos. Nestas instalações, o fumo é extraído por meios mecânicos e a admissão de ar pode ser efetuada de forma natural ou por insuflação mecânica (Portaria n.º 135-2020, 2020).

2.3. REVISÃO DA LITERATURA

Para compreender de melhor forma como é abordada a temática do processo de desenfumagem em parques de estacionamento, uma análise de vários artigos foi efetuada. Daqueles que foram analisados, apenas num não foi realizada uma simulação, pois o estudo baseou-se numa experiência. Os restantes recorreram a algum *software* ou código para tentar prever o escoamento ou a influência da temperatura nas diferentes situações.

Estes artigos foram analisados porque estudam a influência de determinados aspetos, como a ventilação, no escoamento e utilizam códigos *CFD* para efetuar a simulação de diferentes situações de emergência. A exceção é o artigo de Luo et al., (2019), pois o método utilizado foi a realização de experiências em escala reduzida.

Segundo Zhang et al., (2007), Viegas, (2010) e Deckers et al., (2013), as conclusões retiradas permitem confirmar que as simulações *CFD*, se definidas corretamente, são fiáveis, pois os resultados são idênticos aos obtidos experimentalmente.

A Tabela 1 resume os artigos estudados, sendo que os aspetos chave de cada um e as principais conclusões são mencionados. O método utilizado para realizar o estudo também é referido, assim como alguns dos modelos de turbulência selecionados.

Tabela 1 - Revisão da literatura.

Autor	Aspetos chave	Métodos	Conclusões
(Zhang et al., 2007)	Quando o fogo atinge o depósito todo o carro pode começar a arder, desenvolvendo mais rapidamente o incêndio. A ventilação é essencial para garantir alguma qualidade do ar e algum conforto térmico.	FDS (Fire Dynamics Simulator) Modelo: LES (Large Eddy Simulation)	A taxa de calor libertado experimentalmente está de acordo com o obtido na simulação <i>CFD</i> ; A extinção do incêndio apenas se dá com a falta de oxigénio; Se o incêndio voltar a ser aceso, a ventilação acelera o desenvolvimento deste.
(Viegas, 2010)	Projetar sistemas com ventiladores de impulso; Análise da influência dos parâmetros mais importantes – várias simulações; Dois processos físicos são relevantes para o método analítico.	Modelo analítico para escoamento perto do teto e FDS (Fire Dynamics Simulator)	Sistemas de ventiladores de impulso restringem o escoamento do fumo, em caso de incêndio; Os resultados das simulações e os do método analítico concordam entre si.
(Tilley et al., 2012)	Garantir uma certa velocidade para extrair o fumo; Variação de quatro parâmetros para propor três fórmulas de determinar essa velocidade; Possível existir padrões de escoamento complexos.	FDS (Fire Dynamics Simulator); Modelo: Standard Smagorinsky LES.	Foram obtidas três fórmulas para a extração horizontal de fumos, cada uma depende do parâmetro que foi variado; Fórmulas válidas apenas para quando o fumo e o escoamento são unidirecionais e o teto é plano.
(Merci & Shipp, 2013)	Efeito da ventilação mecânica horizontal; Definir corretamente o incêndio é essencial no estudo de sistemas de desenfumagem.	<i>CFD</i> ; Experiências em escala reduzida.	O impacto da geometria nestes estudos deve ser estudado; Proximidade do incêndio com as paredes pode afetar o comportamento do escoamento e pôr em causa a eficácia do sistema; Se a fonte de calor estiver posicionada numa zona de estagnação ou recirculação, o efeito do escoamento é limitado.
(Deckers et al., 2013)	Importância de suporte científico no desenvolvimento de normas e guias para projeto de sistemas de desenfumagem; Importância dos cálculos <i>CFD</i> nestes estudos.	FDS (Fire Dynamics Simulator); Modelo: Standard Smagorinsky LES).	Se definidas corretamente, as simulações <i>CFD</i> são fiáveis; Quando o fumo está numa zona de recirculação, aumentar o caudal de extração não é uma solução; Apesar de algumas diferenças, os resultados simulados estão de acordo com os resultados experimentais.

Tabela 1 - Revisão da literatura (cont.).

Autor	Aspetos chave	Métodos	Conclusões
(Teixeira et al., 2016)	Compara duas estratégias para ventilar o espaço; A ventilação é desafiante devido aos fatores que não são controláveis.	Ansys Fluent; Regime estacionário; Modelo: k-ε standard.	Mais eficaz e menos dispendioso (em termos energéticos) usar ventiladores axiais de impulso perto do teto para promover o escoamento do ar; Ventiladores em diferentes posições para ver o layout mais eficaz. Dependendo do número de veículos, alguns ventiladores não precisam de funcionar.
(Teixeira et al., 2016)	A legislação define os limites aceitáveis da concentração de CO; Os objetivos são avaliar a influência da temperatura da fonte de calor na dispersão de fumos e a dispersão de CO; Colunas e vigas podem facilitar a acumulação de fumos.	Ansys Fluent Modelo: k-ε standard Mistura: soma de várias espécies	A temperatura perto da fonte de calor é influenciada pela alta temperatura do CO; O escoamento em parques não subterrâneos é maioritariamente influenciado pela convecção natural; O desenvolvimento do escoamento é influenciado por fatores externos, como o vento; A propagação de CO não é uniforme.
(Luo et al., 2019)	Os parques verticais são mais fechados e têm menos entradas e saídas; Veículos estacionados de forma mais compacta aumenta o risco de incêndio; Importância do estudo da dispersão da temperatura.	Experiência em escala reduzida.	A taxa de calor libertado pelo incêndio tem grande influência na mudança de temperatura, mais que a ventilação ou a extração de fumos; A entrada de ar pode alimentar o incêndio e aumentar a temperatura; A extração ajuda a remover os fumos e a descarregar o calor libertado logo, a temperatura do parque é mais baixa.
(Barsim et al., 2020)	Sistemas de ventiladores de impulso são fáceis de instalar e reduzem os custos; O foco do estudo são: número de veículos, número de ventiladores, taxa de extração e localização do incêndio.	Ansys CFX Modelo: k-ε Regime estacionário	A capacidade do ventilador de impulso controlar o fumo é sensível à taxa de extração de fumo; Aumentar a taxa de extração melhora a visibilidade; Os ventiladores de impulso podem favorecer a acumulação de gases quentes, aumentando a probabilidade da evolução de incêndio entre carros.
(Kallianiotis et al., 2022)	Conter o fumo e a sua dispersão, para facilitar a evacuação; A visibilidade e a concentração de CO são fatores chave nos sistemas de desenfumagem.	FDS (Fire Dynamics Simulator); Modelo: LES (Large Eddy Simulation).	Os ventiladores mecânicos podem reduzir significativamente os efeitos do fumo; Os meios passivos podem ser a última linha de defesa, em caso de incêndio; Sistemas semi-passivos deveriam ser considerados para desenfumagem.

3. LEGISLAÇÃO E REGULAMENTOS TÉCNICOS

Um parque de estacionamento coberto, tal como qualquer outro projeto a ser realizado, deve seguir certas regras para estar de acordo com a legislação em vigor. Atualmente, em Portugal, a legislação à qual se deve obedecer é o Regulamento Técnico de Segurança Contra Incêndio em Edifícios, SCIE, aprovado pela Portaria n.º 135-2020 (2020). As disposições técnicas presentes nesta portaria foram sofrendo alterações, pois inicialmente estas medidas não eram contempladas na legislação.

3.1. REGULAMENTO DE SEGURANÇA CONTRA INCÊNDIO EM PARQUES DE ESTACIONAMENTO COBERTOS – DECRETO-LEI N.º 66/95 – 8 DE ABRIL

A legislação portuguesa, até à data de publicação deste decreto, não contemplava a segurança contra incêndios nos parques de estacionamento cobertos. Devido à necessidade de um regulamento que abordasse esta temática, foi publicado o Decreto-Lei n.º 66/95 (1995), que apresentava as medidas a aplicar em parques de estacionamento cobertos, a construir, cuja área bruta total assumisse um valor superior a 200 m². No que diz respeito à desenfumagem, nove artigos deste decreto referem as medidas a adotar.

O artigo n.º 16 aborda as medidas relativas ao controlo de fumo nas escadas protegidas enclausuradas. Este controlo deve ser efetuado recorrendo à ventilação natural, de modo a promover a renovação do ar na caixa de escada, caso a renovação seja assegurada. Quando tal não é possível, recorre-se à ventilação mecânica. Este artigo refere ainda que quando a porta de acesso ao piso está aberta, a velocidade mínima do ar através da porta é de 0,5 m/s.

O artigo n.º 17 explica como deve ser o controlo da poluição do ar nas câmaras corta-fogo. Nestas zonas, quando há monóxido de carbono em excesso, o controlo da poluição é realizado por condutas de ventilação natural, com uma secção não inferior a 0,10 m², se a renovação do ar interior for garantida. Quando se utilizam instalações de ventilação mecânica é necessário ter em conta que a renovação do ar interior deve apresentar um caudal igual ou superior a cinco volumes por hora.

O artigo n.º 18 refere o controlo do fumo nas câmaras corta-fogo e rege-se pelo artigo anterior, uma vez que as mesmas instalações são utilizadas em caso de incêndio no parque. Assim, o fumo pode ser controlado por ventilação natural ou por ventilação mecânica.

O artigo nº 25 expõe as exigências de controlo da poluição do ar, relativamente ao teor de monóxido de carbono que resulta da libertação de gases pelo escape dos veículos. A Tabela 2 relaciona os valores médios do teor de CO com o tempo.

Tabela 2 - Valores médios de CO em função do tempo.

Valor médio de CO	Tempo
50 ppm	8 horas
100 ppm	20 minutos
200 ppm	Valores instantâneos

É de notar que os valores médios apresentados são o limite máximo que se deve considerar para a respetiva duração.

O artigo nº 26 é o que refere os processos de controlo de poluição do ar na eventualidade do teor de CO ser excessivo. Estes processos podem ser efetuados por ventilação natural ou ventilação mecânica, de acordo com cada caso. Optando pela ventilação natural, devem existir aberturas permanentes, cuja área total não deve ser menor que $0,06 \text{ m}^2/\text{veículo}$. No caso do recurso à ventilação mecânica, o caudal de extração não deve ser inferior a $300 \text{ m}^3/\text{hora}$ caso o teor de CO seja superior a 50 ppm e se este for superior a 100 ppm, o caudal de extração deve assumir valores iguais ou superiores a $600 \text{ m}^3/\text{hora}$.

O artigo nº 27 menciona a deteção de monóxido de carbono, pois os sistemas devem ser dotados de detetores de gás distribuídos uniformemente por cada piso.

O artigo nº 29 expõe as exigências do controlo do fumo, uma vez que este processo tem como objetivo a evacuação segura dos ocupantes e a fácil intervenção dos meios de socorro.

O artigo nº 30 refere os processos de controlo do fumo que podem recorrer a ventilação natural ou ventilação mecânica. No caso da última referida, deve-se sublinhar que a renovação do ar deve ser efetuada com um caudal de extração não inferior a $600 \text{ m}^3/\text{hora}/\text{veículo}$.

O artigo nº 31 aborda a deteção do incêndio, pois todos os pisos do parque devem possuir detetores de fumo que devem estar distribuídos uniformemente em cada piso do parque de estacionamento.

O artigo nº 41 diz respeito às condutas de ventilação que são utilizadas no controlo da poluição do ar e no controlo do fumo, quando se recorre à ventilação mecânica. As condutas de admissão ou de insuflação de ar novo e as condutas de extração devem ser independentes por piso ou por setor. Estas condutas devem ser constituídas por materiais específicos, relativamente à sua reação e à sua resistência ao fogo (Cunha, 2014; Decreto-Lei n.º 66/95, 1995).

3.2. REGIME JURÍDICO DA SEGURANÇA CONTRA INCÊNDIO EM EDIFÍCIOS – DECRETO – LEI Nº 220/2008 – 12 DE NOVEMBRO

Como a legislação relativa à Segurança Contra Incêndio em Edifícios, SCIE, se encontrava dispersa por vários documentos, o seu cumprimento podia não ser o mais correto devido à dificuldade na sua compreensão. Assim, todas as medidas foram compiladas num só documento, no qual também foram corrigidas algumas lacunas da anterior legislação. Trata-se então do Decreto-Lei n.º 220/2008 (2008), publicado a 12 de novembro. Este decreto já aborda todas as disposições regulamentares a aplicar em todos os edifícios, relativamente à SCIE. Uma característica deste documento é que foi introduzida uma designação nova referente aos tipos de espaço. Assim, foi implementado o termo Utilização Tipo, UT, que pode ser dividido em 12 categorias. Este decreto começa por apresentar definições de certos termos que são usados ao longo do documento. Os termos e as respetivas definições mais importantes para este projeto encontram-se na Tabela 3.

Tabela 3 - Termos e respetivas definições do Decreto-Lei 220/2008.

Termo	Definição
Altura da utilização-tipo	Diferença de cota entre o plano de referência e o pavimento do último piso acima do solo, suscetível de ocupação por essa utilização-tipo.
Área bruta de um piso ou fração	Superfície total de um dado piso ou fração, delimitada pelo perímetro exterior das paredes exteriores e pelo eixo das paredes interiores separadoras dessa fração, relativamente às restantes.
Carga de incêndio	Quantidade de calor suscetível de ser libertada pela combustão completa da totalidade de elementos contidos num espaço.
Categorias de risco	Classificação em quatro níveis de risco de incêndio de qualquer utilização-piso.
Densidade de carga de incêndio	Carga de incêndio por unidade de área útil de um dado espaço ou, para o caso de armazenamento, por unidade de volume.
Utilização-tipo	Classificação do uso dominante de qualquer edifício ou recinto.
Plano de referência	Plano de nível, à cota de pavimento do acesso destinado às viaturas de socorro, medida na perpendicular a um vão de saída direta para o exterior do edifício.
Efetivo	Número máximo estimado de pessoas que pode ocupar em simultâneo um dado espaço de um edifício ou recinto.

Neste mesmo capítulo estão ainda expostos os princípios gerais, que se baseiam na preservação da vida humana, do ambiente e do património cultural. Este documento rege-se ainda pela redução da probabilidade de ocorrência de incêndios, pela limitação do desenvolvimento de eventuais incêndios, pela evacuação e salvamento dos ocupantes e por permitir uma rápida intervenção dos meios de socorro.

O segundo capítulo caracteriza os edifícios e os recintos que nesta legislação estão englobados. Assim, são classificados como utilizações-tipo os diferentes edifícios, sendo que para um parque de estacionamento se considera a UT II. Segundo a definição presente no decreto, uma UT II (estacionamentos) corresponde a edifícios ou partes de edifícios destinados exclusivamente à recolha de veículos e seus reboques, fora da via pública, ou recintos delimitados ao ar livre, para o mesmo fim. Relativamente à classificação dos locais de risco, estes podem ser do tipo local de risco A, B, C, D, E e F. Um parque de estacionamento enquadra-se no local de risco C, uma vez que apresenta riscos agravados de eclosão e de desenvolvimento de incêndio devido às atividades nele desenvolvidas e às características dos produtos, materiais ou equipamentos nele existentes. A categoria de risco correspondente a uma UT II varia de acordo com certos fatores, como se pode verificar na Figura 2.

Categoria	Critérios referentes à utilização-tipo II, quando integrada em edifício			Ao ar livre
	Altura da UT II	Área bruta ocupada pela UT II	Número de pisos ocupados pela UT II abaixo do plano de referência	
1. ^a	—			Sim
	≤ 9 m	≤ 3 200 m ²	≤ 1	Não
2. ^a	≤ 28 m	≤ 9 600 m ²	≤ 3	Não
3. ^a	≤ 28 m	≤ 32 000 m ²	≤ 5	Não
4. ^a	> 28 m	> 32 000 m ²	> 5	Não

Figura 2 - Categorias de risco da utilização-tipo II.

O capítulo três do Decreto-Lei expõe as condições técnicas gerais e específicas da SCIE, sendo elas:

- As condições exteriores comuns;
- As condições de comportamento ao fogo, isolamento e proteção;
- As condições de evacuação;
- As condições das instalações técnicas;
- As condições dos equipamentos e sistemas de segurança;
- As condições de autoproteção (Cunha, 2014; Decreto-Lei n.º 220/2008, 2008).

3.3. REGULAMENTO TÉCNICO DE SEGURANÇA CONTRA INCÊNDIO EM EDIFÍCIOS – PORTARIA Nº 1532/2008 – 29 DE DEZEMBRO

Segundo o Decreto-Lei n.º 220/2008 (2008), as disposições técnicas gerais e específicas de SCIE referentes às condições exteriores comuns, às condições de comportamento ao fogo, isolamento e proteção, às condições de evacuação, às condições das instalações técnicas, às condições dos equipamentos e sistemas de segurança e às condições de autoproteção devem ser regulamentadas por uma portaria. Assim, a Portaria n.º 1532/2008 (2008), publicada a 29 de dezembro tem como propósito expor toda a regulamentação técnica, que serve de base ao projeto de um parque de estacionamento.

No que diz respeito ao controlo do fumo, os edifícios devem cumprir determinados requisitos de segurança. Para tal, os edifícios devem ser dotados de meios que promovam a libertação para o exterior do fumo e dos gases tóxicos ou corrosivos, reduzindo a contaminação e a temperatura dos espaços e mantendo condições de visibilidade, nomeadamente nas vias de evacuação. Assim, o controlo do fumo pode ser efetuado por varrimento ou por pressurização, tal como referido no capítulo anterior.

O artigo n.º 135 enumera as exigências de estabelecimento de instalações de controlo de fumo em zonas como é o caso das vias verticais de evacuação enclausuradas, das câmaras corta-fogo e das vias horizontais.

O artigo n.º 136 é relativo à localização das tomadas exteriores de ar e das aberturas para descarga de fumo, referindo qual a devida disposição consoante os casos.

No que diz respeito às instalações de desenfumagem passiva, nesta portaria é abordada a forma de admissão do ar e como se pode realizar a extração do fumo. Da mesma forma, é feita a abordagem à admissão e extração do ar, quando se recorre à desenfumagem ativa.

É ainda de realçar o artigo n.º 145 que refere as condicionantes de dimensionamento. Estas baseiam-se no facto da velocidade do ar nas bocas de insuflação ser inferior a 5 m/s e o seu caudal ser da ordem de 60% do caudal das bocas de extração, à temperatura de 20°C (Cunha, 2014; Portaria n.º 1532/2008 (2008)).

3.4. REGULAMENTO TÉCNICO DE SEGURANÇA CONTRA INCÊNDIO EM EDIFÍCIOS – PORTARIA Nº 135/2020 – 2 DE JUNHO

A portaria mais atual é a Portaria n.º 135-2020 (2020), que foi publicada a 2 de junho. Esta resulta das alterações efetuadas à Portaria n.º 1532/2008 (2008). Assim, a presente portaria apresenta a regulamentação técnica a aplicar, segundo as condições:

- Exteriores comuns, gerais e específicas;
- De comportamento ao fogo, isolamento e proteção;
- De evacuação;
- Das instalações técnicas;
- Dos equipamentos e sistemas de segurança;
- De autoproteção, igualmente aplicáveis aos edifícios e recintos já existentes à data de entrada em vigor do Decreto-Lei n.º 220/2008 (2008), de 12 de novembro.

O artigo n.º 145, relativo às condicionantes de dimensionamento, refere que o caudal de insuflação deve ser da ordem dos 60% do caudal de extração.

O artigo n.º 154 aborda as instalações de desenfumagem ativa. Assim, torna-se importante referir algumas características, como as seguidamente enumeradas:

- As bocas de extração devem ser distribuídas à razão de uma por cada 320 m² de área do local e proporcionar um caudal de 1 m³/s por cada 100 m² de área do local, com um mínimo de 1,5 m³/s;
- Os sistemas de desenfumagem ativa comuns a vários locais devem ser dimensionados para a soma dos caudais exigidos para os dois locais de maiores dimensões.

Referindo mais concretamente algumas especificidades que um parque de estacionamento coberto e fechado deve cumprir, são ainda definidas algumas notas:

- A extração de fumo em caso de incêndio deve ser ativada com um caudal de 600 m³/hora por veículo no compartimento corta-fogo sinistrado;
- A insuflação deve ser parada no compartimento corta-fogo sinistrado e ser acionada nos compartimentos corta-fogo adjacentes que comuniquem com o sinistrado, com caudais iguais a 60% da extração do piso sinistrado;

- No caso particular de compartimentos corta-fogo que não possuam, no seu interior, rampas de comunicação a outros pisos, a desenfumagem tem de ser efetuada, nesse compartimento, por insuflação ou extração com os caudais referidos nas alíneas anteriores;
- O sistema de controlo de fumo pode recorrer ao sistema de ventilação para controlo de poluição por meios ativos, desde que disponha das características exigidas pelo regulamento para o controlo de fumo.

No que diz respeito às UT II (estacionamentos), nos parques de estacionamento cobertos não é permitida a existência de garagens, postos de abastecimento de combustíveis, nem oficinas de reparação.

Relativamente à evacuação dos ocupantes, neste tipo de parques de estacionamento a distância máxima a percorrer até se atingir a saída mais próxima deve ser de 25 m nos pontos em impasse e 40 m nos pontos com acesso a diferentes saídas (Portaria n.º 135-2020, 2020).

4. CASO DE ESTUDO

O espaço em estudo trata-se de um parque de estacionamento subterrâneo com três pisos, totalmente coberto. Neste capítulo serão apresentados os *layouts* dos três pisos que constituem o parque de estacionamento e será efetuada a análise do caso de estudo. Também serão realçadas algumas características deste caso, de modo a entender como a geometria e a localização dos equipamentos presentes têm impacto no processo de desenfumagem. Este estudo irá auxiliar as simulações a realizar, pois terão de ser feitas algumas considerações que poderão influenciar os resultados obtidos. É de notar que, apesar dos *layouts* dos pisos -2 e -3 serem apresentadas, o foco deste projeto será o piso -1, mais concretamente a zona de entrada do parque e circulação de veículos.

4.1. LAYOUTS

Ao observar os *layouts* dos pisos do parque de estacionamento é possível perceber onde se situam as zonas de insuflação e as zonas de extração, bem como conhecer a localização e orientação dos ventiladores de indução. Estes desenhos permitem ainda constatar que existem zonas que se encontram abertas durante o funcionamento normal do parque, mas que no caso de ser necessário ativar o processo de desenfumagem, estas zonas fecham-se, impedindo a ligação entre pisos e com o exterior. Deste modo, para perceber como foram projetadas as instalações, no caso de ocorrer um incêndio e, conseqüentemente, ser ativado o sistema de desenfumagem, é necessário analisar os desenhos.

4.1.1. PISO -1

O piso -1 do parque de estacionamento encontra-se dividido em duas partes, a zona onde circulam os veículos e a zona do armazém. Estas encontram-se separadas por uma parede e por um portão e possuem um sistema de desenfumagem distinto, fazendo com que, em caso de incêndio, não haja qualquer ligação entre estas áreas. Como é possível observar na Figura 3, a zona A corresponde à entrada do parque e à zona de circulação de veículos, enquanto que a zona B funciona como armazém. A reta vermelha presente na Figura 3 representa a parede que separa as duas zonas.

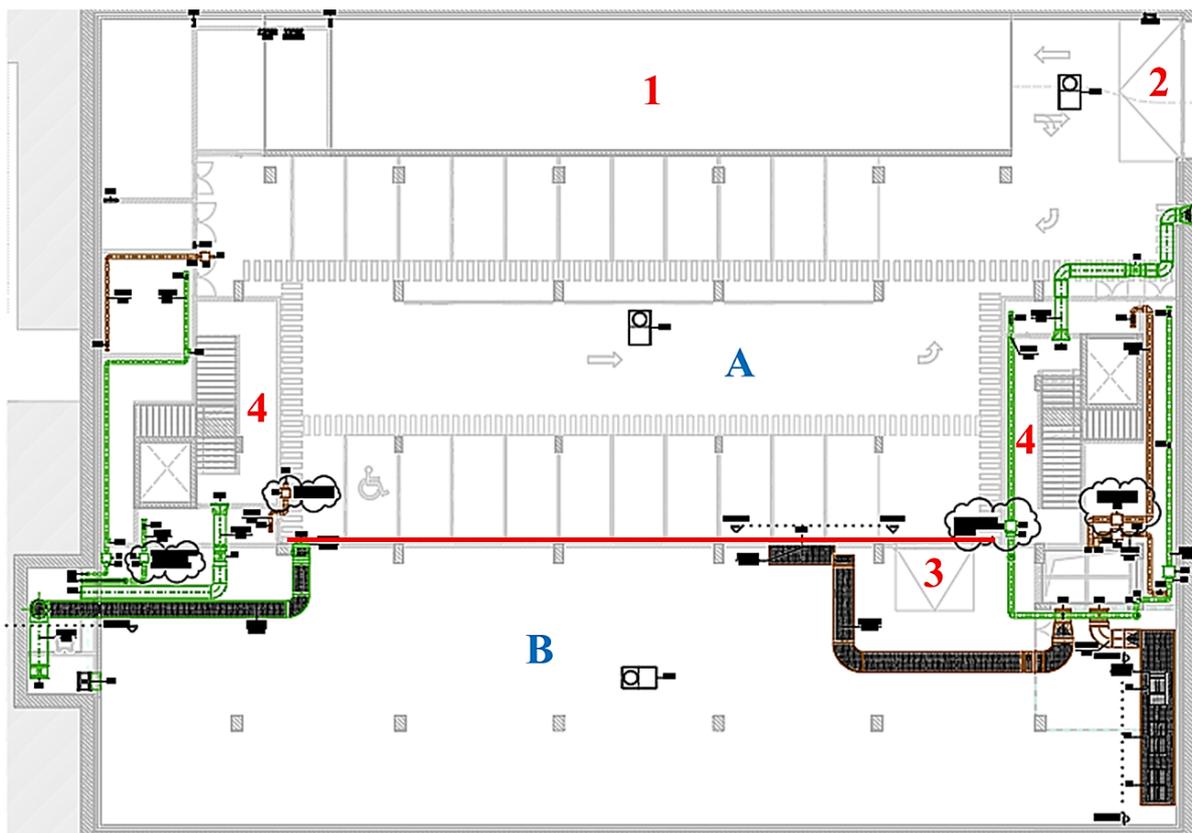


Figura 3 - *Layout* do piso -1: zona A - entrada para o parque e circulação de veículos, zona B - armazém; 1 - rampa de ligação ao piso -2, 2 - portão de entrada para o parque, 3 - portão que liga as zonas do piso -1, 4 - vias de evacuação vertical; linha vermelha – parede que divide a zona A da zona B.

Na Figura 3 estão ainda assinalados quatro números que indicam algumas características do piso em questão. O número 1 corresponde à rampa de ligação entre o piso -1 e o piso -2. É de realçar que esta zona não afetará os resultados do estudo uma vez que, em caso de incêndio, esta zona será fechada, de modo a restringir o local sinistrado. O número 2 representa o portão de entrada para o parque de estacionamento, que é fechado quando o processo de desenfumagem é ativado. Da mesma forma, o número 3, referente ao portão entre a zona A e a zona B, também fecha nesta situação. O número 4 assinala as zonas onde existem vias de evacuação vertical, zonas essas excluídas deste estudo.

No que diz respeito aos equipamentos que pertencem ao sistema de desenfumagem, é possível observar na Figura 4 que no piso -1 existem dois ventiladores de insuflação, dois de extração e três de indução.

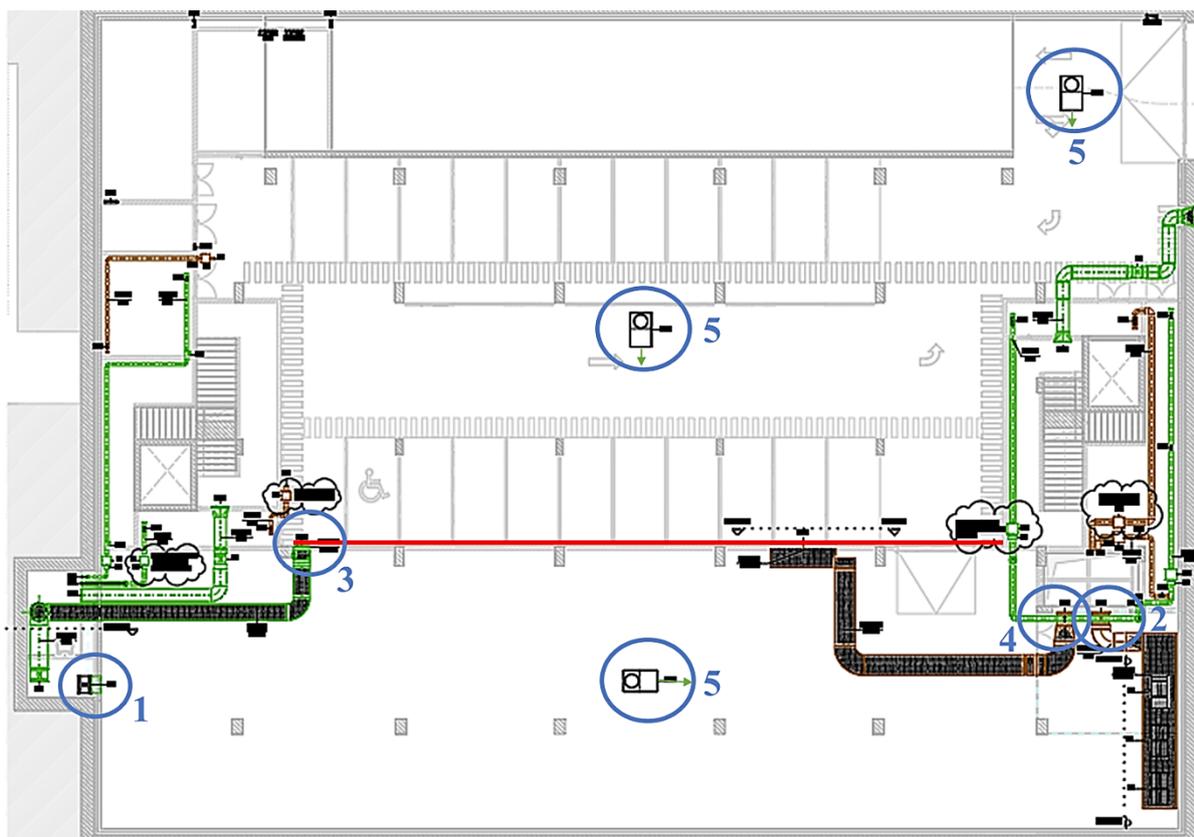


Figura 4 - Indicação dos equipamentos presentes no piso -1: 1 e 3 - ventiladores de insuflação, 2 e 4 - ventiladores de extração, 5 - ventiladores de indução; setas verdes – direção dos ventiladores de indução; linha vermelha – parede que divide a zona de circulação de veículos da zona de armazém.

Na Figura 4, os números 1 e 3 representam os ventiladores de insuflação da zona do armazém e da zona de circulação de veículos, respetivamente. O número 2 e 4 assinalam a zona onde se encontram os ventiladores de extração, sendo que o número 2 faz parte do sistema de desenfumagem da parte do armazém e o número 4 é referente à zona de entrada para o parque. Por fim, o número 5 representa os ventiladores de indução, cuja direção é demonstrada na figura pelas setas verdes, sendo que um deles se encontra no armazém e os restantes dois estão presentes na zona de entrada.

Como a imagem do espaço se encontra com bastante ruído, procedeu-se à limpeza da mesma. Desta forma, foi possível obter o desenho da zona de circulação e veículos, desenho esse que apresenta apenas as informações necessárias ao estudo do caso. Através do desenho obtido foi possível retirar as informações necessárias para a conceção da geometria necessária à realização das simulações. É de realçar que a zona que vai ser simulada é a zona de passagem de veículos, ou seja, a zona apresentada na Figura 5, daí o facto dos seguintes subcapítulos apenas fazerem referência a esta área do piso -1 e não ser apresentado o desenho tratado da zona do armazém.



Figura 5 - Desenho sem ruído da zona de entrada e circulação de veículos do piso -1.

4.1.2. PISO -2 E PISO -3

O piso -2 apresenta algumas características que não são comuns às do piso anteriormente abordado. Tal como é possível ver na Figura 6, este piso não dispõe de uma ligação ao exterior, sendo que a sua entrada se dá pelo piso -1 e possui uma rampa de ligação ao piso -3. Este piso não apresenta uma zona isolada, ou seja, toda a sua área é para circulação e estacionamento de veículos.

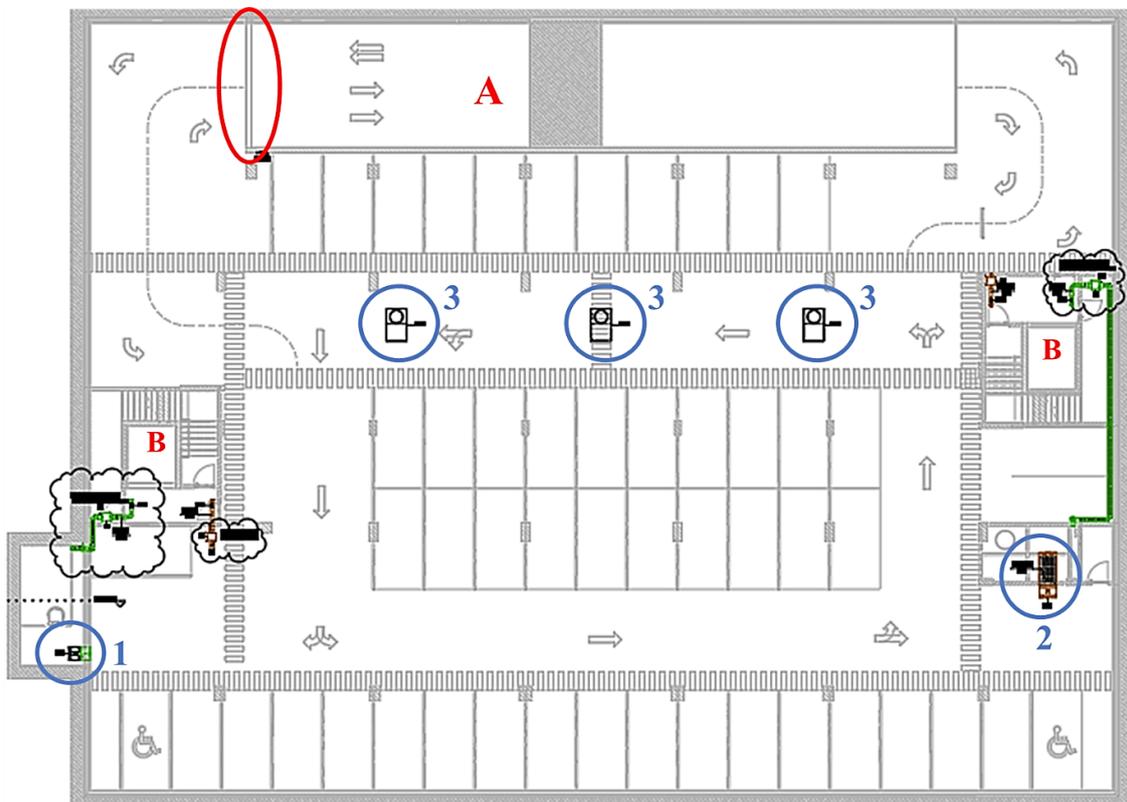


Figura 6 - *Layout* do piso -2: 1 – ventilador de insuflação, 2 – ventilador de extração, 3 – ventiladores de indução, A – rampa de ligação aos outros pisos, B – vias de evacuação vertical.

Como é possível verificar na Figura 6, o sistema de desfumagem deste piso é constituído por um ventilador de insuflação, assinalado pelo número 1, um ventilador de extração, indicado pelo número 2 e três ventiladores de indução que são assinalados pelo algarismo 3. A zona sinalizada com a letra A corresponde à rampa de ligação aos restantes pisos e a letra B corresponde às vias de evacuação vertical.

O piso -3 apresenta uma configuração semelhante à do piso -2, sendo que as diferenças mais notórias se dão no local onde se situa o ventilador de extração, pois a localização e a orientação diferem, e também na zona da rampa. Estas variações podem ser observadas na Figura 7.

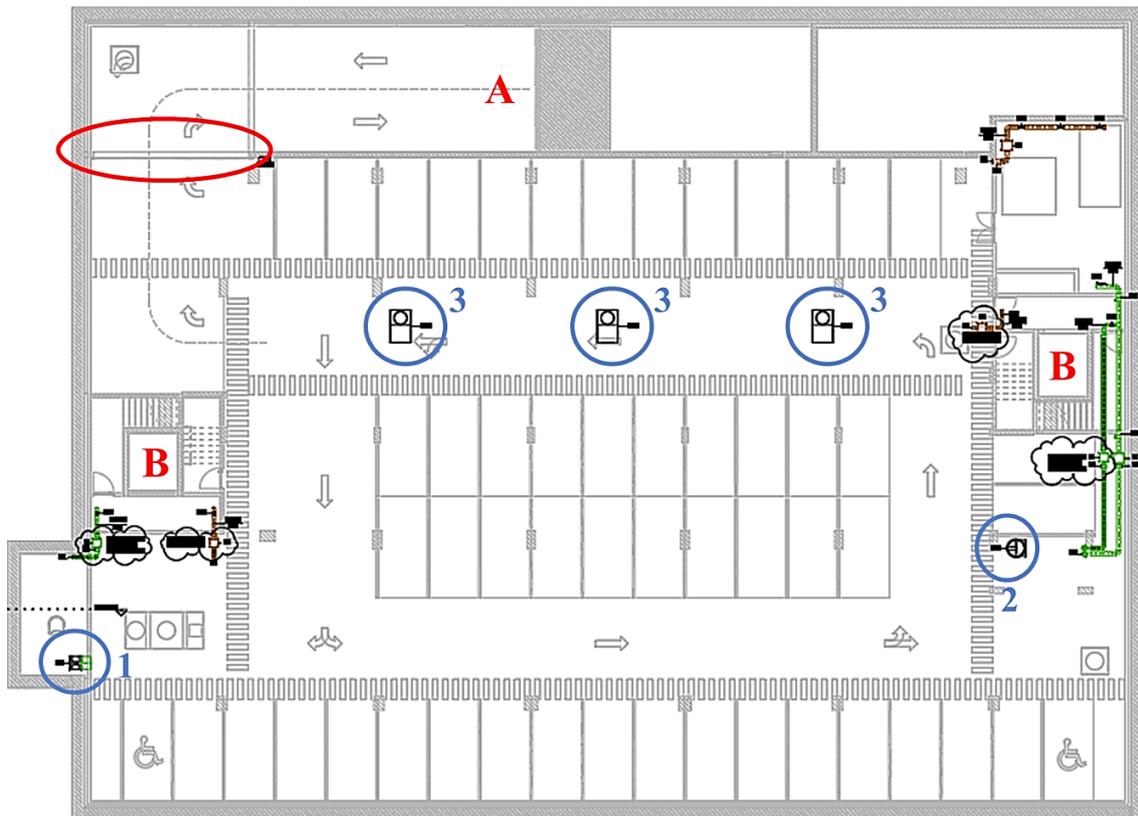


Figura 7 - *Layout* do piso -3: 1 – ventilador de insuflação, 2 – ventilador de extração, 3 – ventiladores de indução, A – rampa de ligação ao piso -2, B – vias de evacuação vertical.

Como se pode verificar na Figura 7, os ventiladores de insuflação e de extração estão indicados com os algarismos 1 e 2, respetivamente. Por sua vez, os ventiladores de indução estão assinalados com o número 3. A zona A é a zona da rampa de ligação e a diferença para o piso -2 é a zona que é fechada em caso de incêndio. Quando o sistema de desfumagem é ativado a zona da rampa no piso -2 é fechada na vertical, enquanto que no piso -3 é na horizontal, como se pode ver pela zona rodeada a vermelho. A zona B corresponde às vias de evacuação vertical.

Dado que estes pisos não vão ser estudados neste projeto, não foi necessário apresentar o tratamento dos respetivos desenhos.

4.2. PONTOS DE POLUIÇÃO

Para simular a desenfumagem do parque de estacionamento é necessário entender quais os possíveis pontos de poluição. Além da área onde ocorre o incêndio, é importante ter em conta que todos os veículos presentes neste espaço são pontos de poluição, uma vez que libertam fumos e gases que podem afetar o processo de desenfumagem do espaço. Assim, para efetuar uma simulação mais realista, teria de se ter em conta cada lugar de estacionamento e ainda a zona do incêndio, sendo que seria necessário estudar as diferentes espécies libertadas por cada um destes pontos. No entanto, como o objetivo desta simulação é prever o comportamento do escoamento e, assim, perceber se o sistema de desenfumagem é eficaz, esta análise não será contemplada.

Deste modo, para simplificar a simulação será tido em conta o número de veículos presentes no piso em estudo para que o caudal de extração possa ser calculado, tal como referido na Portaria n.º 135-2020 (2020). Assim, para cada veículo não será considerado um ponto fixo de poluição, dado que o caudal que cada um liberta estará incluído no caudal de extração calculado.

Este estudo irá contemplar o pior cenário, que corresponde à ocupação total do espaço. Assim, se todos os lugares de estacionamento estiverem ocupados, serão considerados 20 veículos como fonte de poluição.

4.3. PONTOS DE CAPTAÇÃO

Os pontos de captação dizem respeito aos locais onde o ar vai ser captado para ser extraído ou para ser induzido numa determinada direção. Para facilitar a orientação do escoamento na direção pretendida são utilizados ventiladores de insuflação, de extração e de indução. É de notar que estes equipamentos apenas entram em funcionamento para iniciar o processo de desenfumagem, ou seja, em caso de emergência. Assim, este sistema entra em ação sempre que os sensores de CO que estão instalados detetam valores acima dos legais.

O ventilador de insuflação tem como propósito insuflar ar novo para a zona sinistrada e, assim, promover o fluxo de ar não contaminado. Na fase de projeto foi selecionado o ventilador a usar, cujo modelo é o TGT/6-800-6/12-AL-0,55KW-3-400V.

No que diz respeito ao ventilador de extração, este tem como função a extração do ar contaminado para o exterior. O modelo escolhido para este ventilador foi o THGT/6-710-5/28-AL-1,1KW-F400.

Os ventiladores de indução têm como objetivo auxiliar o escoamento para que este siga a direção considerada mais correta para que a desenfumagem ocorra de forma eficaz. Ao contrário dos outros ventiladores, esta zona do parque tem presente dois destes equipamentos, cujo modelo selecionado foi o IFHT/4/8-50N-C. A ficha técnica deste equipamento encontra-se no Anexo A.

4.4. POTENCIAIS PONTOS CRÍTICOS

Os potenciais pontos críticos são as zonas onde o varrimento do ar poderá ser menor. Um dos objetivos do estudo do caso é assinalar as áreas onde se prevê que tal aconteça e, após a realização das simulações, comparar e perceber se essas zonas coincidem.

Na Figura 8 estão indicadas a vermelho as zonas onde se prevê que o varrimento seja menor.

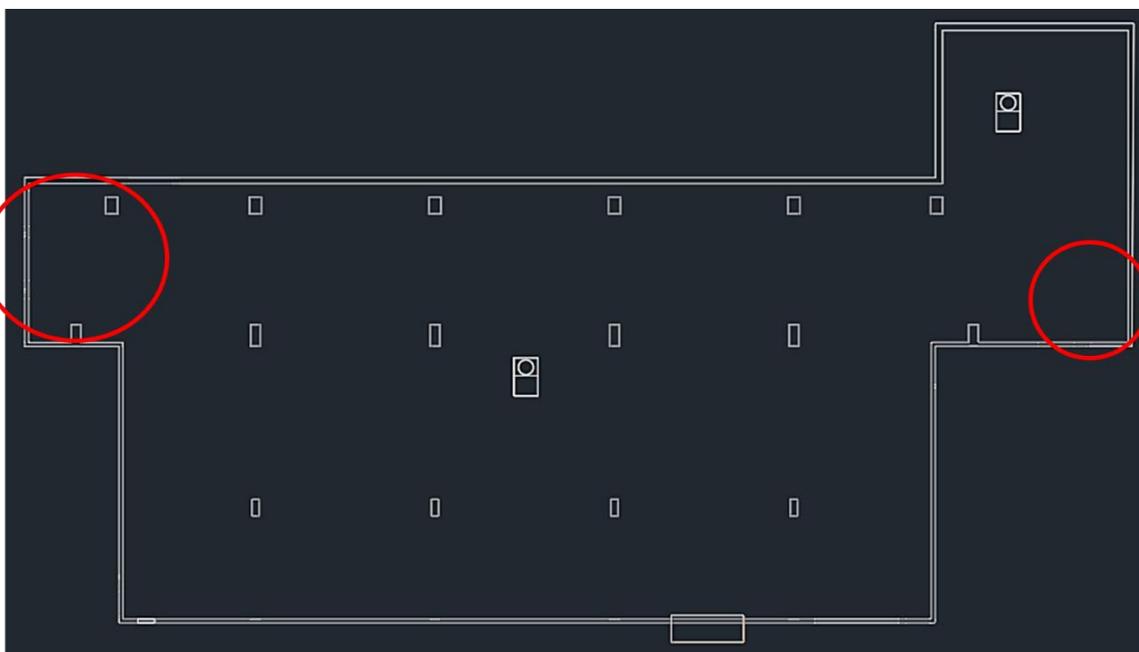


Figura 8 - Potenciais pontos críticos.

Pela análise da Figura 8, é possível perceber que a zona de insuflação está muito próxima da parede lateral, o que pode comprometer o fluxo de ar para a zona superior esquerda. Se se verificar que o ar insuflado não atinge aquela zona, então a zona torna-se um ponto crítico.

Outro ponto que pode ser considerado crítico encontra-se na zona superior direita. Apesar de existir um ventilador de indução nessa zona, o ar presente no canto inferior direito pode não ser varrido como o expectável, fazendo com que nessa zona o processo de desenfumagem não seja eficaz. Além disso, a existência de colunas nessa zona pode não favorecer o varrimento, uma vez que estas podem ser obstáculos ao escoamento do ar.

5. SIMULAÇÕES *CFD*

Este capítulo apresenta os procedimentos utilizados no desenvolvimento da simulação *CFD*. Trata-se assim de um estudo bidimensional, capaz de simular o escoamento do fluido e a variação da temperatura consoante as diferentes fases do incêndio. O estudo dividiu-se em duas fases. A primeira fase, cuja simulação não contempla a fonte de calor, tem como objetivo perceber o funcionamento do sistema de desenfumagem. Na segunda fase foi introduzida uma fonte de calor que representa o incêndio, o que permite analisar o comportamento do sistema ao longo das diferentes fases do incêndio.

5.1. COMPUTAÇÃO DINÂMICA DE FLUIDOS

A computação dinâmica de fluidos é a análise de sistemas que envolvem o escoamento de fluidos, transferência de calor e outros fenómenos associados, tendo por base a simulação computacional. Este tipo de análise tem várias aplicações, entre elas a aerodinâmica de aviões e veículos, engenharia de processos químicos e ventilação de edifícios. O principal objetivo da *CFD*, *Computational Fluid Dynamics*, é disponibilizar ferramentas que permitam ultrapassar a complexidade de prever o comportamento dos fluidos sem descuidar os fatores económicos. Apesar das dificuldades inerentes a estas análises, a computação dinâmica de fluidos apresenta várias vantagens quando comparada a abordagens baseadas em evidências empíricas. As principais vantagens são a redução de custos por não ser necessário construir modelos físicos, a diminuição do tempo que demora a criar e a otimizar produtos, a possibilidade de estudar sistemas complexos e de conseguir analisar sistemas sob condições perigosas e fora dos limites do desempenho normal. É ainda possível estudar situações com diferentes especificações e consegue-se obter resultados com grande nível de detalhe. As limitações desta análise prendem-se com a definição do problema, do modelo escolhido para a resolução e com erros por aproximação e de truncatura (Versteeg & Malalasekera, 1995).

5.1.1. EQUAÇÕES DE CONSERVAÇÃO

As equações de conservação são as equações que regem o fluxo do fluido e representam os princípios matemáticos das leis de conservação da física. Estes princípios são o de conservação da massa de fluido, conservação de *momentum* segundo a 2ª lei de Newton e a conservação de energia de acordo com a 1ª lei da termodinâmica (Gonçalves, 2022).

Conservação da Massa

Para conservar a massa num certo volume de controlo é necessário que o fluxo de massa à entrada seja igual ao fluxo de massa à saída, criando um equilíbrio. A equação 1 é a equação tridimensional, em regime transiente, da conservação de massa, ou a equação da continuidade, num certo ponto num fluido compressível.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho u) = 0 \quad (1)$$

Nesta equação o primeiro termo, à esquerda, representa a taxa de variação da massa volúmica em função do tempo, sendo que ρ representa a massa volúmica. O segunda parte da expressão representa o termo convectivo, ou seja, descreve o fluxo de massa que passa pela fronteira do elemento.

Para casos cujo fluido é incompressível a massa volúmica é constante logo, a equação 2 ganha a seguinte forma (Gonçalves, 2022; Versteeg & Malalasekera, 1995).

$$\text{div } u = 0 \quad (2)$$

Conservação do *Momentum*

A segunda lei de Newton enuncia que o aumento da taxa de *momentum* de uma partícula de fluido é igual ao somatório das forças que atuam nessa mesma partícula. A lei da conservação de *momentum* baseia-se nesse princípio e é representada pela equação 3, que apresenta o aumento da taxa de *momentum* em x, y e z por unidade de volume da partícula, respetivamente.

$$\rho \frac{Du}{Dt} \quad \rho \frac{Dv}{Dt} \quad \rho \frac{Dw}{Dt} \quad (3)$$

Nas partículas de fluido é possível distinguir dois tipos de força: as forças que atuam na superfície, como as forças de pressão e as forças viscosas, e as forças que atuam no corpo, que envolvem as forças gravitacionais, as forças centrífugas, as forças *Coriolis* e as forças eletromagnéticas.

Tendo em conta as forças que atuam na superfície, a força total por unidade de volume é dada pela equação 4.

$$\frac{\partial(-p + \tau_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} \quad (4)$$

Onde p representa a pressão e τ as tensões de corte com os sufixos a indicarem a direção.

Sem detalhar as forças que atuam no corpo, é possível ter em conta o efeito geral destas ao considerar uma fonte de *momentum* por unidade de volume por unidade de tempo, S_M . Assim, a componente x da equação de *momentum* é dada pela equação 5 (Gonçalves, 2022; Versteeg & Malalasekera, 1995).

$$\rho \frac{Du}{Dt} = \frac{\partial(-p + \tau_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial\tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial\tau_{zx}}{\partial z} + S_{Mx} \quad (5)$$

Por sua vez, a equação correspondente à componente y é dada pela equação 6:

$$\rho \frac{Dv}{Dt} = \frac{\partial\tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial(-p + \tau_{yy})}{\partial y} + \frac{\partial\tau_{zy}}{\partial z} + S_{My} \quad (6)$$

A equação de *momentum* da componente z é apresentada pela equação 7:

$$\rho \frac{Dw}{Dt} = \frac{\partial\tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial\tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial(-p + \tau_{zz})}{\partial z} + S_{Mz} \quad (7)$$

Conservação de Energia

A equação da energia tem origem na primeira lei da termodinâmica que enuncia que a taxa de aumento de energia numa partícula do fluido é igual à taxa de adição de calor mais a taxa de trabalho feito na partícula. A derivação da equação da taxa de aumento de energia de uma partícula por unidade de volume é dada pela equação 8 (Gonçalves, 2022):

$$\rho \frac{DE}{Dt} \quad (8)$$

De acordo com Versteeg & Malalasekera (1995), a equação tridimensional da energia é dada pela equação 9.

$$\rho \frac{DE}{Dt} = -div(pu) + \left[\frac{\partial(u\tau_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial(u\tau_{yx})}{\partial y} + \frac{\partial(u\tau_{zx})}{\partial z} + \frac{\partial(v\tau_{xy})}{\partial x} + \frac{\partial(v\tau_{yy})}{\partial y} + \frac{\partial(v\tau_{zy})}{\partial z} + \frac{\partial(w\tau_{xz})}{\partial x} + \frac{\partial(w\tau_{yz})}{\partial y} + \frac{\partial(w\tau_{zz})}{\partial z} \right] + div(kgradT) + S_E \quad (9)$$

Onde $\rho \frac{DE}{Dt}$ representa a taxa de aumento de energia por unidade de volume, $-div(pu) + \left[\frac{\partial(u\tau_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial(u\tau_{yx})}{\partial y} + \frac{\partial(u\tau_{zx})}{\partial z} + \frac{\partial(v\tau_{xy})}{\partial x} + \frac{\partial(v\tau_{yy})}{\partial y} + \frac{\partial(v\tau_{zy})}{\partial z} + \frac{\partial(w\tau_{xz})}{\partial x} + \frac{\partial(w\tau_{yz})}{\partial y} + \frac{\partial(w\tau_{zz})}{\partial z} \right]$ representa a taxa total de trabalho feito na partícula devido às forças que atuam na superfície, $div(kgradT)$ corresponde à taxa de adição de calor devido à condução de calor pelas fronteiras do elemento e S_E é a fonte de calor por unidade de volume.

5.1.2. MODELOS DE TURBULÊNCIA

Os escoamentos turbulentos são caracterizados pelos campos de velocidade flutuantes que misturam quantidades que são transportadas, como *momentum*, energia e concentração de espécies que, conseqüentemente, também flutuam. Como estas variações são muito caras de simular devido à elevada capacidade computacional requerida são feitas médias e aproximações nas equações que regem o fluxo. Estas modificações resultam num novo conjunto de equações menos dispendiosas de resolver. A forma como as equações são manipuladas leva à adição de variáveis desconhecidas e, por esta razão, são necessários modelos de turbulência para determinar o valor das mesmas.

O *Ansys Fluent*, *software* utilizado para realizar as simulações, oferece os modelos de turbulência enumerados na Tabela 4 (ANSYS Inc., 2022b).

Tabela 4 - Modelos de turbulência.

Equações	Modelo
1	<i>Spalart - Allmaras</i>
2	<i>k - ε</i>
	<i>k - ω</i>
3	<i>Transition k-klω</i>
4	<i>Transition SST</i>
5	<i>Reynolds Stress (RSM)</i>
-	<i>Scale-Adaptive Simulation (SAS)</i>
-	<i>Detached Eddy Simulation (DES)</i>

À medida que o número de equações dos modelos vai aumentando, a complexidade também começa a ser mais elevada e, por isso, o custo por iteração sobe.

Para o problema em questão, a complexidade computacional não precisa de ser muito elevada logo, os modelos mais complexos não são tidos em conta na escolha do modelo. Também se exclui das opções o modelo *Spalart - Allmaras*, pois foi desenvolvido para aplicações aeroespaciais. Assim, limitou-se a escolha a dois modelos: o *k-epsilon* e o *k-omega*. Após uma breve análise é possível perceber que o *k-omega* prevê melhor o escoamento junto às paredes, ao passo que o *k-epsilon* tem melhor performance num estudo longe desta condição de fronteira. Como o objetivo do estudo é prever o escoamento no interior do espaço, o modelo *k-epsilon* é mais adequado. É de notar que este oferece três opções de modelos: *standard*, *realizable* e RNG (ANSYS Inc., 2022a, 2022b).

5.1.3. MÉTODO DOS VOLUMES FINITOS

O método dos volumes finitos, ou MVF, é uma técnica numérica muito usada em códigos *CFD*, pois permite transformar as equações diferenciais parciais num sistema de equações algébricas lineares. A utilização deste método inicia-se pela discretização do domínio. Como se trata de uma simulação *CFD*, a discretização do domínio é feita através da conceção de uma malha que divide todo o domínio em volumes de controlo.

O processo de resolução pode ser dividido em duas etapas, sendo que na primeira etapa as equações diferenciais parciais são integradas e transformadas em equações de equilíbrio sobre um elemento. Esta transformação envolve a mudança dos integrais da superfície e do volume em relações algébricas discretas, usando uma determinada ordem de precisão. O resultado desta transformação é um conjunto de equações semi discretizadas. Na segunda etapa deste método, certas interpolações são escolhidas para aproximar as variações dos valores das variáveis dentro do elemento e relacionar estas com os valores das superfícies. Assim, é possível transformar as relações algébricas em equações algébricas. Em ambas as etapas as aproximações têm influência na precisão e robustez dos resultados obtidos (Gonçalves, 2022).

A popularidade do MVF nos códigos *CFD* deve-se ao facto de ser um método conservativo, pois alguns termos da equação de conservação que são transformados em fluxos nas faces e avaliados nas faces dos volumes de controlo são idênticos. Este método tem a capacidade de conseguir lidar com malhas não estruturadas e problemas físicos complexos. Além disso, a implementação de condições de fronteira de uma maneira não invasiva é uma mais-valia deste método (Moukalled et al., 2016).

5.2. FUNCIONAMENTO DO *SOFTWARE ANSYS FLUENT*

Os códigos *CFD* são estruturados com base em algoritmos numéricos, cuja função é resolver os problemas do escoamento de fluidos. Para facilitar o uso dos códigos, estes encontram-se divididos em três elementos: pré-processador, solver e pós-processador.

O pré-processador consiste em definir as condições do problema no programa. Isto permite realizar a simulação *CFD*, pois o *solver* utiliza essas mesmas informações no cálculo. Assim, nesta etapa, é necessário definir a geometria, gerar a malha, seleccionar os fenómenos físicos e químicos que se pretende estudar, definir as propriedades dos fluidos e especificar as condições de fronteira. Esta fase tem grande importância, pois como a solução do problema é definida nos nós dentro de cada célula, a precisão dos resultados vai depender do refinamento da malha.

O funcionamento do *solver* baseia-se em três passos: a aproximação das variáveis desconhecidas do fluido através de funções simples, a discretização fazendo a substituição das aproximações efetuadas nas equações que regem o fluxo do fluido e, depois de feitos esses cálculos chega-se à solução das equações algébricas. No *solver* é preciso ter em conta que existem três técnicas de resolução que podem ser utilizadas, sendo que o método usado na maioria dos códigos *CFD* comerciais é o método dos volumes finitos. Tendo em conta o método utilizado, o *solver* começa por integrar as equações que regem o fluxo do fluido através de todos os volumes finitos de controlo que se encontram no domínio, de seguida faz a discretização, substituindo as aproximações pelos termos nas equações e cria um sistema algébrico de equações, para de seguida resolvê-lo de forma iterativa. O pós- processador corresponde à fase onde os resultados obtidos são analisados através da demonstração da geometria e da malha, de vetores, de linhas e contornos, de gráficos 2D e 3D, da manipulação da imagem, entre outros. Com a melhoria destes programas, atualmente já é possível fazer animações de resultados dinâmicos e trabalhar os dados obtidos de forma mais detalhada (Versteeg & Malalasekera, 1995).

A ferramenta escolhida para realizar a simulação *CFD* foi o *software Ansys Fluent*, que permite prever o comportamento o escoamento dos fluidos devido às suas avançadas capacidades de modelação e precisão de resultados.

Como se pode observar na Figura 9, a simulação é antecedida pela conceção do desenho e criação da malha, sendo depois possível fazer a configuração da simulação.

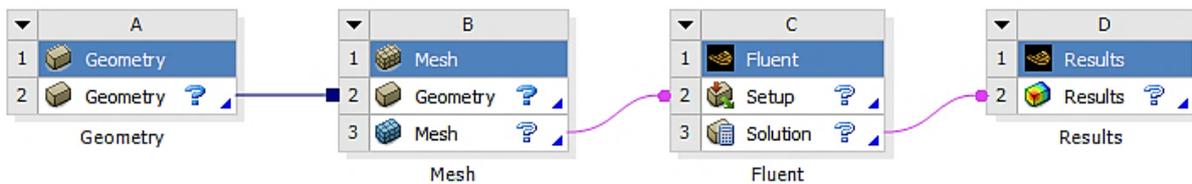


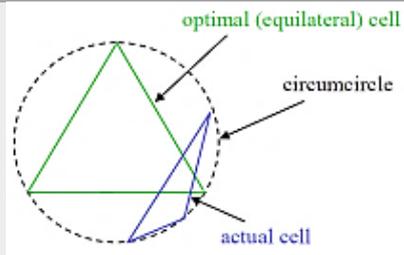
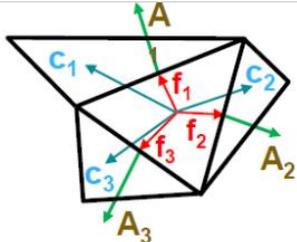
Figura 9 - Etapas de uma simulação.

A preparação da simulação começa com a conceção do desenho, daí ser preciso a implementação de um bloco relativo à geometria. O desenho pode ser elaborado com o auxílio de uma das duas ferramentas disponíveis, o *DesignModeler* e o *SpaceClaim*.

O bloco que deve ser inserido de seguida e que tem de estar conectado à geometria por necessitar dessas informações é o da malha. A malha é o conjunto de todas as células que constituem o domínio e esta deve ser refinada de modo que as propriedades dentro do volume não variem. Este bloco merece especial atenção uma vez que o *Fluent* é sensível à malha gerada e, se esta não apresentar uma qualidade adequada, alguns problemas podem surgir numa fase mais avançada da simulação.

Assim, o refinamento da malha é um aspeto que deve ser estudado, de modo a impedir que a malha tenha influência nos resultados obtidos. É de notar que quanto mais refinada for a malha maior será o tempo de simulação, por isso, a realização da otimização da malha torna-se importante para que haja um compromisso entre a qualidade dos resultados e o tempo necessário para efetuar a simulação. Como a malha pode ter impacto nos resultados da simulação é importante perceber que características esta deve apresentar. Uma delas é o tipo de elemento a considerar, pois o que se pretende é uma malha estruturada, com os elementos perfeitamente alinhados, que não dificulte os cálculos. Assim, como se trata de um estudo bidimensional deve dar-se prioridade aos elementos quadriláteros. Outra característica que permite avaliar a malha é a sua qualidade, que é determinada segundo parâmetros como o *skewness*, *aspect ratio*, e *orthogonal quality*, cuja definição se encontra na Tabela 5.

Tabela 5 – Parâmetros de avaliação da qualidade da malha (ANSYS Inc., 2022c).

Parâmetro	Forma de cálculo	Ilustração	Valores
<i>Skewness</i>	Cálculo do desvio dos ângulos dos elementos em relação a um elemento ótimo.		0 – Perfeito 1 - Pésimo
<i>Aspect ratio</i>	Rácio entre a maior aresta e a menor aresta do elemento, para elementos quadriláteros.		≈1 - Perfeito
<i>Orthogonal quality</i>	Mede a variação dos ângulos dos vetores centrais do elemento.		0 – Pésimo 1 – Perfeito

Como se trata de uma simulação sobre a dinâmica dos fluidos, o bloco escolhido para definir as condições e as especificações necessárias ao estudo deve ser o *Fluent*. Assim, o *setup* deve ter em consideração todas as condições e todos os elementos que possam afetar os resultados. Uma análise cuidada do caso em estudo deve anteceder esta preparação, uma vez que o objetivo é aproximar a simulação à realidade. Após essa preparação, devem ser definidas as condições para efetuar o cálculo pretendido.

Por fim, a última etapa baseia-se na análise e interpretação dos resultados obtidos, daí se colocar um bloco destinado aos resultados. Neste bloco é possível observar os valores obtidos, bem como estudar diferentes imagens e animações que facilitam a análise dos resultados.

5.3. SIMULAÇÃO SEM A FONTE DE CALOR

A simulação realizada tem como base uma geometria bidimensional e contempla a zona de insuflação e de extração, bem como a área onde se encontram os ventiladores de indução. Nesta primeira fase não foi incluída a fonte de calor que representa o incêndio, daí apenas se ter em atenção o comportamento do escoamento e dos equipamentos presentes no espaço. Tendo isto em conta procedeu-se à preparação e cálculo da simulação.

5.3.1. GEOMETRIA

A primeira etapa que possibilita a simulação é a conceção do desenho do piso em análise. Neste caso, recorreu-se ao *DesignModeler* para representar o espaço. É de notar que por causa dos vários elementos presentes no parque o desenho torna-se complexo. A Figura 10 apresenta o desenho elaborado.

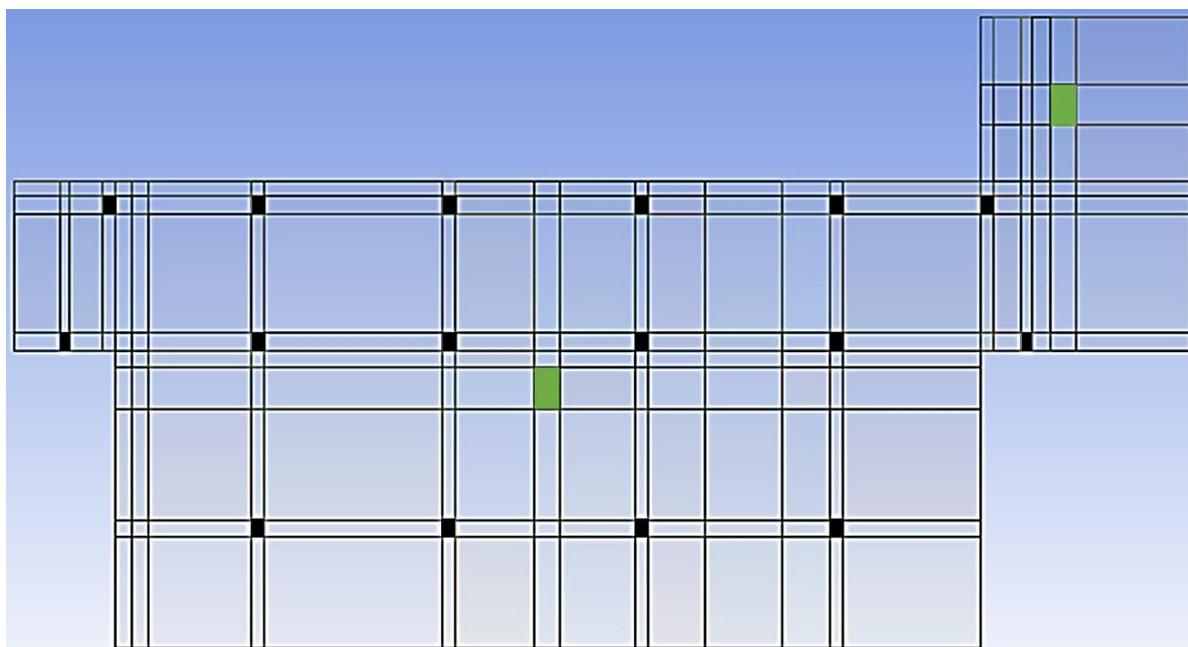


Figura 10 - Desenho do piso -1 do parque de estacionamento com as colunas a preto e os ventiladores de indução a verde.

A Figura 10 apresenta a geometria criada, na qual se pode ver algumas características da construção, como é o caso das 16 colunas que estão assinaladas a preto. Na mesma figura encontram-se assinaladas a verde duas áreas que correspondem aos ventiladores de indução.

Devido ao facto deste estudo ser bidimensional não é possível definir o comportamento real destes ventiladores, pelo que foram efetuadas algumas aproximações para representar adequadamente o funcionamento destes. Assim, considera-se que a entrada de ar se dá pela aresta superior dos retângulos verdes e que a saída se dá pela aresta inferior dos mesmos.

Nesta fase foram ainda definidos os corpos sólidos, mais concretamente as colunas, e os restantes corpos foram definidos como fluido.

5.3.2. MALHA

Após concluir o desenho, a etapa seguinte é a realização da malha. Nesta fase foi efetuada a otimização da malha para perceber qual a influência desta nos resultados obtidos.

Este estudo tem então como propósito determinar o tamanho de elemento que possibilita a obtenção de resultados fiáveis com um tempo de simulação adequado.

Foram efetuadas quatro simulações com tamanhos de elemento diferentes, mas mantendo as restantes condições iguais. Iniciou-se com o tamanho de elemento igual a 0,4 metros, de seguida reduziu-se para 0,2 metros, reduziu-se novamente para 0,1 e, por fim, analisou-se para um tamanho de elemento de 0,05 metros. Assim, para um tamanho de elemento de 0,4 metros foi obtida a malha exposta na Figura 11.

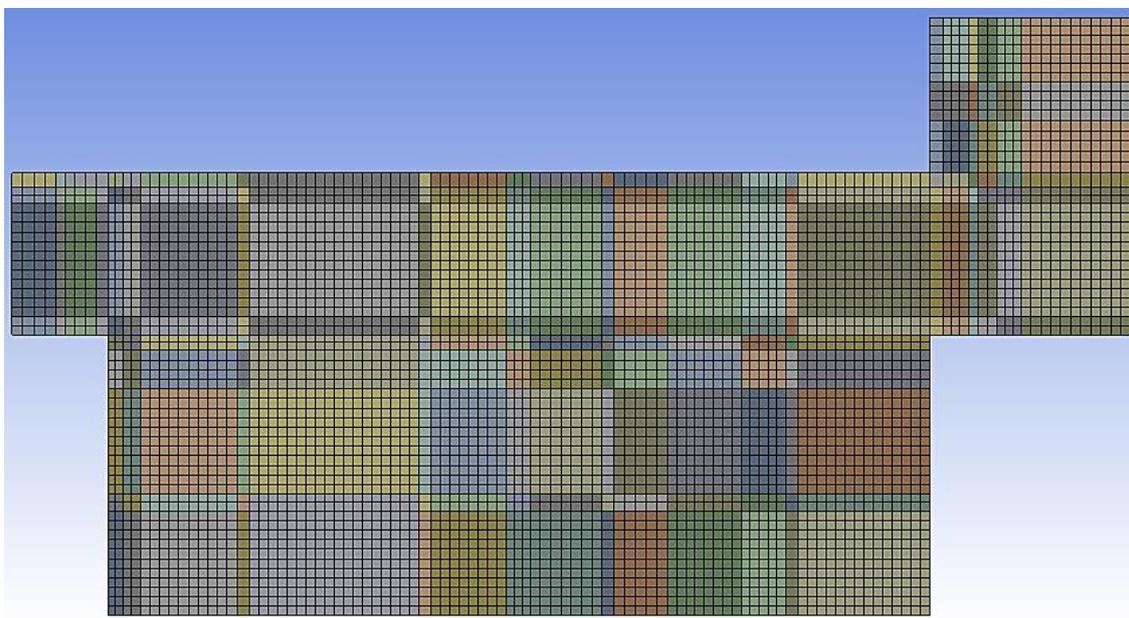


Figura 11 - Malha com tamanho de elemento de 0,4 metros.

Esta malha é composta por 5068 nós e por 4888 elementos. Como ainda não está refinada pode-se ver que é estruturada e os seus elementos são quadriláteros. À medida que a malha vai sendo refinada, ou seja, que o tamanho de elemento diminui, a imagem torna-se escura e deixa de ser possível diferenciar os elementos sem fazer uma aproximação da imagem.

As restantes malhas foram concebidas da mesma forma que a apresentada o que permitiu realizar a otimização. Esta otimização teve como variável de estudo a velocidade, uma vez que esta é a variável com mais peso no estudo em questão. Desta forma, foi criada uma linha vertical entre os ventiladores e foi calculada a média da velocidade nessa linha. Tendo em conta esses valores, foi calculado também o erro percentual entre cada redução do tamanho de elemento, de modo a perceber quando o erro baixo o suficiente para a malha não ter influência nos resultados. Os valores calculados podem ser analisados na Tabela 6.

Tabela 6 - Valores calculados para a otimização da malha.

Tipo de malha	Grosseira \longrightarrow Refinada			
	Tamanho de elemento (m)	0,4	0,2	0,1
Velocidade média (m/s)	0,449428	0,475921	0,461327	0,452629
Erro (%)	5,57	3,16	1,92	

A malha selecionada foi aquela cujo tamanho de elemento é de 0,1 metros. Observou-se que o erro entre esta e a malha mais refinada é baixo e, escolhendo a de 0,1 metros reduz-se o tempo de simulação necessário. É de notar que o erro entre a malha de 0,2 metros e a de 0,1 metros também podia ser aceite, mas visto que a diferença no tempo de simulação não é significativa, é preferível escolher a que apresenta resultados mais precisos.

Assim, a malha selecionada é constituída por 77187 nós e por 76474 elementos. No que diz respeito à qualidade, os valores dos critérios podem ser encontrados na Tabela 7.

Tabela 7 - Parâmetros da qualidade da malha com tamanho de elemento de 0,1 metros.

Critério de qualidade	Valor médio
Skewness	$1,3059 \times 10^{-10}$
Orthogonal Quality	1
Aspect Ratio	1,019

Tendo em conta estes valores conclui-se que a malha apresenta uma boa qualidade.

Ainda neste bloco foi efetuada a seleção e definição de zonas importantes para a simulação, como é o caso da entrada, da saída, das paredes e dos ventiladores. A Figura 12 expõe o desenho com a indicação das zonas a considerar na simulação.

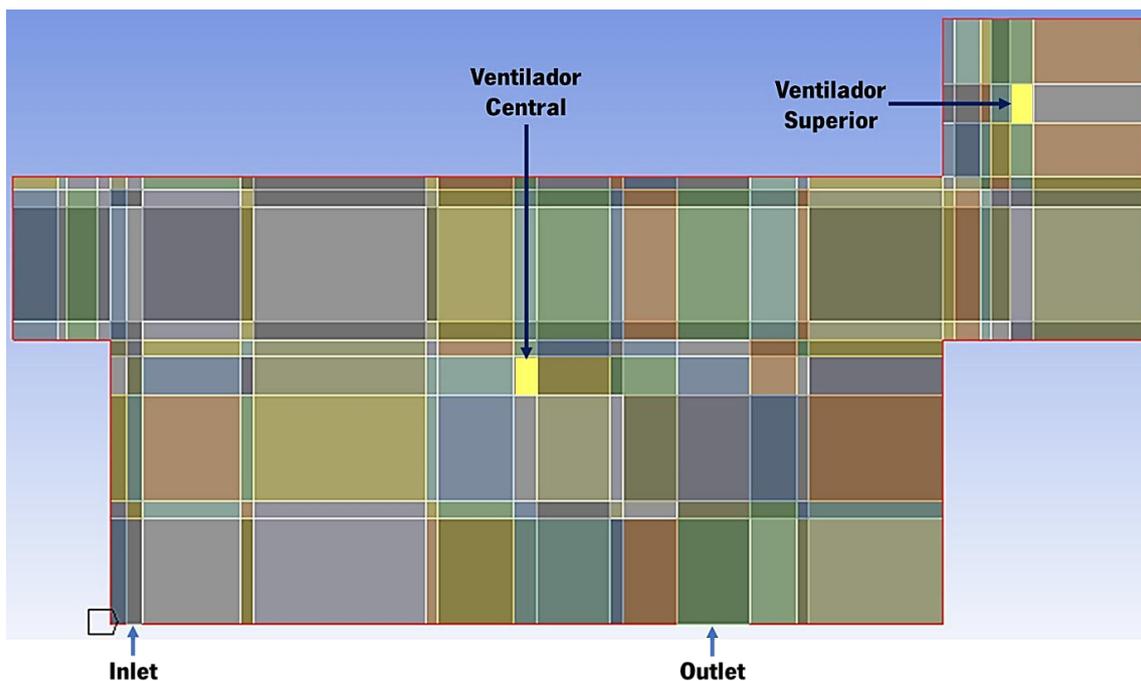


Figura 12 - Desenho com a indicação das zonas a considerar na simulação.

Tal como é possível observar na Figura 12, foram definidas a zona de entrada, cuja designação é *inlet*, e a zona de saída, com o nome de *outlet*. A linha vermelha fina representa as paredes do parque e as áreas a amarelo correspondem aos ventiladores de indução.

5.3.3. SETUP

A preparação da simulação passa pela etapa de definição das condições do problema. Assim, nesta fase são definidas as condições de fronteira, bem como alguns elementos que possam afetar o domínio. São ainda definidos os fenómenos que se pretende estudar e os modelos de turbulência que mais se adaptam à resolução do problema.

A primeira etapa passa por escolher os parâmetros do *solver*. Este apresenta dois métodos de solução, o *pressure-based* e o *density-based*. Apesar de atualmente ambos os métodos conseguirem ser aplicados a uma grande variedade de escoamentos, no passado existiam algumas diferenças entre eles. O *pressure-based* foi desenvolvido para fluidos incompressíveis ou ligeiramente compressíveis a baixa velocidade, enquanto que o *density-based* era mais indicado para fluidos compressíveis a alta velocidade. Tendo em conta a natureza do fluido em questão, utilizou-se o *pressure-based* como método numérico de resolução. No que diz respeito à formulação da velocidade, considerou-se que esta seria absoluta devido ao facto desta opção ser aplicada quando grande parte do domínio não está em rotação (ANSYS Inc., 2022a).

Quanto à dimensão espacial, seleciona-se a opção *2D planar* que indica que o estudo é bidimensional. De seguida é necessário definir se o estudo depende ou não do tempo. Nesta primeira abordagem assume-se que o regime é estacionário logo, os resultados não dependem do tempo. É de notar que a opção da gravidade não foi ativada, uma vez que esta não tem influência no estudo. Desta forma, ficaram definidos os parâmetros gerais, como se pode comprovar na Figura 13.

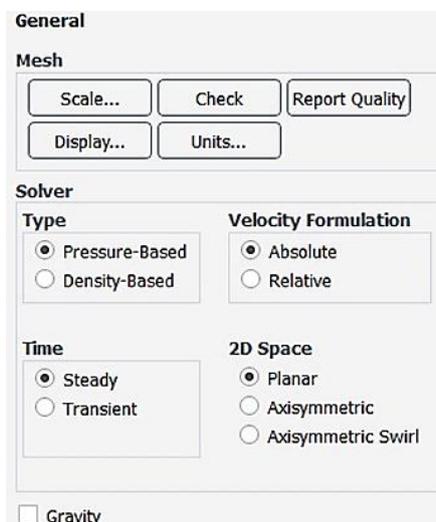


Figura 13 - Parâmetros gerais do *setup* da simulação.

A tarefa seguinte passa por definir os modelos apropriados ao estudo. Sendo o objetivo desta primeira simulação a análise do comportamento do escoamento, mais nenhuma equação precisa de ser ligada. Os modelos de turbulência que podem ser considerados foram apresentados no início deste capítulo. Como se concluiu que o mais apropriado ao estudo é o *k-epsilon*, só resta escolher uma das três opções disponibilizadas. É de realçar que, de acordo com Barsim et al. (2020), os modelos *k-epsilon* são capazes de prever o escoamento turbulento provocado por incêndios. Uma rápida análise permite concluir que o modelo *k-epsilon realizable* é o mais apropriado para fluxos relativamente complexos, localmente transitórios, com remoinhos moderados e alguns vórtices. Alguns dos benefícios deste modelo são que consegue prever de forma precisa a dispersão e apresenta um melhor desempenho em ambientes que envolvem rotações e recirculações. Assim, um exemplo da sua aplicação é a ventilação de compartimentos, daí se concluir que este é adequado ao estudo (ANSYS Inc., 2022a).

As propriedades dos materiais não têm impacto no comportamento do escoamento, por isso, estes não foram definidos nesta simulação.

Neste problema, as condições das zonas pertencentes ao domínio, denominadas de *Cell Zone Conditions*, são relativas aos ventiladores de indução que se encontram no espaço. Assim, apenas esses elementos devem ser considerados e, para isso, foi definido o comportamento destes. A forma usada para representar o funcionamento destes equipamentos foi introduzir nessas células um *Source Term*.

O *Source Term* que possibilita replicar esse funcionamento é o $Y_{momentum}$, cuja unidade é N/m^3 . Para chegar a um valor adequado foi necessário recorrer à ficha técnica deste ventilador, que se encontra no Anexo A. Nesta ficha o valor que é relevante é o do empuxo, expresso em N. Sendo que se trata de um estudo 2D apenas se vai considerar a área de secção, cujo valor é $1,6 m^2$. Conhecidos todos os dados, o valor obtido para o $Y_{momentum}$ foi de $-29,4 N/m^3$. É de notar que os 47 N foram considerados para que o ventilador trabalhasse com o valor máximo e o sinal negativo representa a direcção que se pretende. Tanto o ventilador central como o ventilador superior têm o mesmo funcionamento.

Relativamente às condições de fronteira, foram realizadas duas simulações com a entrada definida de forma diferente, para perceber qual o comportamento do escoamento em cada uma. É de lembrar que, de acordo com a legislação em vigor, o caudal de insuflação deve ser cerca de 60% do caudal de extração. Tendo em conta que o caudal e a área de entrada são valores conhecidos, então é possível calcular a velocidade através da equação 10.

$$Q = v \cdot A \leftrightarrow v = \frac{Q}{A} \quad (10)$$

Como o caudal de extração deve ser de $600 m^3/hora/veículo$ e a área de saída é de $3,025 m^2$, para o caso de existirem 20 veículos no parque de estacionamento, a velocidade de saída deve assumir o valor de $1,1 m/s$. É de notar que este valor deve ser representado com um sinal de subtração devido à direcção imposta. Assim, o valor estabelecido para a velocidade de saída é de $-1,1 m/s$.

Para calcular a velocidade de entrada que permite cumprir o requisito do caudal de insuflação é preciso ter em conta que a área de entrada é de $0,7 m^2$ e que o caudal de insuflação é cerca de 60% do caudal de extração. Assim, o valor da velocidade de entrada é de aproximadamente $2,86 m/s$.

Tendo calculado os valores das velocidades de entrada e de saída, definiu-se ambas as fronteiras como *velocity-inlet*, de forma a impor o caudal previsto na legislação. Além da magnitude da velocidade que necessita ser imposta, é também preciso definir a intensidade da turbulência. Assim, foi utilizada a equação 11 que permite calcular o número de Reynolds.

$$Re = \frac{\rho \cdot U \cdot D}{\mu} \quad (11)$$

Onde Re representa o número de Reynolds, ρ é a massa específica, U é a velocidade, D é o diâmetro hidráulico e μ é a viscosidade dinâmica do fluido. Assume-se que a massa específica é igual a $1,225 \text{ kg/m}^3$, que a velocidade e o diâmetro hidráulico dependem da zona para onde se pretende calcular estes parâmetros e a viscosidade toma um valor de $1,7894 \times 10^{-5} \text{ kg/m.s}$.

Os valores destas propriedades foram retirados da base de dados do *Fluent*. Tendo obtido o valor do número de Reynolds, calculou-se a intensidade de turbulência pela equação 12 (ANSYS Inc., 2022b).

$$I = 0,16. (Re_{Dh})^{-\frac{1}{8}} \quad (12)$$

Admitindo que o diâmetro hidráulico corresponde à área da secção de entrada ou de saída, dependendo do pretendido, podem ser efetuados os cálculos necessários. Assim, para a zona de entrada determinou-se que o número de Reynolds é igual a 137054 e que a intensidade de turbulência é igual a 3,65%.

Deste modo ficaram definidas as condições na entrada, tal como se pode confirmar na Figura 14.

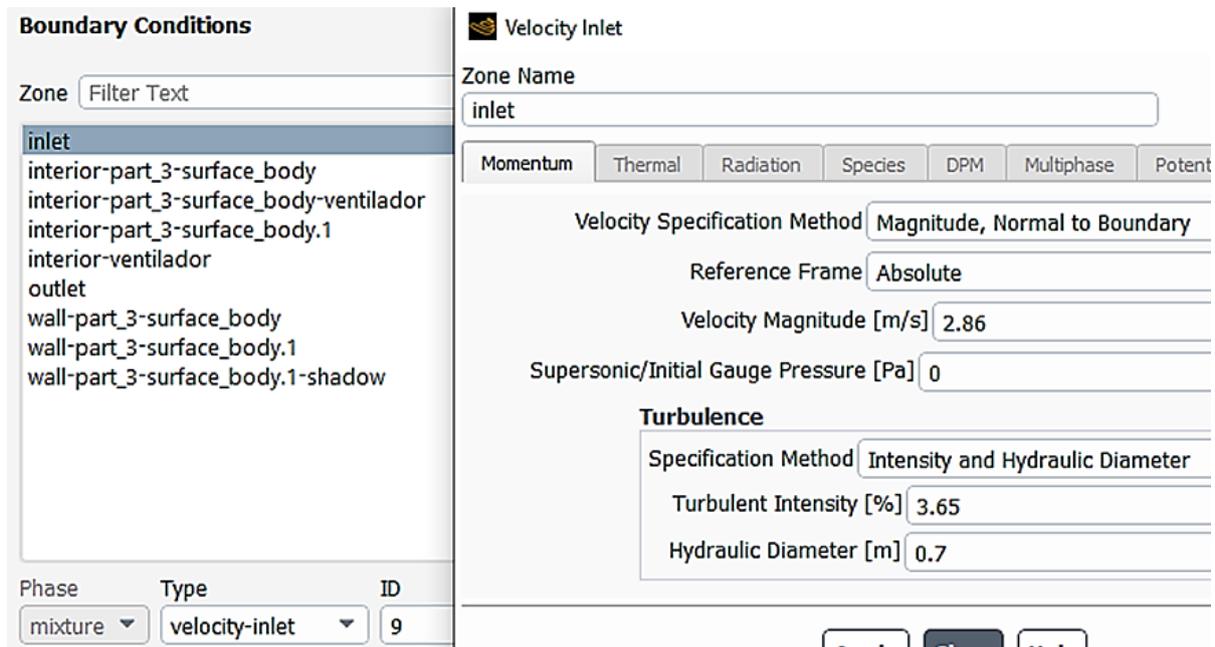


Figura 14 - Definição das condições de entrada como *velocity-inlet*.

Da mesma forma calculou-se o número de Reynolds para a saída, cujo valor obtido foi 227796, e a intensidade de turbulência para esta condição, que resultou em 3,42%.

Determinados estes parâmetros, definiu-se a condição de fronteira de saída, como se pode observar na Figura 15.

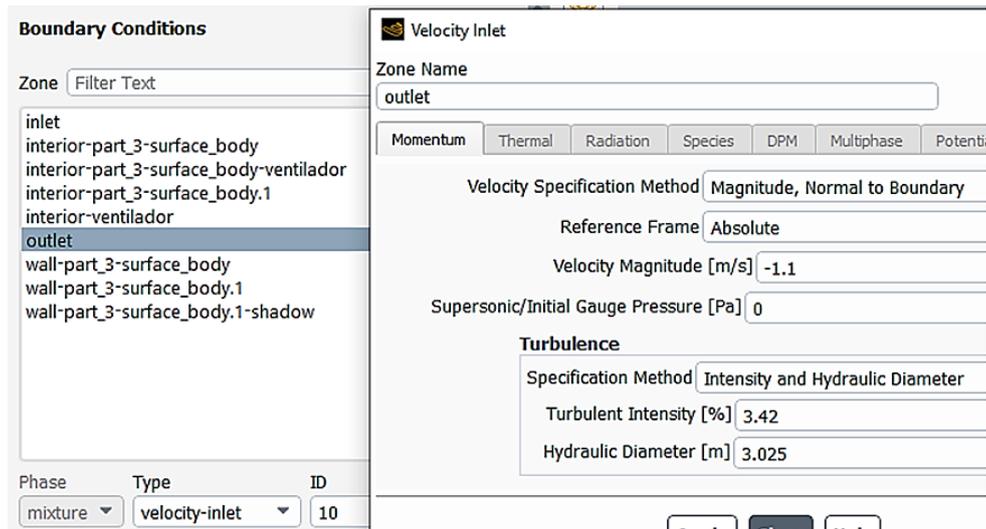


Figura 15 - Definição das condições de saída.

De seguida estabelecem-se as condições das paredes, mas uma vez que estas não têm influência significativa no escoamento, consideram-se os parâmetros definidos por defeito, como se pode ver na Figura 16.

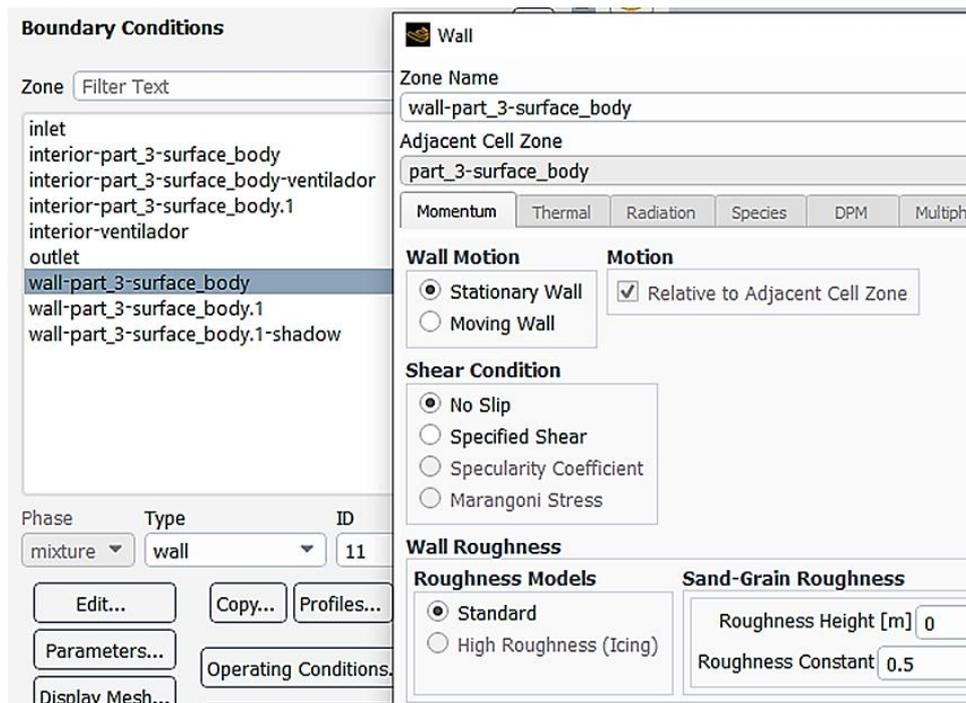


Figura 16 - Definição das condições da parede.

Deste modo, ficam definidas todas as condições de fronteira que representam o problema. No entanto, apenas ficam definidas para a primeira condição de entrada considerada. Para a segunda abordagem, como o *outlet* permanece como *velocity-inlet* para que o caudal seja forçado, altera-se a entrada para *pressure-inlet*, de modo a entender se o escoamento é afetado e que valores assume o caudal de entrada. É de salientar que nenhum valor de pressão foi imposto, tal como se pode observar na Figura 17.

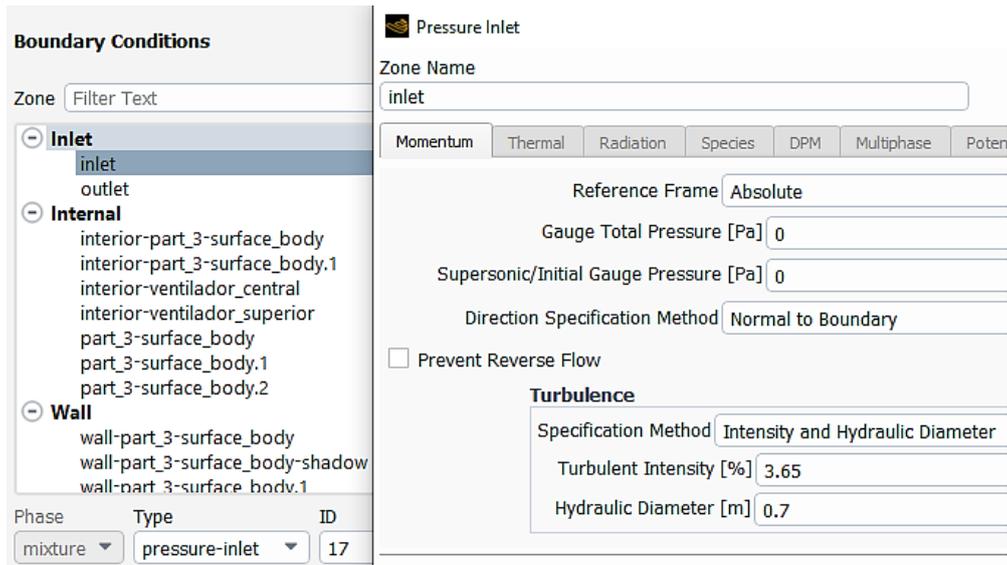


Figura 17 - Definição das condições de entrada como *pressure-inlet*.

Como a pressão pode alterar algum aspeto no escoamento, definiu-se posteriormente a mesma condição, mas impondo o valor arbitrário de 75 Pa de pressão à entrada. Esta alteração permite concluir de que forma pode ou não a pressão influenciar o escoamento.

5.3.4. SOLVER

No *pressure-based* solver estão disponíveis dois algoritmos, o segregado e o acoplado. O segregado resolve as equações que regem o fluido de forma sequencial, o que significa que a convergência pode levar mais tempo a ser atingida. Por sua vez, o algoritmo acoplado resolve em simultâneo a equação do *momentum* e a equação da continuidade. Com a junção destes dois passos a convergência é atingida mais rapidamente. Outra vantagem de utilizar o esquema acoplado é que, para fluxos em regime estacionário, é possível obter uma implementação de uma fase mais robusta e eficiente, com um desempenho superior ao obtido caso se optasse pelo algoritmo segregado. Assim, foi selecionada a opção do algoritmo acoplado para realizar a simulação (ANSYS Inc., 2022a).

No que concerne a discretização espacial, os gradientes servem para construir os valores dos escalares nas faces da célula e para determinar os termos secundários da difusão e as derivadas da velocidade. Existem três possibilidades, sendo que a selecionada para o caso foi a *Least Squares Cell Based*, cuja solução varia de forma linear. A sua precisão é semelhante á de outros gradientes e a capacidade computacional requerida não é tão elevada. O esquema de discretização selecionado foi o *Second-Order Upwind*, pois é atingida uma ordem mais alta de precisão nas faces das células e não existem problemas de convergência usando este esquema (ANSYS Inc., 2022a).

A inicialização deve ser sempre efetuada antes de se iniciar um cálculo e pode ser feita de duas formas, a híbrida e a normalizada. Neste caso, recorreu-se à inicialização híbrida, uma vez que promove uma rápida aproximação ao escoamento. Esta opção permite resolver a equação de Laplace para determinar a velocidade e a pressão e as restantes variáveis são atualizadas de acordo com valores médios (ANSYS Inc., 2022a).

Como se trata de um estudo em regime estacionário, é necessário definir o número de iterações que permite a convergência. O valor definido foi de 8000 iterações, mas o cálculo convergiu antes desse número ser atingido, tal como se pretendia.

5.3.5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Após efetuadas as simulações foi feita a análise dos resultados obtidos. Nesta fase observaram-se os contornos das diferentes variáveis e foram retirados alguns valores que auxiliam a compreensão dos resultados.

Velocity-inlet (inlet) + Velocity-inlet (outlet)

A primeira abordagem teve como condição a definição das velocidades, de forma a impor o caudal de extração e o caudal de insuflação segundo os valores enunciados na legislação. A análise do contorno da velocidade é importante, pois através desta consegue-se perceber o comportamento do escoamento. Os respetivos resultados encontram-se na Figura 18.

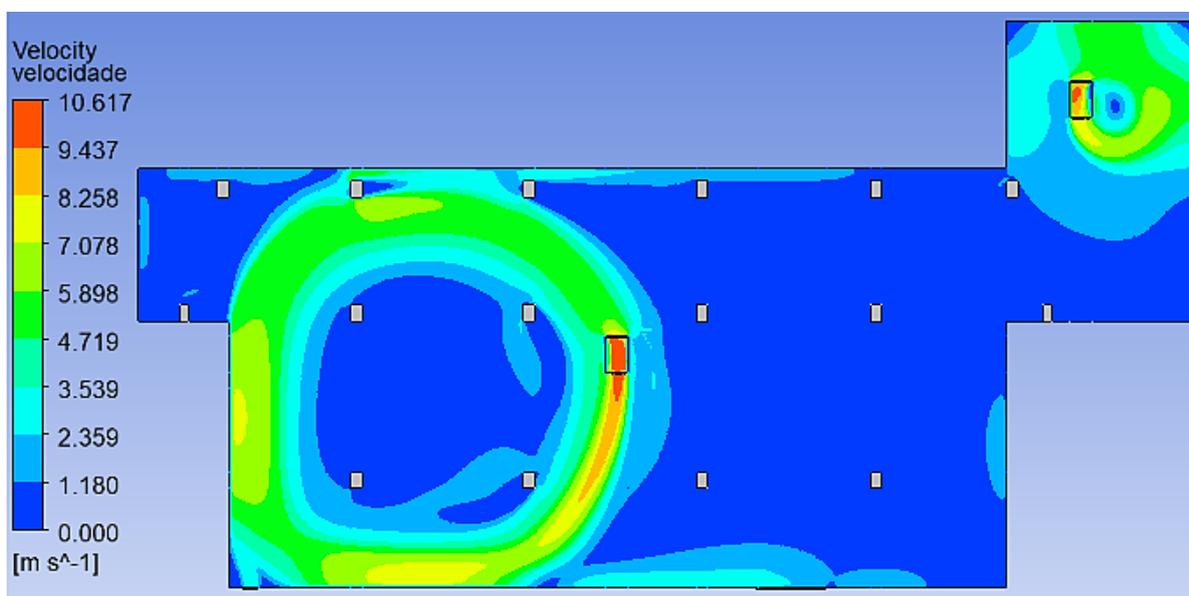


Figura 18 - Contorno da velocidade - entrada como *velocity-inlet*.

Ao observar o contorno da velocidade constata-se que o varrimento não é feito de forma uniforme. Nota-se uma assimetria entre a zona à esquerda do ventilador central e a zona à direita do mesmo, uma vez que existe uma recirculação de ar no lado da entrada.

É de sublinhar que na zona superior esquerda não se notam variações significativas, o que sugere que essa zona está estagnada. Este fenómeno pode dever-se ao facto da entrada se encontrar muito próxima da parede, fazendo com que o ar insuflado não consiga varrer a área em questão. Na zona do ventilador superior também se vê uma recirculação em torno deste, fazendo com que a região abaixo se encontre sem varrimento. Outros dados que devem ser estudados são as velocidades de entrada e de saída dos ventiladores de indução, de modo a validar o seu funcionamento. Assim, definiu-se um ponto central em cada um desses locais para calcular os valores da velocidade, valores esses que se encontram na Tabela 8.

Tabela 8 - Valores de velocidade à entrada e saída dos ventiladores.

	Ventilador central	Ventilador superior
Velocidade entrada (m/s)	7,48413	6,6317
Velocidade saída (m/s)	9,70879	7,80545

Sendo a velocidade de entrada menor que a velocidade de saída nos dois ventiladores pode concluir-se que este funciona da forma pretendida.

Outra variável com relevância para o estudo é a turbulência. Tal como visualizado na Figura 19, os ventiladores são os elementos que mais causam turbulência no escoamento, sendo o ventilador superior o mais impactante.

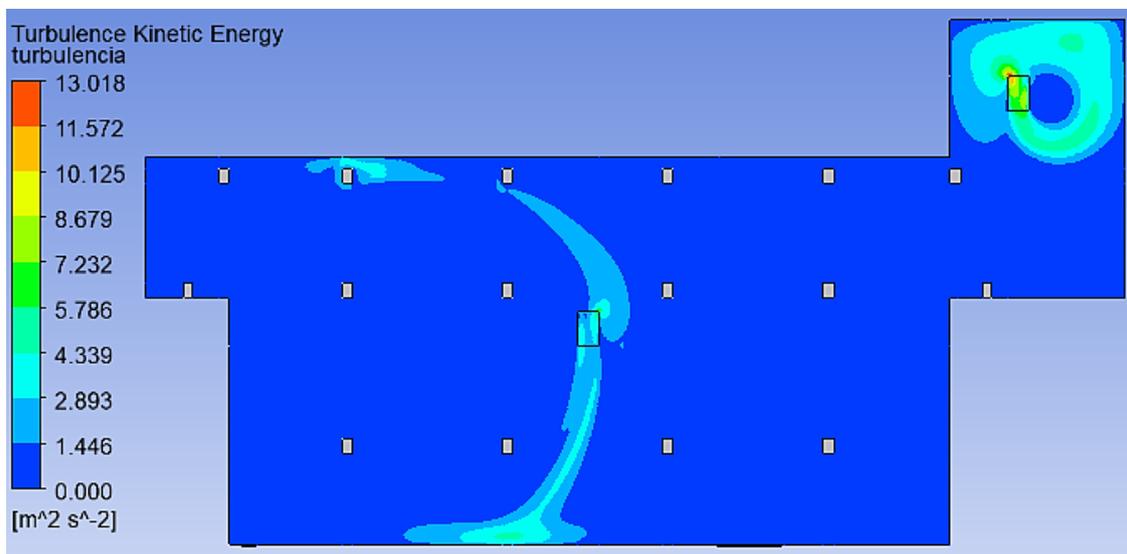


Figura 19 - Contorno da turbulência - entrada como *velocity-inlet*.

No que diz respeito à pressão, pode observar-se na Figura 20 que, novamente, os elementos que causam maior variação são os ventiladores de indução. Esta conclusão era esperada, uma vez que uma queda de pressão é imposta durante a definição destes equipamentos. Verifica-se ainda que na zona de recirculação, a pressão apresenta valores mais baixos.

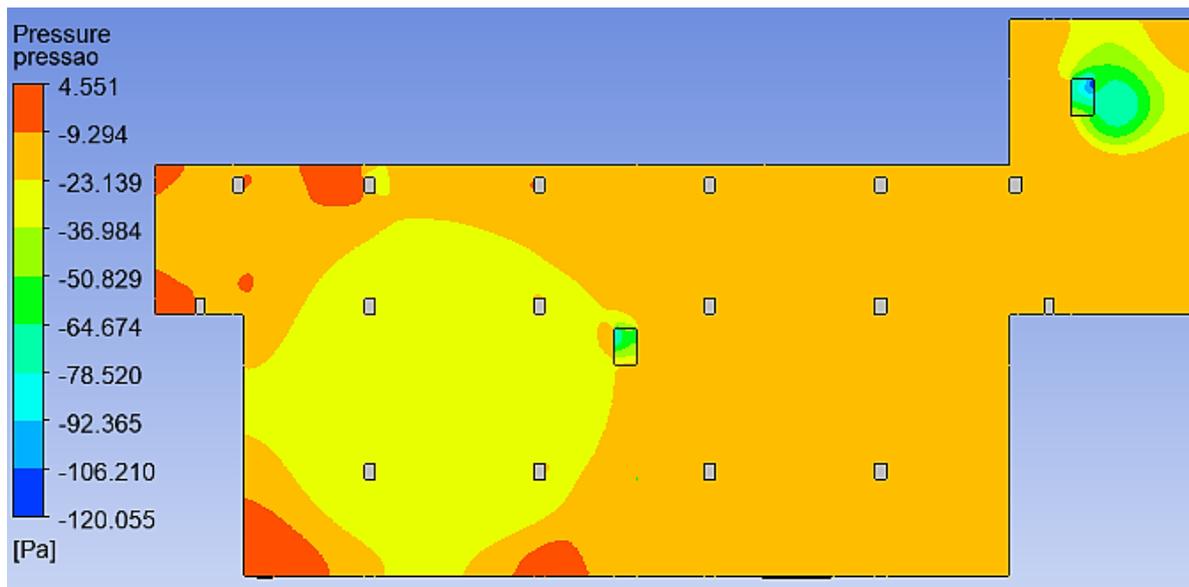


Figura 20 - Contorno da pressão - entrada como *velocity-inlet*.

Por fim, foi calculado o caudal mássico à entrada e à saída para confirmar a igualdade. Como tal não se verifica devido à imposição das velocidades, que foram calculadas para que o caudal de insuflação fosse 60% do caudal de extração, abordou-se a questão de outra forma.

Pressure-inlet (inlet) + Velocity-inlet (outlet)

Como mencionado anteriormente, visto que a definição das condições de fronteira não era a mais apropriada, alterou-se o tipo de entrada para *pressure-inlet*. Desta forma, o caudal de extração continua definido de acordo com a legislação, mas a entrada não tem nenhuma condição imposta. Para compreender como se comporta o escoamento com esta configuração não foi definido qualquer valor de pressão à entrada. O contorno resultante desta simulação, relativamente à velocidade, é semelhante ao que está exposto na Figura 18. A diferença apenas se baseia na magnitude, pois esta passa a ter como valor máximo 11,112 m/s. Do mesmo modo, o contorno relativo à turbulência aparenta ter o mesmo aspeto que o exposto na Figura 19, sendo que o seu limite máximo varia ligeiramente para 13,075 m²/s². O mesmo acontece relativamente à pressão, pois o contorno é idêntico, mas os limites mínimo e máximo passam a ser -134,197 Pa e -6,824 Pa, respetivamente.

A determinação dos caudais mássicos à entrada e à saída permitiu concluir que existe um equilíbrio entre estes, resolvendo assim o problema encontrado previamente. O caudal mássico de entrada assume o valor de 1,00774 kg/s e o de saída assume o valor é de -1,0111 kg/s, sendo que o sinal negativo indica a direção do ar.

***Pressure-inlet* com pressão (*inlet*) + *Velocity-inlet* (*outlet*)**

Visto que o comportamento do escoamento não se altera com a variação da condição de fronteira, um fator que se torna interessante de analisar é a influência da pressão nos resultados. Para tal, alterou-se o valor da pressão à entrada para um valor arbitrado, 75 Pa, e manteve-se as restantes condições. Tal como sucedido na situação anterior, o aspeto dos contornos de velocidade, turbulência e pressão não se alteraram. Notam-se diferenças mínimas nos limites máximos da velocidade e da turbulência, ao passo que a pressão apresenta uma grande variação de valores, assim como esperado. Na Figura 21 encontra-se o contorno da pressão em estudo.

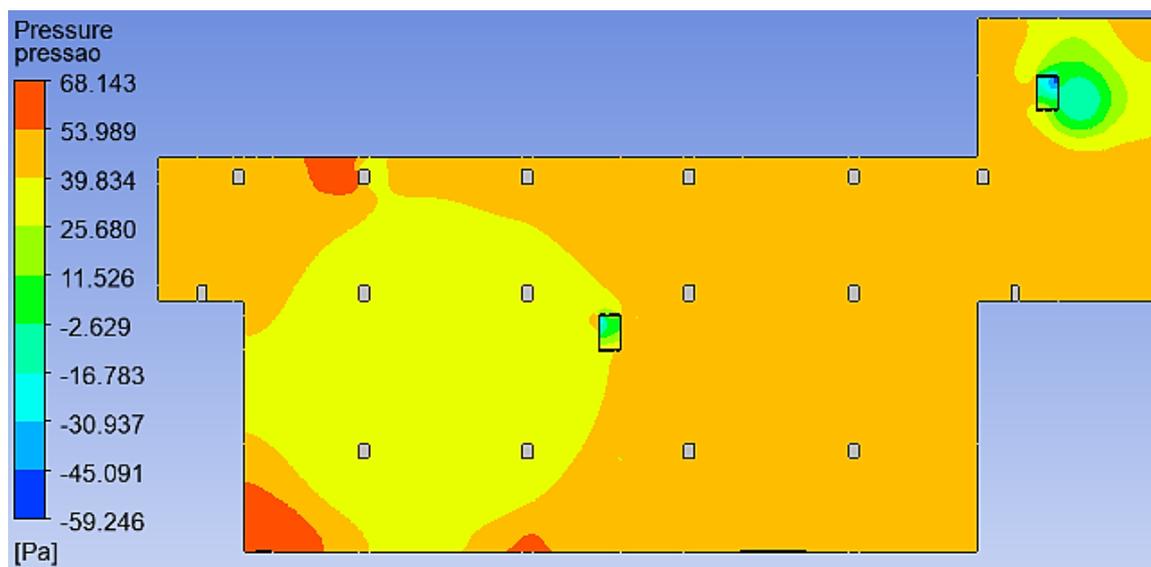


Figura 21 - Contorno da pressão - entrada como *pressure-inlet* com pressão.

O cálculo dos caudais mássicos foi efetuado e conclui-se que o valor de entrada é equivalente ao valor de saída, mantendo assim o equilíbrio pretendido.

5.4. SIMULAÇÃO COM A FONTE DE CALOR

A simulação que contempla a fonte de calor tem como propósito simular de forma simplificada um incêndio. Como engloba outro tipo de análise, algumas alterações à abordagem anterior foram feitas.

5.4.1. GEOMETRIA E MALHA

Esta simulação funciona de forma muito semelhante à anterior, até porque não há mudanças na geometria. A primeira alteração realizada foi no bloco da malha. Como há a necessidade de implementar uma fonte de calor, uma nova zona teve de ser definida, zona essa assinalada a vermelho na Figura 22. A área onde se definiu a fonte de calor foi escolhida de forma a perceber o impacto do escoamento no contorno da temperatura.

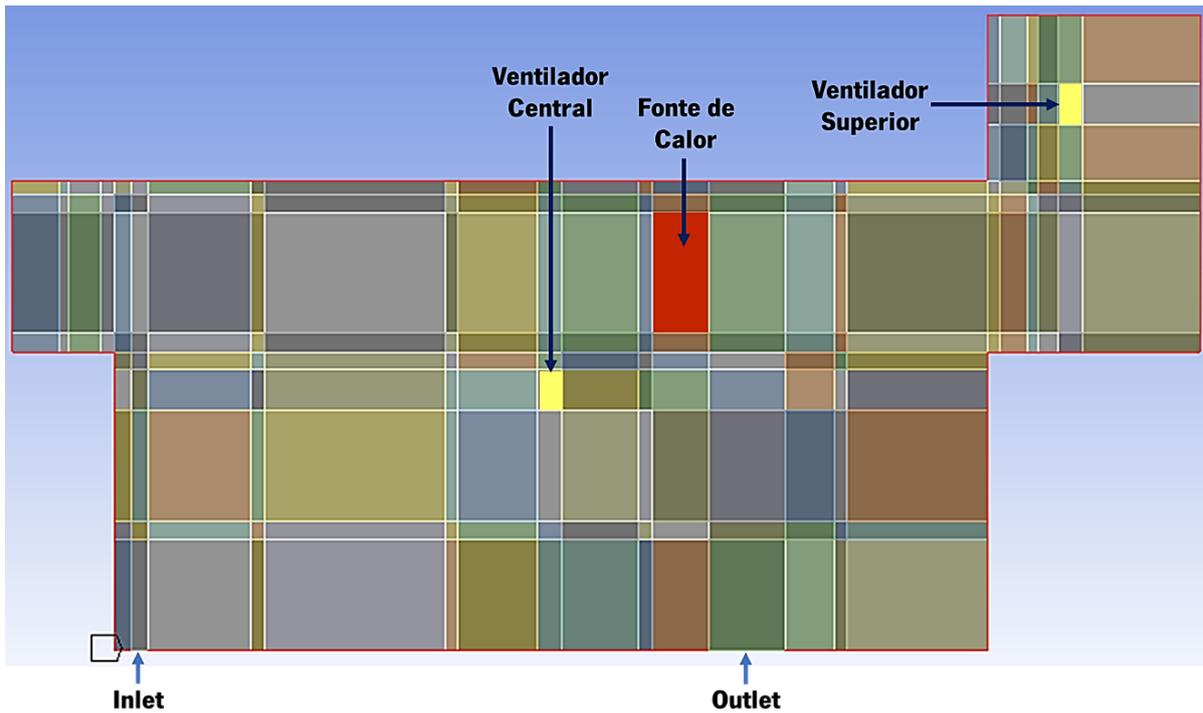


Figura 22 - Desenho com a indicação das zonas principais.

5.4.2. *SETUPE SOLVER*

De seguida, foi ativada a equação da energia que permite especificar a fonte de calor e, assim, analisar a variação da temperatura.

A seguinte alteração dá-se dentro do domínio, pois é lá que se implementa a fonte de calor. Esta foi considerada como uma *Source Term* de energia e, para aproximar o estudo à realidade, foi implementada uma função com uma fase inicial de ignição, uma segunda fase que foi considerada constante e uma terceira que corresponde ao arrefecimento, que é quando o incêndio começa a extinguir-se. Esta função apresenta uma fase de crescimento que vai desde os 0 s aos 300 s, onde atinge um valor de aproximadamente 166667 W/m^2 . Este valor mantém-se constante até aos 1500 s e depois começa a decrescer até atingir os 0 W/m^2 aos 1800 s. Os valores do tempo foram arbitrados e o valor de 166667 W/m^2 foi calculado pela taxa de calor libertado e pela área. A área da zona onde se definiu a fonte de calor assume um valor de $10,2 \text{ m}^2$ e a taxa de calor libertado é de 1700000 W , valor aproximado de um estudo realizado por Merci & Shipp (2013) para um veículo médio com o motor a arder.

Sabendo todos os valores necessários à determinação da função, conclui-se que esta poderia ser representada pelo seguinte sistema de equações.

$$y = \begin{cases} 555,557t & , \quad 0 < t < 300 \\ 166667 & , \quad 300 < t < 1500 \\ -555,557t + 1000002,6 & , \quad 1500 < t < 1800 \end{cases} \quad (113)$$

Reunindo os termos da função, esta pode ser representada segundo o gráfico da Figura 23. É de notar que este gráfico tem como limite máximo de tempo 2000 s apenas para confirmar que a partir dos 1800 s não há libertação de energia, ou seja, o incêndio já terminou.

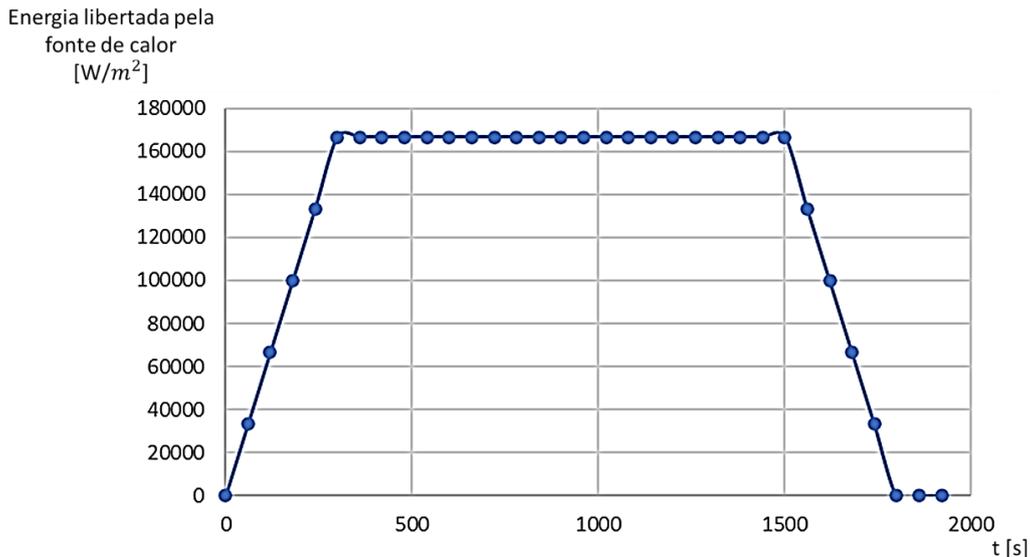


Figura 23 - Energia libertada pela fonte de calor ao longo do tempo.

Esta função foi definida no *software* através da seguinte *UDF*:

$$\text{IF}((t < 300[s]), (555.557 [W/(m^3)/s] * t[s] + 0), \text{IF}((t < 1500[s]), 166667 [W/m^3], \text{IF}((t < 1800[s]), (-555.557 [W/(m^3)/s] * t[s] + 1000002.6), 0 [W/m^3])))$$

É importante realçar que dos parâmetros gerais anteriormente definidos, o único que teve de ser alterado, devido à implementação da fonte de calor, foi o do regime. Assim, como se trata de um estudo que depende do tempo, alterou-se o regime de estacionário para transiente.

Nas condições de fronteira apenas é preciso indicar o material dos elementos do parque e as temperaturas iniciais. Todos os elementos que pertencem à estrutura, como as paredes e as colunas, são feitas de betão. Por sua vez, os ventiladores apresentam uma carcaça de aço galvanizado. Todos os valores relativos às propriedades dos materiais mencionados encontram-se definidos na base de dados do *Fluent*. A temperatura definida para todos estes elementos foi de 25 °C, tal como a zona de entrada e de saída de ar. Nesta simulação, a condição de fronteira de entrada foi definida como *pressure-inlet* e a saída manteve-se como *velocity-inlet*, de modo a permitir o equilíbrio entre o caudal mássico de entrada e o caudal mássico de saída.

O método de solução não foi alterado e, relativamente à formulação transiente, a primeira ordem implícita foi escolhida, uma vez que a precisão obtida é suficiente para o estudo deste problema (ANSYS Inc., 2022b).

A inicialização foi efetuada com a opção *standard*, uma vez que esta simulação é dependente do tempo. Assim, os valores iniciais foram definidos de acordo com a condição de fronteira de saída, que é aquela que impõe a condição mais relevante.

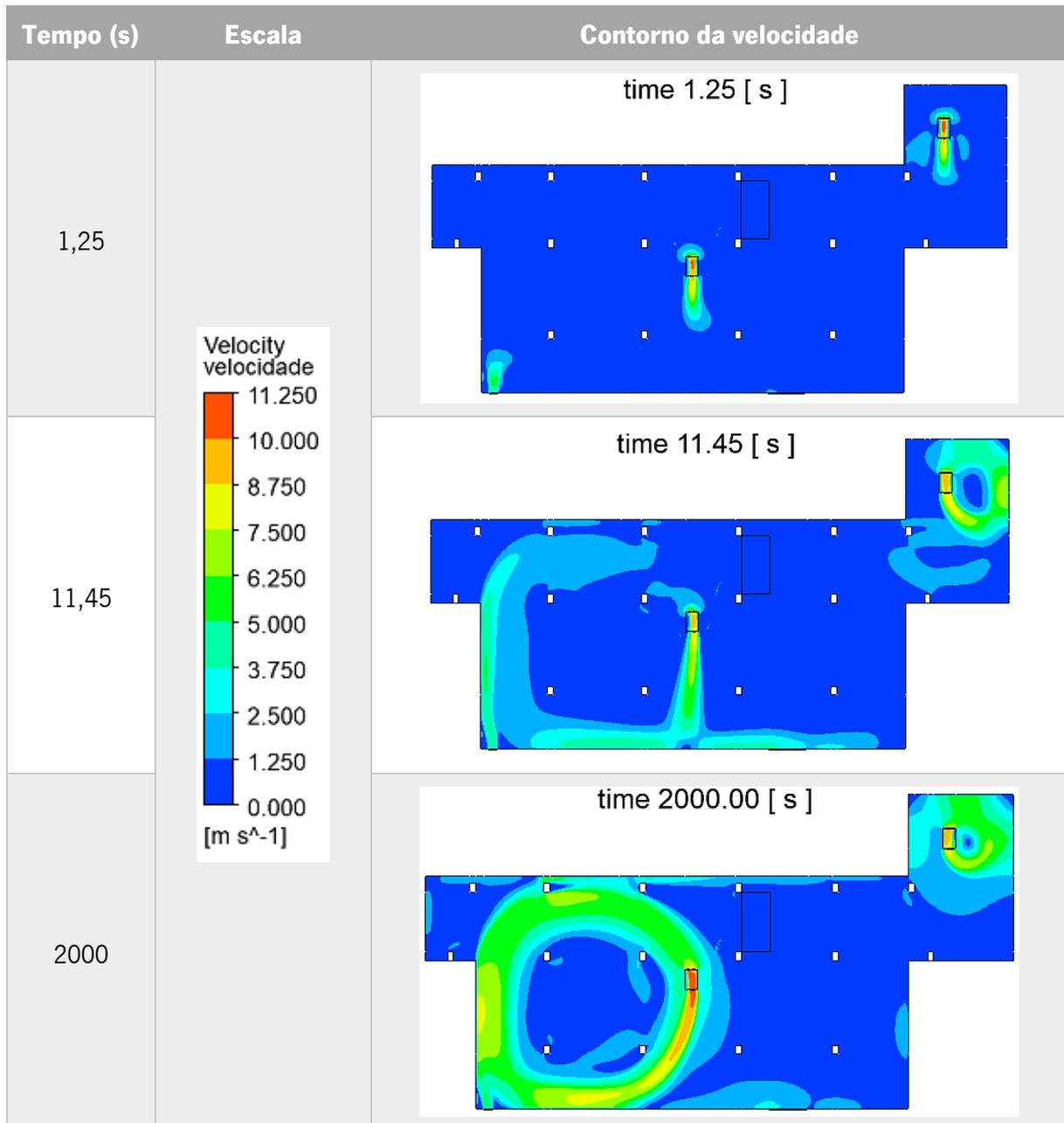
Por fim, os parâmetros do cálculo tiveram de ser alterados, uma vez que o regime também o foi. Deste modo, considerou-se o adaptativo baseado no erro e a duração foi definida conforme o tempo total. Assim, foram definidos 2000 s para se analisar os resultados depois do término do incêndio, com uma tolerância de 0,01. Posto isto, iniciou-se o cálculo desta simulação, sendo que alguns *time steps* foram gravados para a posterior análise.

5.4.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados obtidos nesta simulação corroboram os resultados das abordagens anteriores. A grande questão nesta abordagem é a temperatura e a sua evolução ao longo do tempo. Assim, foram analisados os contornos em determinados instantes para perceber as variações mais importantes de cada uma das variáveis estudadas, sendo que a temperatura foi examinada com mais detalhe. Nesta análise também é possível perceber o comportamento dos ventiladores de indução e das zonas de entrada e de saída.

A análise do contorno da velocidade é fundamental para examinar o comportamento do escoamento. Assim, alguns instantes de tempo foram selecionados, de forma a observar o desenvolvimento desta variável. Na Tabela 9 encontram-se expostos os contornos da velocidade analisados.

Tabela 9 - Contornos da velocidade em função do instante de tempo.

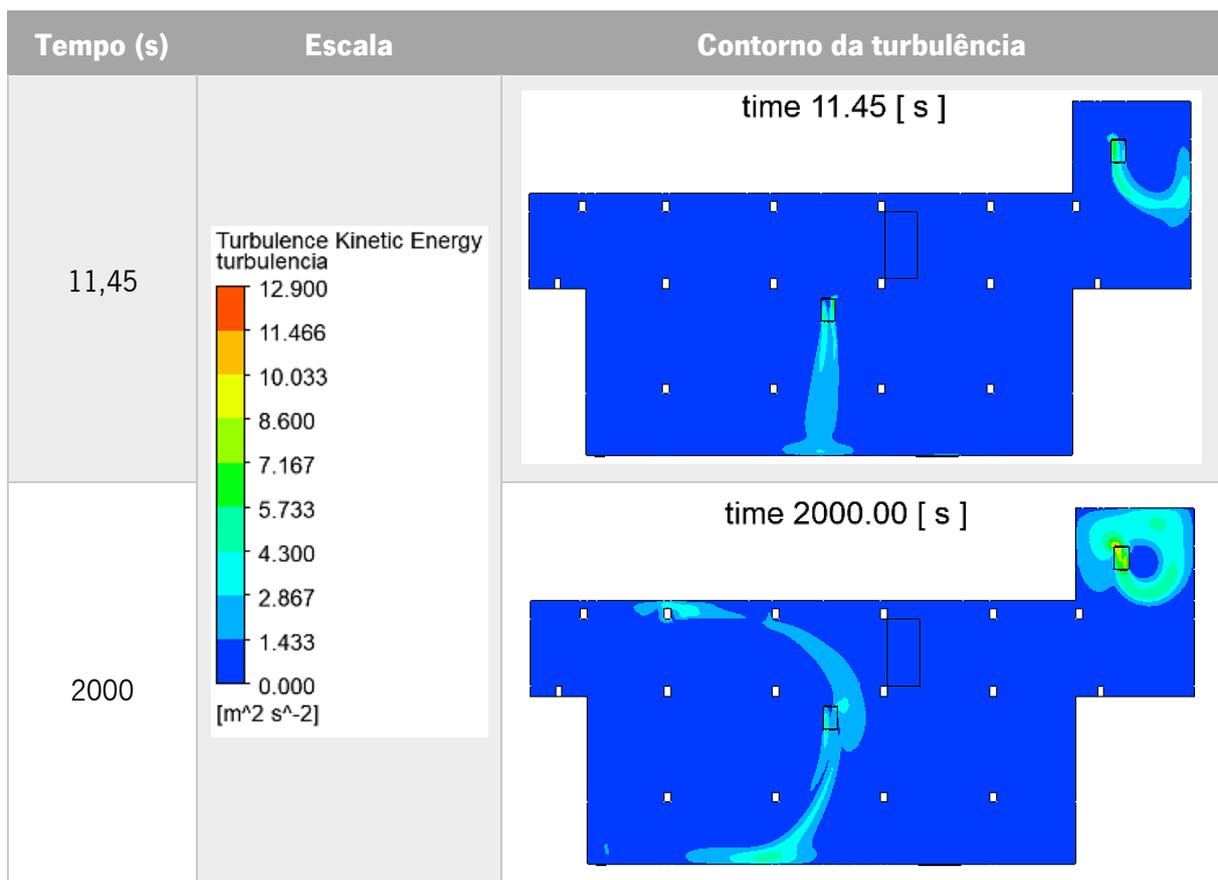


Como se pode observar, o primeiro contorno (1,25 s) demonstra a entrada de ar, uma pequena saída deste e a fase inicial do funcionamento dos ventiladores de indução. Pode concluir-se que o funcionamento destes ventiladores está a realizar-se da forma esperada. No segundo contorno (11,45 s) já se observa melhor a insuflação de ar novo pela zona de entrada e a extração de algum ar pela zona de saída. O ventilador central funciona como o pretendido, pois direciona o ar para junto da parede onde se encontra a saída. Porém, o ventilador de indução superior não efetua corretamente esta tarefa, uma vez que se dá a recirculação do ar que deveria ser direcionado para fora da zona superior direita.

Ao fim de 2000 s, pode ver-se na Tabela 9 o aspeto do escoamento quando está totalmente desenvolvido. A entrada de ar em conjunto com o ventilador de indução central criam uma zona de recirculação, o que impede que grande parte do ar se dirija para a saída. Assim, a zona de extração de ar não apresenta variações significativas, ao contrário do pretendido. A zona superior esquerda não apresenta variações relevantes de velocidade, o que significa que não há varrimento significativo nesse local. Relativamente à zona do ventilador de indução superior, este cria uma recirculação em torno de si próprio impedindo que esse ar seja direcionado para a zona central do parque de estacionamento. Pode concluir-se que estes dados são idênticos aos da abordagem anterior, sendo que apenas diferem os valores máximo obtidos.

Outra variável de interesse para o estudo é a turbulência. Esta essencialmente demonstra a turbulência gerada pelos ventiladores de indução, tal como é possível constatar nas imagens presentes na Tabela 10.

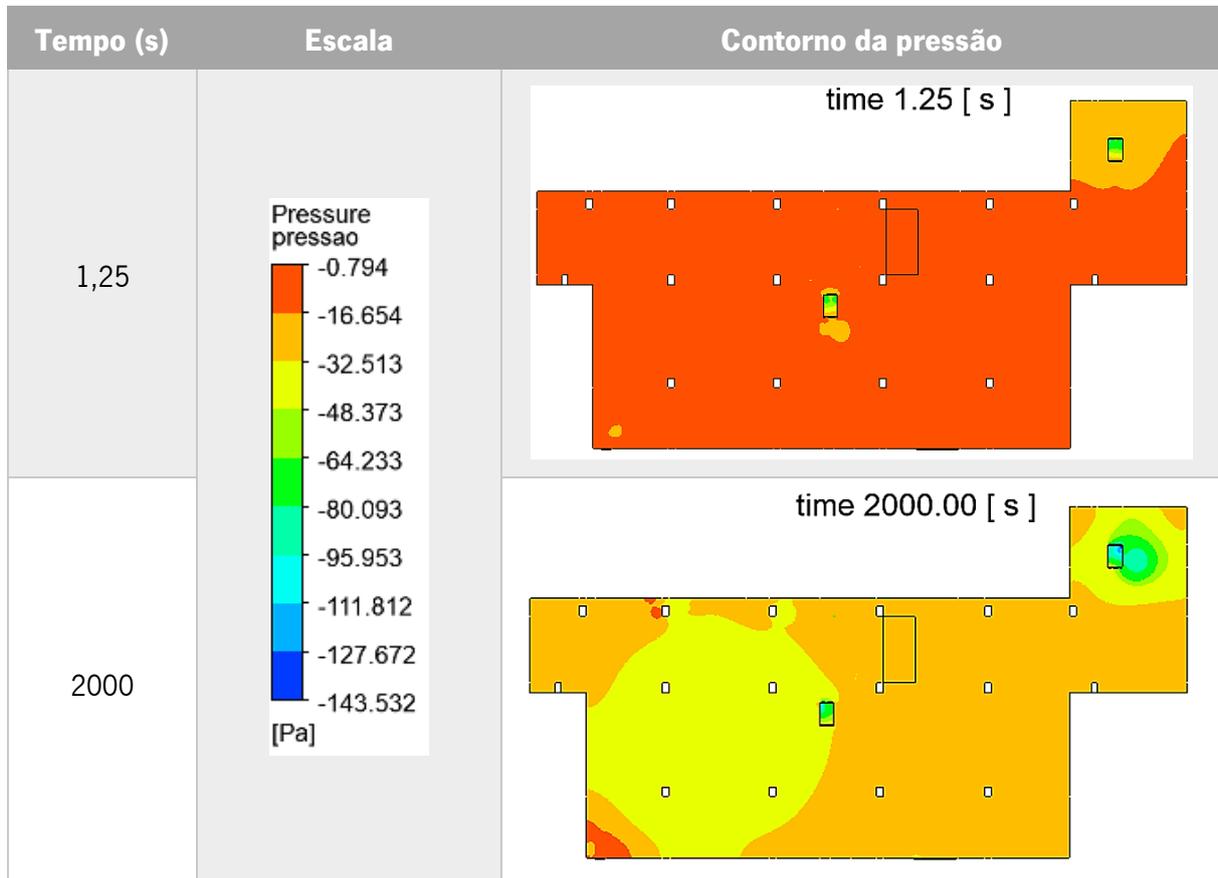
Tabela 10 - Contornos da turbulência em função do instante de tempo.



Estas imagens permitem confirmar que a turbulência se deve maioritariamente aos ventiladores de indução e um pouco à recirculação, entre a zona de entrada e o ventilador central, anteriormente mencionada.

No que diz respeito à pressão, numa fase inicial esta não varia consideravelmente, uma vez que o funcionamento dos equipamentos está a começar. Como se pode observar na Tabela 11, após algum tempo de funcionamento, o contorno da pressão muda consideravelmente, quer em magnitude, quer em aspeto.

Tabela 11 - Contornos da pressão em função do instante de tempo.

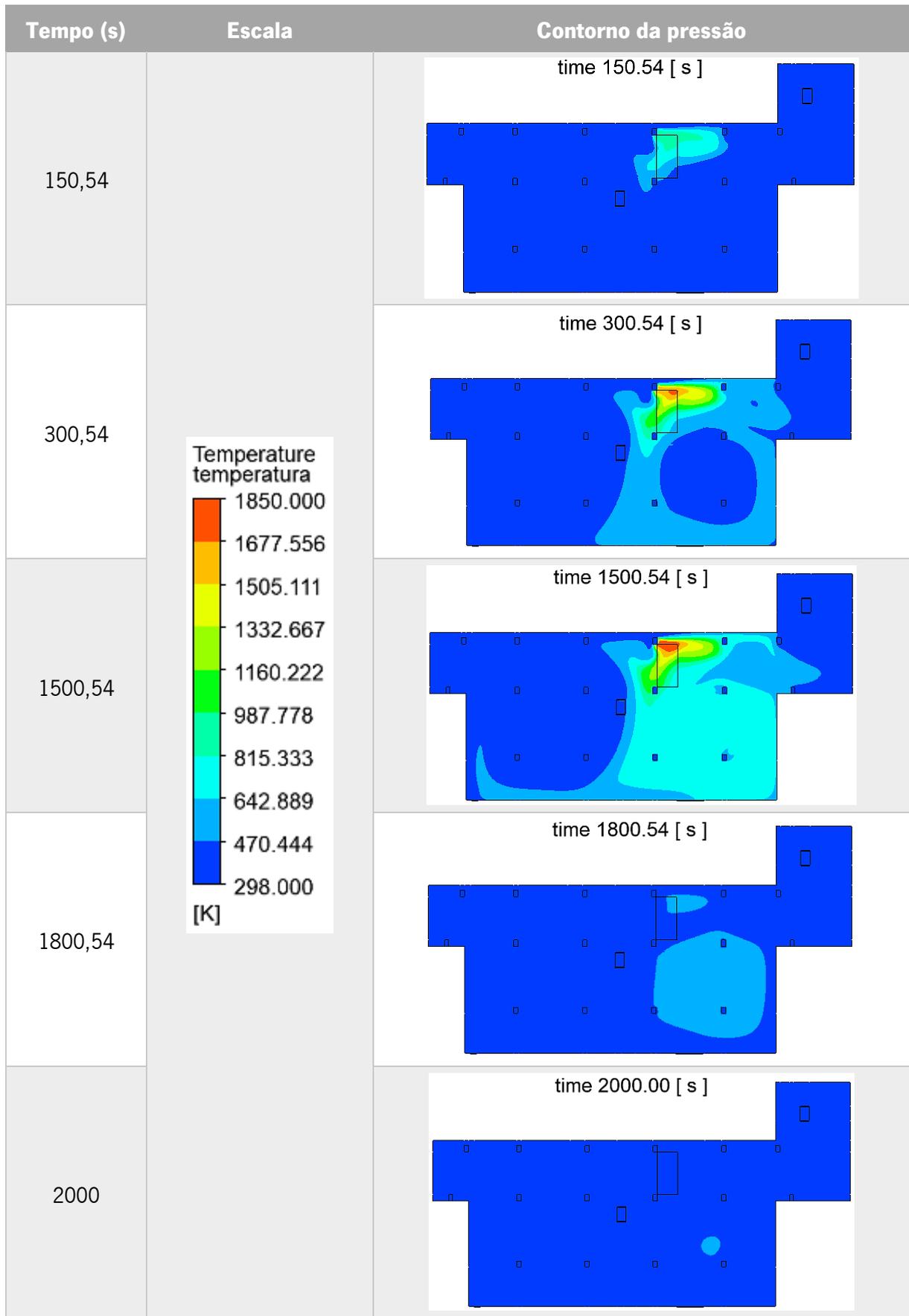


A análise do último contorno (2000 s) permite constatar que as recirculações existentes são notórias o suficiente para afetar as diferentes variáveis em estudo e que estas influenciam substancialmente a forma como o processo de desenfumagem se realiza.

Por fim, a variável que permite perceber o desenvolvimento do incêndio é estudada. Assim, os contornos da temperatura são analisados, sendo que alguns pontos importantes da função que define a fonte de calor são mencionados. A Tabela 12 apresenta os contornos com mais relevância para o estudo.

Simulação *CFD* do processo de desfumagem de um
parque de estacionamento

Tabela 12 - Contornos da temperatura em função do instante de tempo.



O contorno da temperatura para um tempo próximo de zero não apresenta qualquer alteração, uma vez que todo o domínio se encontra à temperatura definida inicialmente, antes de começar o incêndio, daí este contorno não ser mostrado. Assim, o primeiro contorno a ser considerado é aquele que representa a fase intermédia do crescimento do incêndio, para um tempo de 150 segundos. Segundo a imagem correspondente é possível perceber que o incêndio está ativo, mas ainda não atingiu uma temperatura muito elevada. Após 300 segundos o incêndio já se encontra numa fase desenvolvida, porém ainda não se atingiu o ponto máximo da sua evolução. Este pico dá-se aos 1500 segundos, altura em que se inicia a fase de arrefecimento do incêndio. Nesta fase (1500 s) é bem visível a influência da velocidade do escoamento no contorno da temperatura. Na zona onde existe recirculação entre a entrada e o ventilador central, a temperatura não atinge valores altos, permanecendo sempre próxima da temperatura inicial definida. Os valores de temperatura vão diminuindo até chegar aos 1800 segundos, instante em que o incêndio termina, ou seja, a fonte de calor já não emite energia. É de notar que neste instante a temperatura ainda não voltou à inicial, uma vez que é necessário algum tempo para atingir os valores iniciais. Por fim, o contorno relativo aos 2000 segundos é analisado e permite concluir que a temperatura vai diminuindo com o tempo, sendo que neste instante ainda não atingiu os 25 °C, inicialmente definidos nas condições de fronteira e no restante domínio. Durante todo este processo a temperatura atinge valores que rondam os 1800 Kelvin.

Após analisados todos os contornos e os valores relevantes, pode-se concluir que o varrimento não é efetuado de forma uniforme e que os ventiladores de indução não funcionam da maneira pretendida. É ainda notório o facto da zona de entrada estar muito próxima de uma parede, o que faz com que o ar insuflado não alcance a zona superior esquerda, problema esse que é favorecido pela recirculação presente nessa região. O funcionamento do ventilador de indução superior não é eficaz, uma vez que este não direciona o ar para uma zona favorável à sua extração.

Para o incêndio definido neste estudo o sistema de desenfumagem funciona de forma aceitável, mesmo que não seja da forma mais eficaz. A temperatura de todo o espaço volta aos valores iniciais algum tempo após o término do incêndio, o que confirma a eficácia do sistema. No entanto, caso o incêndio fosse definido numa outra área, como na zona superior esquerda, o sistema podia não ser tão eficaz, uma vez que é uma zona considerada estagnada e, potencialmente, o varrimento não seria o suficiente.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

6.1. CONCLUSÕES

Nesta dissertação foram realizadas quatro simulações, sendo que as três primeiras não tinham implementada a fonte de calor e a última efetuada já contemplava o incêndio.

O objetivo das primeiras três simulações era prever o comportamento do escoamento. Através dos contornos obtidos, é possível concluir que o varrimento do espaço não é uniforme, pois há grandes diferenças entre a zona de entrada e a zona de saída. Em conjunto, a entrada e o ventilador central criam uma recirculação que dificulta a extração do ar. O ventilador de indução superior também forma uma recirculação, o que impede o escoamento do fluido para uma zona de varrimento que facilite a extração. O facto da entrada estar localizada junto de uma parede faz com que o ar insuflado colida com esta e, assim, não é fornecido ar novo à zona superior esquerda. Tendo em conta que no início do estudo foram considerados dois potenciais pontos críticos, ao fazer esta análise da velocidade conclui-se que o esperado se confirma. Pode-se então afirmar que as zonas mais críticas são as laterais superiores. Esta conclusão permite também assumir que a geometria tem grande influência no escoamento, uma vez que sem as zonas superiores as áreas com pouco varrimento seriam retiradas. Além disso, as colunas que constituem a geometria podiam criar obstáculos ao fluido, mas este aspeto não se verificou, pois nenhuma alteração significativa foi consequência desta característica da construção. A diferença entre as três simulações era apenas a condição de fronteira de entrada. A alteração desta, de *velocity-inlet* para *pressure-inlet*, e posteriormente para um *pressure-inlet* com uma pressão imposta, permitiu constatar que o tipo de entrada não tem influência no aspeto dos contornos das variáveis estudadas. A turbulência foi uma das variáveis analisadas. Ao observar o contorno desta facilmente se percebe que esta varia devido ao funcionamento dos ventiladores de indução e um pouco devido à recirculação criada entre a entrada e o ventilador central. Por sua vez, a pressão varia mais nas recirculações e na zona de entrada para os ventiladores de indução, algo que era esperado dada a condição que define o funcionamento destes equipamentos.

Na quarta simulação foi definida uma fonte de calor para representar o desenvolvimento do incêndio. Assim, o objetivo desta simulação era perceber a influência da temperatura, no caso de ocorrer um incêndio. Nesta simulação também foram analisados os contornos das variáveis anteriormente mencionadas. O seu aspeto permaneceu idêntico, confirmando assim os dados obtidos. Esta abordagem tem como principal variável de estudo a temperatura logo, este contorno é analisado com mais detalhe.

A variação da temperatura depende do intervalo de tempo em que se encontra, daí esta simulação ter sido efetuada em regime transiente. A análise dependente do tempo possibilita ainda a visualização do início do funcionamento dos ventiladores, da entrada e da saída. À medida que a fonte de calor liberta energia a temperatura aumenta. O contrário acontece numa fase de arrefecimento. Ao observar a sequência de contornos da temperatura, conclui-se que na zona onde existe a recirculação a temperatura não varia significativamente, o que é natural, pois é a zona onde há maior varrimento. Tendo em conta os instantes finais, pode concluir-se que o processo de desenfumagem favorece a remoção de fumo e o decréscimo da temperatura, já que a temperatura retorna aos valores inicialmente definidos. É importante referir que o sistema é adequado neste caso devido ao local onde se definiu o incêndio. Caso a fonte de calor fosse colocada noutra zona, o sistema podia não ser capaz de realizar totalmente a desenfumagem do espaço sinistrado, reduzindo assim a sua eficácia.

Em suma, os objetivos estabelecidos para este trabalho foram alcançados, uma vez que se conseguiu prever o escoamento dentro do espaço e simular a ativação do processo de desenfumagem em caso de incêndio.

6.2. TRABALHOS FUTUROS

O trabalho desenvolvido não contempla certos fatores que seriam interessantes num estudo mais aprofundado. Assim, algumas propostas são enumeradas para trabalho futuro:

- Efetuar a simulação 3D para o estudo se aproximar mais da realidade;
- Implementar a equação das espécies para analisar a dispersão das mesmas;
- Inserir o incêndio noutras zonas do parque e verificar a eficácia do sistema;
- Alterar o local, a posição e até mesmo o número de ventiladores de indução;
- Adicionar uma zona de extração em frente ao ventilador de indução superior;
- Aumentar a área da zona de insuflação para tentar equilibrar as velocidades.

ANEXO A: FICHA TÉCNICA DO VENTILADOR DE INDUÇÃO

Funcionalidade e design para aplicações em garagens

OTAM



IFHT

Ventiladores de indução para induzir o fluxo de ar em estacionamentos para ventilação e para exaustão de fumaça em situações de emergência. Possuem baixo perfil, adequado para estacionamentos com pé direito baixo.



Tela de proteção. Caixa de ligação externa para conexão fácil.

Características

- Rotor centrífugo da pás curvadas para trás em aço galvanizado e balanceado de acordo com a norma ISO 1940-1, G6.3
- Carcaça do ventilador em aço galvanizado
- Caixa de ligação externa
- Fornecido com tela de aspiração
- Ventilador completo testado de forma independente e homologado de acordo com a norma EN 12101-3 a F300 (300°C/2h), e F 400 (400°C/2h)

Motores

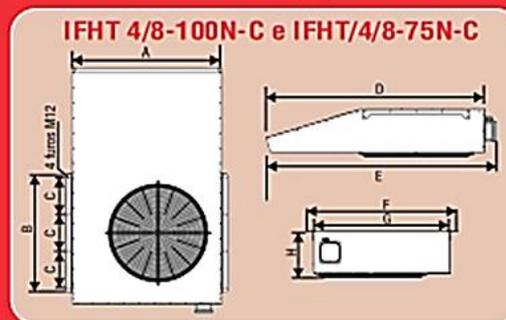
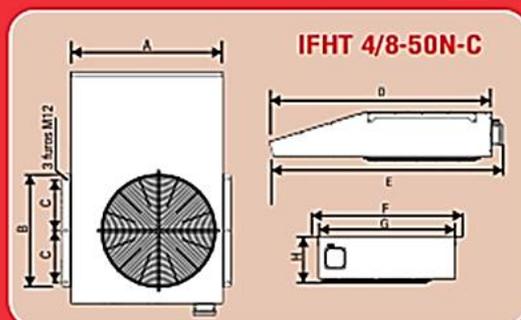
- Carcaça IEC 80 e 90 Tri-fásicos 380-400V/60Hz, IP 55
- Isolamento classe HF300, F400
- Rolamentos com vida útil L1 0-20.000 horas
- Duas velocidades 4/8 polos enrolamento Dahlander
- Temperatura ambiente máxima de 40°C para a condição normal de operação

MODELO	Pólos	Veloc. (rpm)	Empuxo (N)	Vazão (m³/h)	Potência (kW)	FLC (A)	Corrente (A)	Potência Sonora (LwA)	Pressão Sonora* (LpA) 3m	Peso (Kg)
IFHT 4/8-50N-C	4/8	1650/855	47/13	5750/2980	1.5/0.22	3.7/1.3	16/4	95/79	78/62	76
IFHT 4/8-75N-C	4/8	1700/855	72/18	8000/4020	2.5/0.45	6.1/2	30.4/7	97/82	80/65	120
IFHT 4/8-100N-C	4/8	1700/855	90/23	8900/4470	2.5/0.45	6.1/2	30.4/7	98/82	81/65	120

Sob Consulta

- Versão com caixa de ligação P 65
- Isolador elétrico também disponível, como acessório, para fixar próximo ao ventilador
- Pintura externa.

*Pressão sonora a 3 metros, hemisférica, em campo livre, para comparação.



MODELO	A	B	C	D	E	F	G	H
IFHT 4/8-50N-C	800	600	275	1232	1298	890	844	272
IFHT 4/8-75N-C	1000	800	250	1600	1666	1090	1044	337
IFHT 4/8-100N-C	1000	800	250	1600	1666	1090	1044	337



Matriz: Av. Francisco Silveira Bitencourt, 1501 - Porto Alegre/RS - Tel. 51 3349 6363 - comercialBR@solerpalau.com
Filial: Av. Brigadeiro Faria Lima, 2369 - cj.1709/1710- São Paulo/SP - Tel. 11 3539 5313 - comercialBRSP@solerpalau.com
www.solerpalau.com.br

BIBLIOGRAFIA

- ANSYS Inc. (2022a). *Ansys Fluent Theory Guide*. <http://www.ansys.com>
- ANSYS Inc. (2022b). *Ansys Fluent User's Guide*. <http://www.ansys.com>
- ANSYS Inc. (2022c). *ANSYS Meshing User's Guide*. <http://www.ansys.com>
- Barsim, M. M., Bassily, M. A., El-Batsh, H. M., Rihan, Y. A., & Sherif, M. M. (2020). Performance of impulse ventilation system in an underground car park fire: Case study. *Journal of Building Engineering*, 29. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2019.101162>
- Bernardo, C., & Pessoa, P. (2022). *Sodeca, Decflex, Seminários Sodeca, Sistemas mecânicos de controlo de fumo*.
- Cunha, P. (2014). *Estudo da Dispersão de Fumos num Parque de Estacionamento* [Dissertação de mestrado]. Universidade do Minho.
- Deckers, X., Haga, S., Tilley, N., & Merci, B. (2013). Smoke control in case of fire in a large car park: CFD simulations of full-scale configurations. *Fire Safety Journal*, 57, 22–34. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2012.02.005>
- Decreto-Lei n.º 66/95. (1995). *Decreto-lei relativo ao regulamento de segurança contra incêndio em parques de estacionamento cobertos*. Ministério da Administração Interna.
- Decreto-Lei n.º 220/2008. (2008). *Decreto-Lei referente à legislação sobre segurança contra incêndio em edifícios*.
- Gonçalves, I. H. (2022). *Thermochemical Modeling of the Forest Fire Spread* [Dissertação de mestrado]. Universidade do Minho.
- Kallianiotis, A., Papakonstantinou, D., Toliás, I. C., & Benardos, A. (2022). Evaluation of fire smoke control in underground space. *Underground Space (China)*, 7(3), 295–310. <https://doi.org/10.1016/j.undsp.2021.07.010>
- Luo, J., Zhang, X., Zhao, J., & Xu, Z. (2019). Fire experiment on temperature distribution in an underground vertical car park. *Case Studies in Thermal Engineering*, 15. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2019.100513>
- Merci, B., & Shipp, M. (2013). Smoke and heat control for fires in large car parks: Lessons learnt from research? *Fire Safety Journal*, 57, 3–10. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2012.05.001>
- Moukalled, F., Mangani, L., & Darwish, M. (2016). *The Finite Volume Method in Computational Fluid Dynamics* (Vol. 113). Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-16874-6>

- Portaria n.º 135-2020. (2020). *Portaria referente ao regulamento técnico de segurança contra incêndio em edifícios (SCIE)*. Diário da República Eletrónico (DRE).
- Portaria n.º 1532/2008. (2008). *Portaria referente à legislação sobre segurança contra incêndio em edifícios*. Ministério da Administração Interna.
- Teixeira, J., Teixeira, S. F. C., Carneiro, A. F., & Silva, A. M. (2016). Ventilation of a Bus Central Station. *Asociación Española de Ingeniería Mecánica*.
- Teixeira, J., Teixeira, S. F. C. F., Cunha, P., & Silva, A. M. (2016). *Thermal driven dispersion of smoke in a parking space* (ASME 2016 International Mechanical Engineering Congress and Exposition, Ed.).
- Tilley, N., Deckers, X., & Merci, B. (2012). CFD study of relation between ventilation velocity and smoke backlayering distance in large closed car parks. *Fire Safety Journal*, 48, 11–20. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2011.12.005>
- Versteeg, H. K., & Malalasekera, W. (1995). *An Introduction to Computational Fluid Dynamics - the finite volume method*. In Computer Physics Communications.
- Viegas, J. C. (2010). The use of impulse ventilation for smoke control in underground car parks. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 25(1), 42–53. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2009.08.003>
- Vilar, F. (2010). *Segurança Contra Incêndio em Parques de Estacionamento Cobertos* [Dissertação de mestrado, Universidade do Porto]. <http://www.fe.up.pt>
- Zhang, X. G., Guo, Y. C., Chan, C. K., & Lin, W. Y. (2007). Numerical simulations on fire spread and smoke movement in an underground car park. *Building and Environment*, 42(10), 3466–3475. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2006.11.002>