



Universidade do Minho  
Escola de Engenharia

Pedro Xavier Garim da Cunha

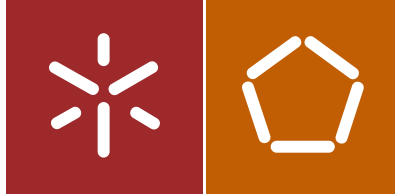
Estudo da Dispersão de Fumos  
num Parque de Estacionamento

Pedro Xavier Garim da Cunha  
Estudo da Dispersão de Fumos  
num Parque de Estacionamento

UMinho | 2014

outubro de 2014





Universidade do Minho  
Escola de Engenharia

Pedro Xavier Garim da Cunha

Estudo da Dispersão de Fumos  
num Parque de Estacionamento

Dissertação de Mestrado  
Ciclo de Estudos Integrados Conducentes ao  
Grau de Mestre em Engenharia Mecânica

Trabalho efetuado sob a orientação de  
Professor Doutor José Carlos Teixeira  
Professora Doutora Senhorinha Teixeira

## DECLARAÇÃO

Nome: Pedro Xavier Garim da Cunha

Endereço electrónico: [a58840@alunos.uminho.pt](mailto:a58840@alunos.uminho.pt)

Telefone: 915124830

Número do Bilhete de Identidade: 13941850

Título dissertação:

Estudo da dispersão de fumos num parque de estacionamento

Orientador:

José Carlos Fernandes Teixeira

Ano de conclusão: 2014

Ciclo de Estudos Integrados Conducentes ao Grau de Mestre em Engenharia Mecânica

Nos exemplares das teses de doutoramento ou de mestrado ou de outros trabalhos entregues para prestação de provas públicas nas universidades ou outros estabelecimentos de ensino, e dos quais é obrigatoriamente enviado um exemplar para depósito legal na Biblioteca Nacional e, pelo menos outro para a biblioteca da universidade respectiva, deve constar uma das seguintes declarações:

É AUTORIZADA A REPRODUÇÃO INTEGRAL DESTA TESE/TRABALHO APENAS PARA EFEITOS DE INVESTIGAÇÃO, MEDIANTE DECLARAÇÃO ESCRITA DO INTERESSADO, QUE A TAL SE COMPROMETE;

Universidade do Minho, \_\_\_/\_\_\_/\_\_\_\_\_

Assinatura: \_\_\_\_\_

## Agradecimentos

A realização desta dissertação foi influenciada por um conjunto de pessoas que estiveram diretas ou indiretamente envolvidos no desenvolvimento do meu trabalho. Desta forma, gostaria de prestar os meus agradecimentos.

Agradeço ao meu orientador, Prof. José Carlos Teixeira, que me acompanhou desde o início, mostrando uma disponibilidade e sentido de orientação que permitiu o desenvolvimento do plano de trabalho definido.

Agradeço à minha co-orientadora, Prof. Senhorinha Teixeira, que me ajudou e simplificou a resolução dos diversos problemas surgidos ao longo do tempo ao nível computacional, mais propriamente às modelações em *Ansys Fluent*.

Por último, um reconhecimento especial aos meus pais e amigos, pela confiança, estímulo e ajuda prestada ao longo de todo o meu percurso académico.

## Resumo

O presente projeto enquadra-se no âmbito da Dissertação inserida no Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica da Universidade do Minho. O projeto teve como principal objetivo analisar e estudar a dispersão de fumos provenientes de um incêndio simulado no primeiro piso do parque de estacionamento do *GuimarãesShopping*. Para tal, realizou-se a modelação computacional utilizando a ferramenta *Ansys Fluent*.

O projeto iniciou-se com uma revisão bibliográfica sobre regulamentos de segurança e problemas associados a parques de estacionamento. Estes regulamentos foram nomeadamente focalizados no que se refere ao controlo de fumos. Outros temas também pesquisados foram a computação dinâmica de fluidos, particularmente o método de volumes finitos, que envolve uma formulação numérica.

Relativamente ao *software Ansys Fluent* efetuaram-se diversas simulações de forma a replicar o processo físico. Primeiramente foram realizadas modelações num meio com características muito próximas da realidade, embora com dimensões geométricas inferiores. Esta metodologia foi adotada com o intuito de testar e aplicar os métodos e formulações de dinâmica de fluidos capazes de reproduzir o escoamento em causa. A vantagem desta opção tomada foi simplificar todo o processo numérico, diminuindo drasticamente o tempo de processamento do cálculo. Consequentemente, todos os métodos e formulações adotadas nestas modelações, em meios geometricamente menores, foram transpostos para as simulações no parque de estacionamento.

Em termos de resultados das modelações no parque de estacionamento verificou-se que as condições exteriores influenciam o desenvolvimento do escoamento no seu interior, nomeadamente a propagação de CO para o exterior depende consideravelmente da intensidade da convecção natural (vento).

**Palavras-chave:** Parques de Estacionamento; Controlo de Fumos; Volumes Finitos; Computação Dinâmica de Fluidos; *Ansys Fluent*.

## Abstract

This project is presented in the context of the Dissertation assigned in Master in Mechanical Engineering, University of Minho. The project aims to analyze and study the dispersion of fumes from a simulated fire on the first floor of the parking garage in Guimarães Shopping. This simulation was created with computer modeling using the Fluent Ansys tool.

The project began with a literature review on problems and safety regulations associated to parking. Of these regulations, smoke control was the main focus. Computing the dynamics of fluids, particularly the finite volume method, which involves a numerical formulation, was another one of the topics covered in the literature.

In regards to Ansys Fluent software, several simulations were performed in order to replicate the physical process. Firstly, the modeling was performed in an environment very close to reality, though with significantly smaller geometrical dimensions. This methodology was adopted in order to try out and implement the methods and formulations of fluid dynamics capable of reproducing the flow in question. The advantage of this option has been to simplify the whole numerical process, dramatically reducing the processing time of the calculation. Consequently, all methods and formulations adopted in these modulations were then transposed onto the simulations in parking.

In terms of results of modeling on the parking was found that external conditions influence the development of the flow within it, in particular CO propagating to the outside depends considerably on the intensity of the natural convection (wind).

**Keywords:** Car Parking; Fume Control; Finite Volume; -Computational Fluid Dynamics; Ansys Fluent.

# Índice

Agradecimentos .....	i
Resumo .....	ii
Abstract .....	iii
Lista de Siglas.....	viii
Lista de Símbolos.....	ix
Símbolos Gregos.....	x
Índice de Figuras.....	xi
Índice de Tabelas.....	xiii
Índice de Equações.....	xiv
<b>1 Introdução .....</b>	<b>1</b>
1.1 Enquadramento do Tema .....	1
1.2 Objetivos da Dissertação .....	2
1.3 Metodologia de Investigação .....	2
1.4 Organização da Dissertação .....	3
<b>2 Segurança em Parques de estacionamento .....</b>	<b>4</b>
2.1 Problemas em Parques de Estacionamento.....	4
2.2 Sistemas de Ventilação em Parques de Estacionamento.....	4
2.3 Controlo de Fumo em Caso de Incêndio .....	5
2.4 Regulamentos de Segurança contra Incêndio em Parques de Estacionamento Cobertos .....	6
2.4.1 Regulamento de Segurança contra Incêndio em Parques de Estacionamento Cobertos – Decreto-Lei nº 66/95 de 8 de Abril.....	6
2.4.2 Regime Jurídico da Segurança Contra Incêndio em Edifícios – Decreto-Lei n.º 220/2008, de 12 de Novembro .....	7
2.4.3 Regulamento Técnico de Segurança Contra Incêndio em Edifícios – Portaria n.º	



1532/2008, de 29 de Dezembro .....	8
<b>3 Computação Dinâmica de Fluidos .....</b>	<b>11</b>
3.1 Componentes de um Método de Solução Numérica .....	12
3.1.1 Modelos Matemáticos.....	12
3.1.2 Métodos de Discretização .....	18
3.1.3 Sistema de Vetores e Coordenadas.....	21
3.1.4 Malha Numérica .....	21
3.1.5 Aproximações Finitas.....	27
3.1.6 Método de Solução.....	29
3.1.7 Critério de Convergência .....	29
3.1.8 Discretização do Tempo em Regime Transiente .....	29
3.2 Propriedades dos Métodos de Solução Numérica .....	30
<b>4 Método dos Volumes Finitos .....</b>	<b>33</b>
4.1 Equação Geral do Transporte .....	33
4.2 Métodos de Definição dos Volumes de Controlo.....	34
4.3 Aproximação dos Integrais de Superfície .....	34
4.4 Aproximação dos Integrais de Volume.....	37
4.5 Interpolação e Práticas de Diferenciação .....	38
4.5.1 Interpolação <i>Upwind</i> (UDS) .....	39
4.5.2 Interpolação Linear (CDS) .....	39
4.5.3 <i>Quadratic Upwind Interpolation</i> (QUICK) .....	41
4.6 Implementação das Condições de Fronteira.....	42
4.7 Sistema de Equações Algébricas.....	42
<b>5 Definição das Modelações em <i>Ansys Fluent</i> .....</b>	<b>44</b>
5.1 Estrutura do <i>Fluent</i> .....	44

5.2	Definição das Modelações Demonstrativas (Influência das Condições de Fronteira no Escoamento).....	46
5.2.1	Condições de Fronteira.....	46
5.2.2	Concepção da Malha .....	48
5.2.3	Definição do Problema .....	51
5.2.4	Métodos de Discretização da Solução.....	52
5.2.5	Execução do Cálculo .....	53
5.3	Definição das Modelações do Incêndio no Parque de Estacionamento .....	54
5.3.1	Desenho CAD .....	54
5.3.2	Condições de Fronteira.....	55
5.3.3	Concepção da Malha .....	57
5.3.4	Definição do Problema .....	59
5.3.5	Métodos de Discretização da Solução.....	60
5.3.6	Execução do Cálculo .....	60
<b>6</b>	<b>Resultados e Discussão das Modelações em <i>Fluent</i> .....</b>	<b>61</b>
6.1	Resultados e Discussão das Modelações Demonstrativas (Influência das Condições de Fronteira no Escoamento).....	61
6.2	Resultados e Discussão da Modelação do Incêndio no Parque de Estacionamento (Primeiro Caso).....	88
6.3	Resultados e Discussão da Modelação do Incêndio no Parque de Estacionamento (Segundo Caso).....	96
<b>7</b>	<b>Conclusões .....</b>	<b>105</b>
7.1	Atividades Futuras .....	107
	Referências Bibliográficas.....	109
	Anexo I – Descrição dos artigos do Decreto-Lei nº 66/95 de 8 de Abril - Regulamento de Segurança contra Incêndio em Parques de Estacionamento Cobertos.....	113
	Anexo II – Descrição do Decreto-Lei n.º 220/2008, de 12 de Novembro – Regime Jurídico da Segurança Contra Incêndio em Edifícios.....	115

Anexo III – Planta do piso 1 do parque de estacionamento do GuimarãesShopping.....	121
Anexo IV – Resultados da Modelação do Incêndio no Parque de Estacionamento (Primeiro Caso) – Plano XZ 3 Metros (Teto).....	122
Anexo V – Resultados da Modelação do Incêndio no Parque de Estacionamento (Segundo Caso) – Plano XZ 3 Metros (Teto).....	128

## Lista de Siglas

1D	<i>One Dimensional</i>
2D	<i>Two Dimensional</i>
3D	<i>Three Dimensional</i>
CAD	<i>Computer Aid Design</i>
CDS	<i>Central Difference Scheme</i>
CFD	<i>Computational Fluid Dynamics</i>
CV	<i>Control Volume</i>
DES	<i>Detached Eddy Simulation</i>
DNS	<i>Direct Numerical Simulation</i>
LES	<i>Large Eddy Simulation</i>
MDF	Método de Diferenças Finitas
MEF	Método de Elementos Finitos
MVF	Método dos Volumes Finitos
PCI	Poder Calorífico Inferior
PISO	<i>Pressure Implicit with Splitting of Operators</i>
QUICK	<i>Quadratic Upstream Interpolation for Convective Kinematics</i>
RANS	<i>Reynolds Averaged Navier Stokes</i>
RSM	<i>Reynolds Stress Model</i>
RT-SCIE	Regulamento Técnico de Segurança Contra Incêndios em Edifícios
SAS	<i>Scale-Adaptive Simulation</i>
SIMPLE	<i>Semi-Implicit Method of Pressure-Linked</i>
SST	<i>Shear-Stress Transport</i>
UDS	<i>Upwind Differencing Scheme</i>
UT	Utilização Tipo
VF	Volume Finitos

## Lista de Símbolos

$A$	Área	[m]
$C_{1\varepsilon}, C_{2\varepsilon}, C_{3\varepsilon}$	Constantes do modelo $k-\varepsilon$	[-]
$C_u$	Constante do modelo $k-\varepsilon$	[-]
$D$	Diâmetro	[m]
$E$	Energia	[J]
$f$	Fator de atrito	[-]
$g$	Aceleração gravítica	[m/s <sup>2</sup> ]
$G_b$	Energia Cinética Turbulenta devida a efeitos de flutuabilidade	[m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ]
$G_k$	Energia Cinética Turbulenta devida a gradientes da velocidade média	[m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ]
$J_j$	Fluxo difusivo	[m <sup>2</sup> /s]
$k$	Energia Cinética Turbulenta	[m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ]
$k_{eff}$	Condutibilidade efetiva	[W/m·K]
$p$	Pressão estática	[Pa]
$Pr$	Número de <i>Prandtl</i>	[-]
$r_{ij}$	Vetor posição	[m]
$Re$	Número de <i>Reynolds</i>	[-]
$S_h$	Calor resultante de reações químicas ou outras fontes de calor	[J]
$S_k$	Valor de $k$ definido pelo utilizador	[m <sup>2</sup> /s <sup>3</sup> ]
$S_\varepsilon$	Valor de $\varepsilon$ definido pelo utilizador	[m <sup>2</sup> /s <sup>3</sup> ]
$t$	Tempo	[s]
$T$	Temperatura	[K]
$u$	Velocidade	[m/s]
$x, y, z$	Coordenadas cartesianas	[m]
$y^+$	Altura adimensional	[-]
$Y_M$	Energia Cinética Turbulenta devida a efeitos de sustentação	[J/kg]

## Símbolos Gregos

$\Phi$	Grandeza escalar	[-]
$\varepsilon$	Taxa de dissipação da energia cinética turbulenta	[m <sup>2</sup> /s <sup>3</sup> ]
$\mu$	Viscosidade dinâmica	[kg/m·s]
$\mu_t$	Viscosidade dinâmica turbulenta	[kg/m·s]
$\rho$	Massa volúmica	[kg/m <sup>3</sup> ]
$\sigma_\varepsilon$	Inverso do número de Pr efetivo para $\varepsilon$	[-]
$\sigma_k$	Inverso do número de Pr efetivo para $k$	[-]
$\tau_{eff}$	<i>Stress tensor</i>	[N/m <sup>2</sup> ]
$\omega$	Taxa de dissipação específica	[s <sup>-1</sup> ]
$\Omega$	Volume de controlo	[m <sup>3</sup> ]

## Índice de Figuras

Figura 2.1 - Representação dos gases/partículas expelidas pelos automóveis [5] .....	4
Figura 2.2 - Categorias de risco para a utilização-tipo II [10] .....	8
Figura 3.1 - Diagrama de modelos de turbulência .....	15
Figura 3.2 - Exemplo de malha ortogonal [3] .....	22
Figura 3.3 - Exemplo de malha não ortogonal [3] .....	22
Figura 3.4 - Exemplo de malha 2D, estruturada, não ortogonal [3] .....	23
Figura 3.5 - Exemplo de malha não estruturada [3] .....	24
Figura 3.6 - Exemplo de malha estrutura por blocos, com 3 blocos [3] .....	25
Figura 3.7 - Exemplo de malha estruturada em blocos, com 5 blocos [3] .....	25
Figura 3.8 - Exemplo de elementos com diferente <i>skewness</i> [13] .....	26
Figura 3.9 - Exemplo de <i>Aspect Ratio</i> em quadriláteros [13] .....	26
Figura 3.10 - Gráfico do Perfil de Velocidades [12] .....	28
Figura 3.11 - Métodos de tratamento junto à parede [13] .....	29
Figura 3.12 - <i>Plot</i> de resíduos em regime transiente [14] .....	30
Figura 4.1 - Tipos de malhas de VF: nós centrados nos CV's (esquerda) e face do CV centrada entre nós (direita) [6] .....	34
Figura 4.2 - Um típico volume de controlo e a notação usada para uma malha cartesiana 2D [6] .....	35
Figura 4.3 - Um típico volume de controlo e a notação usada para uma malha cartesiana 3D [6] .....	35
Figura 4.4 - Exemplos de moléculas computacionais em 2D e 3D [6] .....	43
Figura 5.1 – Condições de fronteira do caso 1 .....	46
Figura 5.2 - Condições de fronteira do caso 2 .....	47
Figura 5.3 - Condições de fronteira do caso 3 .....	47
Figura 5.4 – Condições de fronteira do caso 4 .....	47
Figura 5.5 - Malha do caso 1 .....	48
Figura 5.6 - Malha do caso 2 .....	49
Figura 5.7 - Malha do caso 3 .....	50
Figura 5.8 - Malha do caso 4 .....	50
Figura 5.9 – Definição do <i>solver</i> .....	51
Figura 5.10 - Desenho CAD da parte superior do parque de estacionamento .....	54
Figura 5.11 - Desenho CAD da parte inferior do parque de estacionamento .....	54
Figura 5.12 - Desenho CAD do parque de estacionamento simplificado da vista superior .....	55
Figura 5.13 - Desenho CAD do parque de estacionamento simplificado da vista inferior .....	55
Figura 5.14 - Condições de fronteira para o primeiro caso - entradas .....	56

Figura 5.15 - Condições de fronteira da modelação – saídas.....	56
Figura 5.16 - Condições de fronteira para o segundo caso .....	57
Figura 5.17 - Malha da modelação no parque de estacionamento do primeiro caso .....	57
Figura 5.18 - Malha da modelação no parque de estacionamento do segundo caso .....	58
Figura 5.19 - Energia debitada pela queima de um veículo [24].....	59
Figura 7.1 - Resistência ao fogo padrão mínima de elementos estruturais de edifícios [10] .....	117
Figura 7.2 - Áreas máximas de compartimentação corta-fogo [10].....	117
Figura 7.3 - Resistência ao fogo padrão mínima dos elementos da envolvente de locais de risco C [10] ....	117
Figura 7.4 -Resistência ao fogo padrão mínima dos elementos da envolvente de vias horizontais de evacuação interiores protegidas [10].....	118
Figura 7.5 - Proteção dos acessos a vias de evacuação verticais protegidas localizados no piso de saída para o exterior [10].....	118
Figura 7.6 - Proteção dos acessos a vias de evacuação verticais protegidas não localizados no piso de saída para o exterior [10].....	118



## Índice de Tabelas

Tabela 3.1 - Modelos de turbulência.....	14
Tabela 3.2 - Coeficientes do modelo <i>Standard k-ε</i> .....	17
Tabela 3.3 - Coeficientes do modelo <i>Realizable -ε</i> .....	17
Tabela 3.4 - Qualidade do elemento em função do valor de <i>skewness</i> .....	26
Tabela 5.1 - Características da malha.....	48
Tabela 5.2 - Características da malha.....	49
Tabela 5.3 - Características da malha.....	50
Tabela 5.4 - Características da malha.....	51
Tabela 5.5 - Modelos selecionados.....	52
Tabela 5.6 – Descrição das condições de fronteira do primeiro e terceiro caso.....	52
Tabela 5.7 - Descrição das condições de fronteira do segundo e quarto caso.....	52
Tabela 5.8 - Abordagens selecionadas para as variáveis de campo.....	53
Tabela 5.9 - Características da malha.....	58
Tabela 5.10 - Características da malha.....	58
Tabela 5.11 – Condições de fronteira das modelações no parque de estacionamento.....	60
Tabela 6.1 - Resultados da fração volúmica de CO do caso 1.....	61
Tabela 6.2 - Resultados da temperatura do caso 1.....	64
Tabela 6.3 - Resultados da fração volúmica de CO do caso 2.....	68
Tabela 6.4 - Resultados da temperatura do caso 2.....	71
Tabela 6.5 - Resultados da fração volúmica de CO do caso 3.....	74
Tabela 6.6 - Resultados da temperatura da mistura do caso 3.....	78
Tabela 6.7 - Resultados da fração volúmica do CO.....	81
Tabela 6.8 - Resultados da temperatura da mistura.....	84
Tabela 6.9 – Resultados da fração volúmica de CO no plano XZ (1.5 metros).....	88
Tabela 6.10 - Resultados do volume de cada fase aos 180s.....	91
Tabela 6.11 – Resultados da temperatura da mistura no plano XZ (1.5 metros).....	92
Tabela 6.12 – Resultados da fração volúmica de CO no plano XZ (1.5 metros).....	96
Tabela 6.13 - Resultados do volume de cada fase aos 180s.....	99
Tabela 6.13 - Resultados da temperatura da mistura no plano XZ (1.5 metros).....	101

## Índice de Equações

Equação 3.1.....	12
Equação 3.2.....	12
Equação 3.3.....	13
Equação 3.4.....	13
Equação 3.5.....	13
Equação 3.6.....	16
Equação 3.7.....	16
Equação 3.8.....	17
Equação 3.9.....	27
Equação 4.1.....	33
Equação 4.2.....	33
Equação 4.3.....	33
Equação 4.4.....	35
Equação 4.5.....	36
Equação 4.6.....	36
Equação 4.7.....	36
Equação 4.8.....	37
Equação 4.10.....	38
Equação 4.11.....	38
Equação 4.12.....	38
Equação 4.13.....	38
Equação 4.14.....	39
Equação 4.15.....	39
Equação 4.16.....	39
Equação 4.17.....	39
Equação 4.18.....	39
Equação 4.19.....	40
Equação 4.20.....	40
Equação 4.21.....	40
Equação 4.22.....	40
Equação 4.23.....	41
Equação 4.24.....	41
Equação 4.25.....	41
Equação 4.26.....	41

Equação 4.27.....	43
Equação 4.28.....	43
Equação 5.1.....	60

# 1 Introdução

Neste capítulo faz-se um breve enquadramento ao tema deste projeto, bem como uma descrição dos objetivos, da metodologia de investigação e da forma como está organizada a dissertação.

## 1.1 Enquadramento do Tema

Atualmente, o desenvolvimento global provoca nas grandes cidades uma afluência de veículos originando problemas acentuados de mobilidade e de organização urbana. O estacionamento dos veículos torna-se complicado, devido ao reduzido espaço comparativamente ao número de veículos. Para tal, a solução passa pela construção de parques de estacionamento subterrâneos, nomeadamente em centros comerciais, hospitalares e turísticos, tornando-se na melhor resolução económica e urbanística.

Além das diversas vantagens que um parque de estacionamento proporciona, tal como o aproveitamento da área útil de construção (pisos subterrâneos) e comodidade/segurança oferecida aos utilizadores, estes edifícios acarretam problemas, devido às suas características construtivas. Um dos grandes problemas é a aglomeração de gases provenientes da circulação dos veículos, os quais são extremamente prejudiciais para a saúde humana, em particular o CO. Outro problema está relacionado com a elevada carga térmica no interior, que aumenta a eventualidade de ocorrência de um incêndio.

Dependendo das características do parque, se é fechado ou semi-aberto, a colocação de um sistema de ventilação torna-se inevitável por forma a controlar os gases no seu interior. No caso pontual de ocorrência de um incêndio, este sistema de ventilação deverá também ser acionado de forma a escoar o fumo e o calor. Em parques parcialmente abertos, a constante ventilação natural (vento) elimina os problemas oriundos dos parques de estacionamento. No entanto, a sua implementação deverá ser minuciosamente estudada e analisada para que não haja possibilidade de ocorrência de tragédias no interior do parque de estacionamento.

Neste contexto, o trabalho em causa relaciona-se com uma análise da dispersão de fumos proveniente de um possível incêndio. O parque de estacionamento em causa é o piso 1 do *GuimarãesShopping*. Este parque contém algumas características especiais, o qual é parcialmente aberto nas laterais e não contém qualquer sistema de ventilação. Considerando estes aspetos, estudou-se e analisou-se um modelo computacional, capaz de verificar se é imprescindível ou não a implementação do sistema de ventilação forçada.

Este trabalho é visto como uma oportunidade de aprofundar conhecimentos no âmbito das técnicas de simulação computacional, nomeadamente utilizar e aprofundar o *software Ansys Fluent*.

## 1.2 Objetivos da Dissertação

O objetivo principal desta dissertação foi avaliar e estudar a dispersão de fumos proveniente de um incêndio simulado, tendo em conta as condições atuais do parque de estacionamento. Para tal, é realizada uma simulação computacional utilizando a ferramenta *Ansys FLUENT*. Outros objetivos são inerentes tais como:

- ◆ Análise da legislação portuguesa em parques de estacionamento;
- ◆ Definição da geometria e das condições do parque de estacionamento;
- ◆ Estudo dos métodos de dinâmica computacional de fluidos;
- ◆ Análise detalhada do método de volumes finitos;
- ◆ Desenvolvimento de um modelo computacional em *Ansys Fluent* do parque de estacionamento;

## 1.3 Metodologia de Investigação

Como qualquer projeto de dissertação, a metodologia de trabalho adotada segue diversas fases, a qual se inicia com a compreensão e definição, terminando com resultados/conclusões do problema.

A primeira fase de projeto passou pela definição do problema e objetivos, a qual foi suportada por uma pesquisa bibliográfica sobre o tema em causa. Nesta fase, a percepção da dinâmica de funcionamento e as regras/leis inerentes aos parques de estacionamento foram de carácter obrigatório. Prontamente, tendo em conta a área de trabalho em causa, a dinâmica de fluidos, a metodologia de trabalho envolveria, obrigatoriamente, uma ferramenta de simulação computacional de escoamento de fluidos. O *Ansys Fluent* foi a ferramenta CFD escolhida, o qual é um *software* robusto e capaz de simular o desempenho de qualquer meio/componente sujeito a um escoamento. A utilização desta ferramenta proporciona obrigatoriamente seguir uma metodologia de trabalho, estando esta dividida em cinco fases distintas e consecutivas (*Geometry, Mesh, Setup, Solution, Results*). A geometria está diretamente ligada ao desenho CAD, através do *SolidWorks* foram desenhados todos os desenhos 3D presentes neste projeto e posteriormente importados para o *Fluent*. A fase *Mesh*, já na plataforma *Ansys Fluent*, está relacionada com a criação da malha no meio em estudo, envolvendo métodos e regras de

acordo com o tipo de escoamento. As fases do *Setup* e *Solution* são fases, nas quais é definido o problema e os métodos/parâmetros para a resolução do mesmo. Por fim, efetuou-se um estudo e análise dos resultados obtidos nas várias modelações.

## **1.4 Organização da Dissertação**

Esta dissertação encontra-se dividida em 7 capítulos. O primeiro capítulo apresenta a introdução ao trabalho, focalizando no enquadramento do projeto, na definição dos objetivos e na metodologia de investigação.

O capítulo 2 apresenta os problemas de segurança em parques de estacionamento e os meios para os resolver, evidenciando-se os sistemas de ventilação. E por fim faz-se um levantamento da legislação portuguesa relativa a parques de estacionamento.

No capítulo 3 é apresentado a importância dos métodos numéricos na dinâmica computacional de fluidos. É também destacado os componentes de um método de solução numérica.

O capítulo 4 apresenta toda a formulação que envolve o método de discretização volumes finitos.

O capítulo 5 é referente à plataforma *Ansys Fluent*. É apresentado a sua estrutura, e definidas as condições, os modelos, as formulações e os parâmetros que envolvem as modelações em *Fluent*.

No capítulo 6 é apresentado os resultados e discussão das modelações efetuadas em *Ansys Fluent*.

No capítulo 7 apresentam-se as conclusões do projeto e propostas de melhoria para trabalhos futuros.

## 2 Segurança em Parques de estacionamento

### 2.1 Problemas em Parques de Estacionamento

Os parques de estacionamento são edifícios que apresentam problemas específicos de segurança contra incêndio, pois, habitualmente, a sua arquitetura estrutural não inviabiliza a dispersão do calor e dos fumos/gases. Este problema surge quando não existe uma intervenção adequada dos meios de proteção. Outro problema relevante está relacionado com os veículos, uma vez que utilizam combustível líquido como fonte de energia provocando um aumento da carga de incêndio para estes edifícios [5].

Dos vários gases/partículas expelidos pelos veículos automóveis, como demonstrado na figura 2.1, o mais preocupante é o monóxido de carbono, pois além de ser o que necessita de menor concentração para ser prejudicial à saúde, é um asfíxiante químico, imperceptível, sem cheiro nem sabor. Quando inspirado em quantidades suficientes (em atmosferas com 1000-2000 ppm), reduz progressivamente a capacidade de transporte de oxigénio pelo sangue, causando mal-estar. Os efeitos de intoxicação são completamente irreversíveis em atmosferas com CO acima dos 4000 ppm, provocando em casos extremos a morte, dependendo do tempo de exposição. A concentração de gás, o tempo de exposição, a intensidade da atividade física e a própria sensibilidade do indivíduo determinam a percentagem de conversão de hemoglobina em carboxihemoglobina [21].

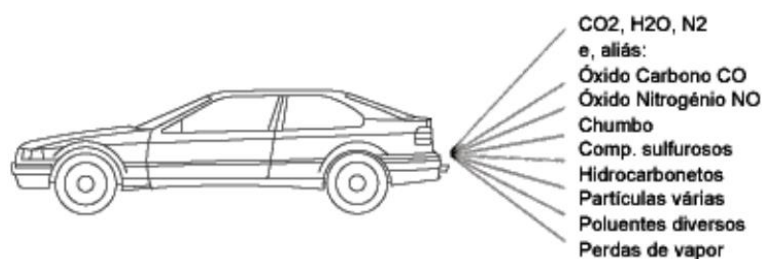


Figura 2.1 - Representação dos gases/partículas expelidas pelos automóveis [5]

### 2.2 Sistemas de Ventilação em Parques de Estacionamento

Os sistemas de ventilação em parques de estacionamento têm como objectivo primário garantir, que não se acumule monóxido de carbono em concentrações perigosas em nenhum ponto do parque; em segundo lugar, mas igualmente importante, têm de garantir a evacuação de fumo em caso de incêndio. Além destes dois pontos fundamentais, a ventilação mantém os outros agentes poluentes, produzidos pelos automóveis em níveis aceitáveis [5].

Um sistema de ventilação assegura a qualidade do ar, baseando-se num método de

varrimento através de aberturas de admissão e exaustão do ar, substituindo o ar poluído por ar novo. Este método aumenta a sua eficiência quando a captação do ar é próxima à fonte de poluição, exigindo uma compartimentação mais refinada. Em caso de incêndio, a implementação deste método contribui, significativamente, para uma exaustão do fumo distribuída e eficiente no interior do parque [5].

Um sistema de ventilação é constituído por compartimentos ao longo do parque, por ventiladores de impulso, que puxam horizontalmente o ar, libertando-o a velocidades elevadas e por ventiladores de indução que puxam verticalmente o ar, usando uma turbina para libertar o ar a velocidades elevadas. Os sistemas de desenfumagem pressupõem ventiladores axiais periféricos, os quais são capazes de insuflar e extrair os caudais necessários à manutenção da qualidade do ar no interior do parque de estacionamento [5].

A existência de obstáculos impede a uniformidade do escoamento e cria zonas de estagnação do ar poluído. Por esta razão, cada vez mais se utiliza, em parques de estacionamento cobertos, ventiladores de impulso ou de indução associados a ventiladores axiais de admissão e de exaustão de ar, posicionados na periferia. A vantagem é permitir a orientação do escoamento, gerando um varrimento global e eliminando zonas de eventual estagnação. Uma das desvantagens é promover a mistura entre o ar novo e o ar poluído, uniformizando a concentração de poluentes no interior. Esta situação por um lado é vantajosa, pois atenua os picos de concentração, por outro obriga ao escoamento de um maior volume de ar para retirar a mesma quantidade de poluentes [5].

### **2.3 Controlo de Fumo em Caso de Incêndio**

Em caso de incêndio, a ventilação deve evitar que os utilizadores respirem o fumo tóxico libertado e não percam a visibilidade que necessitam para evacuar o edifício. O fumo sobe, por consequência da elevada temperatura, e deve ser imediatamente extraído antes que este arrefeça, efeito da mistura com o ar, e baixe, dificultando a tarefa de evacuação e extinção do incêndio.

Os sistemas de controlo tradicionais de fumo baseiam-se, especificamente, pela estratificação térmica nos espaços confinados. Estes sistemas tentam manter esta estratificação, de forma a reduzir o caudal de extração e a evitar a diminuição da temperatura do fumo. Se este processo for eficiente, facilita a extração do fumo quando o efeito chaminé está presente na propagação do incêndio [5].

O confinamento de zonas com fumo surge como forma de limitar a sua propagação a outros compartimentos, diminuindo a dificuldade de evacuação dos ocupantes, mas também reduzir o



caudal de fumo diluído com o ar. Por estas razões, os sistemas tradicionais de controlo de fumo, em parques de estacionamento cobertos, são baseados na compartimentação corta-fogo.

Por ventilação de impulso, a extração do fumo é realizada por um processo de varrimento, no qual a sua velocidade evita zonas de estagnação do fumo e provoca um gradiente de pressões. Este gradiente impede a propagação do fumo a lugares adjacentes. Este sistema tem o inconveniente de promover a mistura da camada superior quente com a camada inferior fria, promovendo a eliminação da estratificação. Por consequência o caudal de fumo aumenta, necessitando de um caudal de exaustão superior ao exigido regulamentado. Por outro lado, a mistura reduz consideravelmente a temperatura, que por sua vez reduz a probabilidade de propagação do incêndio, prolongando as condições de sobrevivência no interior do parque [5].

A implementação e utilização de ventiladores de impulso ou de indução, suspensos no tecto, associados à utilização de ventiladores axiais periféricos, de insuflação e de extração, têm a vantagem de assegurar a existência de uma zona livre de fumo, o que facilita a intervenção dos bombeiros e de evacuação do edifício. A instalação deste sistema deve ser cuidadosamente analisada e projetada, de forma que os processos de controlo de fumo sejam realizados eficientemente. É também necessário analisar o comportamento entre este sistema e os sistemas de combate automático, os *sprinklers*, pois a velocidade elevada de extração interfere no fluido libertado pelos difusores ou, eventualmente anular a sua nebulização, tornando o sistema sem utilidade.

## **2.4 Regulamentos de Segurança contra Incêndio em Parques de Estacionamento Cobertos**

### **2.4.1 Regulamento de Segurança contra Incêndio em Parques de Estacionamento Cobertos – Decreto-Lei nº 66/95 de 8 de Abril**

O primeiro regulamento de Segurança contra Incêndio em Parques de Estacionamento Cobertos foi aprovado pelo Decreto-Lei nº 66/95 de 8 de Abril. Precedentemente, a regulamentação portuguesa não contemplava normas nem diretivas no que diz respeito à segurança contra incêndios em parques de estacionamento cobertos. Nestes locais era aplicado o Regulamento de Segurança contra Incêndio em Edifícios de Habitação, de 1951.

O Decreto-Lei nº 66/95 contém 54 artigos e estabeleceu as medidas básicas de segurança contra incêndios a observar em parques de estacionamento cobertos com uma área total superior a 200 m<sup>2</sup>. De salientar os artigos 16, 17, 18, 25, 26, 27, 29, 30 e 41, os quais são relativos ao controlo do fumo, em caso de incêndio, e ao controlo da poluição do ar no interior de parques

estacionamento. A descrição dos artigos acima mencionados encontra-se no anexo I.

#### **2.4.2 Regime Jurídico da Segurança Contra Incêndio em Edifícios – Decreto-Lei n.º 220/2008, de 12 de Novembro**

Em 2008, estabeleceu-se o Regime Jurídico da Segurança Contra Incêndios, anteriormente a legislação sobre segurança contra incêndio em edifícios encontrava-se dispersa por um número excessivo de diplomas, de difícil compreensão e, por vezes, diversas lacunas e omissões. Para além disso, verificava-se que para um conjunto elevado de edifícios não existiam regulamentos específicos de segurança contra incêndios.

Este Decreto-Lei engloba as disposições regulamentares de segurança contra incêndio aplicáveis a todos os edifícios e recintos, distribuídos por 12 utilizações-tipo, sendo cada uma estratificada por quatro categorias de risco de incêndio.

No capítulo I expõe as disposições e os princípios gerais do Decreto-Lei. Estes baseiam-se em reduzir a probabilidade de ocorrência de incêndios; limitar o desenvolvimento de eventuais incêndios, circunscrevendo e minimizando os seus efeitos, nomeadamente a propagação do fumo e gases de combustão; facilitar a evacuação e o salvamento dos ocupantes em risco; e permitir a intervenção eficaz e segura dos meios de socorro [10].

O capítulo II refere-se à caracterização dos edifícios e recintos, nos quais as utilizações-tipo (UT) são divididas em doze. Os parques de estacionamento enquadram-se no tipo II, que 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 [10].

A utilização-tipo II enquadra-se no local de risco C, uma vez que apresenta riscos agravados de eclosão e de desenvolvimento de incêndio devido, quer às atividades nele desenvolvidas, quer às características dos produtos, materiais ou equipamentos existentes, designadamente à carga de incêndio.

Como se verifica pela figura 2.2, a categoria do risco de incêndio, em utilizações-tipo II, depende de fatores como, a altura da utilização-tipo, a área bruta, o número de pisos abaixo do plano de referência e se o espaço é ao ar livre ou não.

Categoria	Valores máximos 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 <sup>2</sup>	≤ 1	Não
2.ª	≤ 28 m	≤ 9 600 m <sup>2</sup>	≤ 3	Não
3.ª	≤ 28 m	≤ 32 000 m <sup>2</sup>	≤ 5	Não
4.ª	> 28 m	> 32 000 m <sup>2</sup>	> 5	Não

**Figura 2.2 - Categorias de risco para a utilização-tipo II [10]**

No capítulo III, o artigo nº 15 aprova um regulamento técnico que estabelece as seguintes condições técnicas gerais e específicas da SCIE (Segurança Contra Incêndio em Edifícios), 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.

### **2.4.3 Regulamento Técnico de Segurança Contra Incêndio em Edifícios – Portaria n.º 1532/2008, de 29 de Dezembro**

A portaria tem por objecto a regulamentação técnica das condições de segurança contra incêndio em edifícios e recintos, a que devem obedecer os projetos de arquitetura e os projetos de SCIE. Estas condições gerais e específicas de SCIE referem-se 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, dos sistemas de segurança e de autoproteção [11].

De destacar, para o caso em estudo, as condições gerais dos equipamentos e sistemas de segurança. As restantes condições encontram-se resumidamente no anexo II.

#### **2.4.3.1 Condições Gerais dos Equipamentos e Sistemas de Segurança**

##### **◆ Controlo de fumo**

Os edifícios devem ser dotados de meios que promovam a libertação para o exterior do fumo e dos gases tóxicos, reduzindo a contaminação e a temperatura dos espaços, e mantendo condições de visibilidade nas vias de evacuação.

A desenfumagem é considerada passiva, quando realizada por tiragem térmica natural, ou ativa, nos casos em que se utilizem meios mecânicos. As instalações de desenfumagem passiva

compreendem aberturas para admissão de ar e aberturas para libertação do fumo, ligadas ao exterior, quer diretamente, quer através de condutas. Nas instalações de desenfumagem ativa, o fumo é extraído por meios mecânicos e a admissão de ar por via natural ou realizada por insuflação mecânica [11].

As instalações de ventilação e de tratamento de ar dos edifícios podem participar no controlo do fumo produzido no incêndio, desde que sejam satisfeitas as exigências.

Consideram-se naturalmente ventilados e desenfumados por meios passivos:

a) Os locais que apresentem fenestração direta para o exterior, desde que os respectivos vãos possam ser facilmente abertos e as vias de acesso sejam desenfumadas;

b) Os pisos dos parques de estacionamento cobertos sejam abertos;

c) Os pisos dos parques de estacionamento semi-enterrados onde, sobre duas fachadas opostas, seja possível garantirem aberturas de admissão de ar, ventilação baixa, e saída de fumo, ventilação alta, cujas bocas em ambos os casos tenham dimensões superiores a 0,06 m<sup>2</sup> por lugar de estacionamento, em condições que garantam um adequado varrimento [11].

#### ◆ **Sistemas fixos de extinção automática de incêndios**

Estes sistemas têm como objectivo a circunscrição e extinção de um incêndio que ocorra na área por eles protegida. Podem usar como agente extintor a água, produtos espumíferos, pó químico, dióxido de carbono ou outros gases extintores, desde que homologados e adequados à classe de fogo a que se destinam [11].

#### ◆ **Controlo de poluição de ar**

O sistema de controlo de poluição deve dispor de sistema automático de detecção de CO e alarme capaz de funcionar, mesmo em caso de falha de energia da rede, por um período não inferior a 60 minutos, contemplando ainda a ventilação, por meios passivos ou ativos, com as condições expressas no RT-SCIE. A utilização destes sistemas é obrigatória em parques de estacionamento cobertos.

A ventilação efectuada num parque de estacionamento prevê três situações diferentes de funcionamento, que se distinguem pelo teor de CO no ambiente:

◆ A concentração de CO não deve ultrapassar 50 partes por milhão (ppm), em valores médios durante oito horas, nem 200 ppm em valores instantâneos;

◆ Quando a concentração de CO está entre 50 ppm e 100 ppm, segundo a regulamentação

em vigor, a extração terá de ter um caudal mínimo de  $300\text{m}^3/\text{h}$  por veículo;

- ◆ Quando a concentração de CO ultrapassa as 100 ppm, segundo a regulamentação em vigor, a extração terá de ter um caudal mínimo de  $600\text{m}^3/\text{h}$  por veículo.

Quando atingida a concentração máxima de 200 ppm, os utilizadores devem ser avisados através de sinalização óptica e acústica que indique “Atmosfera Saturada CO” junto das entradas e acessos aos parques de estacionamento [11].

### 3 Computação Dinâmica de Fluidos

A Mecânica de Fluidos Computacional consiste na análise de sistemas que envolvem fluxo de fluidos, transferência de calor e reações químicas através da modelação numérica que recorre a meios computacionais.

Desde a década de sessenta, que a modelação de escoamentos de fluidos vem adquirindo importância não só como um domínio científico, mas também na resolução de problemas de engenharia. A elevada complexidade dos problemas de escoamento associada à inexistência de soluções analíticas, determinaram fortemente a aplicação de métodos numéricos na resolução destes problemas. Surgiu assim a dinâmica computacional de fluidos (*Computational Fluid Dynamic – CFD*) [3].

As técnicas CFD existentes são muito poderosas e abrangem uma vasta gama de aplicações, tais como, a aerodinâmica, a hidrodinâmica, a combustão, os processos químicos entre muitas outras áreas.

Atualmente, o engenheiro tem à sua disposição, fundamentalmente, três elementos de análise para resolver problemas, os métodos analíticos, os métodos numéricos (modulação numérica) e os métodos experimentais em laboratório.

A utilização dos métodos numéricos como abordagem a um problema tem vantagens, tais como, a redução considerável do tempo e dos custos de obtenção da solução, comparativamente às outras abordagens; os métodos numéricos são utilizados em problemas geometricamente complexos, sendo impossíveis de resolver analiticamente; os modelos numéricos dos sistemas físicos são precisos devido ao desenvolvimento avançado dos esquemas matemáticos; a evolução tecnológica na área computacional permite a obtenção de soluções realísticas [1].

Cada vez mais se realizam experiências em laboratórios, com o objetivo de utilizar os resultados na corroboração dos modelos matemáticos e numéricos, na investigação de novos fenómenos, que ainda necessitam de ser matematicamente modelados.

A tarefa de um método numérico é resolver uma ou mais equações diferenciais, substituindo as derivadas existentes na equação por expressões algébricas que envolvem a função incógnita. Um método analítico que fosse capaz de resolver as equações permitiria obter a solução de forma fechada e calcular os valores das variáveis dependentes num nível infinitesimal. Por outro lado, quando se decide efetuar uma aproximação numérica das equações diferenciais, aceita-se a solução num número discreto de pontos, prevendo que, quanto maior for este número de pontos, mais próxima da solução real será a solução numérica [3].

## 3.1 Componentes de um Método de Solução Numérica

### 3.1.1 Modelos Matemáticos

O ponto de partida de qualquer método numérico são os modelos matemáticos, sendo um conjunto de equações diferenciais parciais que caracterizam o processo. Devido à diversidade de modelos matemáticos existentes (escoamento incompressível, escoamento de *Euler*, escoamento potencial, escoamento de *Stokes*, aproximação de *Boussinesq*, aproximação de camada limite, modelo de escoamentos complexos), a sua escolha deve ser ajustada à aplicação, uma vez que cada um deles contém generalizações da conservação. [6].

#### 3.1.1.1 Equações da Conservação do Escoamento

A modelação de um sistema físico necessita de um conjunto de equações que regem o escoamento, as quais se destacam a conservação da massa, a conservação da quantidade de movimento, a conservação da massa e, ainda se for o caso, a equação da conservação das espécies químicas.

##### ◆ Conservação da massa

A conservação da massa baseia-se no princípio de que, num determinado volume de controlo, o fluxo de massa que entra é equilibrado pelo fluxo de saída.

A forma da equação de conservação da massa é apresentada na equação 3.1.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho u_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho u_z)}{\partial z} = 0 \quad \text{Equação 3.1}$$

onde  $\rho$  representa a massa volúmica do fluido,  $x_i$  ( $i=1,2,3$ )/( $x,y,z$ ) representam as coordenadas cartesianas e  $u_i$ /( $u_x, u_y, u_z$ ) representam as componentes cartesianas do vetor velocidade  $\vec{u}$ .

##### ◆ Conservação da quantidade de movimento

A conservação da quantidade de movimento também conhecida como a 2ª Lei de *Newton*, enuncia que a taxa de movimento de uma partícula do fluido é igual ao somatório das forças na partícula do fluido e segue a forma apresentada na equação 3.2.

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_j u_i)}{\partial x_j} = \frac{\partial r_{ij}}{\partial x_j} - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \rho g_i \quad \text{Equação 3.2}$$

onde  $r_{ij}$  representa o vetor posição,  $p$  a pressão estática e  $g_j$  a componente da aceleração gravitacional na direção da coordenada cartesiana  $x_j$ .

#### ◆ Conservação da energia

A conservação da energia, derivada da 1ª Lei da Termodinâmica, afirma que a taxa de energia de uma partícula do fluido é igual ao somatório da taxa de calor adicionado à partícula e à taxa de trabalho realizado na partícula.

A equação da energia apresenta a forma da equação 3.3.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho E) + \nabla(\vec{u}(\rho E + p)) = \nabla \left( k_{eff} \nabla T - \sum_j h_j \vec{J}_j + \overline{(\tau_{eff} \vec{u})} \right) + S_h \quad \text{Equação 3.3}$$

onde  $k_{eff}$  representa a condutibilidade efetiva ( $k+k_t$  a condutibilidade térmica por turbulência),  $\vec{J}_j$  o fluxo de difusão da espécie,  $\vec{u}$  o vetor velocidade,  $T$  a temperatura e  $\overline{(\tau_{eff})}$  o *stress tensor* efetivo.

Os primeiros três termos do lado direito da equação 3.3 representam, respetivamente, a transferência de energia por condução, a difusão por espécies e a dissipação viscosa. O termo  $S_h$  refere-se ao calor resultante de reações químicas e a outras fontes de calor volumétrico.

#### ◆ Conservação de espécies químicas

A equação de conservação das espécies químicas segue a forma da equação 3.4.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho Y_i) + \nabla(\rho \vec{v} Y_i) = -\nabla \vec{J}_i + R_i + S_i \quad \text{Equação 3.4}$$

onde  $Y_i$  representa a fração local de massa de cada espécie,  $R_i$  a taxa de produção da espécie  $i$  por equações químicas,  $S_i$  a taxa de adição da fase dispersa definida previamente e  $J_i$  representa o fluxo de difusão da espécie  $i$ . Em escoamento turbulento, a difusão mássica é calculada pela equação 3.5.

$$\vec{J} = - \left( \rho D_{i,m} + \frac{\mu_t}{Sc_t} \right) \nabla Y_i \quad \text{Equação 3.5}$$

onde  $Sc_t$  representa o número de *Schmidt* para a turbulência e  $D_{i,m}$  representa o coeficiente de difusão para a espécie na mistura. Por defeito, é considerado que  $Sc_t$  assume o valor de 0,7.



### 3.1.1.2 Modelos de Turbulência

O número de *Reynolds* de um escoamento é a medida relativa entre as forças de inércia e as forças viscosas. Para valores de *Reynolds* inferiores a 2000, o escoamento apresenta um comportamento suave e ordenado, denominado de regime laminar. Para valores de *Reynolds* superiores a  $5 \times 10^5$ , o fluxo torna-se instável e a direção da velocidade altera aleatoriamente, dando-se a geração de vórtices [22]. A desordem e o caos são aspetos no escoamento denominado turbulento. Os escoamentos turbulentos têm características próprias que os distinguem de um escoamento laminar, sobretudo, em regime turbulento, o escoamento é irregular e caótico, devido a movimentos aleatórios do fluido; a turbulência é uma forma tridimensional de transporte difusivo de massa; em escoamentos turbulentos, a quantidade de movimento e a energia produzem vórtices; e a modelação da turbulência exige termos adicionais nas equações de *Navier-Stokes* [7].

Os programas de CFD aplicam os modelos de turbulência, de forma a resolverem as propriedades do escoamento em cada uma das células. Sabendo que se trata de simulações de escoamentos turbulentos, a escolha do modelo apropriado é importante, uma vez que este influencia a solução do escoamento.

Tipicamente, os *softwares* CFD disponibilizam os modelos e sub-modelos de turbulência apresentados na tabela 3.1 [13].

Tabela 3.1 - Modelos de turbulência

Modelo de Turbulência	Sub-modelos
<b><i>Spalart-Allmaras</i></b>	-
<b><i>k - ε</i></b>	<i>Standard k - ε</i> <i>Renormalization-group (RNG) k - ε</i> <i>Realizable k - ε</i>
<b><i>k - ω</i></b>	<i>Standard k - ω</i> <i>Shear-stress transport (SST) k - ω</i>
<b><i>Transition k -kl - ω</i></b>	-
<b><i>Transition SST</i></b>	-
<b><i>Reynolds stress models (RSM)</i></b>	<i>Linear pressure-strain RSM</i> <i>Quadratic pressure-strain RSM</i> <i>Low-Re stress-omega RSM</i>
<b><i>Scale-Adaptive Simulation (SAS)</i></b>	-

Modelo de Turbulência	Sub-modelos
<i>Detached eddy simulation (DES)</i>	<i>Spalart-Allmaras RANS</i>
	<i>Realizable <math>k - \epsilon</math> RANS</i>
	<i>SST <math>k - \omega</math> RANS</i>
<i>Large eddy simulation (LES)</i>	<i>Smagorinsky-Lilly subgrid-scale model</i>
	<i>WALE subgrid-scale model</i>
	<i>WMLES subgrid-scale model</i>
	<i>Kinetic-energy transport subgrid-scale model</i>
<i>Direct Numerical Simulation (DNS)</i>	-

A tabela 3.1 apresenta os vários modelos disponíveis para escoamentos turbulentos, no entanto cada um deles é direcionado para um determinado tipo de escoamento. Os três modelos apresentados na figura 3.1 são direcionados para escoamentos turbulentos completamente desenvolvidos, os restantes são para escoamentos em regime de transição, não sendo abordados ao longo do trabalho.

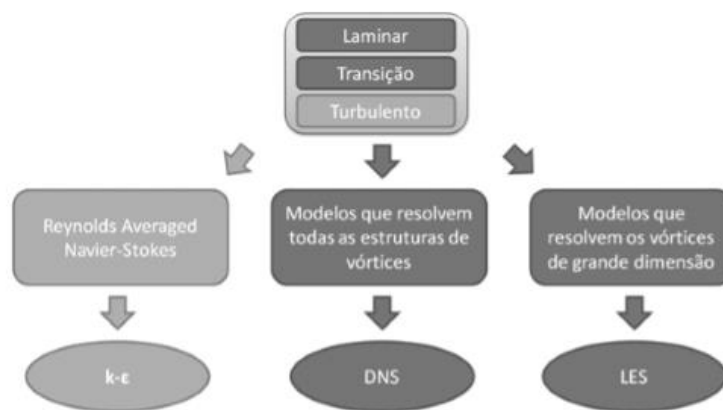


Figura 3.1 - Diagrama de modelos de turbulência

O modelo *Direct Numerical Simulation* é capaz de resolver todas as estruturas de vórtices com elevada precisão do escoamento, no entanto requer altos recursos computacionais e elevado tempo do processamento de cálculo.

O modelo *Large Eddy Simulation* é direcionado para escoamentos que apresentam vórtices de grande dimensão, produzindo bons resultados, porém os recursos computacionais e tempos de processamento do cálculo são similarmente elevados.

Os modelos de turbulência *Reynolds Averaged Navier-Stokes* (RANS) abrangem uma maior gama de escoamentos turbulentos, os quais introduzem novas variáveis na sua formulação relativamente aos restantes. Os modelos de turbulência RANS são atualmente os mais utilizados, uma vez que produzem bons resultados com baixos recursos computacionais.

Dentro dos modelos RANS, o modelo  $k-\epsilon$  é o mais utilizado e apresenta melhores resultados

em diferentes tipos de problemas.

O modelo  $k-\varepsilon$  apresenta duas equações adicionais do transporte, em que a variável  $k$  determina a energia da turbulência e a variável  $\varepsilon$  determina a taxa de dissipação da turbulência. Com estas duas variáveis é calculada uma outra variável denominada *Reynolds Stress*. Dentro do modelo  $k-\varepsilon$ , o sub-modelo *Realizabale* é o recomendado pela maioria dos *softwares*, apesar da exigência computacional ser superior ao modelo *Standard*. Seguidamente é realizada uma análise dos dois modelos.

#### ◆ Modelo $k-\varepsilon$ Standard

O modelo  $k-\varepsilon$  Standard tornou-se conhecido na solução de problemas de engenharia, por ser robusto computacional e economicamente, mas também, sobretudo, por apresentar uma precisão de resultados na maior parte dos casos práticos. É um modelo de duas equações semi-empíricas, onde são introduzidas duas novas variáveis para a modelação do escoamento, a energia cinética gerada pela turbulência ( $k$ ) e a sua taxa de dissipação ( $\varepsilon$ ) [23].

Este modelo apenas é válido para escoamentos turbulentos completamente desenvolvidos, como dito anteriormente, mas também para escoamentos em que a sua viscosidade molecular é desprezada.

As equações de transporte adicionais 3.1 e 3.2 são as utilizadas para modelar  $k$  e  $\varepsilon$ .

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( u + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b + \rho \varepsilon - Y_M + S_k \quad \text{Equação 3.6}$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( u + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + S_\varepsilon \quad \text{Equação 3.7}$$

Nas equações 3.1 e 3.2, o termo  $G_k$  representa a geração de energia cinética turbulenta devida aos gradientes da velocidade média, o termo  $G_b$  representa a energia cinética turbulenta gerada devido a efeitos de flutuabilidade. O termo  $Y_M$  representa a contribuição da dilatação flutuante em turbulência compressível. Os termos  $C_{1\varepsilon}$ ,  $C_{2\varepsilon}$  e  $C_{3\varepsilon}$  são constantes que foram determinadas experimentalmente para ar e água em várias configurações de fluxo (ver tabela 3.2), enquanto  $\sigma_k$  e  $\sigma_\varepsilon$  são números de *Prandtl* turbulentos para  $k$  e  $\varepsilon$ , respetivamente, e assumem por defeito os valores apresentados na tabela 3.2 [23].

Tabela 3.2 - Coeficientes do modelo *Standard k-ε*

Coeficiente	Valor
$C_{1\varepsilon}$	1.44
$C_{2\varepsilon}$	1.92
$C_{3\varepsilon}$	0.09
$\sigma_k$	1.0
$\sigma_\varepsilon$	1.3

Relativamente à viscosidade turbulenta,  $\mu_t$ , é determinada pela equação 3.8.

$$\mu_t = \rho C_u \frac{k^2}{\varepsilon} \quad \text{Equação 3.8}$$

#### ◆ Modelo *k-ε Realizable*

O modelo de turbulência *k-ε Realizable* deriva das mesmas equações de transporte do modelo *k-ε Standard*, no entanto as variáveis  $k$  e  $\varepsilon$  são derivadas de equações exatas, enquanto no modelo *Standard*,  $k$  advém de equações exatas e  $\varepsilon$  de formulações empíricas.

As diferenças em relação ao modelo *k-ε Standard* estão ao nível de uma nova formulação para a viscosidade turbulenta ( $\mu_t$ ), onde  $C_u$  é calculado neste modelo, enquanto no modelo *k-ε Standard* é constante. A taxa de dissipação dos vórtices ( $\varepsilon$ ) é resultante de formulações empíricas no modelo *k-ε Standard*, e neste modelo deriva de uma equação de transporte exata [23].

Esta nova formulação do modelo *k-ε Realizable* permite resultados mais precisos na separação da camada limite, em escoamentos que envolvam rotação e gradientes de pressão adversos, e em zonas de recirculação.

As constantes do modelo *k-ε Realizable* são apresentadas na tabela 3.3 e observa-se que este modelo tem menos uma constante em relação ao modelo *k-ε Standard*, uma vez que  $C_u$  é calculado [23].

Tabela 3.3 - Coeficientes do modelo *Realizable -ε*

Coeficiente	Valor
$C_{1\varepsilon}$	1.44
$C_{2\varepsilon}$	1.90
$\sigma_k$	1.0
$\sigma_\varepsilon$	1.2

#### 3.1.1.3 Modelos Multifásicos

A evolução da dinâmica computacional de fluidos forneceu uma concepção mais aprofundada de fluxos multifásicos. Atualmente existem duas abordagens para o cálculo numérico de

escoamentos multifásicos, a abordagem *Euler-Lagrange* e a *Euler-Euler*.

Na abordagem *Euler-Euler*, as fases são tratadas matematicamente como interpenetrando contínuas, uma vez que o volume de uma fase não é ocupado por outras fases. O conceito de fração volúmica de fases é introduzido, a qual é considerada função contínua no espaço e tempo, e o seu valor máximo é igual a um. As equações de conservação para cada fase são derivadas para obter um conjunto de equações, que têm estrutura similar para todas as fases. Estas equações são fechadas através de relações constitutivas que são obtidas a partir de informações empíricas [4].

Os três modelos multifásicos *Euler-Euler* vulgarmente utilizados são o modelo do *Volume of Fluid* (VOF), o modelo de *Mixture* e o modelo *Eulerian*.

O modelo *Volume of Fluid* modela dois ou mais fluidos imiscíveis, sendo resolvido por um conjunto de equações do momento e, em que a fração volúmica de cada fase é inquirida ao longo do domínio. Este modelo é aplicado em casos em que é necessário analisar a superfície entre dois fluidos imiscíveis, ou em casos, de fluxos estratificados, fluxos *free-surface* ou *filling* [17].

O modelo de Mistura é essencialmente uma simplificação do modelo Euleriano multi-fluido. Este modelo utiliza as propriedades médias de cada fase definidas em todo o domínio e permite que as fases se movimentem com velocidades diferentes entre si. Contudo, o modelo Mistura não apresenta a solução das equações da continuidade e de quantidade de movimento em cada fase, mas apenas para a mistura. Esta simplificação baseia-se no equilíbrio local entre fases, implicando que a partícula presente na fase dispersa assume a velocidade terminal nas condições locais à sua posição. Por fim, uma relação deve ser proposta para a velocidade de escorregamento entre as fases (*slip*) [4].

Comparando os modelos, o método Mistura resolve a equação da energia para a mistura das fases, enquanto o método Euleriano é um método mais complexo, pois resolve as equações de energia, de conservação de massa e do momento para cada fase. Se a solução do problema solicitar menor exigência computacional, o modelo Mistura é o recomendado, uma vez que resolve um menor número de equações que o modelo Euleriano. Se a solução exigir alta precisão, o modelo Euleriano é a melhor opção. No entanto, a complexidade do modelo Euleriano torna-o menos estável, computacionalmente, do que o modelo de Mistura [4].

### 3.1.2 Métodos de discretização

Após a seleção dos modelos matemáticos escolhe-se o método de discretização, que aproxima as equações diferenciais por um sistema de equações algébricas. Os métodos de discretização mais conhecidos são o Método das Diferenças Finitas (MDF), o Método dos Volumes

Finitos (MVF) e o Método dos Elementos Finitos (MEF).

Todos os métodos produzem bons resultados, mas para tal é necessário conceber uma malha suficientemente robusta. Contudo, alguns métodos são mais adequados do que outros para determinadas categorias de problemas.

### 3.1.2.1 Método das Diferenças Finitas

O método das Diferenças Finitas é o método de resolução de equações diferenciais parciais introduzido por *Euler* no século XVIII.

O ponto de partida é a conservação da equação na forma diferencial. A equação é aproximada, substituindo as derivadas parciais por termos de valores das funções nos nós da malha. O resultado é uma equação algébrica por nó da malha, na qual o valor da variável num certo número de nós vizinhos assume como incógnita [3].

Para obter aproximações para a primeira e segunda derivada da variável em função das coordenadas, são usadas expansões em séries de *Taylor* ou regressões polinomiais. Quando necessário, estes métodos são também aplicados para obter os valores das variáveis em locais fora dos nós da malha (por interpolação) [3].

Em malhas estruturadas, este método é muito simples e eficaz. A conservação não é inerente ao método e existem limitações em problemas complexos, o que tornam este método de discretização pouco utilizado.

### 3.1.2.2 Método dos Volumes Finitos

O método dos volumes finitos utiliza, como ponto de partida, a forma integral da equação da conservação. O domínio de solução é dividido num número finito de volumes de controlo e em cada um é aplicada a equação da conservação. No centróide de cada volume de controlo localiza-se um nó computacional, no qual são calculados os valores das variáveis. No entanto, os valores das variáveis nas superfícies dos volumes de controlo são obtidos por interpolação em função dos valores nodais. Os integrais de volume e de superfície são aproximados usando fórmulas de quadratura apropriadas. Como resultado, obtém-se uma equação algébrica para cada volume de controlo, na qual apresenta os valores das variáveis de um determinado nó e dos nós vizinhos [3].

O método de volumes finitos aplica-se a qualquer tipo de malha, por isso adapta-se perfeitamente a geometrias complexas. A malha define as fronteiras do volume de controlo e não necessita de uma relação com um sistema de coordenadas.

Esta aproximação é, distintamente, a de compreensão mais simples, uma vez que os termos

aproximados apresentam significado físico, tornando-a muito popular.

A desvantagem deste método, em relação ao método de diferenças finitas, é o facto de métodos de segunda ordem superiores são mais difíceis de desenvolver em 3D, com malhas não estruturadas.

### 3.1.2.3 Método dos Elementos Finitos

O método dos elementos finitos é similar ao método dos volumes finitos em vários aspectos. O domínio é dividido num conjunto discreto de elementos finitos que normalmente são não estruturados. Em 2D, são tipicamente utilizados triângulos ou quadriláteros, enquanto em 3D são tetraedros ou hexaedros.

O aspecto que diferencia o método dos elementos finitos é o facto de as equações serem multiplicadas por uma função peso antes de serem integradas sobre todo o domínio. Na forma mais simples do método dos elementos finitos, a solução é aproximada por uma função linear com os elementos de uma maneira a garantirem continuidade da solução através das fronteiras dos elementos [3].

Uma vantagem importante do método dos elementos finitos é a capacidade para lidar com geometrias arbitrárias. As malhas são facilmente refinadas em regiões de interesse, pois em cada elemento há a possibilidade de ser fragmentado em vários elementos. O método de elementos finitos é relativamente fácil de analisar matematicamente e são os mais adequados para determinados tipos de equações. O principal inconveniente, que é partilhado por todos os métodos que usam malhas não estruturadas, é o facto de as matrizes das equações linearizadas não serem tão bem definidas como as das malhas estruturadas, fazendo com que seja mais difícil encontrar métodos de resolução eficientes [3].

### 3.1.2.4 Acoplamento da Pressão-Velocidade

Os algoritmos de acoplamento, entre a pressão e velocidade, frequentemente utilizados em simulações, são o SIMPLE (*Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations*) e o PISO (*Pressure-Implicit with Splitting of Operators*). Ambos algoritmos utilizam partes com estimativa e correção e são baseados no método de *Chorin*. Estes métodos delimitam o campo de velocidade através de um campo de pressão estimado, resolvendo a equação de conservação de quantidade de movimento. O campo de pressão deve ser alterado a fim de satisfazer a equação de conservação de massa.

O algoritmo SIMPLE desenvolvido por *Patankar* (1980) relaciona a correção da velocidade

com a correção de pressão a partir da equação de conservação de quantidade de movimento. A correção de pressão é obtida de forma a garantir a conservação da massa. Uma vez que a solução da equação de correção é conseguida, o valor da pressão no centro do volume de controlo e o fluxo de massa nas faces dos volumes de controlo são corrigidos através de um fator de relaxamento da pressão.

O algoritmo PISO desenvolvido por Issa (1986) apresenta uma estimativa melhor do campo de velocidade e pressão comparativamente ao algoritmo SIMPLE. O procedimento é semelhante ao SIMPLE, no entanto apresenta dois níveis de correção de velocidade e pressão. A vantagem do esquema PISO no *Fluent* é utilizar uma correção associada à malha não ortogonal. Esta correção é definida como *Skewness Correction*, que tem como objetivo reduzir expressivamente a dificuldade de convergência em malhas não estruturadas.

O algoritmo PISO necessita de um intervalo maior de tempo para cada iteração, embora possa diminuir acentuadamente o número de iterações necessárias para atingir a convergência, nomeadamente em regime transiente. Posto isto, aconselha-se para regimes transientes o algoritmo PISO, uma vez que requer um menor número de iterações comparativamente ao algoritmo SIMPLE.

### **3.1.3 Sistema de Vetores e Coordenadas**

As equações de conservação podem ser descritas em várias formas diferentes, dependendo do sistema de coordenadas e do sistema de vetores utilizados. Para diversas aplicações, o sistema de coordenadas pode ser cartesiano, cilíndrico, esférico e curvilíneo ortogonal ou não ortogonal, o qual pode ser fixo ou móvel. A escolha depende do escoamento em causa, e, conseqüentemente influencia a seleção do método de discretização e o tipo de malha [6].

Também é preciso selecionar a base na qual os vetores e tensores serão definidos (fixos ou variáveis, covariantes ou contravariantes).

### **3.1.4 Malha Numérica**

Os pontos em que as variáveis são calculadas, são definidos pelas malhas numéricas as quais são, essencialmente, uma representação discretizada do domínio geométrico no qual o problema é resolvido. A malha divide o domínio da solução num número finito de sub-domínios (elementos ou volumes de controlo) [3].

A geração da malha é de vital importância, dela depende a exatidão da solução, tipicamente quanto maior for o número de células, maior será a precisão do resultado. Por outro lado, é muito



importante equilibrar o número de células com a rapidez de cálculo, sendo estes dois factores de natureza oposta. Existem vários tipos de malhas como demonstrado em seguida.

#### 3.1.4.1 Tipos de Malha

##### ◆ Malhas ortogonais e não ortogonais

Os métodos computacionais baseados em sistemas de coordenadas ortogonais (ou Cartesianos) ou cilíndricos apresentam diversas limitações em geometrias irregulares. Em problemas geométricos complexos e frequentemente irregulares, caso se utilizem malhas ortogonais, são mapeados de acordo com a figura 3.2.

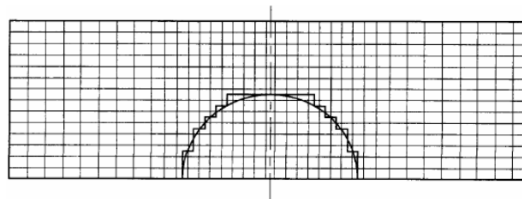


Figura 3.2 - Exemplo de malha ortogonal [3]

Para calcular o fluxo que passa em torno do cilindro da figura 3.2, utilizando malhas ortogonais, a fronteira é representada por uma aproximação e as células localizadas no interior da parte sólida do cilindro não são consideradas no cálculo [3].

Outra desvantagem da utilização de sistemas de coordenadas ortogonais é o desperdício de recursos de armazenamento, pois a introdução de uma malha ortogonal fina numa região de interesse particular implica o refinamento inútil de outra região de interesse mínimo [3].

Os métodos de adaptação das malhas aos sólidos ou sistemas de malhas não ortogonais têm vindo a ser desenvolvidos para superar as limitações referidas anteriormente e são cada vez mais utilizadas nos códigos computacionais. A figura 3.3 apresenta uma malha não ortogonal adaptada a um cilindro.

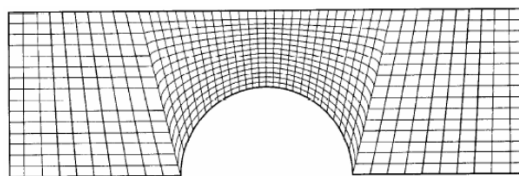


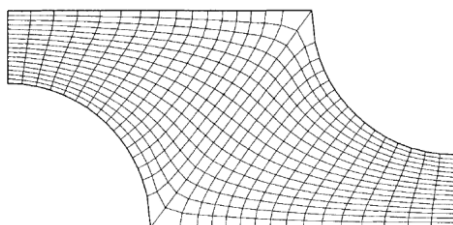
Figura 3.3 - Exemplo de malha não ortogonal [3]

A flexibilidade geométrica oferecida por técnicas de adaptação de malhas a sólidos é muito importante na modelação de problemas práticos, envolvendo geometrias irregulares. Estas técnicas são de extrema importância, uma vez que os detalhes geométricos são incorporados de uma forma precisa e as propriedades da malha são controladas para alcançar características úteis em regiões de interesse. As equações governantes com malhas não ortogonais são, contudo,

muito mais complexas do que as suas malhas ortogonais equivalentes. Deste modo, nos códigos computacionais o recurso a malhas não ortogonais é cada vez mais preferível, dados os requisitos de armazenamento adicionais associados às malhas ortogonais. Contudo, as malhas não ortogonais requerem procedimentos especiais, de forma assegurar o cálculo correto da cinemática de deslizamento e do acoplamento pressão-velocidade, evitando campos de pressão irrealistas [3].

#### ◆ Malhas estruturadas e não estruturadas

As malhas não-ortogonais dividem-se em dois grupos: malhas estruturadas e malhas não-estruturadas. Esta classificação está relacionada com a disposição relativa dos diferentes elementos. Nas malhas estruturadas, os elementos são dispostos em famílias de linhas, em que membros de uma determinada família não se cruzam uns com os outros e atravessam cada membro de outras famílias apenas uma vez. Isto permite que as linhas de um determinado conjunto sejam numeradas consecutivamente. A posição de qualquer ponto (ou volume de controlo) da malha é numerada dentro do domínio sendo identificado de maneira única por um conjunto de dois (em 2D) ou três (em 3D) índices, por exemplo  $(i,j,k)$ . Esta é a estrutura de malha mais simples, uma vez que é logicamente equivalente a uma malha ortogonal (Cartesiana) [3]. Um exemplo de uma malha estruturada é apresentado na figura 3.4.



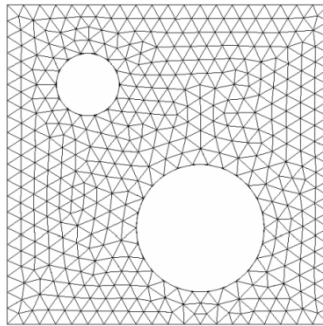
**Figura 3.4 - Exemplo de malha 2D, estruturada, não ortogonal [3]**

Esta conectividade entre células vizinhas simplifica a programação, e a matriz do sistema de equações algébricas apresenta uma estrutura regular, que é resolvida por técnicas de resolução adequadas. De facto, existem várias metodologias eficientes para resolver apenas malhas estruturadas.

A desvantagem das malhas estruturadas é que estas apenas são aplicadas em domínios com geometrias de complexidade média.

Outra desvantagem é a dificuldade de distribuição dos pontos na malha, uma concentração de células numa região da malha, por razões de precisão de cálculo implica necessariamente menor espaçamento em outras regiões do domínio e o conseqüente desperdício de recursos [3].

Para geometrias muito complexas, o tipo mais flexível de malhas é o que consegue adaptar-se sem quaisquer limitações à fronteira do domínio de solução, designadas por malhas não estruturadas, conforme ilustrado na figura 3.5.



**Figura 3.5 - Exemplo de malha não estruturada [3]**

Teoricamente, estas malhas são usadas em qualquer método de discretização, mas adaptam-se melhor às aproximações por volumes finitos ou por elementos finitos. Os elementos ou volumes de controlo têm qualquer forma e não há qualquer restrição ao número de elementos vizinhos ou vértices. Na prática, malhas feitas de triângulos ou quadriláteros, em 2D, e tetraedros ou hexaedros, em 3D, são as mais frequentemente utilizadas [3].

A vantagem da flexibilidade conduz a desvantagem da irregularidade da estrutura dos dados e o aumento da complexidade da formulação.

A matriz do sistema de equações algébricas já não tem estrutura diagonal regular e a largura da banda necessita ser reduzida por reordenação dos elementos. Os algoritmos que resolvem os sistemas de equações algébricas são necessariamente mais lentos que os algoritmos para malhas estruturadas.

As malhas não estruturadas, tipicamente, são usadas com elementos finitos e, crescentemente, com volumes finitos. Os códigos computacionais para malhas não estruturadas são mais flexíveis, não necessitam ser alterados quando a malha é localmente refinada, ou quando elementos ou volumes de controlo de diferentes formas são usados, contudo, a geração de malhas e o pré-processamento são habitualmente mais complexos [3].

### ◆ Malhas estruturadas por blocos

Com o objectivo de contornar algumas limitações associadas à utilização de malhas estruturadas convencionais, foi desenvolvido o conceito de malhas estruturadas por blocos. Neste tipo de malhas existem dois (ou mais) níveis de subdivisão do domínio de solução. Dentro de cada subdivisão (bloco) é criada uma malha estruturada. Neste tipo de malhas é necessário um tratamento especial nas interfaces dos blocos [3]. Na figura 3.6 é apresentada uma malha estruturada por blocos com continuidade nas interfaces que mapeia uma geometria 2D em torno de um cilindro, e cuja geometria contém três blocos.

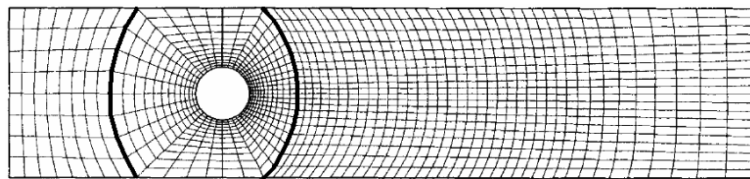


Figura 3.6 - Exemplo de malha estrutura por blocos, com 3 blocos [3]

Na figura 3.7 está ilustrada uma malha estruturada por blocos sem continuidade nas interfaces que foi usada para mapear o domínio em torno de uma asa.

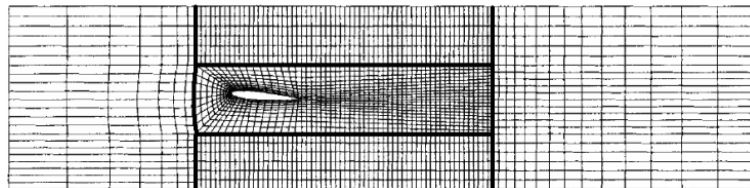


Figura 3.7 - Exemplo de malha estruturada em blocos, com 5 blocos [3]

Este exemplo demonstra a flexibilidade destas malhas quando comparada com as malhas estruturadas simples, pois permite o uso de malhas mais refinadas em regiões limites onde é necessária maior precisão de cálculo. A interface sem continuidade é tratada de uma forma totalmente conservativa. A programação deste tipo de malhas é mais complexa do que a dos casos anteriores.

#### 3.1.4.2 Avaliação da Malha

É indispensável perceber quais são as zonas críticas do escoamento, pois requerem um refinamento da malha. Além de uma malha que se adapte ao problema é necessário avaliar a qualidade dos elementos da malha. As características mais importantes relativas à qualidade dos elementos da malha são a *Skewnes*, a *Orthogonal Quality* e o *Aspect Ratio*.

◆ **Skewness**

Esta característica está relacionada com a perfeição da geometria do elemento, como representado na figura 3.8.

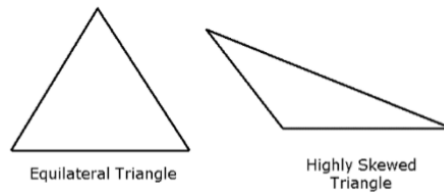


Figura 3.8 -Exemplo de elementos com diferente *skewness* [13]

Na tabela 3.4 é apresentada a qualidade do elemento em função do *skewness*.

Tabela 3.4 - Qualidade do elemento em função do valor de *skewness*

Valor de <i>Skewness</i>	Qualidade do Elemento
1	Inaceitável
0.9 - <1	Mau
0.75-0.9	Pobre
0.5-0.75	Aceitável
0.25-0.5	Bom
>0 – 0.25	Excelente
0	Equiangular

Os elementos com elevado valor de *skewness* não são aceites, uma vez que as equações dos modelos assumem que os elementos são aproximadamente equiangulares.

◆ **Orthogonal Quality**

É a característica relativa à qualidade ortogonal do elemento e varia também entre 0 e 1. Onde 1 diz respeito a um elemento perfeitamente ortogonal e 0 representa um elemento imperfeito.

◆ **Aspect Ratio**

É a razão entre a base e a altura do elemento, esta característica é um bom indicador na avaliação da malha, mas não é tão relevante como o *Skewness* e a *Orthogonal Quality*. Na figura 3.9 está um exemplo de *Aspect Ratio* em quadriláteros.



Figura 3.9 - Exemplo de *Aspect Ratio* em quadriláteros [13]

### 3.1.5 Aproximações Finitas

A seguir à escolha do tipo de malha é necessário definir as aproximações a utilizar nos diferentes processos de discretização. No método de diferenças finitas, as aproximações devem ser efetuadas nas derivadas dos pontos da malha. No método dos volumes finitos, tem-se de definir as aproximações nos métodos de aproximação da superfície e dos integrais dos volumes. No método de elementos finitos, tem-se de escolher as funções forma (elementos) e as funções peso [6].

Existem várias possibilidades de escolher, umas já existentes e outras, ainda, por criar, no entanto a sua escolha irá influenciar a precisão da aproximação. O aumento da precisão faz com que aumente o número de nós, que por sua vez dificulta o desenvolvimento do método de solução, a sua codificação e a sua alteração.

Posto isto, é necessário efetuar uma ponderação entre a simplicidade, a facilidade de execução, a precisão e a eficiência computacional.

#### ◆ Tratamento Próximo da Paredes

Os escoamentos são expressivamente afetados junto às paredes, sendo causadoras de vórtices e turbulência. As variáveis velocidade e pressão variam significativamente junto às paredes.

Posto isto, torna-se importante a introdução de uma variável designada altura adimensional ( $y^+$ ). O valor desta variável influencia o número de elementos da malha, tipicamente junto às paredes, o valor de  $y^+$  é próximo de 1, exigindo malhas refinadas, enquanto para valores crescentes admite-se malhas progressivamente grosseiras. O valor de  $y^+$  é influenciado pela massa volúmica ( $\rho$ ), pela velocidade ( $u$ ) e pela tensão de corte ( $\tau_0$ ) do fluido, como se verifica pela equação 3.9.

$$y^+ = \frac{u}{\sqrt{\frac{\tau_0}{\rho}}} \quad \text{Equação 3.9}$$

De acordo a Mecânica de Fluidos, sabe-se que o desenvolvimento da camada limite próximo da parede se divide em três secções (*layers*), na primeira secção (*viscous sub-layer*, em que  $0 < y^+ < 5$ ) o escoamento é laminar, por esse motivo a viscosidade molecular é um fator relevante para o cálculo da transferência de calor e a quantidade de movimento. A secção intermédia ( $5 < y^+ < 35$ ) é a zona de transição do escoamento laminar para o turbulento. A secção mais afastada da parede

( $y^+ > 35$ ), mas ainda na zona de desenvolvimento da camada limite, o escoamento já é completamente turbulento, por isso a viscosidade turbulenta ( $\mu$ ) e a própria turbulência são variáveis importantes para o cálculo da Transferência de Calor e a quantidade de movimento[13].

A figura 3.10 demonstra as três secções de acordo com o perfil universal de velocidades. Verifica-se que o perfil de *Von Karman*, não é preciso junto às paredes comparativamente aos restantes, para tal nesta zona é aconselhado a utilização da formulação da sub-camada.

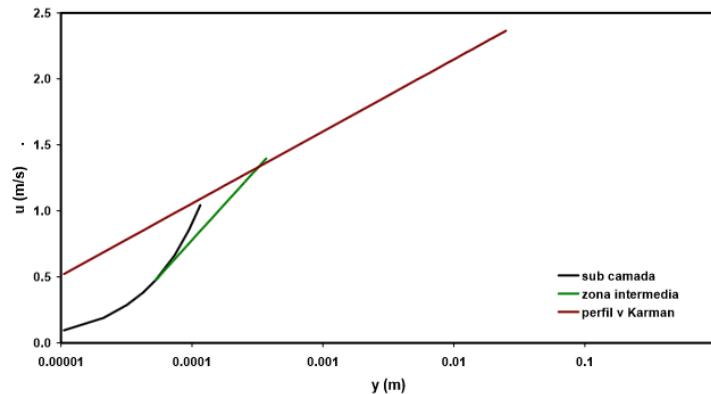


Figura 3.10 - Gráfico do Perfil de Velocidades [12]

Os programas CFD permitem modelar o escoamento junto às paredes, aliado a uma malha refinada nessa zona, como demonstrado na figura 3.11. No entanto para escoamentos complexos isso torna-se computacionalmente difícil. Para tal, os *softwares CFD* resolvem esta situação com uma aproximação diferente, a qual é feita com recurso a formulações empíricas que permitem estimar o valor das variáveis do escoamento na zona junto à parede. Estas formulações são conhecidas como *Wall Function*, que permitem modelar o desenvolvimento do escoamento com malhas comparativamente mais grosseiras, como demonstrado na figura 3.11.

A abordagem *Wall Function* permite o uso das funções *Standard Wall*, que apresentam resultados razoáveis para a maioria dos casos com números de *Reynolds* elevados. Também permite o uso das funções *Non-Equilibrium Wall* para situações de fluxo instável e gradientes de pressão adversos [13].

Apesar de mais exigente computacionalmente, a abordagem *Near-Wall model* é a recomendada, sempre que possível, uma vez que os resultados são mais precisos, nomeadamente com números de *Reynolds* baixos.

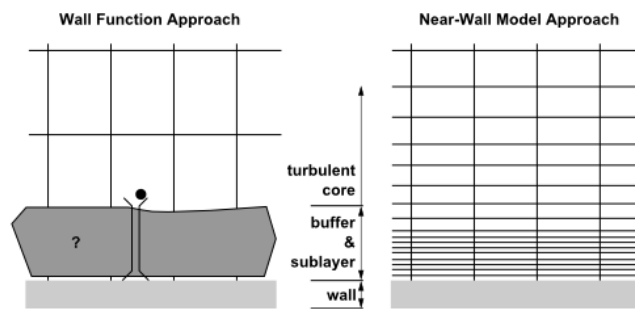


Figura 3.11 - Métodos de tratamento junto à parede [13]

### 3.1.6 Método de Solução

A discretização gera um enorme sistema de equações algébricas não-lineares. O método de solução depende do problema, para fluxos instáveis, os problemas de valor inicial são resolvidos por equações diferenciais ordinárias, para problemas de fluxo constante são normalmente resolvidos por “pseudo-time marching” ou um esquema de iteração equivalente [6].

Quando as equações são não-lineares, um esquema de iteração é usado para resolvê-los. Estes métodos utilizam a linearização sucessiva das equações e os sistemas lineares resultantes são quase sempre resolvidos por técnicas iterativas. A seleção do tipo de método de solução está depende do tipo malha e do número de nós envolvidos em cada equação algébrica [6].

### 3.1.7 Critério de Convergência

Por último, é necessário definir o critério de convergência para o método iterativo. Normalmente existem dois níveis de iterações: iterações internas, dentro da qual a equação linear é resolvida; e as iterações externas, que lidam com a não-linearidade e acoplamento das equações. Decidir quando parar o processo iterativo em cada nível é importante, de ambos dos pontos de vista da precisão e da eficiência [6].

### 3.1.8 Discretização do Tempo em Regime Transiente

Em regime transiente, o modelo numérico não é discretizado apenas no espaço, é também necessário fornecer informação quanto à discretização no tempo.

Na execução do cálculo é definido o número de iterações por *step*, o *time step* e o número de *time steps*. O número de iterações por *step* deve ser definido de forma que em cada *step* a convergência seja alcançada. O *time step* deve ser definido o mínimo possível, de forma que os parâmetros dependentes do tempo sejam resolvidos com precisão. No entanto, valores muito reduzidos fazem aumentar o tempo de processamento do cálculo. Posto isto, é necessário uma ponderação entre a precisão da solução e o tempo de cálculo.



A figura 3.12 demonstra em regime transiente a variação dos resíduos para cada equação. O número de iterações entre cada pico corresponde a um *time step*.

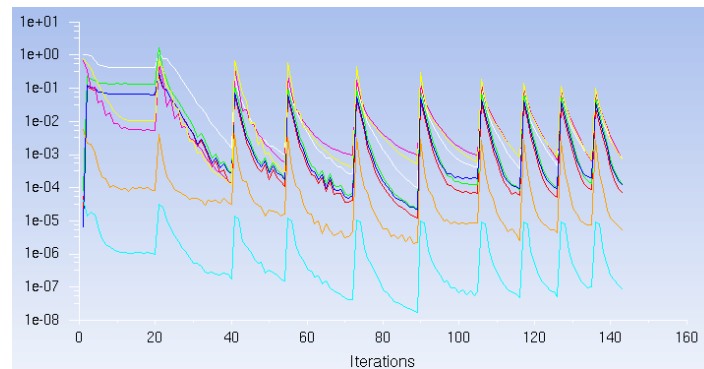


Figura 3.12 - Plot de resíduos em regime transiente [14]

### 3.2 Propriedades dos Métodos de Solução Numérica

Os métodos de solução numérica contêm diversas propriedades. Na maior parte dos casos, não é possível analisar por completo o método de solução. As propriedades mais importantes encontram-se resumidamente de seguida.

#### ◆ Consistência

A diferença entre a equação discretizada e a exatidão é chamada de erro de truncamento. É geralmente estimado, substituindo todos os valores nodais na aproximação discreta, por uma expansão em série de Taylor sobre um único ponto. Como resultado, recupera a equação diferencial original mais o remanescente, que representa o erro de truncamento. Para um método ser considerado consistente, o erro de truncamento deve ser próximo de zero quando o espaçamento de malha tender para zero [6].

Mesmo que as aproximações sejam consistentes, isso não significa necessariamente que a solução do sistema de equação discretizada seja a solução exata da equação diferencial. Para que isso aconteça, o método de solução tem que ser estável.

#### ◆ Estabilidade

Um método de solução numérica é dito ser estável, se os erros que surgem durante o processo de solução numérica não aumentam. Para os métodos iterativos, um método estável é aquele que não diverge. A estabilidade é difícil de investigar, sobretudo quando as condições de fronteira e as não-linearidades estão presentes. Por esta razão, é tipicamente comum avaliar a estabilidade de um método para problemas lineares com coeficientes constantes e sem equações de fronteira [6].

#### ◆ **Convergência**

Um método numérico é considerado convergente se a solução das equações discretizadas tenderem para a solução exata da equação diferencial, mas também se o espaçamento da malha tender para zero [6].

O *Teorema de Equivalência de Lax* é um teorema fundamental na análise da solução numérica de equações diferenciais parciais. O teorema mostra que para analisar um problema de valor inicial ou que dependa do tempo, duas tarefas devem ser feitas; analisar a condição de consistência, levando a determinar o erro de truncamento e a sua ordem; e analisar as propriedades da estabilidade [20].

Se o método é estável e se todas as aproximações usadas no processo de discretização são consistentes, tipicamente a solução converge para uma solução independente da malha.

#### ◆ **Conservação**

Uma vez que as equações a serem resolvidas ajustam-se às leis da conservação, o esquema numérico deve também local e globalmente respeitar essas leis. Se a forma de conservação das equações e do método de volumes finitos é utilizada, a conservação é garantida para cada volume de controle individual e para todo o domínio da solução [6].

A conservação é uma propriedade importante do método de solução, uma vez que impõe uma restrição no erro da solução.

Os regimes não-conservativos, tipicamente, produzem fontes artificiais e dissipadoras, alterando o equilíbrio tanto local como globalmente. No entanto, os regimes não-conservadores são consistentes e estáveis e, portanto, conduzir a correções das soluções nas malhas muito finas. Tipicamente os erros devido a regimes não-conservativos são apreciativos em malhas grosseiras [6].

#### ◆ **Boundedness**

As soluções numéricas devem ficar dentro dos limites adequados. Fisicamente quantidades não-negativas (como a densidade, a energia cinética de turbulência) devem ser sempre positivas; outras grandezas, tais como concentrações, devem situar-se entre 0% e 100%. Na ausência de fontes, algumas equações (por exemplo, a equação do calor para a temperatura quando não há fontes de calor presentes) exige que o valor máximo e mínimo da variável sejam encontradas nas fronteiras do domínio. Estas condições devem ser herdadas pela aproximação numérica [6].

*Boundedness* é um fator difícil de garantir. Todos os esquemas de alta ordem podem produzir soluções ilimitadas; felizmente, isso geralmente acontece somente em malhas muito grosseiras,

em que uma solução com *undershoots* e *overshoots*, geralmente indicam de que os erros da solução são grandes e a malha carece de algum refinamento (pelo menos localmente). O problema é que os regimes propensos à produção de soluções sem limites podem ter problemas de estabilidade e convergência [6].

#### ◆ **Realizability**

Os modelos dos fenômenos são demasiados complexos para tratar diretamente (por exemplo, a turbulência, combustão, ou fluxo multifásico), portanto devem ser projetados para garantir soluções fisicamente realistas. Isto não é uma questão numérica, por si só, mas os modelos que não são realizáveis, por vezes, causam métodos numéricos divergentes. Quando se quer implementar um modelo num código de CFD, é preciso ter cuidado com esta propriedade [6].

#### ◆ **Precisão**

As soluções numéricas de um escoamento e transferência de calor são soluções aproximadas. Para além dos erros que possam ser introduzidos no decurso do desenvolvimento do algoritmo de solução, na programação ou configuração das condições de fronteira, as soluções numéricas incluem sempre três tipos de erros sistemáticos [6]:

- *Modeling errors*, os quais são definidos como a diferença entre o escoamento real e a solução exata do modelo matemático;
- *Discretization errors*, definido como a diferença entre a solução exata das equações de conservação e a solução exata do sistema algébrico de equações obtido pela discretização dessas mesmas equações;
- *Iteration errors*, definido como a diferença entre as soluções exatas e as iterativas do sistema de equações algébricas.

Os *modeling errors* dependem dos pressupostos efetuados nas derivadas das variáveis das equações do transporte. Estes erros são considerados como desprezáveis em fluxos laminares, uma vez que as equações de *Navier-Stokes* representam um modelo suficientemente preciso do fluxo. No entanto, para fluxos turbulentos, escoamentos bifásicos ou combustão, os erros de modelação são tipicamente propensos a surgir. Os erros de modelação também são introduzidos aquando da simplificação da geometria do domínio da solução e das condições de fronteira [6].

As aproximações da discretização introduzem erros que diminuem à medida que a malha é refinada, sendo a ordem da aproximação uma medida da precisão.

## 4 Método dos Volumes Finitos

O conceito chave usado durante toda a formulação de volumes finitos é o princípio da conservação de uma determinada quantidade física expressa pelas equações governativas sobre qualquer volume finito, também denominado volume de controlo. Assume-se que o campo de velocidades e propriedades do fluido são conhecidos. O domínio é discretizado num conjunto de volumes de controlo não sobrepostos, que são irregulares no tamanho e na forma. Os valores de uma variável  $\phi$  são armazenados no centroide dos volumes de controlo. As equações discretizadas da variável dependente  $\phi$  são obtidas integrando a equação governativa sobre cada um dos volumes de controlo do domínio [2].

### 4.1 Equação Geral do Transporte

A equação geral do transporte de uma qualquer grandeza escalar  $\phi$  em regime transiente tem a forma da equação 4.1.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\phi) + \nabla(\rho u\phi) = \nabla(T\nabla\phi) + Q \quad \text{Equação 4.1}$$

em que  $t$  é o tempo;  $\rho$  a massa volúmica;  $u$  a velocidade do fluido,  $T$  o coeficiente de difusão e  $Q$  o termo fonte.

O 1º termo do lado esquerdo da equação 4.1 é a componente transiente, que descreve a variação de  $\phi$  ao longo do tempo. O segundo termo representa a componente convectiva que traduz o transporte da grandeza escalar  $\phi$  no campo de velocidades.

No lado direito da equação 4.1, o primeiro termo designa o transporte de  $\phi$  causado por difusão e o último termo representa a fonte. Entende-se por fonte, todas as forças que possam atuar no fluido que está confinado a um volume de controlo, sejam estas, forças de superfície (tensão superficial, tensões de corte, pressão) ou internas (gravidade, forças electromagnéticas).

Em coordenadas cartesianas e forma tensorial, a equação 4.1 é escrita a 1D pela equação 4.2.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\phi) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u\phi) = \frac{\partial}{\partial x}\left(T\frac{\partial\phi}{\partial x}\right) + Q \quad \text{Equação 4.2}$$

Enquanto a 2D, a equação terá a forma da equação 4.3.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\phi) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u\phi) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v\phi) = \frac{\partial}{\partial x}\left(T\frac{\partial\phi}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(T\frac{\partial\phi}{\partial y}\right) + Q \quad \text{Equação 4.3}$$

Em que  $u$  e  $v$  são as componentes da velocidade segundo os eixos  $xx$  e  $yy$ , respetivamente.

## 4.2 Métodos de Definição dos Volumes de Controlo

Os volumes de controlo são tipicamente definidos por uma malha adequada e é atribuído ao nó computacional o centro do volume de controlo. No entanto, para malhas estruturadas existe a possibilidade de primeiro definir a localização dos nós e construir os volumes de controlo em torno deles, fazendo com que os nós não se centrem no volume de controlo, como apresentado na figura 4.1. Os nós em que são aplicadas as condições de fronteira são indicados como símbolos cheios [6].

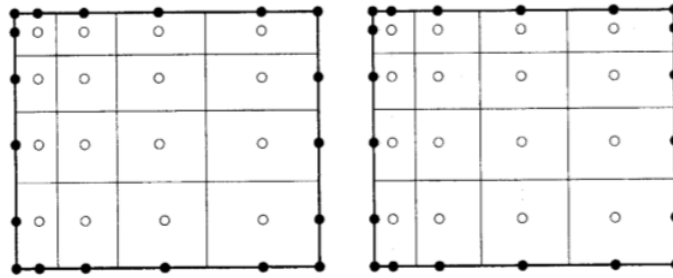


Figura 4.1 - Tipos de malhas de VF: nós centrados nos CV's (esquerda) e face do CV centrada entre nós (direita) [6]

A vantagem do primeiro método é que o valor nodal representa a média de todo o volume, sendo a precisão maior (segunda ordem) do que no segundo método, uma vez que o nó está localizado no centroide do volume de controlo. A vantagem do segundo método é que as aproximações, pela abordagem CDS (*Central Difference Scheme*), das derivadas nas faces do volume de controlo são mais precisas quando a face está no centro entre dois nós [6].

Existem outras variantes especializadas para o método de volumes finitos, tais como esquemas de vértice celular, sistemas de dupla-malha, entre outros. Os princípios de discretização são os mesmos para todas as variantes – apenas se tem em consideração a relação entre as várias localizações dentro do volume de integração [6].

A equação da conservação integral aplica-se a cada volume de controlo, bem como para todo o domínio da solução. Se se somar as equações de todos os volumes de controlo, obtém-se a equação da conservação global, uma vez que os integrais de superfície sobre as faces internas do volume de controlo anulam-se. Assim, a conservação global está incorporada no método e isso proporciona uma das suas principais vantagens.

Para a obtenção de uma equação algébrica para um determinado volume de controlo, os integrais de superfície e de volume precisam de ser aproximados usando fórmulas de quadratura.

## 4.3 Aproximação dos Integrais de Superfície

Nas figuras 4.2 e 4.3, os volumes de controlo cartesianos 2D e 3D são apresentados

juntamente com a sua própria notação. A superfície do volume de controlo consiste em quatro (em 2D) ou seis (em 3D) faces planas, indicadas por letras minúsculas, correspondentes à sua direção (e, w, n, s, t e b) comparativamente ao nó central (P). O caso 2D é considerado como um caso especial de um 3D em que as variáveis dependentes são independentes do eixo dos zz [6].

O fluxo que atravessa a fronteira do volume de controlo é a soma dos integrais sobre quatro (em 2D) ou seis (em 3D) faces do CV, como apresentado na equação 4.4.

$$\int_S f dS = \sum_k \int_{S_k} f dS \quad \text{Equação 4.4}$$

onde  $f$  é a componente do vetor de fluxo convectivo ( $\rho\phi v \cdot n$ ) ou difuso ( $T grad \phi \cdot n$ ) na direção normal à face do volume de controlo. Como a velocidade do fluxo e as propriedades do fluxo são conhecidas, a variável  $\phi$  é a única desconhecida. Se a velocidade do fluxo não é conhecida, tem-se um problema mais complexo, envolvendo equações não-lineares [6].

Para se manter a conservação, é importante que os volumes de controlo não se sobrepõem; cada face do volume de controlo é a mesma para dois volumes de controlo que se encontram lado a lado, como demonstrado na figura 4.2 para 2D e na figura 4.3 para 3D.

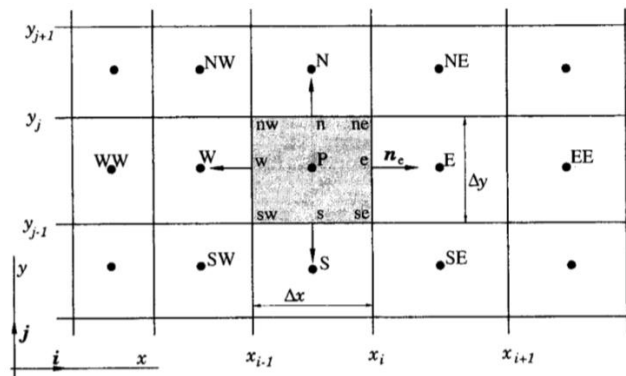


Figura 4.2 - Um típico volume de controlo e a notação usada para uma malha cartesiana 2D [6]

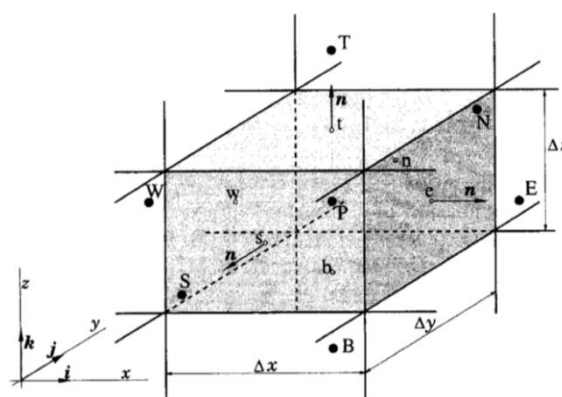


Figura 4.3 - Um típico volume de controlo e a notação usada para uma malha cartesiana 3D [6]

Para calcular o integral de superfície na equação 4.4, será necessário conhecer o integrando  $f$  de todos os locais na superfície  $S_e$ . Esta informação não está disponível, uma vez que só os valores nodais (centro do volume de controlo) de  $\phi$  são calculados, portanto é necessário introduzir uma aproximação. A melhor solução é usar dois níveis de aproximação [6]:

- ◆ O integral é aproximado em termos de valores da variável numa ou mais localizações na face da célula;
- ◆ Os valores da face-célula são aproximados em termos dos valores do nó (centro do volume de controlo).

A aproximação mais simples para o integrando é a regra do ponto médio, em que o integral é aproximado como um produto do integrando no centro da célula-face (que por si só é uma aproximação para o valor médio sobre a superfície) e a área da célula de face, como apresentado na equação 4.5.

$$F_e = \int_{S_e} f \, dS = \bar{f}_e S_e \approx f_e S_e \quad \text{Equação 4.5}$$

Esta aproximação do integral, desde que o valor de  $f$  no local 'e' é conhecido, é exata de segunda ordem.

Uma vez que o valor de  $f$  não está disponível no centro da face-célula 'e', este tem de ser determinado por interpolação. A fim de preservar a segunda ordem da aproximação do integral de superfície, o valor de  $F_e$  tem que ser calculado com precisão, de pelo menos, de segunda ordem [6].

Outra aproximação de segunda ordem do integral de superfície em 2D é a regra trapezoidal, como apresentado na equação 4.6.

$$F_e = \int_{S_e} f \, dS \approx \frac{S_e}{2} (f_{ne} + f_{se}) \quad \text{Equação 4.6}$$

Neste caso, é necessário avaliar o fluxo nos cantos do volume de controlo.

Para aproximação de ordem superior dos integrais de superfície, o fluxo deve ser avaliado em mais de dois locais. A aproximação de quarta ordem é a regra de *Simpson*, que estima o integral sobre  $S_e$ , apresentado na equação 4.7.

$$F_e = \int_{S_e} f \, dS \approx \frac{S_e}{6} (f_{ne} + 4f_e + f_{se}) \quad \text{Equação 4.7}$$

Neste caso, os valores de  $f$  são necessários em três locais, no centro da face da célula 'e' e em

dois cantos, 'ne' e 'se'. A fim de manter a precisão de quarta ordem estes valores têm de ser obtidos por interpolação dos valores dos nós, com pelo menos, a precisão quanto a regra de *Simpson*. Os polinómios cúbicos são os adequados [6].

Em 3D, a regra do ponto médio é novamente a mais simples aproximação de segunda ordem. As aproximações de ordem superior, que exigem o integrando em diferentes locais para além do centro da face da célula (por exemplo, cantos) são possíveis, mas tornam-se mais difícil de implementar.

Se a variação de  $f$  é assumida para obter uma forma simples (por exemplo, um polinómio de interpolação), a integração é fácil. Neste caso, a precisão da aproximação depende da ordem das funções forma [6].

#### 4.4 Aproximação dos Integrais de Volume

Alguns termos nas equações de transporte exigem integração sobre o volume de controlo. A aproximação de segunda ordem mais simples é substituir o integral do volume pelo produto do valor médio do integrando e o volume do CV, como demonstrado na equação 4.8.

$$Q_p = \int_{\Omega} q d\Omega = \bar{q} \Delta\Omega \approx q_p \Delta\Omega \quad \text{Equação 4.8}$$

onde  $q_p$  representa o valor de  $q$  no centro do CV. Este valor é facilmente calculado, uma vez que todas as variáveis estão disponíveis no nó P, não sendo necessário a interpolação. A aproximação anterior torna-se exata se  $q$  for constante ou variar linearmente dentro do CV, caso contrário, a aproximação contém um erro de segunda ordem [6].

Uma aproximação de ordem superior exige os valores de  $q$  em mais locais do que apenas no centro. Estes valores têm de ser obtidos pela interpolação dos valores nodais ou, de forma equivalente, usando as funções forma.

Em 2D o integral do volume torna-se uma área integral. Uma aproximação de quarta ordem é obtida utilizando a função forma bi-quadrática, como apresentada na equação 4.9.

$$q(x, y) = a_0 + a_1x + a_2y + a_3x^2 + a_4y^2 + a_5xy + a_6x^2y + a_7xy^2 + a_8x^2y^2 \quad \text{Equação 4.9}$$

Os nove coeficientes da equação 4.9 são obtidos ajustando a função aos valores de  $q$  nos nove locais ("nw", "W", "sw", "n", P, "s", "NE", "e" e "SE", ver figura 4.2). Em 2D a integração (para malhas cartesianas) apresenta a forma da equação 4.10.



$$Q_p = \int_{\Omega} q d\Omega \approx \Delta x \Delta y \left[ a_0 + \frac{a_3}{12} (\Delta x)^2 + \frac{a_4}{12} (\Delta y)^2 + \frac{a_8}{144} (\Delta x)^2 (\Delta y)^2 \right] \quad \text{Equação 4.10}$$

Apenas quatro coeficientes necessitam de ser determinados, no entanto dependem dos valores de  $q$  em todos os nove locais listados acima. Assim, numa malha cartesiana uniforme obtém-se a equação 4.11.

$$Q_p = \frac{\Delta x \Delta y}{36} (16q_p + 4q_s + 4q_n + 4q_w + 4q_e + 4q_{se} + 4q_{sw} + 4q_{ne} + 4q_{nw}) \quad \text{Equação 4.11}$$

Uma vez que apenas o valor de  $P$  está disponível, a interpolação deve ser utilizada para obter  $q$  nos outros locais. Esta tem de ser pelo menos de quarta ordem para manter a precisão da aproximação do integral [6].

A aproximação anterior de quarta ordem do integral de volume em 2D é usada para aproximar os integrais de superfície em 3D. As aproximações de ordem superior aos integrais de volume, em 3D são mais complexas, mas são encontrados usando as mesmas técnicas [6].

## 4.5 Interpolação e Práticas de Diferenciação

As aproximações dos integrais requerem os valores da variável em outros locais do que apenas nos nós computacionais. O integrando, denotado nas seções anteriores por  $f$  (componente convectiva ou difusa), envolve o produto de uma série de variáveis e/ou gradientes variáveis nesses locais, como demonstrado nas equações 4.12 e 4.13.

$$f^c = \rho \phi v \cdot n \quad \text{para o fluxo convectivo} \quad \text{Equação 4.12}$$

$$f^d = \Gamma \text{grad} \phi \cdot n \quad \text{para o fluxo difuso} \quad \text{Equação 4.13}$$

Assume-se que o campo de velocidades e as propriedades dos fluidos são conhecidos em todos os locais. Para o cálculo dos fluxos convectivos e difusos, o valor de  $\phi$  e do seu gradiente normal à face da célula num ou em mais locais na superfície do volume de controlo são indispensáveis. Os integrais de volume dos termos fonte também são necessários. Estes têm de ser expressos em termos de valores nodais por interpolação. Em particular, demonstra-se como o valor de  $\phi$  e sua derivada normal na face da célula "e" é aproximada [6].

### 4.5.1 Interpolação *Upwind* (UDS)

Aproximando  $\phi$  pelo seu valor no nó a montante (*node upstream*) de "e" é equivalente a usar uma aproximação *forward-difference* para a primeira derivada (dependendo da direção do fluxo), daí o nome *upwind differencing scheme (UDS)* para esta aproximação. Em UDS,  $\phi_e$  é aproximado como apresentado na equação 4.14.

$$\phi_e = \begin{cases} \phi_P & \text{if, } (v \cdot n)_e > 0; \\ \phi_E & \text{if, } (v \cdot n)_e < 0. \end{cases} \quad \text{Equação 4.14}$$

Esta é a única aproximação que satisfaz de forma incondicional o critério de fronteira, isto é, nunca vai produzir soluções oscilatórias [6].

A expansão em série de Taylor sobre  $P$  dá a equação 4.15 (malhas cartesiana e  $(v \cdot n)_e > 0$ ).

$$\phi_e = \phi_P + (x_e - x_P) \left( \frac{\partial \phi}{\partial x} \right)_P + \frac{(x_e - x_P)^2}{2} \left( \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} \right)_P + H, \quad \text{Equação 4.15}$$

onde  $H$  significa termos de ordem superior. A aproximação UDS mantém apenas o primeiro termo do lado direito, por isso é um sistema de primeira ordem. O termo do erro de truncamento (equação 4.16) é difusivo, isto é, assemelha-se a um fluxo difusivo.

$$f_e^d = \Gamma_e \left( \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) \quad \text{Equação 4.16}$$

O coeficiente numérico, artificial ou difusivo falso é apresentado na equação 4.17.

$$\Gamma_e^{num} = (pu)_e \frac{\Delta x}{2} \quad \text{Equação 4.17}$$

Esta difusão numérica é ampliada em problemas multidimensionais se o fluxo for oblíquo à malha; o erro de truncamento então produz difusão na direção normal ao fluxo [6].

### 4.5.2 Interpolação Linear (CDS)

Outra aproximação direta para o valor do volume de controlo – o centro da face – é uma interpolação linear entre os dois nós mais próximos. No local "e" numa malha cartesiana (ver 4.2) a interpolação adquire a forma da equação 4.18.

$$\phi_e = \phi_E \lambda_e + \phi_P (1 - \lambda_e) \quad \text{Equação 4.18}$$

Onde o fator de interpolação linear  $\lambda_e$  (equação 4.19) é definido pela equação 4.19.

$$\lambda_e = \frac{x_e - x_P}{x_E - x_P} \quad \text{Equação 4.19}$$

A equação 4.18 é de segunda ordem como é demonstrado usando a expansão da série de Taylor de  $\phi_E$  sobre o ponto  $x_P$ , eliminando a primeira derivada na equação 4.15., obtém o resultado da equação 4.20.

$$\phi_e = \phi_E \lambda_e + \phi_P (1 - \lambda_e) - \frac{(x_e - x_P)(x_E - x_e)}{2} \left( \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} \right)_P + H \quad \text{Equação 4.20}$$

O termo erro de truncamento é proporcional ao quadrado do espaçamento da malha, tanto em malhas uniformes como em malhas não-uniformes [6].

Tal como acontece com todas as aproximações de ordem superior a um, este modelo pode produzir soluções oscilatórias. Este é o esquema mais simples de segunda ordem, sendo o mais utilizado.

O pressuposto de um perfil linear entre os nós  $P$  e  $E$  também oferece uma aproximação simples do gradiente (equação 4.21), a qual é necessária para a avaliação dos fluxos difusivos.

$$\left( \frac{\partial \phi}{\partial x} \right)_e \approx \frac{\phi_E - \phi_P}{x_E - x_P} \quad \text{Equação 4.21}$$

Usando a expansão em série de Taylor em torno de  $\phi_e$  demonstra-se que o erro de truncamento das aproximações acima é o apresentado na equação 4.22.

$$\varepsilon_T = \frac{(x_e - x_P)^2 - (x_E - x_e)^2}{2(x_E - x_P)} \left( \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} \right)_e - \frac{(x_e - x_P)^3 - (x_E - x_e)^3}{6(x_E - x_P)} \left( \frac{\partial^3 \phi}{\partial x^3} \right)_e + H \quad \text{Equação 4.22}$$

Quando o local "e" está a meia distância entre  $P$  e  $E$  (por exemplo, numa malha uniforme), a aproximação é de segunda ordem, uma vez que o primeiro termo do lado direito desaparece e o termo erro é então proporcional a  $(\Delta x)^2$ . Quando a malha não é uniforme, o termo erro é proporcional ao produto de  $(\Delta x)$ . Apesar da precisão de primeira ordem, a redução do erro em malhas refinadas é semelhante ao de uma aproximação de segunda ordem, mesmo em malhas não-uniformes [6].

### 4.5.3 Quadratic Upwind Interpolation (QUICK)

Esta melhoria lógica aproxima o perfil da variável entre  $P$  e  $E$  por uma parábola, em vez de uma linha reta. Para construir uma parábola, precisa-se de dados em mais do que um ponto. De acordo com a natureza da convecção, o terceiro ponto utilizado é o ponto a montante, isto é,  $W$  se o fluxo é de  $P$  para  $E$  e se  $u_x > 0$  ou  $EE$  se  $u_x < 0$ , como comprovado pela figura 4.2. Assim, tem-se a equação 4.23.

$$\phi_e = \phi_U + g_1(\phi_D - \phi_U) + g_2(\phi_U - \phi_{UU}) \quad \text{Equação 4.23}$$

em que  $D$ ,  $U$  e  $UU$  significam o nó a jusante, o primeiro nó a montante e o segundo nó a montante, respectivamente ( $E$ ,  $P$ , e  $W$  ou  $P$ , e  $EE$ , dependendo do sentido do fluxo). Os coeficientes  $g_1$  e  $g_2$  são expressos pelas coordenadas nodais como demonstrado nas equações 4.24 e 4.25.

$$g_1 = \frac{(x_e - x_U)(x_e - x_{UU})}{(x_D - x_U)(x_D - x_{UU})} \quad \text{Equação 4.24}$$

$$g_2 = \frac{(x_e - x_U)(x_D - x_e)}{(x_U - x_{UU})(x_D - x_{UU})} \quad \text{Equação 4.25}$$

Para malhas uniformes, os coeficientes dos três valores nodais envolvidos na interpolação acabam por ser  $3/8$  para o ponto a jusante,  $6/8$  para o primeiro nó a montante e  $-1/8$  para o segundo nó a montante. Este esquema é um pouco mais complexo do que o esquema  $CDS$ , uma vez que a molécula computacional se estende em mais do que um nó em cada direção (em  $2D$ , os nós  $EE$ ,  $WW$ ,  $NN$  e  $SS$  estão incluídos), e, nas malhas não-ortogonais e/ou não-uniforme, as expressões para os coeficientes  $g_i$  não são tão simples [6].

Este esquema de interpolação quadrática tem um erro de truncamento de terceira ordem nas malhas uniformes e não-uniformes. Isto é demonstrado através da eliminação da segunda derivada da equação 4.20 usando  $\phi_w$ , no qual numa malha cartesiana uniforme com  $u_z > 0$ , obtém-se a equação 4.26.

$$\phi_e = \frac{6}{8}\phi_P + \frac{3}{8}\phi_E - \frac{1}{8}\phi_W - \frac{3(\Delta x)^3}{48} \left( \frac{\partial^3 \phi}{\partial x^3} \right)_P + H \quad \text{Equação 4.26}$$

Os três primeiros termos do lado direito da equação 4.26 representam a aproximação *QUICK*,

enquanto o seguinte termo representa o erro de truncamento principal. Embora a aproximação *QUICK* é mais precisa do que a aproximação CDS, ambos os modelos convergem de uma forma assintoticamente de segunda ordem [6].

#### 4.6 Implementação das Condições de Fronteira

Cada volume de controlo fornece uma equação algébrica. Os integrais de volume são calculados da mesma forma para cada controlo de volume, mas os fluxos através das faces dos volumes de controlo coincidem com o limite do domínio, as quais necessitam de um tratamento especial. Estes fluxos de fronteira devem ser conhecidos ou serem expressos como uma combinação entre os valores interiores e os dados de fronteira. Uma vez que estes fluxos não fornecem equações adicionais, não apresentando incógnitas adicionais. Como não há nós fora do limite, essas aproximações devem ser baseadas em diferenças unilaterais ou extrapolações [6].

Geralmente, os escoamentos convectivos são definidos na fronteira do fluxo. Este tipo de escoamentos é nulo nas paredes impermeáveis e nos planos de simetria, e também são geralmente considerados independentes da coordenada normal à saída de um fluxo na fronteira. Neste caso, as aproximações *upwind* podem ser utilizadas. Os fluxos difusivos são por vezes especificados numa parede, por exemplo, um fluxo de calor específico (incluindo o caso especial de uma superfície adiabática), ou os valores da fronteira são definidos. Em tal caso, os fluxos difusivos são avaliados usando aproximações unilaterais para gradientes normais. O próprio gradiente é utilizado para calcular o fluxo, e uma aproximação para o fluxo em termos de valores nodais é usado para calcular o valor da variável na fronteira [6].

#### 4.7 Sistema de Equações Algébricas

O resultado do processo de discretização é um sistema de equações algébricas, as quais podem ser lineares ou não-lineares de acordo com a natureza das equações diferenciais parciais. No caso de não-linear, as equações discretizadas devem ser resolvidas por uma técnica de iteração, uma linearização das equações sobre essa solução e uma melhoria da solução. O processo é repetido até que a convergência do resultado seja alcançada [6].

A soma, de todas as aproximações do fluxo e termos da fonte, produz uma equação algébrica, a qual relaciona o valor da variável no centro do volume de controlo com os valores próximos. O número de equações e incógnitas são ambos iguais ao número de volumes de controlo, de forma que o sistema seja bem definido. A equação algébrica de um volume de controlo tem a forma da equação 4.27.

$$A_{P\phi P} + \sum_l A_l \phi_l = Q_P \quad \text{Equação 4.27}$$

onde  $P$  significa o nó em que a equação diferencial parcial é aproximada e o índice  $l$  é executado ao longo dos nós vizinhos. O nó  $P$  e os seus vizinhos formam a chamada molécula computacional; dois exemplos, os quais resultam de aproximações de segunda e de terceira ordem, são apresentados na figura 4.4. Os coeficientes de  $A_l$  dependem das propriedades do fluido e, para as equações não-lineares, os próprios valores das variáveis. O  $Q_p$  contém todos os termos das variáveis desconhecidas [6].

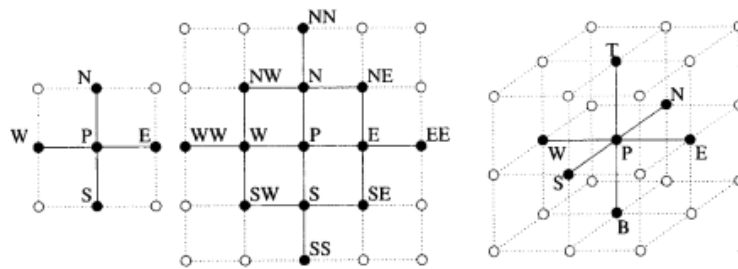


Figura 4.4 - Exemplos de moléculas computacionais em 2D e 3D [6]

Existindo uma equação para cada nó da malha, o conjunto destas equações algébricas lineares devem ser resolvidas numericamente. O sistema é escrito na notação de matriz como apresentado na equação 4.28.

$$A\phi_i = Q \quad \text{Equação 4.28}$$

onde  $A$  é a matriz de coeficientes,  $\phi_i$  é um vetor (ou matriz coluna) que contém os valores das variáveis nos nós da malha e  $Q$  é o vetor que contém os termos do lado direito da equação 4.27.

A estrutura da matriz  $A$  depende da ordem das variáveis do vetor  $\phi$ . Para malhas estruturadas, se as variáveis forem tituladas a partir de um canto, e linha após linha atravessarem de forma regular (ordenação lexicográfica), a matriz tem uma estrutura poli-diagonal. Isto só é verdade para as malhas estruturadas com volumes de controlo quadriláteros ou hexaedros; para outras geometrias, a estrutura da matriz torna-se mais complexa [6].

## 5 Definição das Modelações em *Ansys Fluent*

Neste capítulo são apresentados os procedimentos, os modelos, as abordagens e os parâmetros aplicados, nos vários casos de estudo, em *Ansys Fluent*.

O objetivo do caso em estudo, a simulação de um incêndio no parque de estacionamento do *GuimarãesShopping*, é analisar como a concentração de CO, proveniente do incêndio, reage e dispersa-se ao longo do tempo no seu interior.

Previamente à modelação principal realizaram-se simulações demonstrativas num meio de menores dimensões, mas com características de escoamento e de geometria similares. Estas simulações realizaram-se com o intuito de aplicar, testar e compreender os conceitos que caracterizam o escoamento em causa. De um modo geral, estes conceitos são ao nível da malha (tipo e método de concepção da malha e parâmetros de malha), dos modelos do escoamento, das abordagens de discretização e iteração e parâmetros intrínsecos à modelação em *Fluent*.

As modelações demonstrativas num meio significativamente menor tem como grande objetivo reduzir consideravelmente o tempo de processamento, tornando assim possível a realização de diversas simulações com diferentes parâmetros.

### 5.1 Estrutura do *Fluent*

O *software Ansys Fluent* contém uma diversidade de recursos capazes de modelar escoamentos, turbulência, transferência de calor e reações químicas de aplicações industriais. Os modelos especiais oferecem ao *software* a capacidade de modelar a combustão, a aeroacústica, as turbomáquinas e sistemas multifásicos alargando o seu alcance. Hoje em dia, as empresas beneficiam do uso do *software Ansys Fluent* como forma integrante no desenvolvimento e otimização de novos produtos. Esta plataforma encontra-se segmentada em três fases distintas como apresentado de seguida.

#### ◆ Pré-processador

Consiste no *input* do problema em estudo ajustando ao programa CFD por meio de uma interface e subsequente transformação da entrada numa forma adequada para posterior utilização no *solver*. Esta fase envolve várias atividades como, definição da geometria de interesse, geração da malha em vários sub-domínios, seleção dos fenómenos físicos e químicos necessários a modelar, definição das propriedades do(s) fluido(s) e especificação das condições de fronteira e das variáveis do domínio de estudo [7].

A precisão de uma solução CFD está relacionada com o número de células da malha. Em geral,

quanto maior o número de células melhor será a precisão da solução. A precisão de uma solução como o custo em termos de *hardware* e o tempo de cálculo necessário está dependente do refinamento da malha [7].

#### ◆ **Solver**

O *Solver* é a fase na qual é realizada a aproximação das variáveis do fluxo por meio de funções simples, a discretização por substituição das equações que regem o fluxo pelas aproximações e a solução das equações algébricas. O *Fluent* utiliza como método os volumes finitos, em que o algoritmo numérico consiste na integração formal das equações que governam o fluxo sobre todos os (finitos) volumes do domínio da solução de controlo. A discretização envolve a substituição de uma variedade de aproximações finitas pelas equações dos processos do escoamento tais como a convecção, a difusão e as fontes. Esta substituição converte as equações integrais num sistema de equações algébricas, sendo resolvidas por um método iterativo [7].

As integrações dos volumes de controlo distinguem o método de volumes finitos de todas as outras técnicas de CFD. As demonstrações resultantes expressam a conservação das propriedades para cada célula. Esta relação entre o algoritmo numérico e o princípio da conservação física subjacente constitui uma das principais atrações do método de volumes finitos, tornando os seus conceitos muito mais simples de compreender [7].

Os códigos CFD contem técnicas de discretização adequadas para o comportamento dos fenómenos de transporte, convecção, difusão e a taxa de variação ao longo do tempo. Os fenómenos físicos subjacentes são complexos e não-lineares sendo necessária uma abordagem de solução iterativa.

#### ◆ **Pós-processador**

Como no pré-processamento foi desenvolvido recentemente um enorme trabalho na área do pós-processamento. O aumento da utilização deste tipo de programas nos projetos de engenharia fez desenvolver os principais pacotes de CFD que estão agora equipados com ferramentas de visualização de dados multifacetados. Destaca-se a visualização da malha e o domínio da geometria, gráficos de vetores, gráficos de contornos e linhas sombreadas, gráficos de superfícies 2D e 3D, trajetória de partículas, entre outras tantas formas de visualizar [7].



## 5.2 Definição das Modelações Demonstrativas (Influência das Condições de Fronteira no Escoamento)

As modelações dos diferentes casos têm como objetivo analisar a dispersão de CO, num meio com presença de O<sub>2</sub> e N<sub>2</sub> com diferentes condições de fronteira e geometria.

O escoamento no interior do meio, para o primeiro e o terceiro caso apresentados, não têm qualquer influência das condições exteriores. Por outro lado, o segundo e o quarto caso, os escoamentos no interior do meio são influenciados pelas condições exteriores. A diferença em ambos assenta na diferente geometria, para o terceiro e quarto caso, o meio apresenta “vigas” e “veículos”.

### 5.2.1 Condições de Fronteira

As condições de fronteira para o primeiro caso estão apresentadas na figura 5.1, onde se verifica o local onde o CO é libertado, ilustrado com o número 1, e a saída do escoamento, ilustrado com o número 2. A dimensão do meio é de 500x400x100 mm.

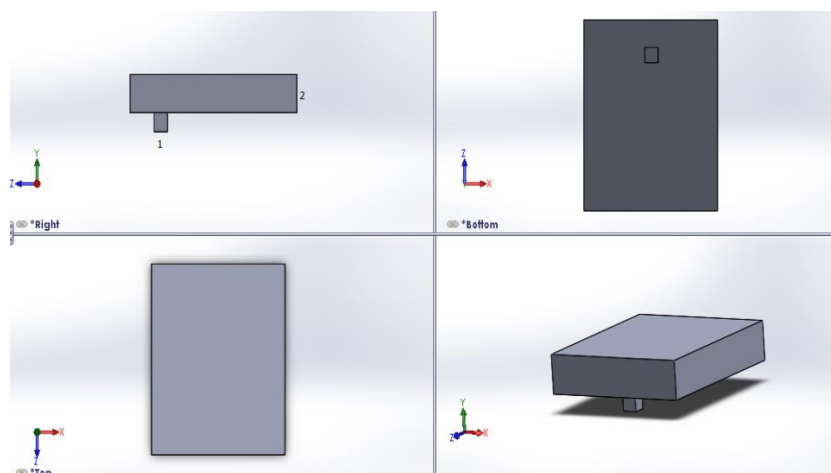


Figura 5.1 – Condições de fronteira do caso 1

As condições de fronteira para o segundo caso estão apresentadas na figura 5.2, onde se verifica o local de CO libertado no meio, ilustrado com o número 1, a entrada de ar (O<sub>2</sub> e N<sub>2</sub>), ilustrado com o número 3, e a saída do escoamento, ilustrado com o número 2.

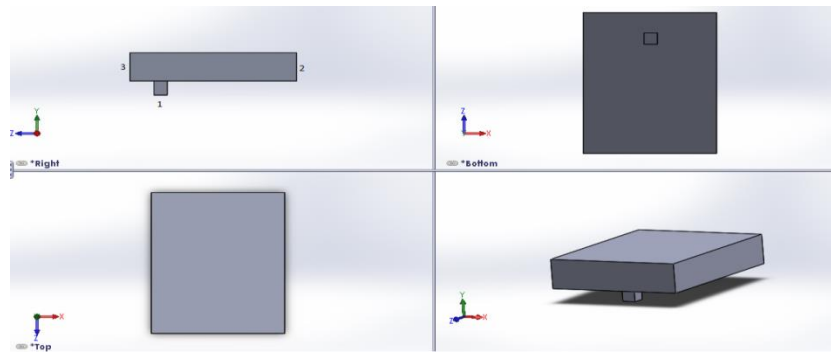


Figura 5.2 - Condições de fronteira do caso 2

As condições de fronteira para o terceiro caso estão apresentadas na figura 5.3, a onde se verifica a entrada de CO, ilustrado com o número 1, e a saída, ilustrado com o número 2. Em termos de geometria, o número 4 representa “vigas” e o número 5 representa “veículos”.

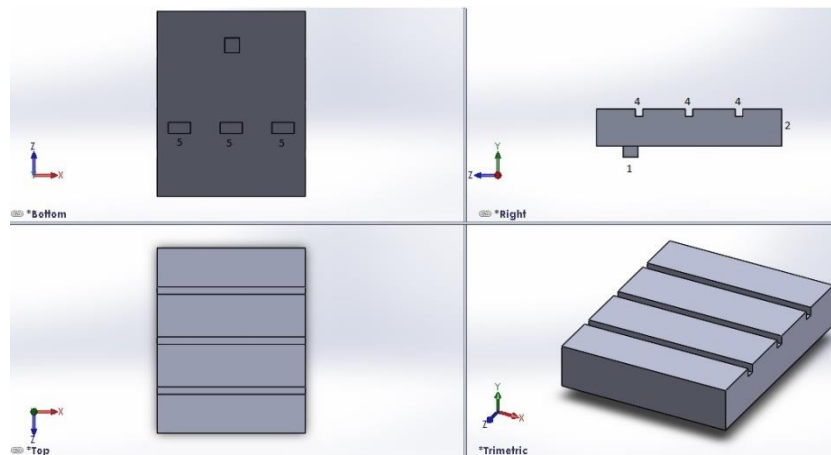


Figura 5.3 - Condições de fronteira do caso 3

As condições de fronteira para o quarto caso estão apresentadas na figura 5.4, onde se verifica a entrada de CO, ilustrado com o número 1, a entrada de O<sub>2</sub> e N<sub>2</sub>, ilustrado com o número 3, e a saída, ilustrado com o número 2. O número 4 representa “vigas” e o número 5 “veículos”.

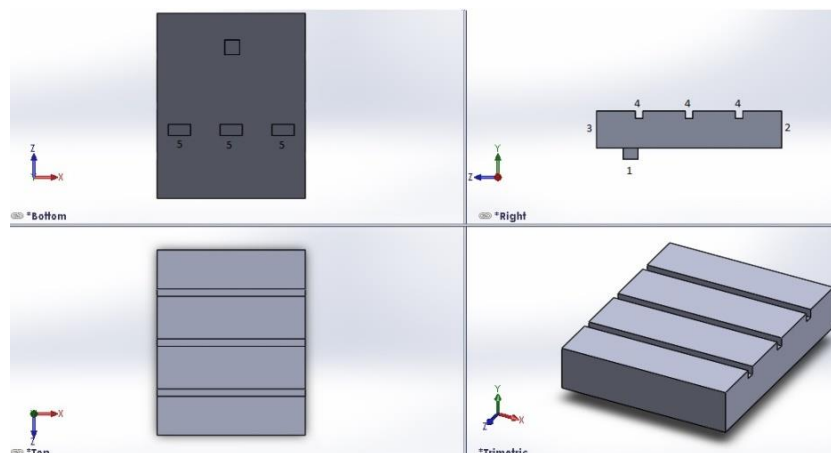


Figura 5.4 – Condições de fronteira do caso 4

## 5.2.2 Concepção da Malha

Após importar a geometria para o programa *Fluent*, a primeira fase passa pela concepção da malha, a qual deve conceber características de acordo com o escoamento em causa.

Como ilustrado na figura 5.5, verifica-se que foi criada uma malha não-ortogonal estruturada para o primeiro caso. A sua implementação é de fácil execução, visto que a geometria em causa não contém qualquer grau de complexidade. Em casos mais complexos, a implementação de malhas deste tipo torna-se difícil de controlar e, além do elevado tempo de concepção. Também se consta que a malha encontra-se perfilada com a direção do escoamento, tornando o processo de solução estável e simplificado, e as variáveis de campo mais precisas.

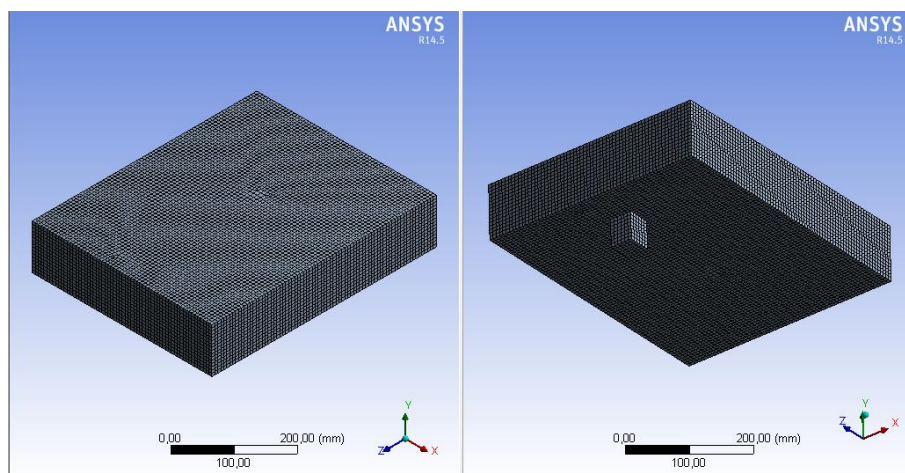


Figura 5.5 - Malha do caso 1

Relativamente às características da malha realçar o número de elementos, mas também os parâmetros de avaliação da malha, como apresentado na tabela 5.1. Os critérios de avaliação da malha apresentam valores consideravelmente favoráveis de acordo com a parametrização estabelecida pelo *Ansys Fluent*.

Tabela 5.1 - Características da malha

Característica	Valor
Nº de elementos	74 288
Qualidade Ortogonal Média	0,99
Skewness Média	0,0085

Para a modelação do segundo caso, como ilustrado na figura 5.6, verifica-se uma malha não-ortogonal estruturada como no primeiro caso, no entanto esta tem a particularidade de sofrer um refinamento junto às paredes, devido à condição de fronteira ilustrada com o número 3 na figura

5.2. Este refinamento foi efetuado com o método *sizing*, onde é introduzido o tamanho do elemento nas faces selecionadas. O tamanho do elemento foi determinado através do cálculo da altura adimensional junto às paredes.

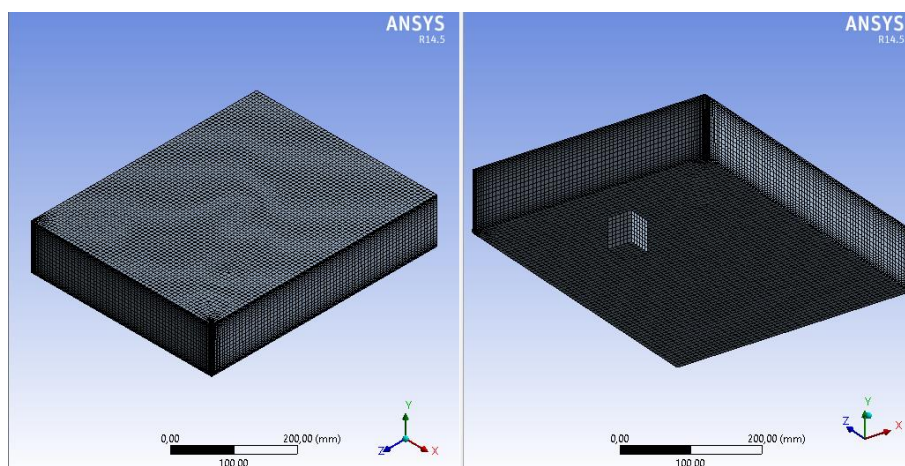


Figura 5.6 - Malha do caso 2

Como apresentado na tabela 5.2, verifica-se que os critérios de avaliação da malha apresentam valores favoráveis de acordo com a parametrização estabelecida pelo *Ansys Fluent*, muito devido ao tipo de malha concebida.

Tabela 5.2 - Características da malha

Característica	Valor
Nº de elementos	110 398
Qualidade Ortogonal Média	0,99
Skewness Média	0,015

Para a modelação do terceiro caso, como apresentado na figura 5.7, verifica-se a implementação de uma malha não-ortogonal não-estruturada. A razão da concepção desta malha é sobretudo pela complexidade da geometria, particularmente na zona das “vigas” e dos “carros”. A implementação de uma malha estruturada implicaria um tempo de processamento elevado, além de que o controlo da mesma tornava-se bastante dificultado. Também se verifica um refinamento da malha na parte superior e inferior do meio, por serem locais de discordância geométrica acentuada, provocando oscilações no escoamento.

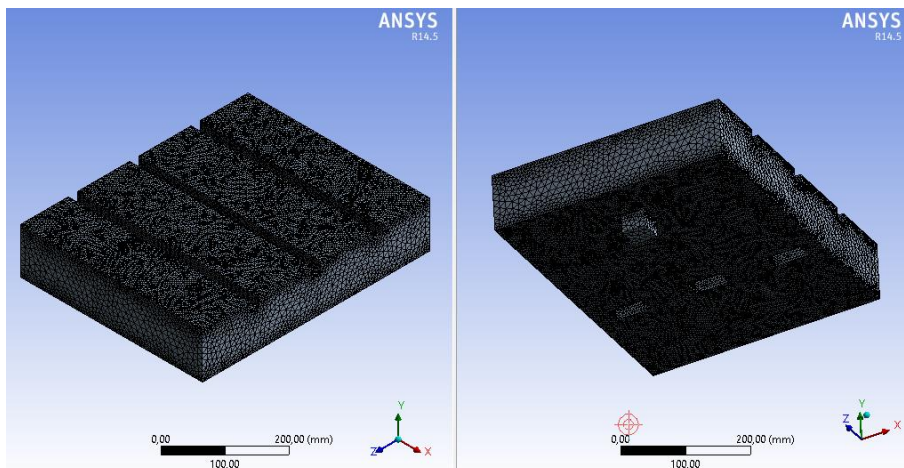


Figura 5.7 - Malha do caso 3

Os parâmetros de avaliação da malha, como ilustrados na tabela 5.3, apresentam valores considerados razoáveis de acordo com a parametrização estabelecida pelo *Ansys Fluent*.

Tabela 5.3 - Características da malha

Característica	Valor
Nº de elementos	487 526
Qualidade Ortogonal Média	0,86
Skewness Média	0,23

Para a modelação do quarto caso, como apresentado na figura 5.8, a malha do é muito similar ao terceiro caso, embora esta sofreu um refinamento superior junto às paredes, devido à condição de fronteira ilustrado com o número 3 na figura 5.4. Este refinamento junto à parede foi efetuado tendo em conta a altura dimensional na primeira *layer*.

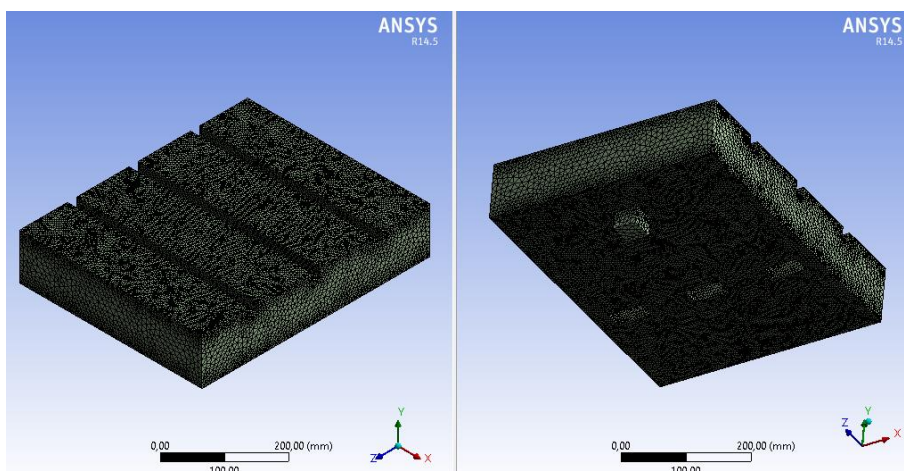


Figura 5.8 - Malha do caso 4

Para este caso, os parâmetros de avaliação da malha apresentam valores ligeiramente

favoráveis relativamente à malha do terceiro caso, como apresentado na tabela 5.4.

Tabela 5.4 - Características da malha

Característica	Valor
Nº de elementos	529 610
Qualidade Ortogonal Média	0,85
Skewness Média	0,23

### 5.2.3 Definição do Problema

Após a concepção da malha, a etapa seguinte é definir as características do problema. A definição do problema em termos de modelos é semelhante para todos os casos anteriormente apresentados, apenas determinadas condições de fronteira são diferenciadas.

O primeiro passo da definição do problema é selecionar os parâmetros do *solver*, os quais se incluem o tipo de regime, a formulação da velocidade e o tipo de *based solver*. A figura 5.9 apresenta a definição dos parâmetros anteriormente enunciados. Simultaneamente ativou-se a aceleração gravítica, visto que o estudo envolve fases gasosas com diferentes temperaturas.

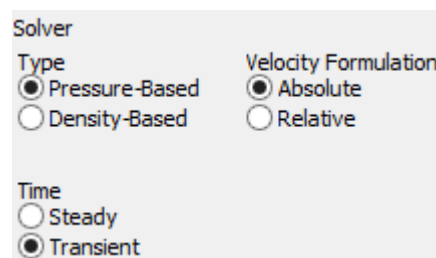


Figura 5.9 – Definição do *solver*

Posteriormente, de acordo com o tipo de escoamento em causa, seleciona-se os modelos existentes na plataforma *Ansys Fluent*. O modelo multifásico foi ativo, devido à presença de várias fases. Dentro dos modelos multifásicos, o selecionado foi o modelo *Mixture*. Apesar do modelo escolhido concentrar aspetos de formulação aproximados ao modelo *Eularian*, a diferença entre ambos é ao nível da equação da energia. Enquanto o modelo *Eularian* resolve a equação da energia para cada fase, o modelo *Mixture* resolve-a para a temperatura da mistura, sendo uma variável importante nos resultados finais. Outro modelo ativado foi o modelo *Energy*, sendo a sua formulação a equação da energia. O modelo de turbulência selecionado foi o *k-epsilon* e o sub-modelo escolhido o *Realizable*. O tratamento junto às paredes é segundo a formulação *Enhanced Wall Treatment*.

A tabela 5.5 apresenta, esquematicamente, os modelos selecionados para todas as

simulações anteriormente expostas.

**Tabela 5.5 - Modelos selecionados**

Modelos
Multifásico – <i>Mixture</i>
Energia
<i>k-ε Realizable</i>

Após a seleção dos modelos caracterizadores do escoamento, definiu-se as condições de fronteira do problema, nomeadamente, à(s) entrada(s), à saída e ao meio. Na tabela 5.6 estão discriminadas as condições de fronteira para o primeiro e terceiro caso.

**Tabela 5.6 – Descrição das condições de fronteira do primeiro e terceiro caso**

	Tipo de condição	Valor	Temperatura	Fração volúmica
<b>Inlet 1</b>	<i>Mass Flow Inlet</i>	0,001 kg/s	773 K	100% CO
	<i>Pressure Inlet</i>	121325 Pa		
<b>Outlet 2</b>	<i>Outflow</i>	-	-	-
<b>Wall</b>	<i>Constant Temperature</i>	-	293 K	-
<b>Meio</b>	-	101325 Pa	293 K	20,4% O <sub>2</sub> e 79,6% N <sub>2</sub>

Na tabela 5.7 estão discriminadas as condições de fronteira para o segundo e quarto caso.

**Tabela 5.7 - Descrição das condições de fronteira do segundo e quarto caso**

	Tipo de condição	Valor	Temperatura	Fração volúmica
<b>Inlet 1</b>	<i>Mass Flow Inlet</i>	0,001 kg/s	773 K	100% CO
	<i>Pressure Inlet</i>	121325 Pa		
<b>Inlet 3</b>	<i>Velocity Inlet</i>	1 m/s	293 K	20,4% O <sub>2</sub> e 79,6% N <sub>2</sub>
	<i>Pressure Inlet</i>	121325 Pa		
<b>Outlet 2</b>	<i>Outflow</i>	-	-	-
<b>Wall</b>	<i>Constant Temperature</i>	-	293 K	-
<b>Meio</b>	-	101325 Pa	293 K	20,4% O <sub>2</sub> e 79,6% N <sub>2</sub>

#### 5.2.4 Métodos de Discretização da Solução

Após introduzir as condições do escoamento, definem-se os métodos de solução do problema, os quais foram idênticos para os quatro casos.

O esquema de acoplamento entre a pressão e a velocidade foi o *Pressure-Implicit with Splitting of Operators (PISO)*, sendo o recomendado para problemas em regime transiente. Os dois fatores do algoritmo PISO, o fator de correção *Skewness* e o fator de correção *Neighbor*, foram

ativados.

Relativamente aos esquemas de interpolação do termo convectivo, designado no *Fluent* como discretização espacial, a abordagem utilizada do gradiente foi a *Least-Squares Cell-Based*. Para a pressão foi utilizada a abordagem *Second Order*, pois é o esquema recomendado para o modelo multifásico. Para a fração volúmica utilizou-se a abordagem *Quadratic Upwind Interpolation (QUICK)*. Para o modelo multifásico *Mixture*, o *Fluent* apenas disponibiliza duas abordagens, a selecionada e a *First-Order Upwind*. A escolha recaiu sobre o QUICK, uma vez que é um método de maior precisão e aconselhado para o tipo de malha aplicada. As restantes variáveis de campo, entre elas, o momento, a energia cinética de turbulência, o rácio de dissipação turbulento e a energia, a escolha reincidiu na abordagem *Second-Order Upwind*. A tabela 5.8 apresenta, esquematicamente, as abordagens selecionadas para as diferentes variáveis de campo.

**Tabela 5.8 - Abordagens selecionadas para as variáveis de campo**

Variáveis de Campo	Esquema utilizado
Gradiente	<i>Least-Squares Cell-Based</i>
Pressão	<i>Second Order</i>
Fração Volúmica	<i>Quadratic Upwind Interpolation (QUICK)</i>
Momento	<i>Second-Order Upwind</i>
Energia Cinética de Turbulência	<i>Second-Order Upwind</i>
Rácio de Dissipação Turbulento	<i>Second-Order Upwind</i>
Energia	<i>Second-Order Upwind</i>
Formulação do Transiente	<i>First Order Implicit</i>

Dentro dos *solution controls*, de acordo com o guia do *Fluent*, os *under relaxation factors* devem assumir os valores padrão apresentados pelo *software*. Apenas se devem alterar caso ocorram problemas de convergência da solução, tal não sucedeu.

Relativamente aos *monitors*, é definido o critério absoluto (resíduo) para cada equação. O resíduo da velocidade em x, da velocidade em y, da velocidade em z, do *k*, do *epsilon*, da fração volúmica da fase 2 e 3 e da continuidade definiu-se 0,001, enquanto para o resíduo da energia definiu-se  $1 \times 10^{-6}$ .

### 5.2.5 Execução do Cálculo

Para todos os casos anteriormente apresentados, definiu-se o *time step* de 0,2 segundos, o número de *time steps* de 30 e o número de iterações por *step* de 20. Posto isto, o tempo total de simulação é de 6 segundos.



### 5.3 Definição das Modelações do Incêndio no Parque de Estacionamento

Esta modelação tem por objetivo, analogamente aos casos anteriores, analisar a dispersão de CO no parque de estacionamento. O monóxido de carbono, oriundo do incêndio simulado, é libertado num local aleatório do meio, enquanto o oxigénio e o azoto, proveniente de supostas condições de convecção natural (vento), invadem o meio por uma das laterais. O escoamento flui para o exterior por duas outras laterais. Para este caso, foram realizadas duas modelações, sendo a diferença entre ambas, o local do incêndio, ou seja, o local por onde o CO é libertado. De realçar a presença da parede corta-fogo a meio do parque de estacionamento, dividindo o parque em duas partes. Estas condições de fronteira estão apresentadas nas figuras 5.13 e 5.14.

#### 5.3.1 Desenho CAD

As figuras 5.10 e 5.11 apresentam o desenho CAD do parque de estacionamento, a parte superior e a parte inferior, respetivamente. As dimensões de atravancamento do parque de estacionamento são de 113,4 m de comprimento, de 76,35 m de largura e 3 m de altura.

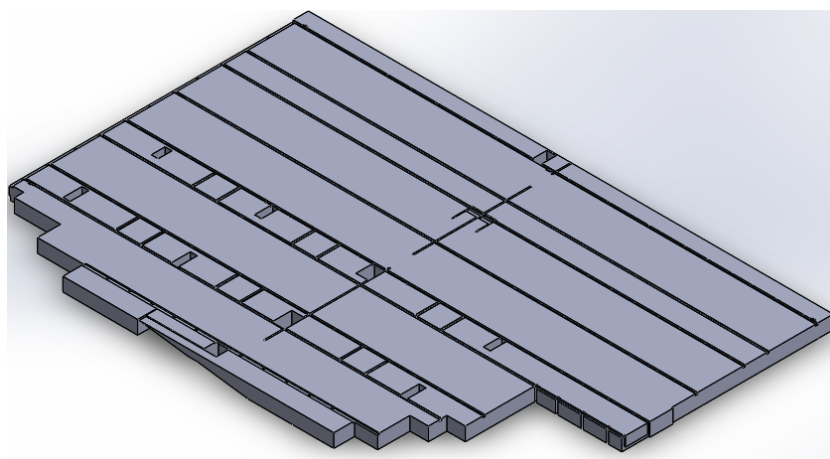


Figura 5.10 - Desenho CAD da parte superior do parque de estacionamento

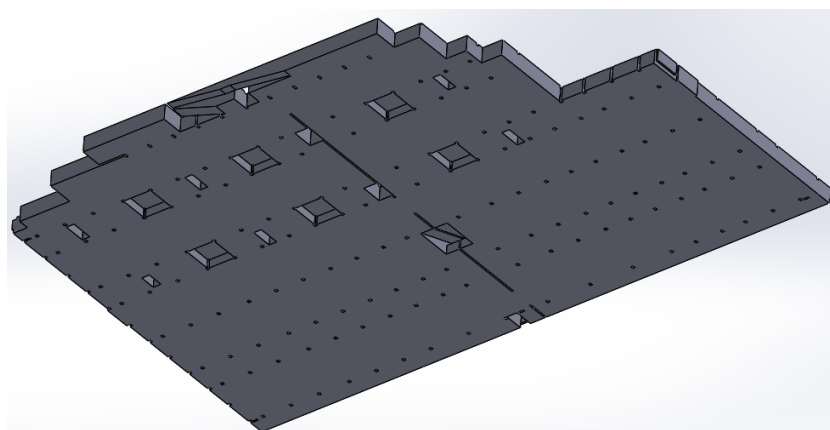


Figura 5.11 - Desenho CAD da parte inferior do parque de estacionamento

No entanto, foram realizadas alterações no desenho CAD original, nomeadamente nas

escadas, nas rampas de acesso ao piso superior e nas vigas de apoio à estrutura do piso. Estes aspetos descritos anteriormente foram removidos do desenho CAD, de forma a simplificar a concepção da malha e, conseqüentemente reduzir os problemas de convergência e de tempo de processamento da solução, além de aumentar a estabilidade da solução. Estas características geométricas apresentariam irregularidades para o escoamento, tornando a solução de estudo demasiado complexa e difícil de alcançar. As figuras 5.12 e 5.13 apresentam o desenho CAD simplificado do parque de estacionamento. Como é possível verificar pela figura 5.12, além das alterações anteriormente ditas, ainda foram incluídos aleatoriamente alguns “veículos”.

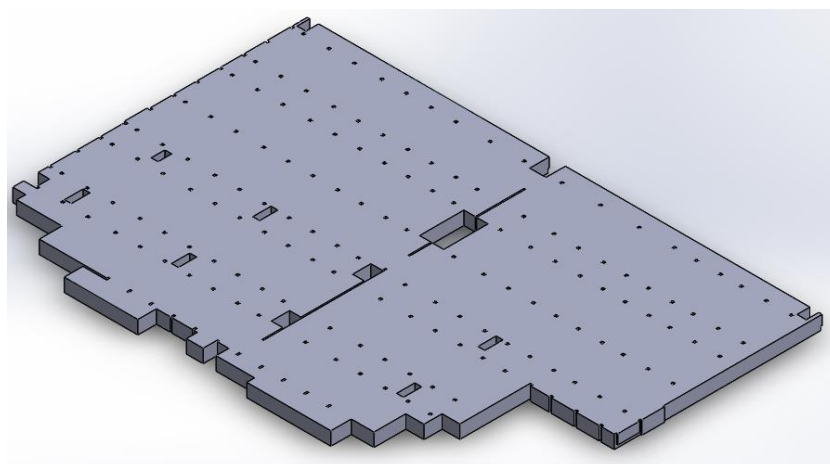


Figura 5.12 - Desenho CAD do parque de estacionamento simplificado da vista superior

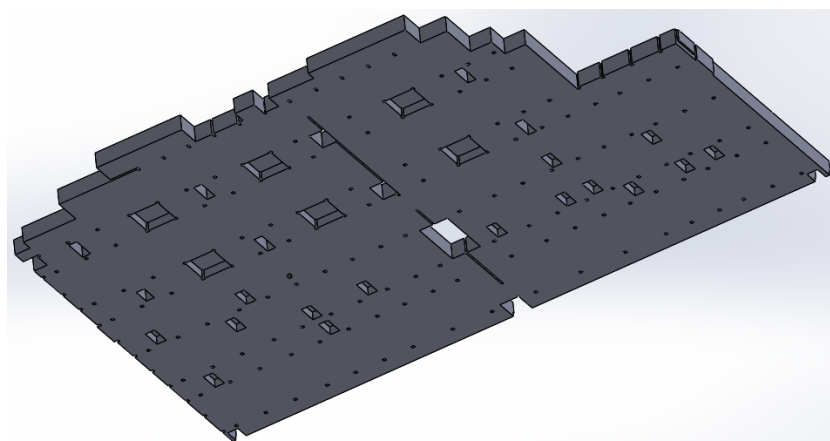
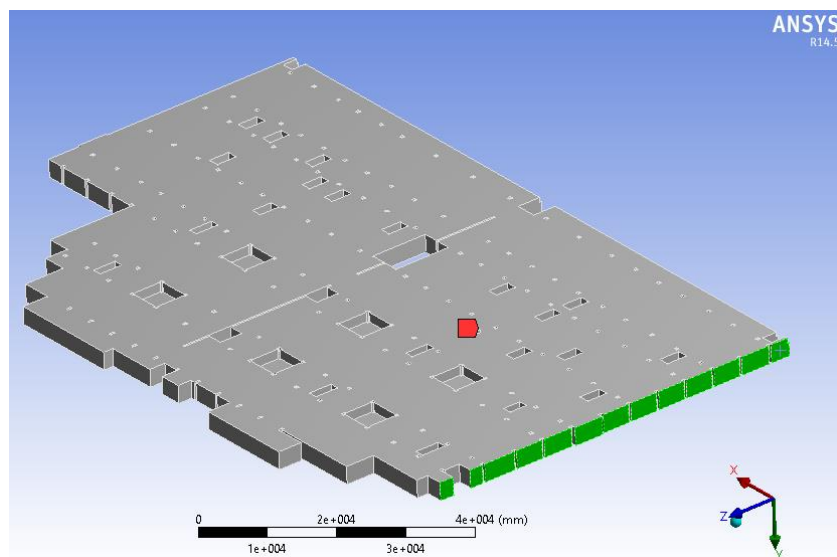


Figura 5.13 - Desenho CAD do parque de estacionamento simplificado da vista inferior

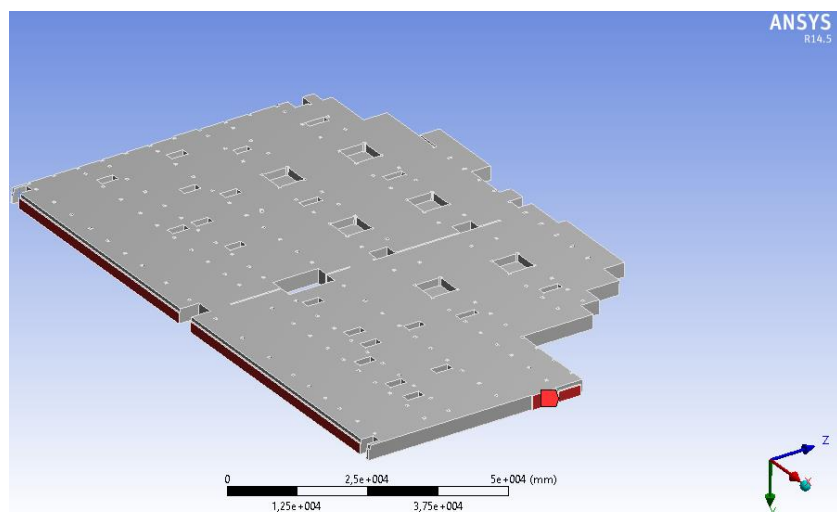
### 5.3.2 Condições de Fronteira

Como já dito anteriormente, foram realizadas duas modelações para o parque de estacionamento, onde a diferença entre ambas assenta no local de entrada do CO. Para o primeiro caso, como ilustrado pela figura 5.14, as faces a verde representam a entrada do ar (oxigénio e azoto), enquanto a seta a vermelho representa o local onde o CO é libertado no meio.



**Figura 5.14 - Condições de fronteira para o primeiro caso - entradas**

Como ilustrado pela figura 5.15, as faces a vermelho representam as saídas do escoamento.



**Figura 5.15 - Condições de fronteira da modelação – saídas**

Para o segundo caso, as condições de fronteira são idênticas à modelação no parque de estacionamento do primeiro caso, apenas difere o local de libertação do CO. Como ilustrado pela figura 5.16, verifica-se o local por onde o CO é libertado no interior do parque de estacionamento, apresentado pela letra B. As restantes condições de fronteira são idênticas ao caso 1.

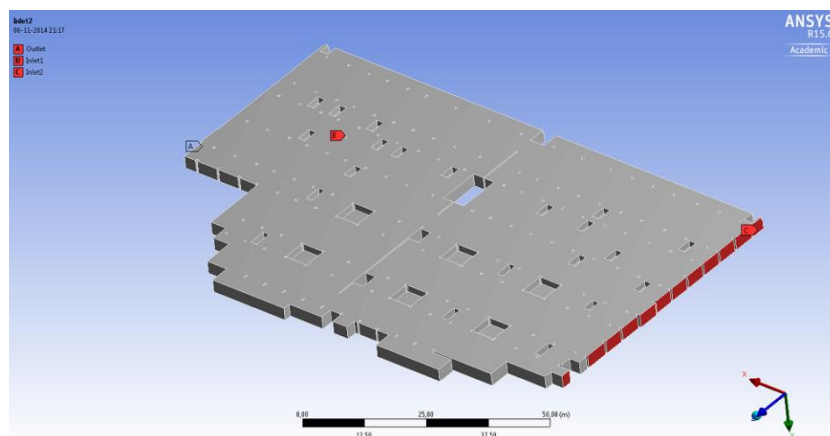


Figura 5.16 - Condições de fronteira para o segundo caso

### 5.3.3 Concepção da Malha

Como apresentado nas figuras 5.17 e 5.18, verifica-se que foi utilizada uma malha não-estruturada para a modelação no parque de estacionamento, uma vez que a geometria em causa é complexa, tornando impossível a concepção de uma malha estruturada. Como apresentado pela figura 5.17, para o primeiro caso verifica-se um refinamento junto aos pilares, sendo locais críticos para o escoamento. Também se verifica um refinamento junto às paredes, que estão em contacto direto com o escoamento. Por outro lado existem locais que não sofreram refinamento, uma vez que não estão em contacto com o escoamento, tornando todo o processo da concepção da malha e de cálculo mais rápido.

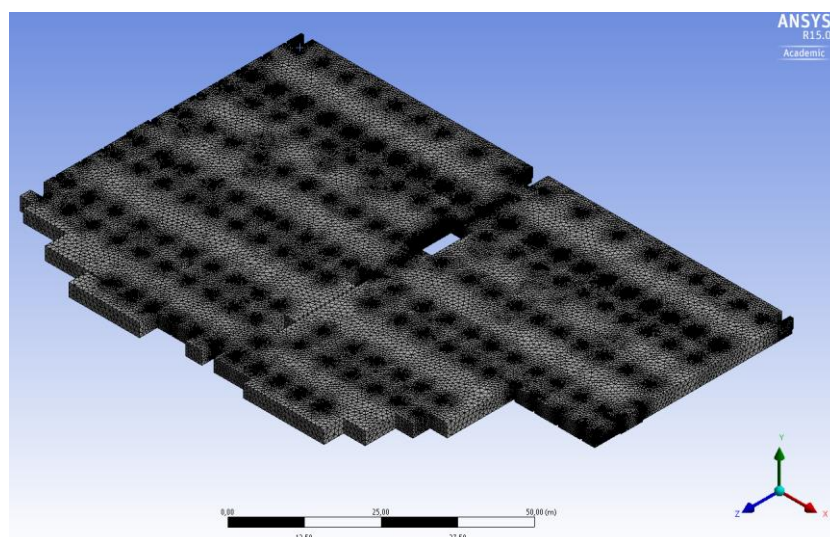


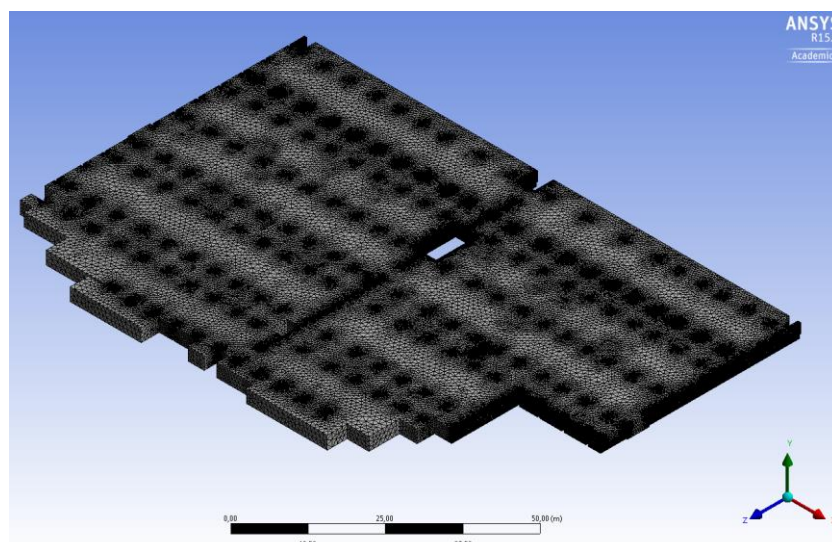
Figura 5.17 - Malha da modelação no parque de estacionamento do primeiro caso

Neste caso, os parâmetros de avaliação da malha apresentam valores favoráveis, como apresentado na tabela 5.9.

**Tabela 5.9 - Características da malha**

Característica	Valor
Nº de elementos	4 658 524
Qualidade Ortogonal	0,85
Média	
<i>Skewness</i>	0,24
Média	

A malha utilizada para o segundo caso está ilustrada na figura 5.18. As razões para a concepção desta malha são idênticas à modelação do parque de estacionamento do primeiro caso. A diferença entre ambas malhas assenta no refinamento junto às paredes que mantêm contacto com o escoamento. Enquanto o refinamento do primeiro caso, é efetuado da parte do parque onde o CO é libertado, para o segundo caso, é efetuado do lado contrário, por onde o CO é libertado no meio. Além do refinamento junto às paredes, para ambos os casos, houve um refinamento junto aos “veículos” que se encontram em cada parte do parque.



**Figura 5.18 - Malha da modelação no parque de estacionamento do segundo caso**

Neste caso, os parâmetros de avaliação da malha apresentam valores favoráveis, como apresentado na tabela 5.10.

**Tabela 5.10 - Características da malha**

Característica	Valor
Nº de elementos	4 154 631
Qualidade Ortogonal	0,85
Média	
<i>Skewness</i>	0,24
Média	

### 5.3.4 Definição do Problema

Como dito anteriormente, além do objetivo de verificar a influência das condições de fronteira no escoamento, as modelações demonstrativas têm também como objetivo testar e aplicar os modelos capazes de caracterizar o escoamento desenvolvido no interior do parque de estacionamento. Posto isto, os parâmetros, os modelos, as formulações e as abordagens utilizadas nas modelações demonstrativas foram replicados nas duas modelações no parque de estacionamento.

Sabendo que o caudal de CO libertado está relacionado com a dimensão do incêndio, tendo em conta a figura 5.19, que destaca a energia debitada pela queima de um veículo ao longo do tempo, determinou-se o caudal necessário para essa energia debitada durante o incêndio. Para tal, utilizou-se a energia máxima, 8 MW, e o PCI da gasolina, constituinte base na queima de um veículo. Posto isto, obtém-se um caudal de gasolina de 0,168 kg/s para debitar a energia máxima.

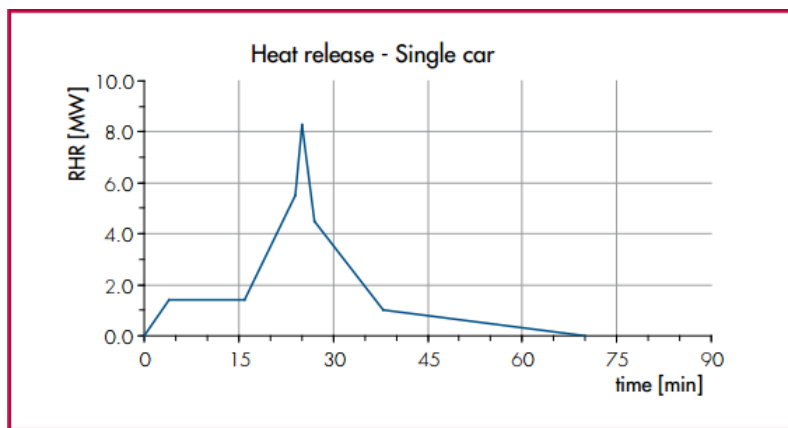
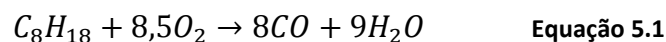


Figura 5.19 - Energia debitada pela queima de um veículo [24]

A reação da queima da gasolina é apresentada pela equação estequiométrica 5.1.



Admitindo que a queima da gasolina é incompleta, ou seja, existe défice de oxigénio, para o caso em estudo admite-se que toda a gasolina produz monóxido de carbono. Posto isto, conforme a equação da reação, uma mole de gasolina produz 8 moles de monóxido de carbono. Tendo em conta as massas molares dos constituintes da gasolina e do monóxido de carbono e o caudal de gasolina determinado anteriormente, calcula-se o caudal de CO. Tendo obtido para a queima de um veículo o caudal de 0,33 kg/s de CO.

Na tabela 5.11 estão discriminadas as condições de fronteira para ambos os casos da modelação no parque de estacionamento.

Tabela 5.11 – Condições de fronteira das modelações no parque de estacionamento

	Tipo de condição	Valor	Temperatura	Fração volúmica
<b>Inlet 1</b>	<i>Mass Flow Inlet</i>	0,33 kg/s	1093 K	100% CO
	<i>Pressure Inlet</i>	101325 Pa	-	-
<b>Inlet 2</b>	<i>Velocity Inlet</i>	1 m/s	293 K	20,4% O <sub>2</sub> e 79,6% N <sub>2</sub>
	<i>Pressure Inlet</i>	101325 Pa		
<b>Outlet 5</b>	<i>Pressure Outlet</i>	101395 Pa	-	-
<b>Wall</b>	<i>Constant</i>	-	293 K	-
	<i>Temperature</i>			
<b>Meio</b>	-	101325 Pa	293 K	20,4% O <sub>2</sub> e 79,6% N <sub>2</sub>

### 5.3.5 Métodos de Discretização da Solução

Na modelação do escoamento no parque de estacionamento foram utilizados os mesmos métodos de solução das modelações demonstrativas.

Uma vez que houve problemas de convergência, efetuou-se alterações nos *under relaxation factors*. Procedeu-se à alteração do fator da energia para 0,91, do rácio de dissipação da turbulência e da energia cinética turbulenta para 0,5 em ambos. Estas alterações foram efetuadas nas duas modelações do parque de estacionamento. Os restantes fatores não sofreram modificações. O *multigrid cycle* da equação da energia foi alterado para o *F-cycle* nas duas modelações do parque de estacionamento.

Os *monitors* foram definidos os mesmos que introduzidos nas modelações demonstrativas.

### 5.3.6 Execução do Cálculo

Definiu-se o *time step* de 1 segundo, o número de *time steps* de 20 e o número de iterações por *step* de 180 para as duas modelações no parque de estacionamento. Posto isto, o tempo total de simulação é de 3 minutos.

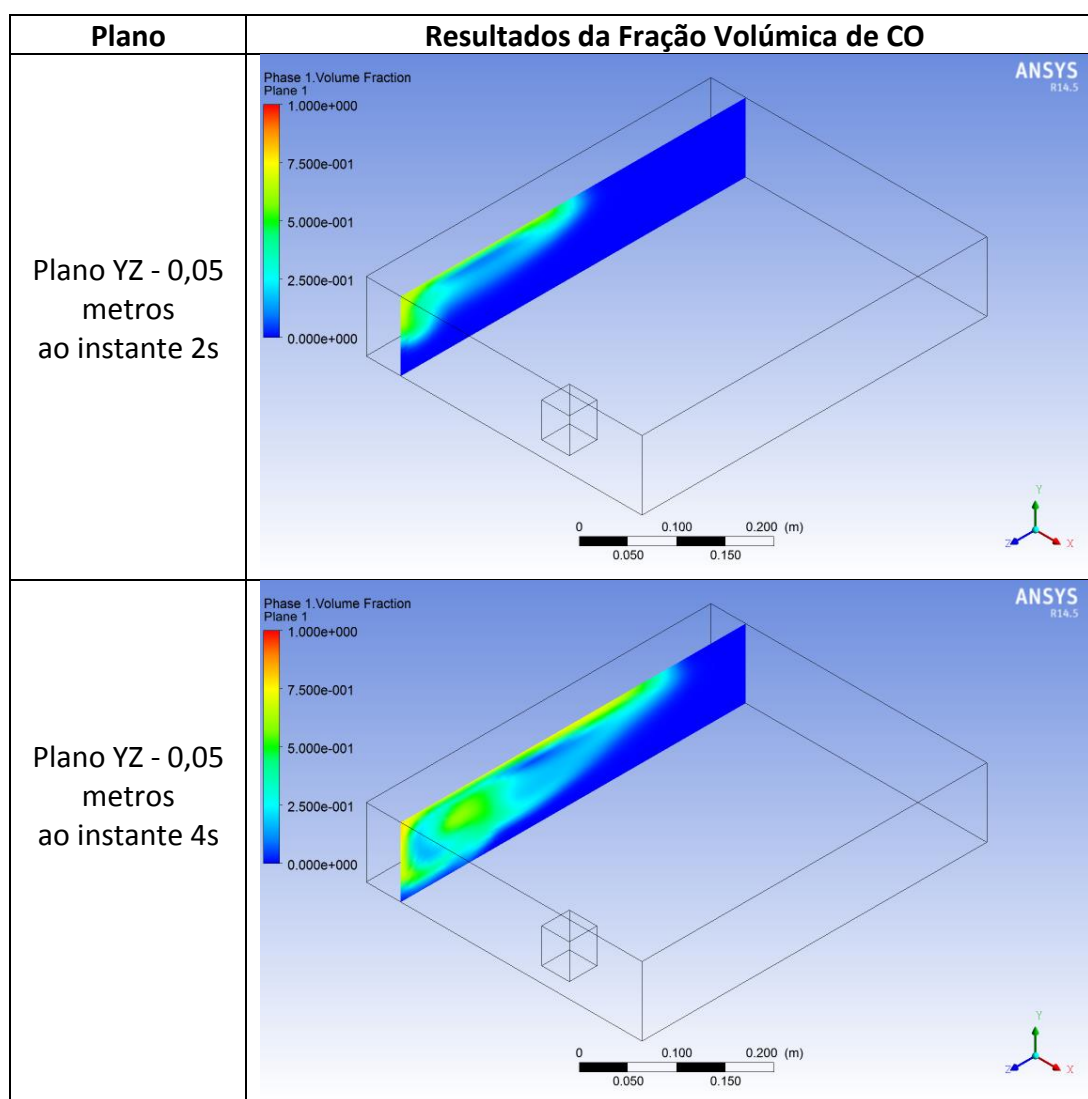
## 6 Resultados e Discussão das Modelações em *Fluent*

Neste capítulo são apresentados os resultados das várias modelações dos casos em estudo, nomeadamente a fracção volúmica do CO e a temperatura da mistura.

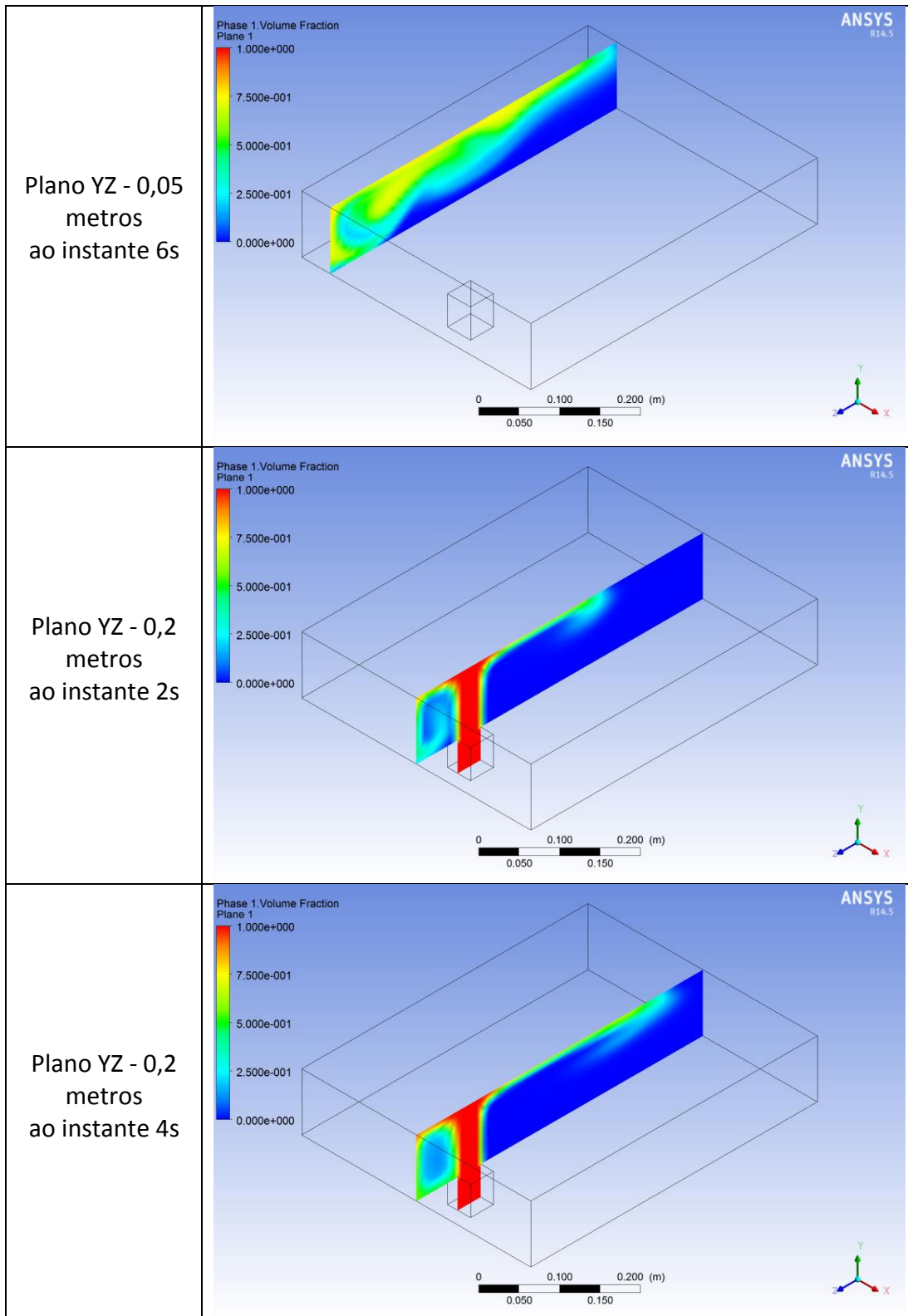
### 6.1 Resultados e Discussão das Modelações Demonstrativas (Influência das Condições de Fronteira no Escoamento)

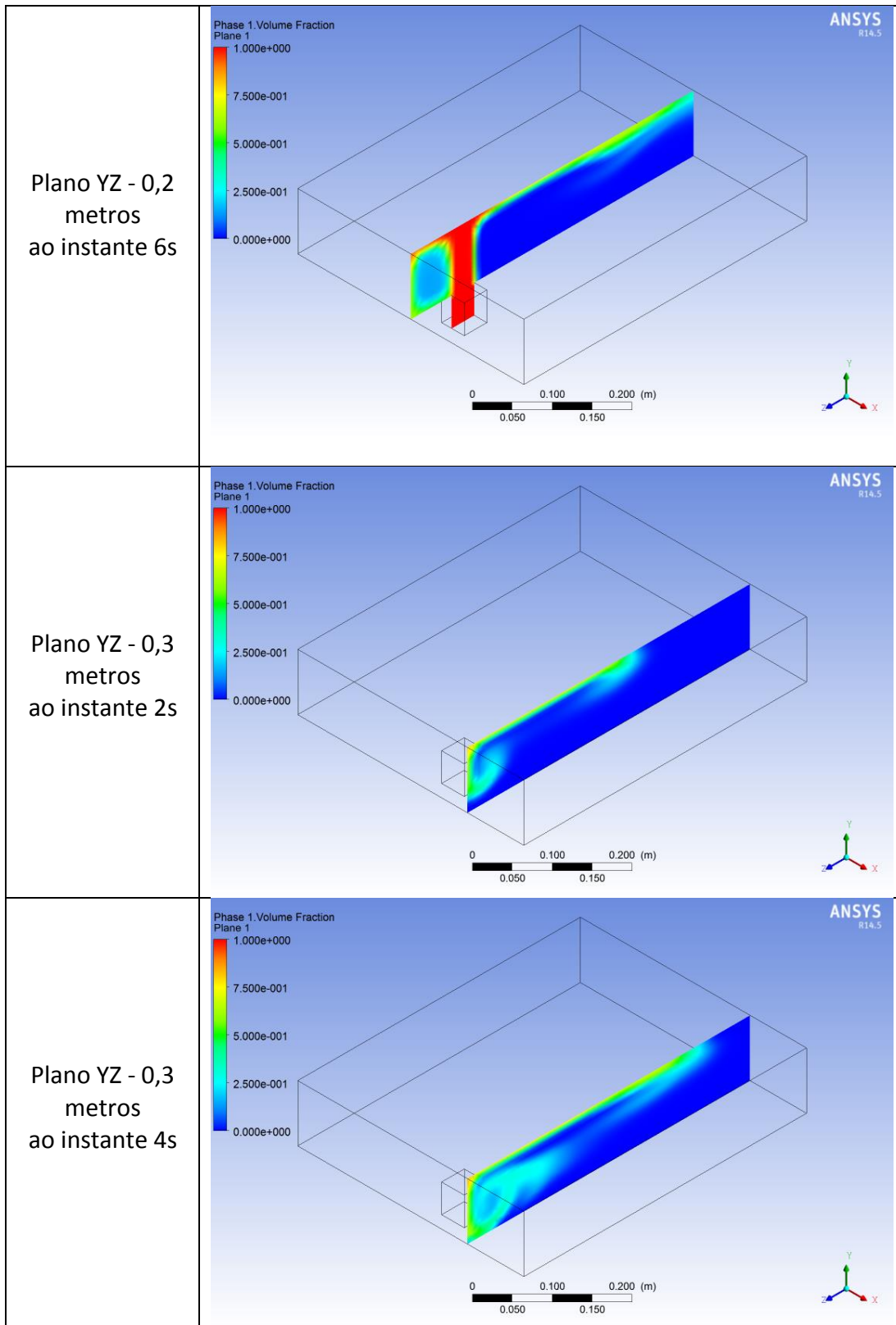
Os resultados da fracção volúmica do CO e da temperatura dos vários casos são apresentados em três planos diferentes para os instantes 2, 4 e 6 segundos.

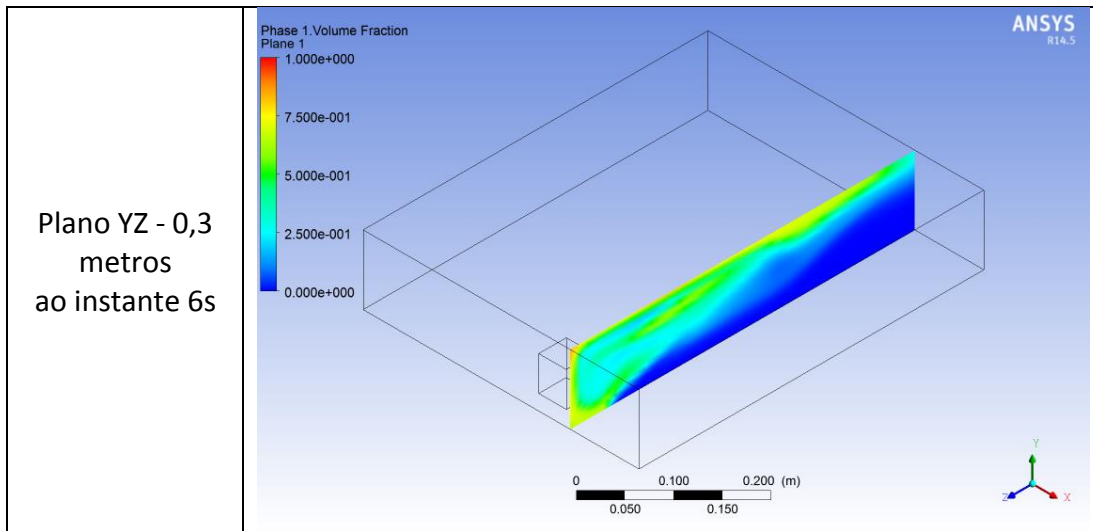
Tabela 6.1 - Resultados da fracção volúmica de CO do caso 1





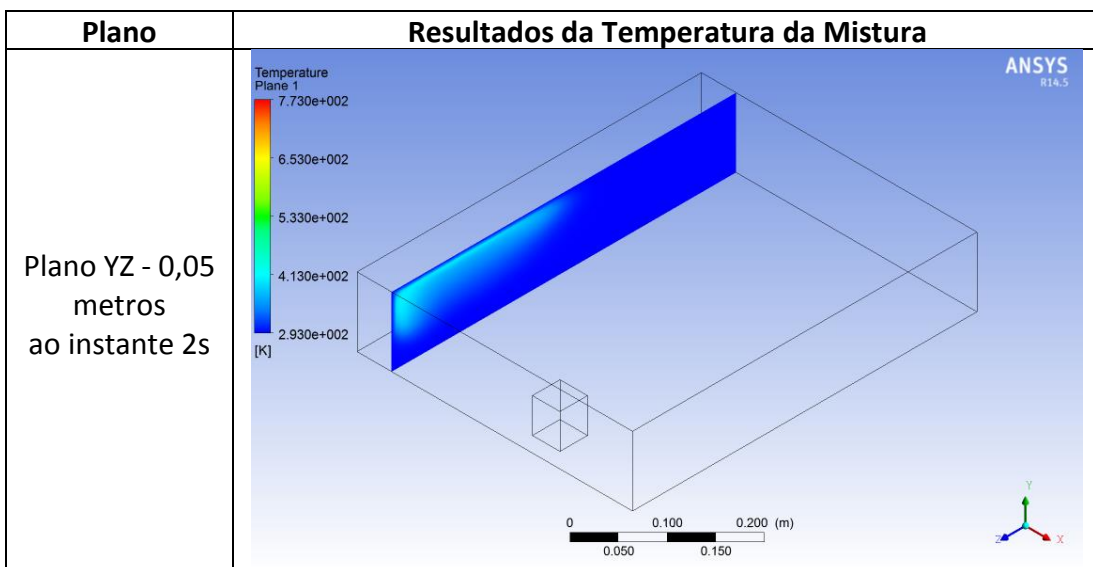


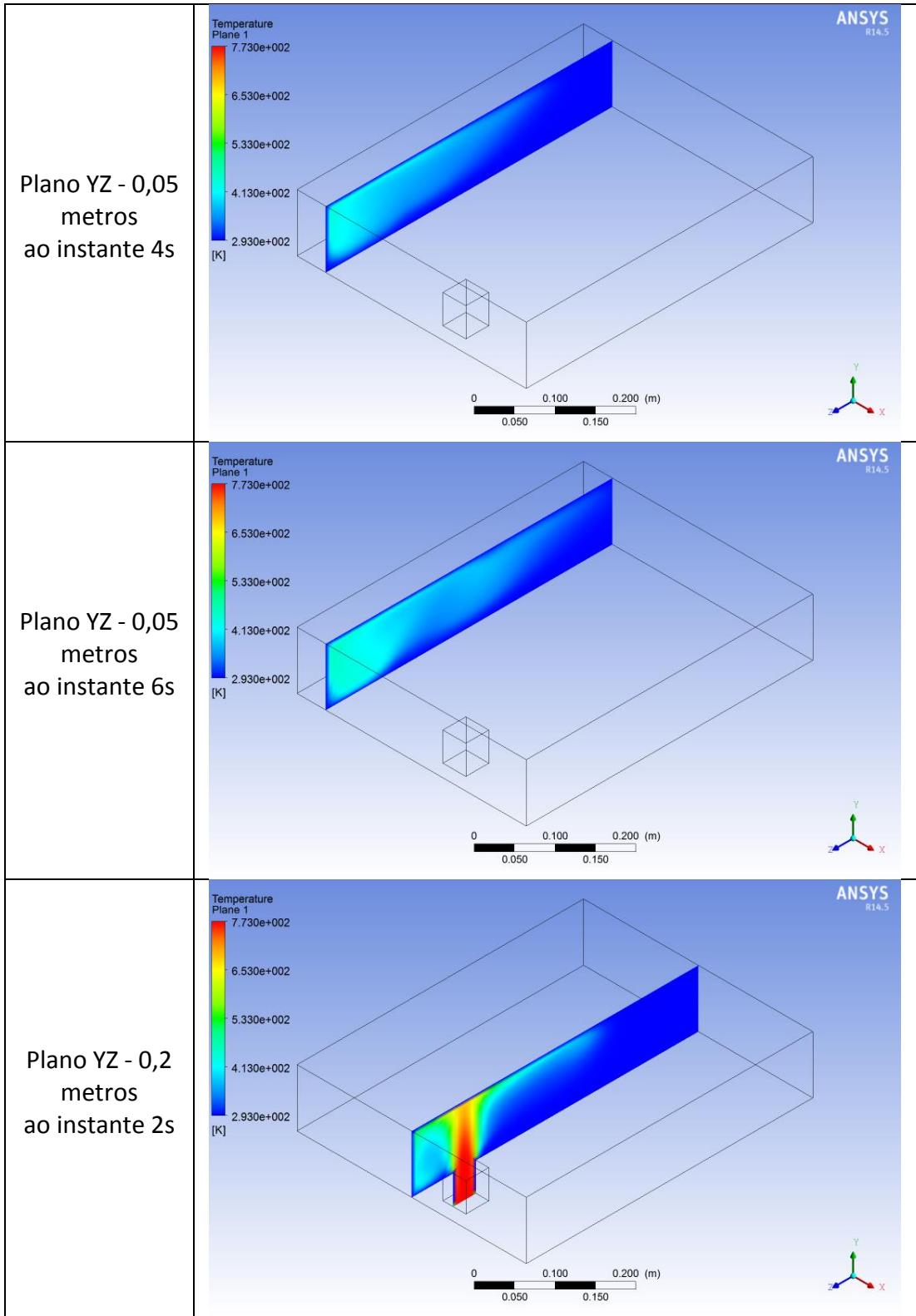


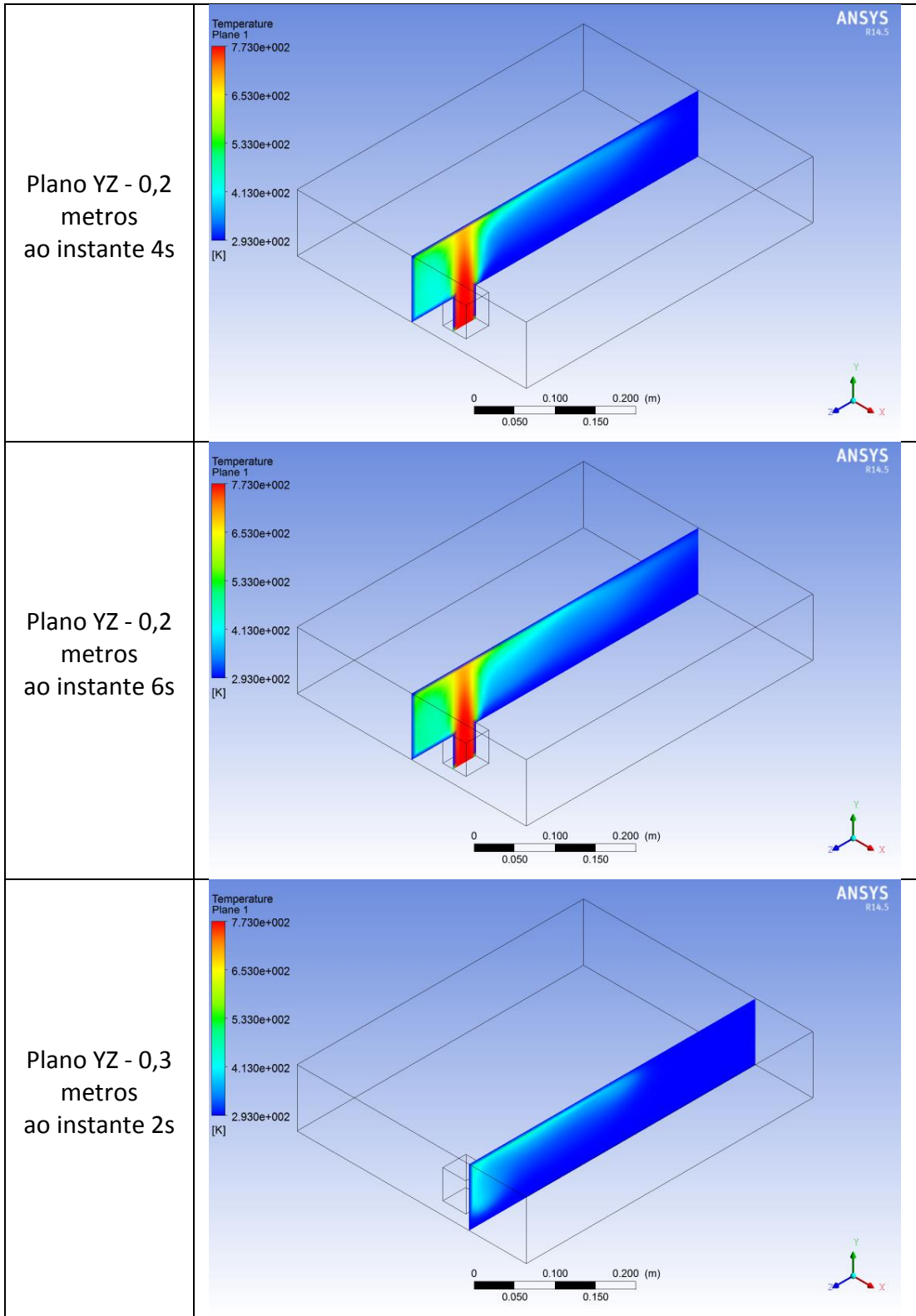


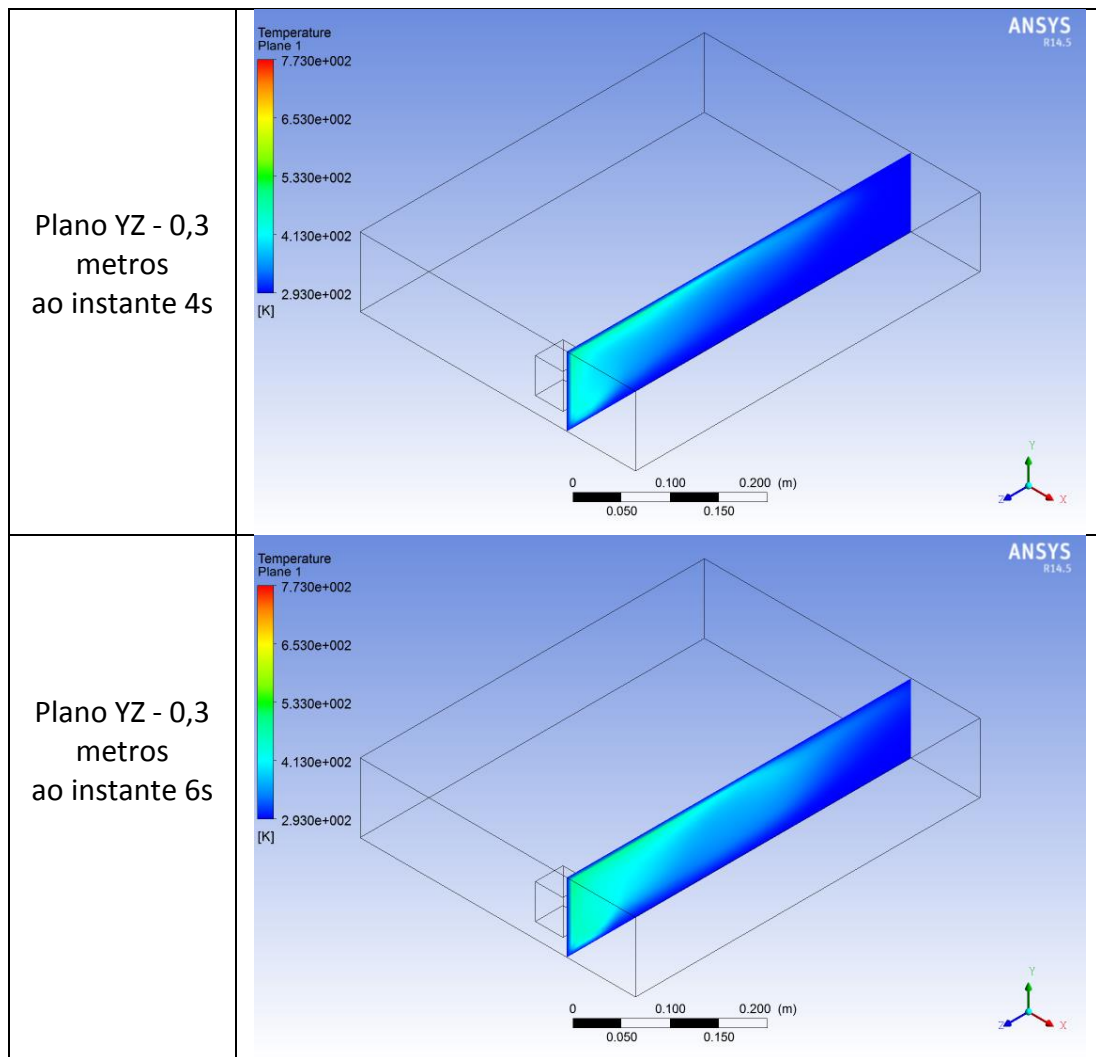
Relativamente aos resultados da fração volúmica de CO verifica-se pela tabela 6.1, que a concentração no interior do meio aumenta ao longo do tempo nos três planos apresentados. A concentração de CO ascende até ao topo do meio, devido à menor densidade do CO relativamente às restantes fases, acentuando este processo de subida com a elevada temperatura de insuflação. Como ilustrado pelos vários planos, verifica-se a presença de um vórtice do lado oposto à saída, tornando-se mais evidente ao longo do tempo. À medida que o escoamento flui para a saída, a concentração de CO dissolve-se com as restantes fases, diminuindo gradualmente a sua fração volúmica no interior do meio.

Tabela 6.2 - Resultados da temperatura do caso 1



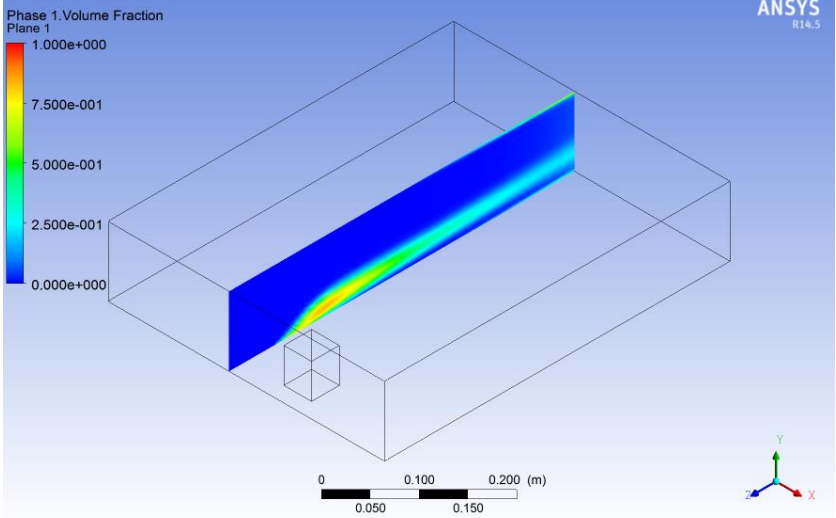
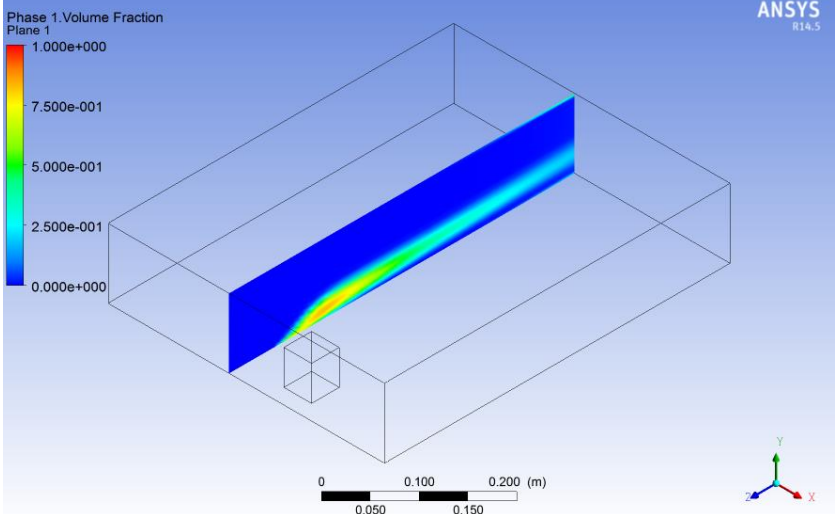
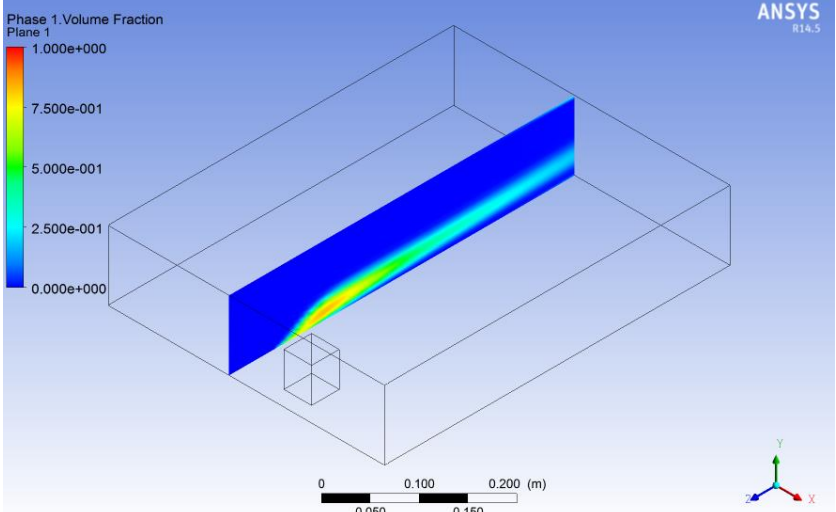


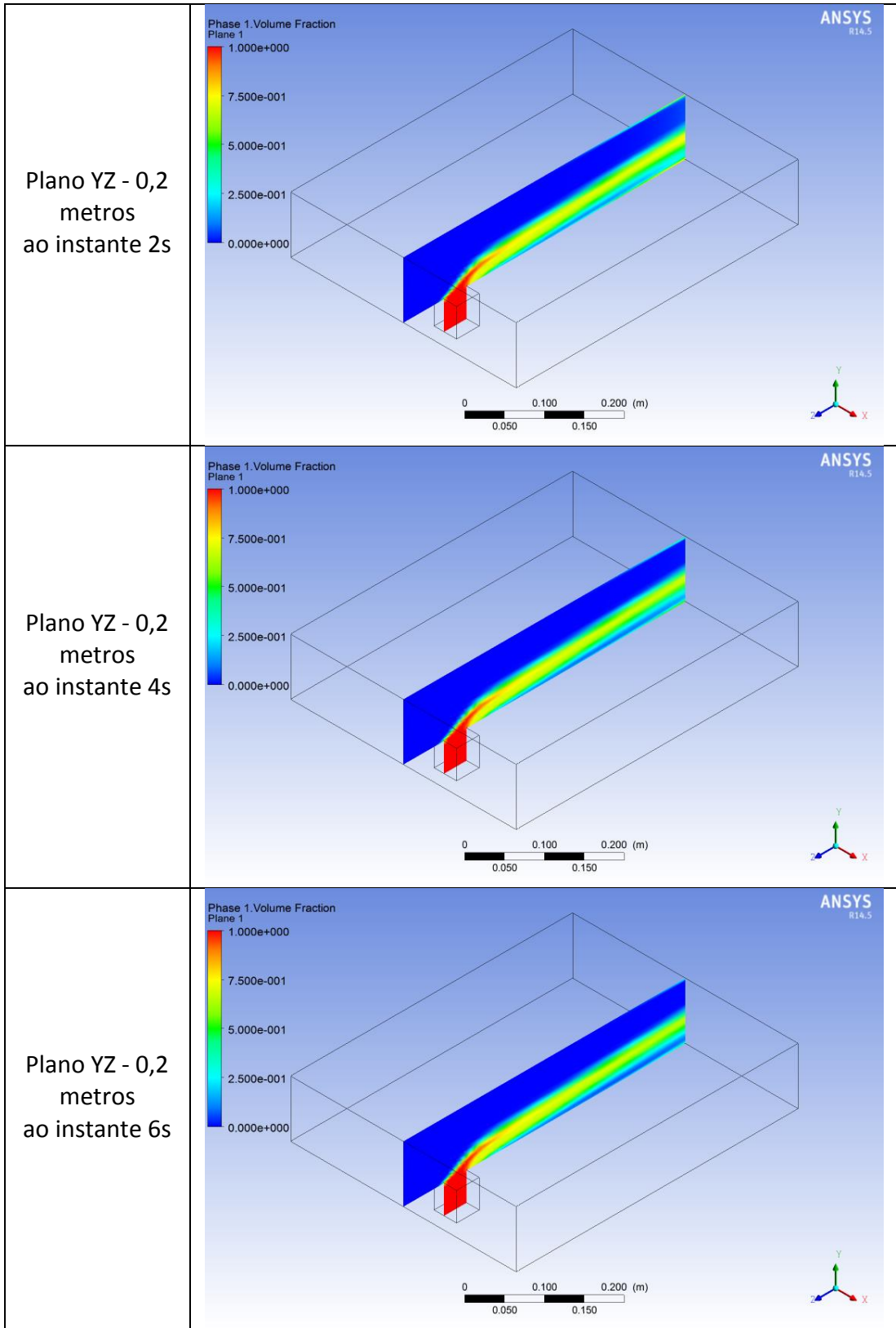




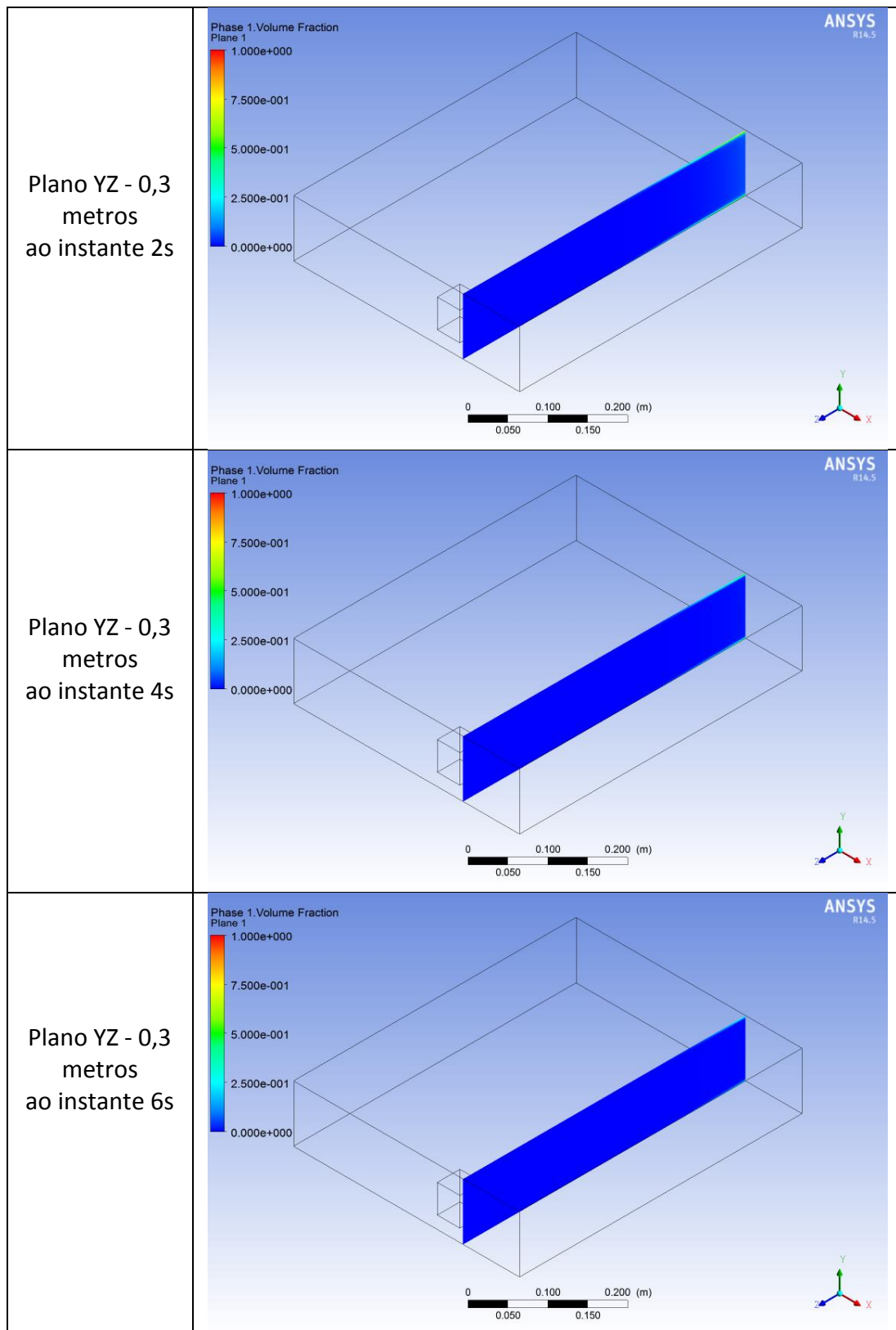
Relativamente aos resultados da temperatura, verifica-se pela tabela 6.2, que a temperatura do CO diminui ao longo que o escoamento se desenvolve até à saída. Esta diminuição deve-se basicamente à temperatura da parede permanecer-se constante a 293K e, também, pela interação do CO com as restantes fases que se encontram a 293K no interior. De salientar, que a temperatura do CO diminui, drasticamente, dos 773K, valor na entrada, para valores a rondar os 400K, na envolvente da saída, diminuindo progressivamente até à saída. Por outro lado, a temperatura da mistura aumenta ao longo do tempo nos três planos apresentados, consequência da elevada temperatura de insuflação do monóxido de carbono.

Tabela 6.3 - Resultados da fração volúmica de CO do caso 2

Plano	Resultados da Fração Volúmica de CO
<p>Plano YZ - 0,175 metros ao instante 2s</p>	
<p>Plano YZ - 0,175 metros ao instante 4s</p>	
<p>Plano YZ - 0,175 metros ao instante 6s</p>	



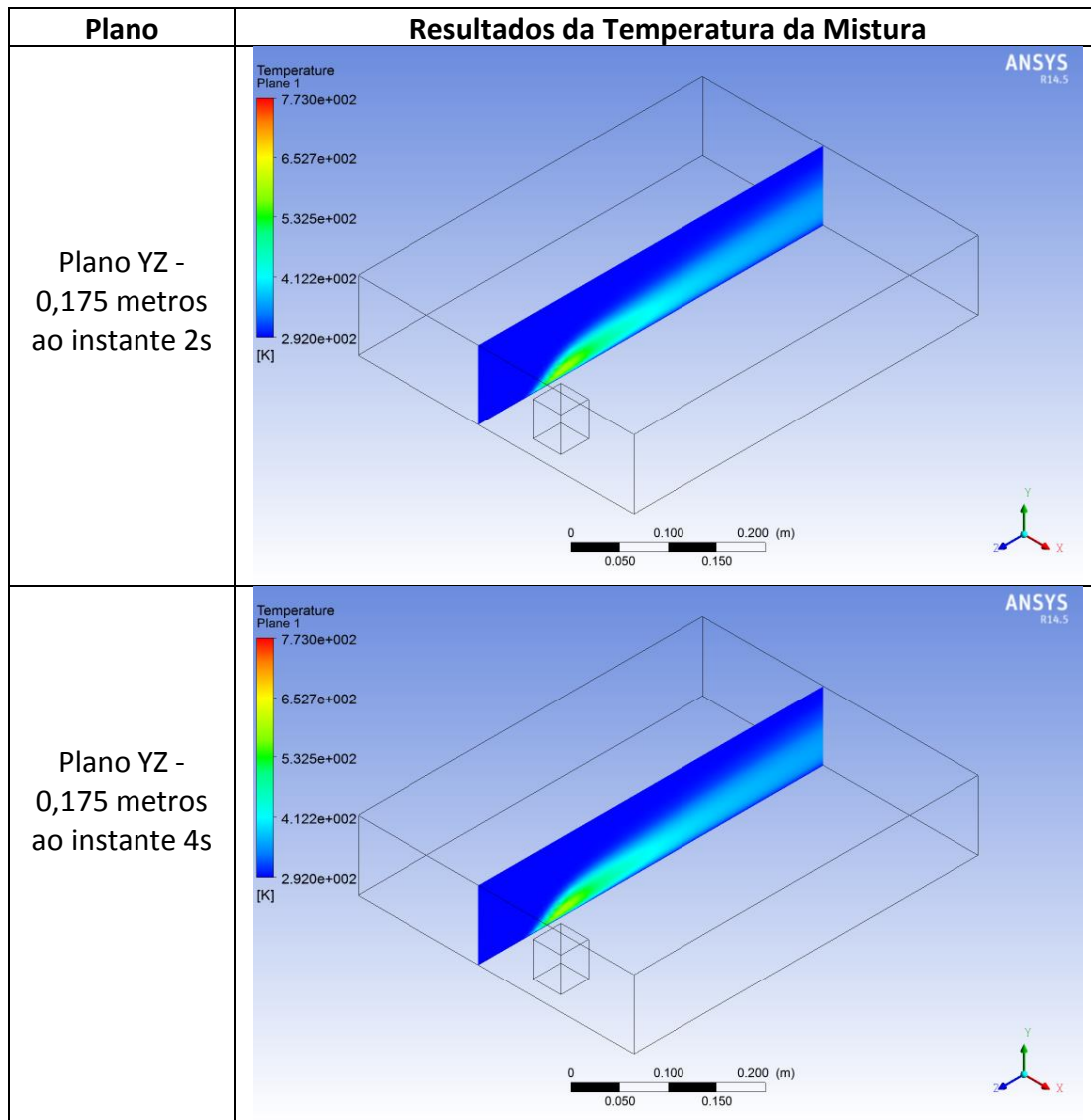


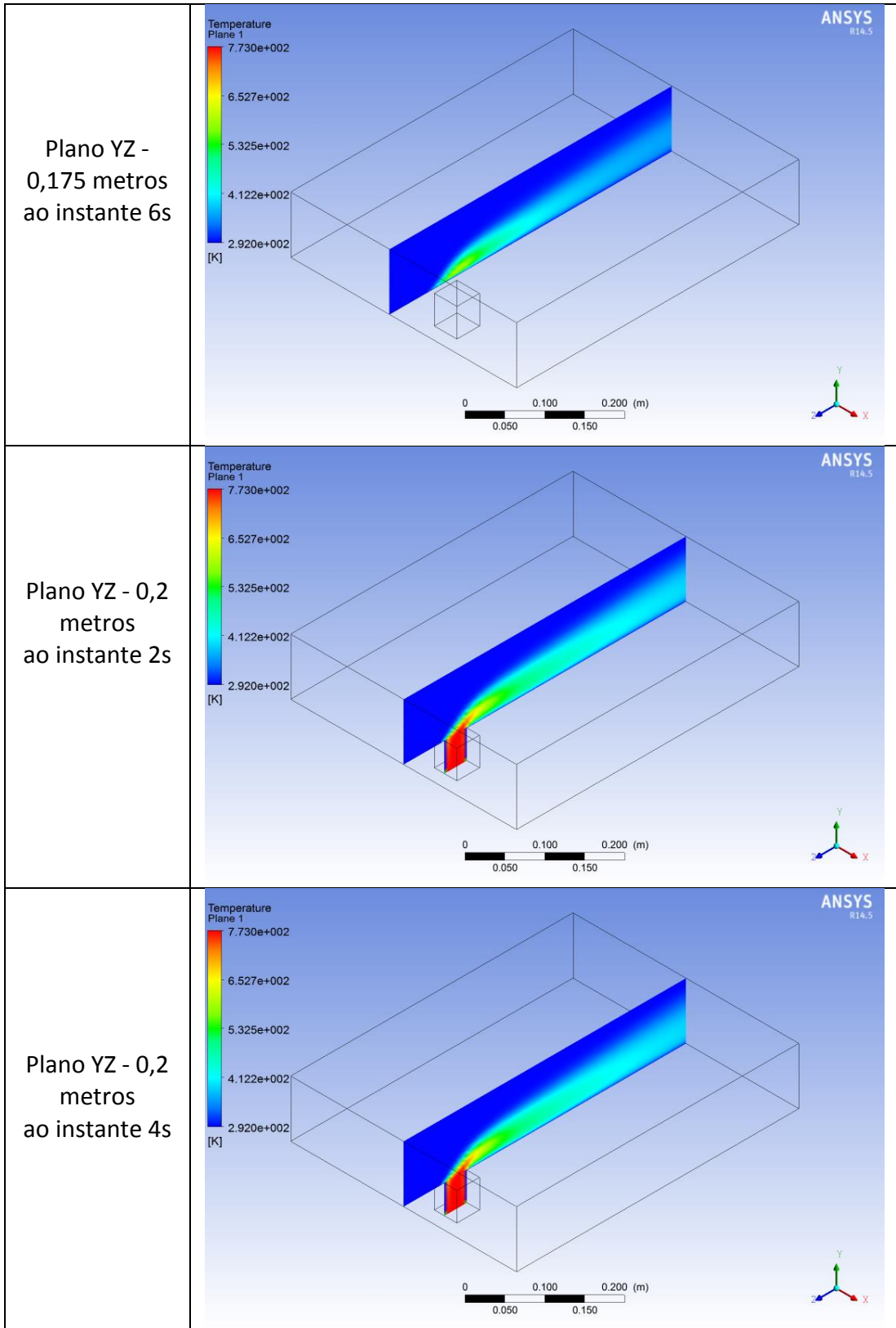


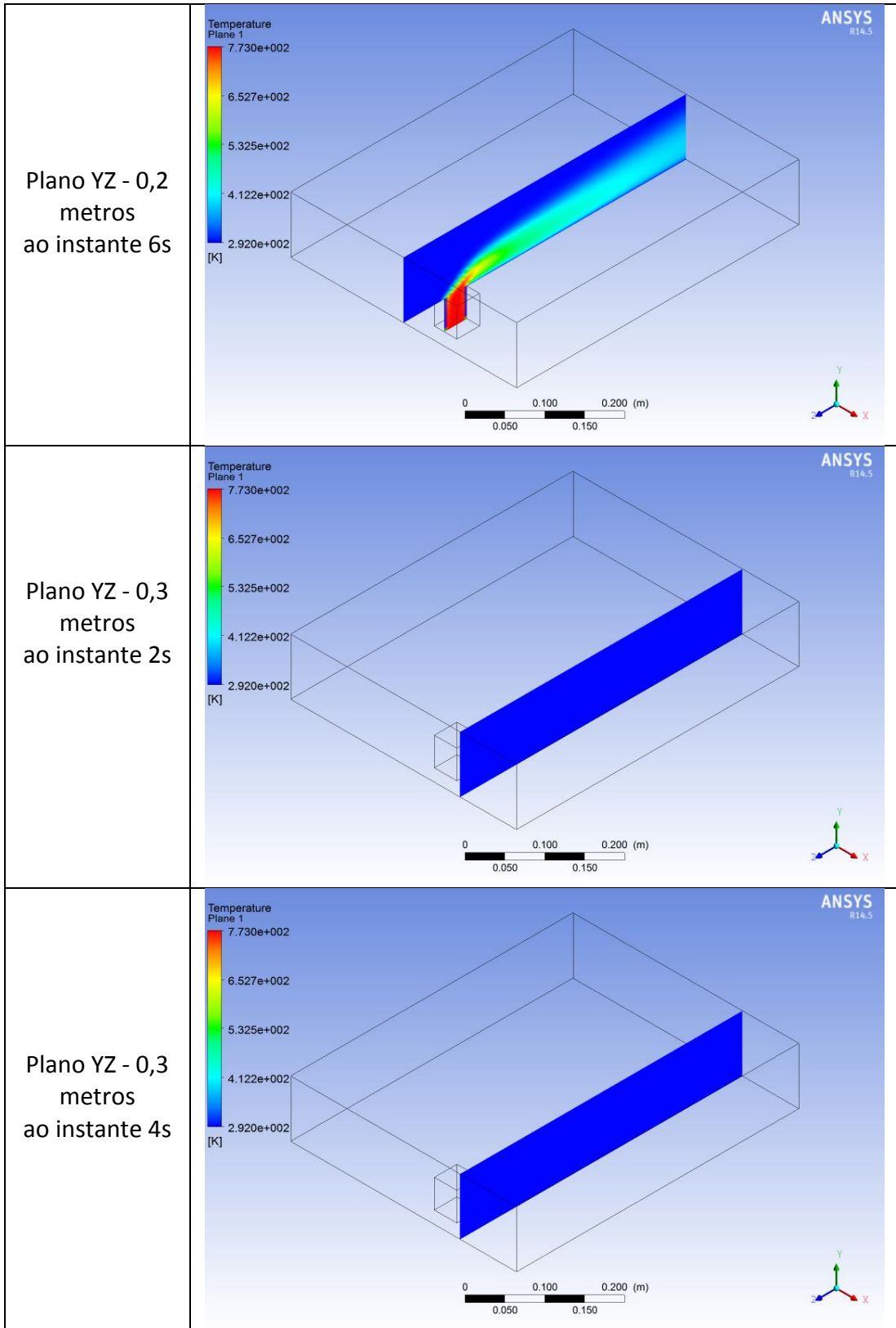
Relativamente aos resultados da fração volúmica de CO, verifica-se pelos vários planos apresentados na tabela 6.3, a acentuada influência das condições exteriores (entrada de ar) no escoamento. A entrada lateral de ar arrasta a concentração de CO em direção à saída, tornando o escoamento uniforme ao longo do tempo. Em termos de fração volúmica de CO, evidência um

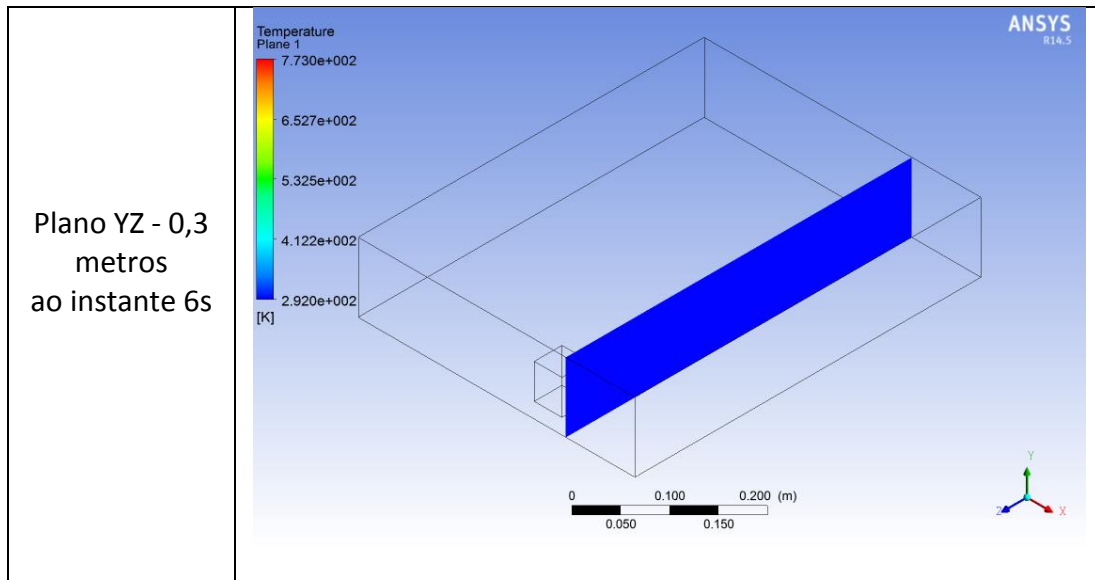
decréscimo progressivo ao longo que o escoamento flui para a saída, devido à interação com as restantes fases. O escoamento do CO é basicamente desenvolvido, apenas, na parte central do meio, por consequência das condições exteriores (elevada velocidade da entrada do ar) no meio, o restante meio envolvente apenas apresenta oxigénio e azoto.

Tabela 6.4 - Resultados da temperatura do caso 2



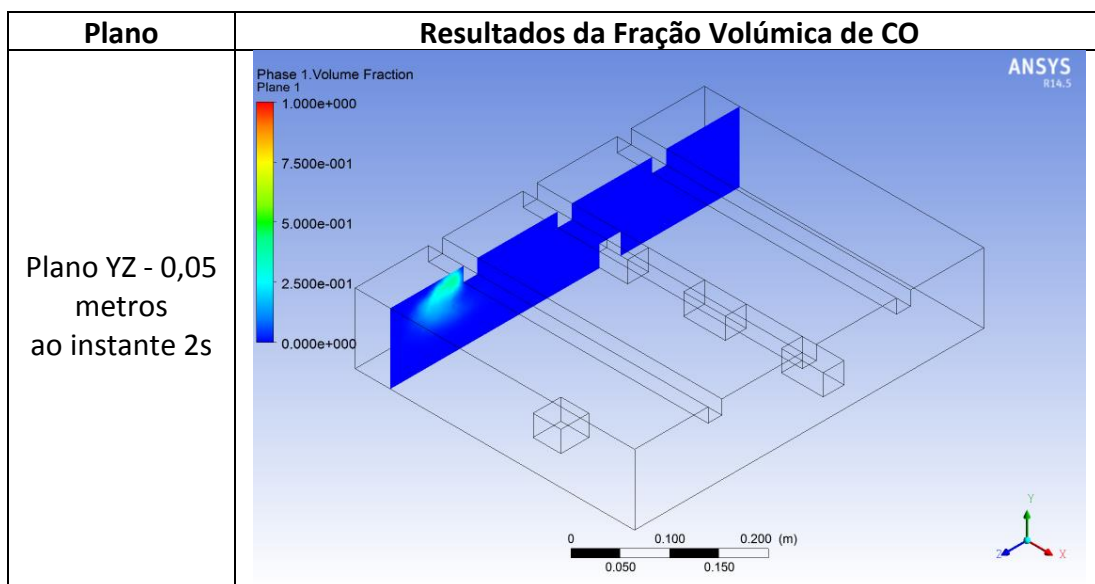


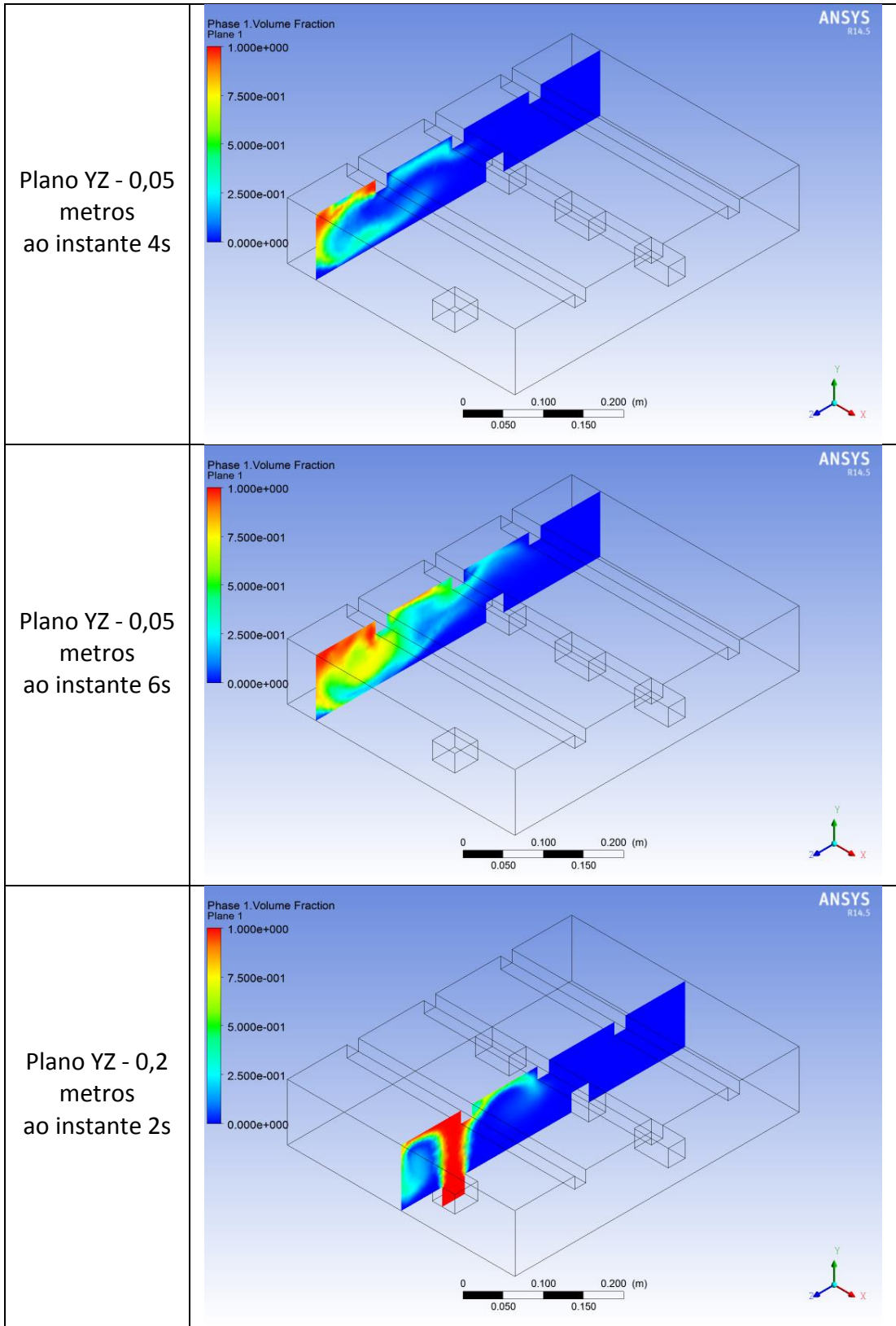


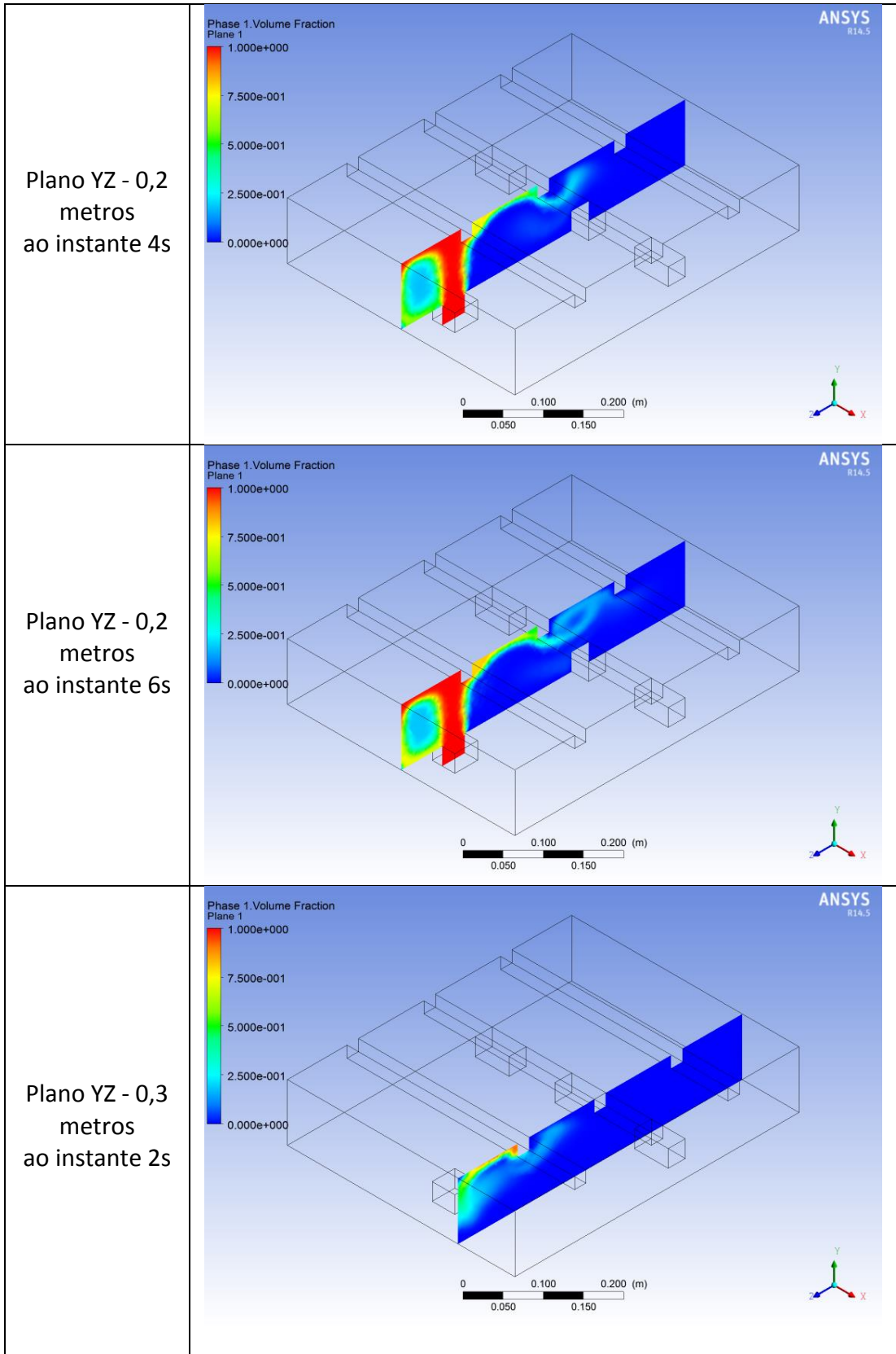


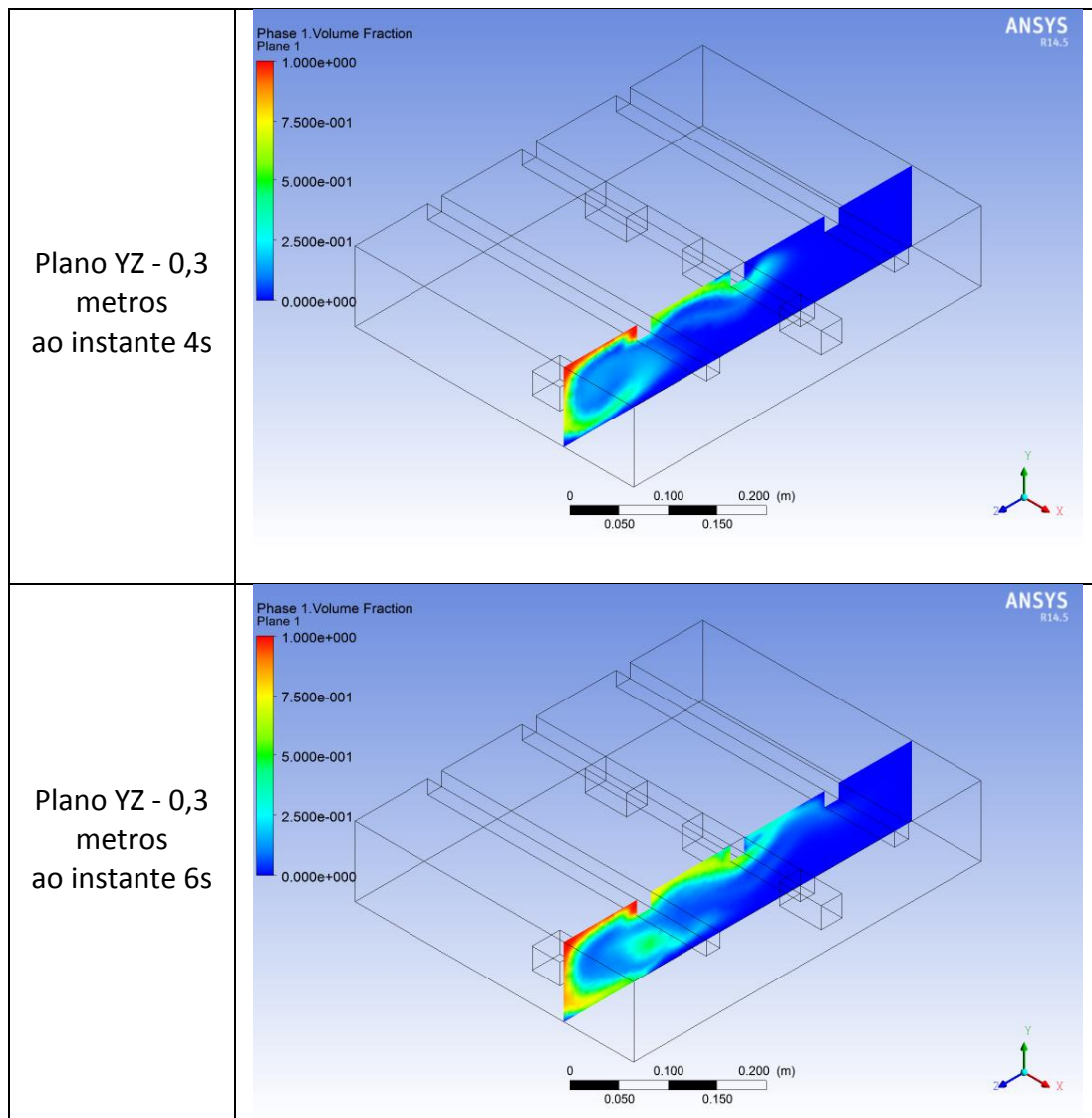
Relativamente aos resultados da temperatura da mistura, verifica-se pelos vários planos apresentados na tabela 6.4, que a temperatura sofre uma diminuição brusca logo à entrada do monóxido de carbono e gradual ao longo do desenvolvimento do escoamento. Apenas no plano central se evidencia um gradiente de temperaturas, enquanto o meio envolvente a mistura permanece à temperatura de entrada do ar e do meio (293K). Verifica-se, também, que a temperatura da mistura sofre alterações ligeiras na zona central da pluma térmica, diminuindo gradualmente dos 500K para os 400K ao longo do tempo.

**Tabela 6.5 - Resultados da fração volúmica de CO do caso 3**





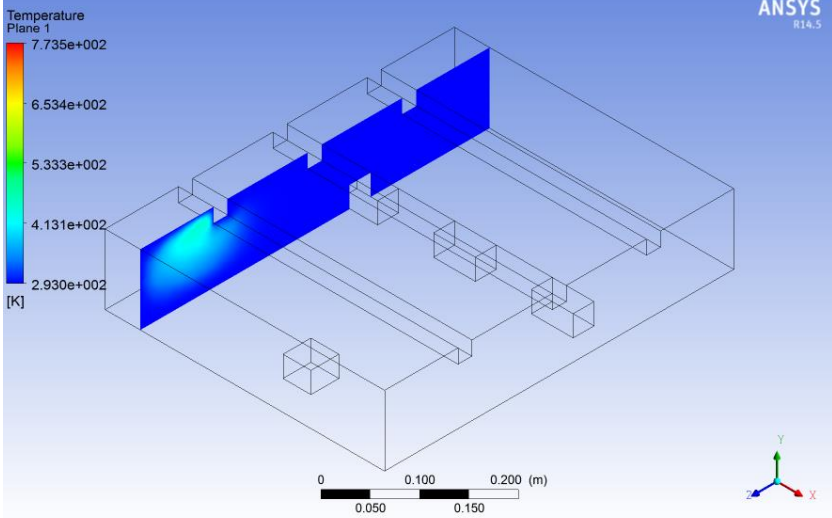
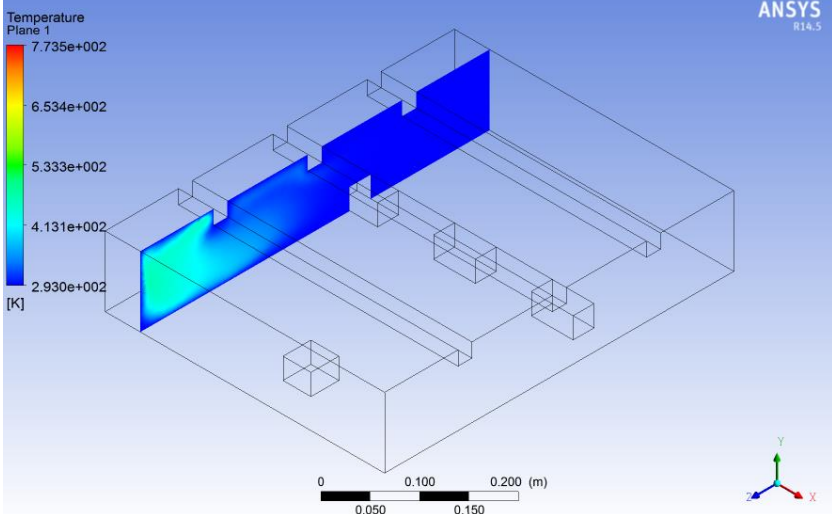
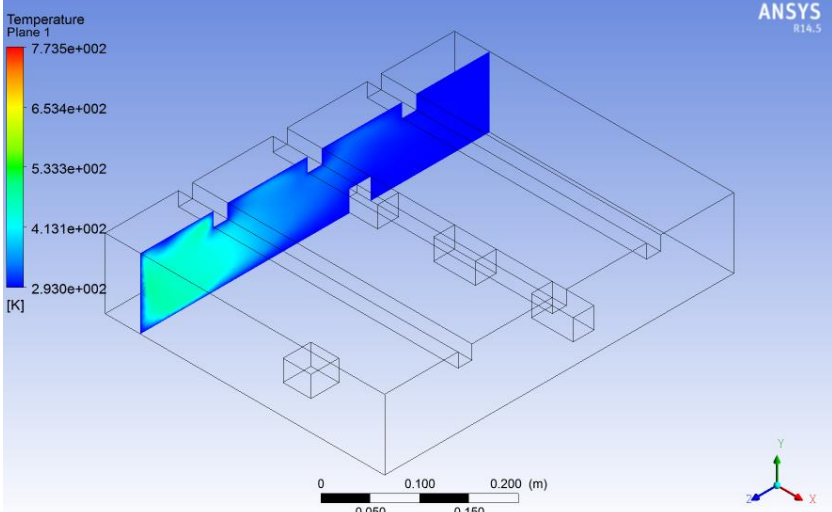


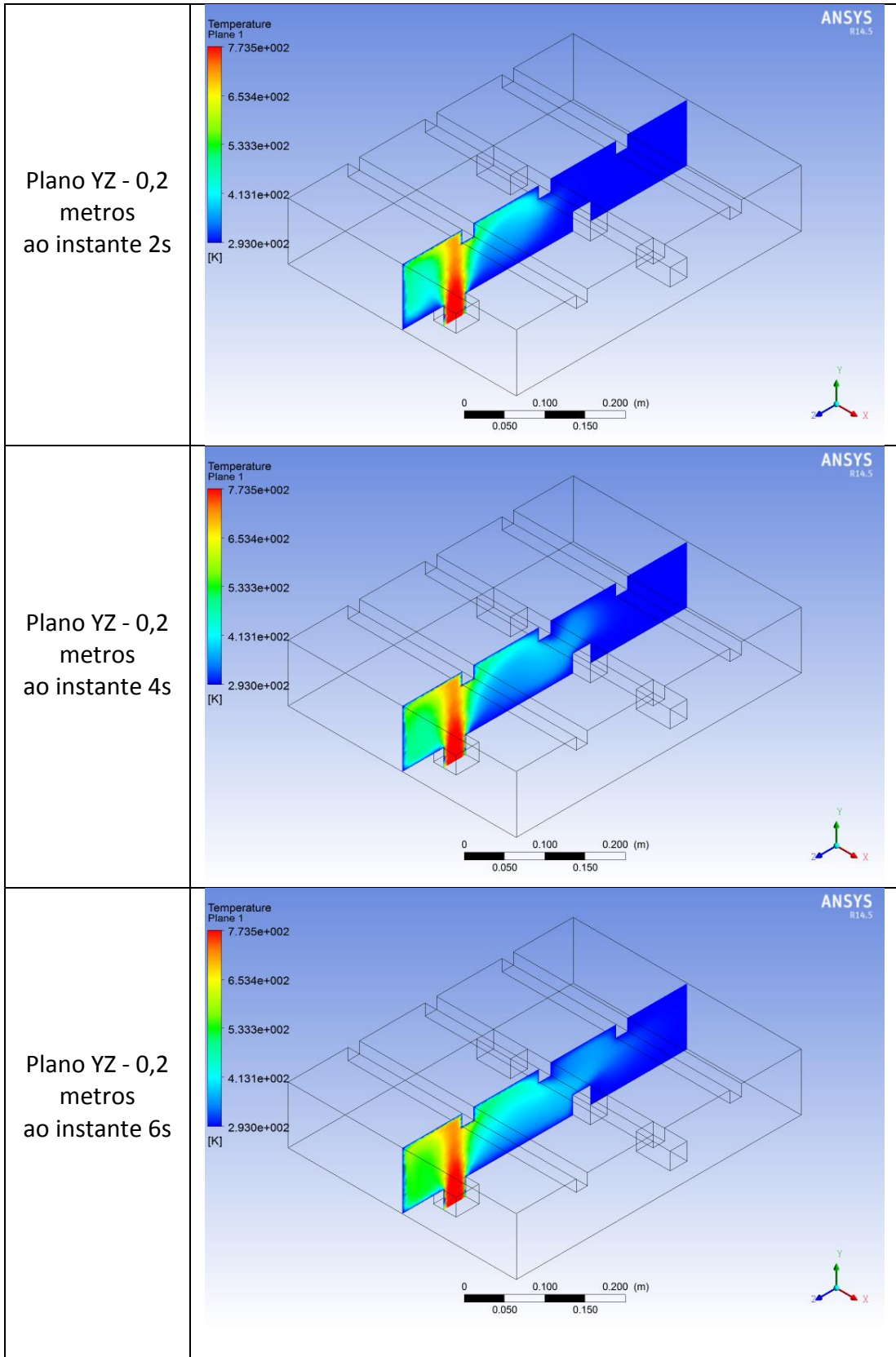


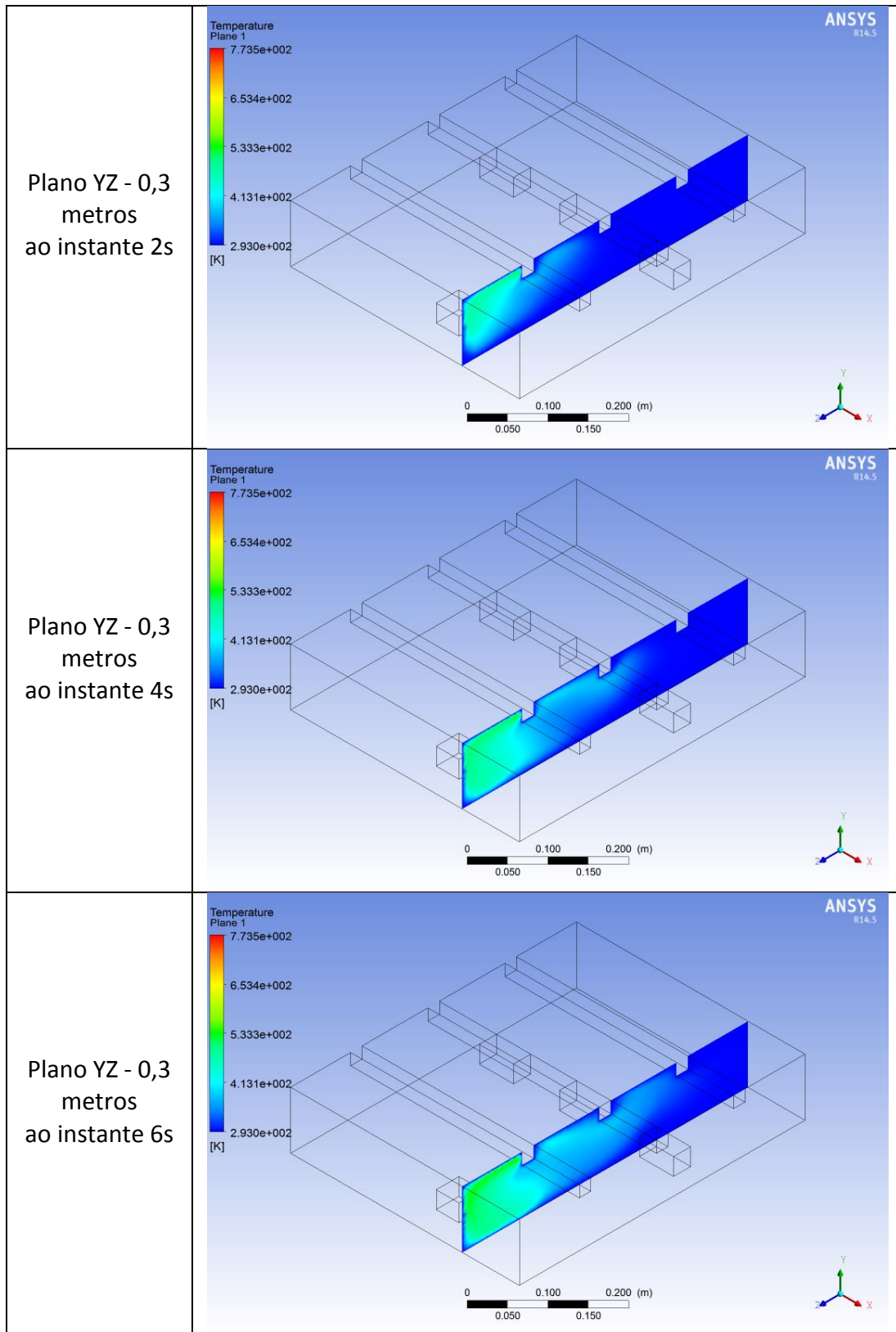
Pelos resultados da fração volúmica de CO apresentados na tabela 6.5, verifica-se uma acumulação na zona envolvente à sua entrada. Esta acumulação deve-se ao facto de não existir qualquer interação com o meio exterior, no entanto, verifica-se uma diluição progressiva de CO com as restantes fases ao longo do desenvolvimento do escoamento. A mistura cria um efeito turbulento junto à lateral esquerda. Este efeito de vórtice é provocado pela insuflação do CO num meio estagnado, que ao atingir a parte superior é forçado a mudar de direção. Os aspetos geométricos, como as “vigas” e os “veículos”, como é evidenciado pelo plano central, influenciam a direção e o desenvolvimento do escoamento, criando efeitos oscilatórios no escoamento. Para este caso, as “vigas” são zonas de concentração de CO, por serem locais de estagnação do escoamento, acentuando-se ao longo do tempo.



Tabela 6.6 - Resultados da temperatura da mistura do caso 3

Plano	Resultados da Temperatura da Mistura
Plano YZ - 0,05 metros ao instante 2s	
Plano YZ - 0,05 metros ao instante 4s	
Plano YZ - 0,05 metros ao instante 6s	

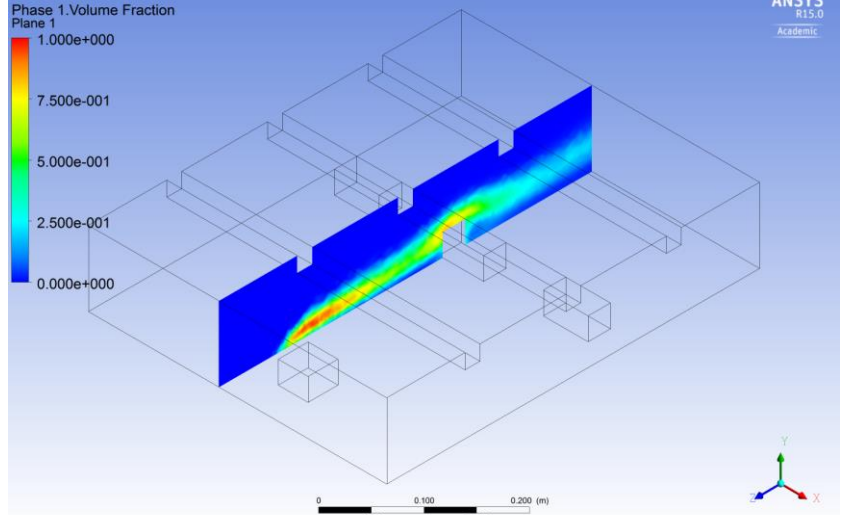
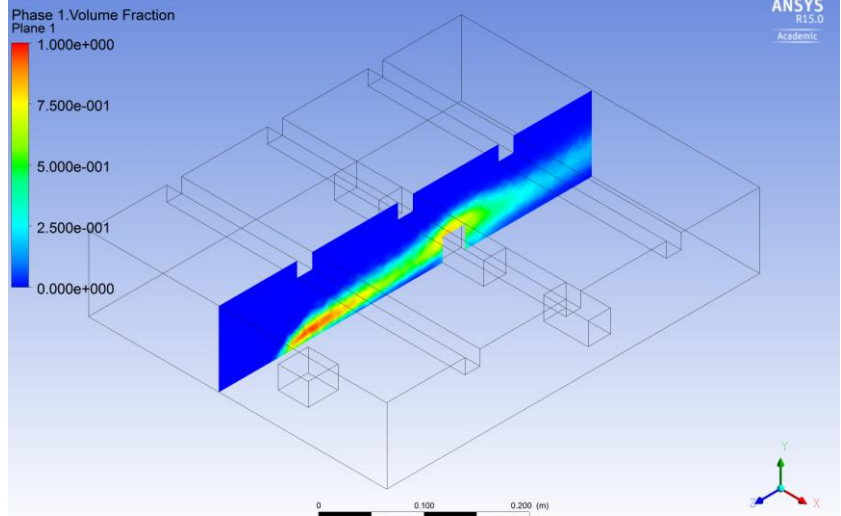
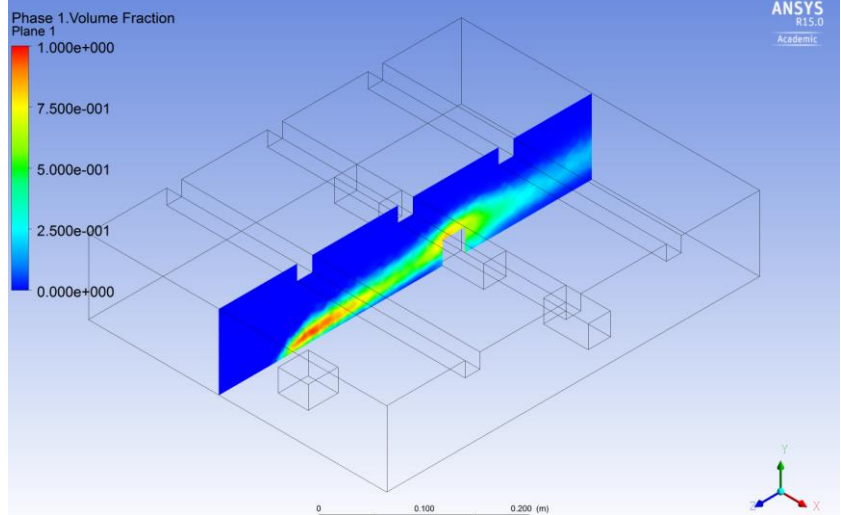


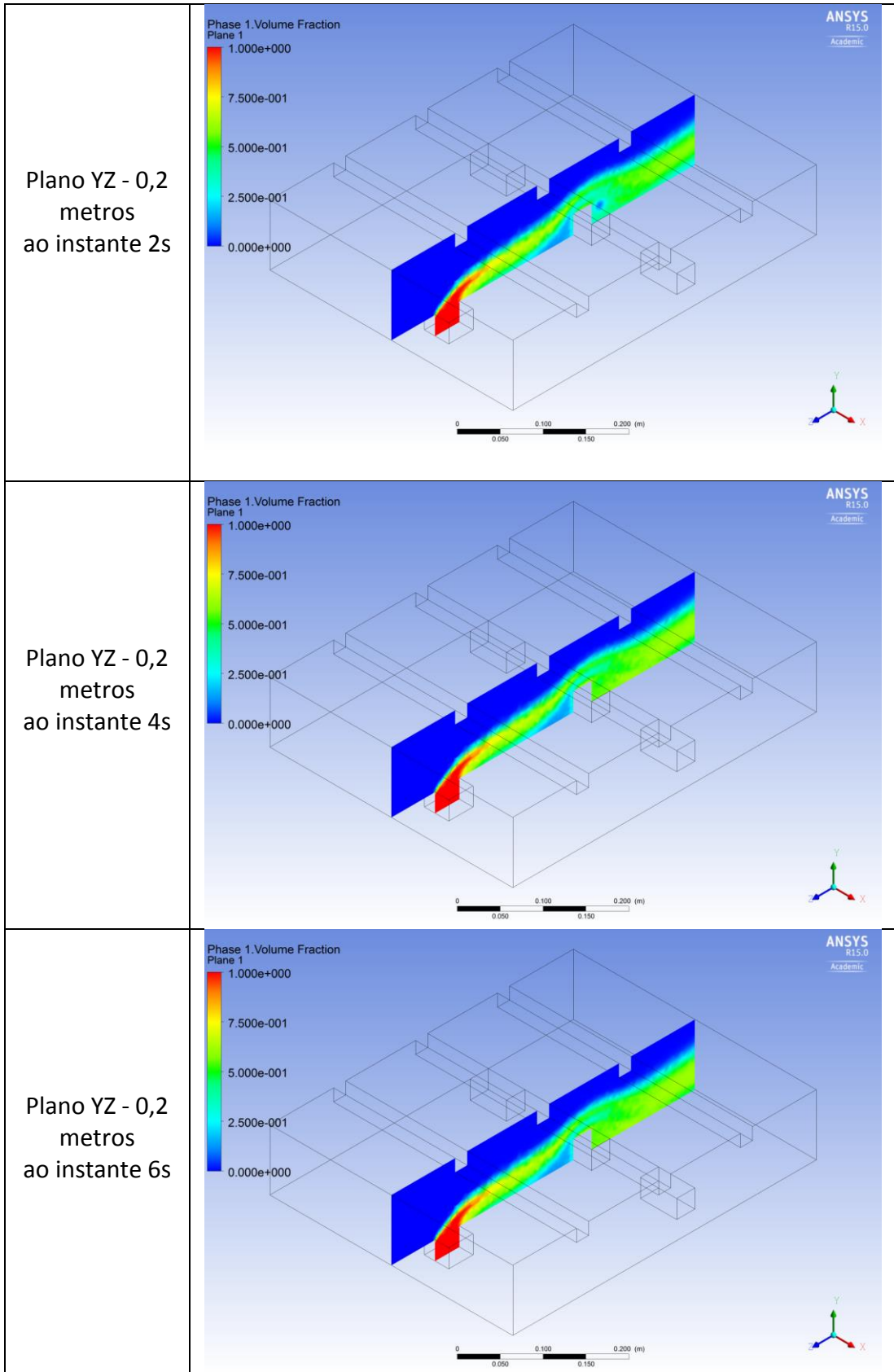


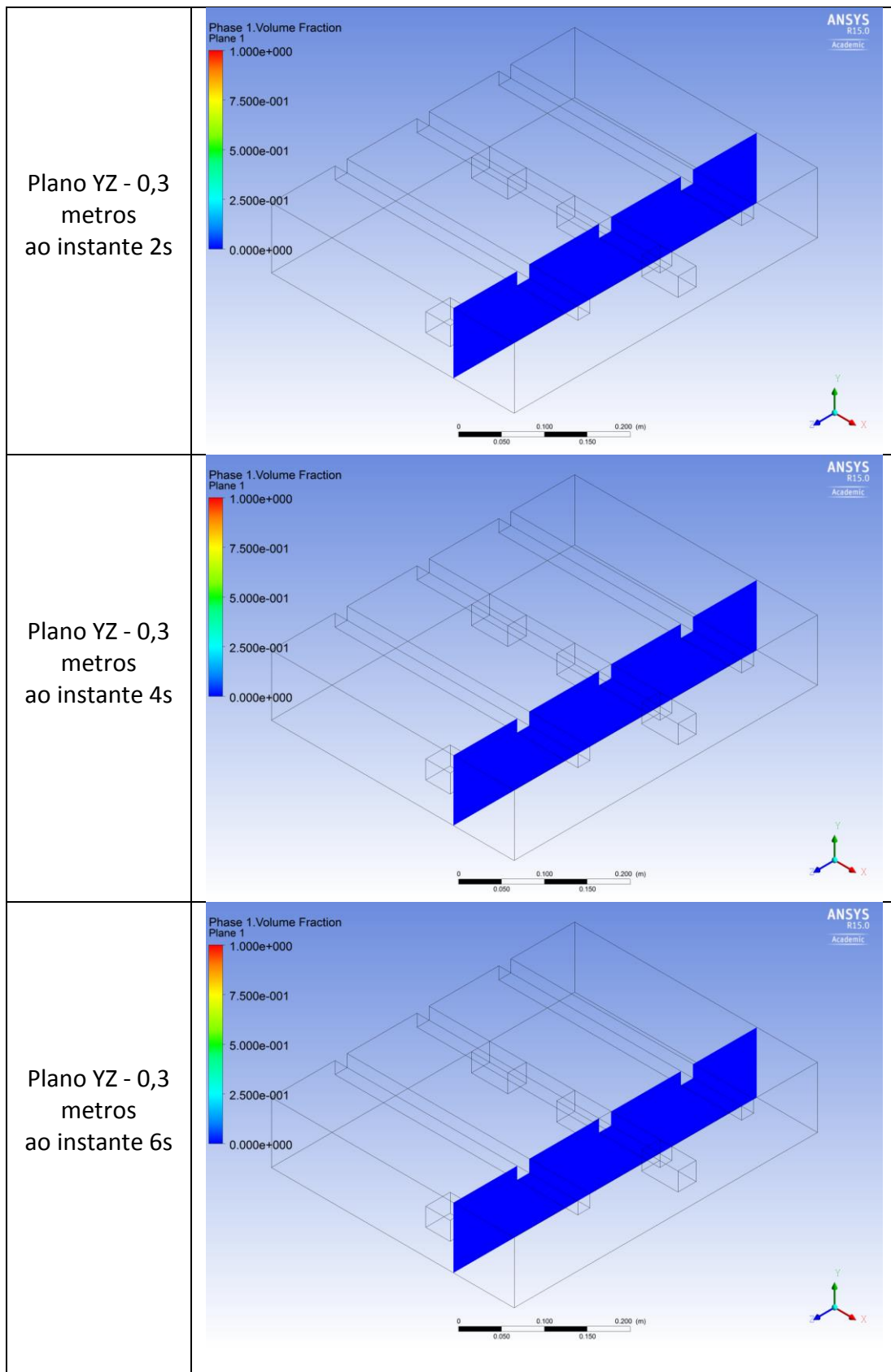
Pelos resultados da temperatura da mistura apresentados na tabela 6.6, verifica-se que ao longo que a mistura flui em direção à saída a temperatura do CO sofre progressivamente um decréscimo, atingindo rapidamente temperaturas por volta dos 350K. Por outro lado, a temperatura da mistura sofre um aumento gradual ao longo do tempo e ao longo do

desenvolvimento do escoamento. Na zona envolvente à entrada de CO, a temperatura da mistura é bastante elevada por força da alta temperatura de insuflação do monóxido de carbono.

Tabela 6.7 - Resultados da fração volúmica do CO do caso 4

Plano	Resultados da Fração Volúmica do CO
Plano YZ - 0,175 metros ao instante 2s	
Plano YZ - 0,175 metros ao instante 4s	
Plano YZ - 0,175 metros ao instante 6s	

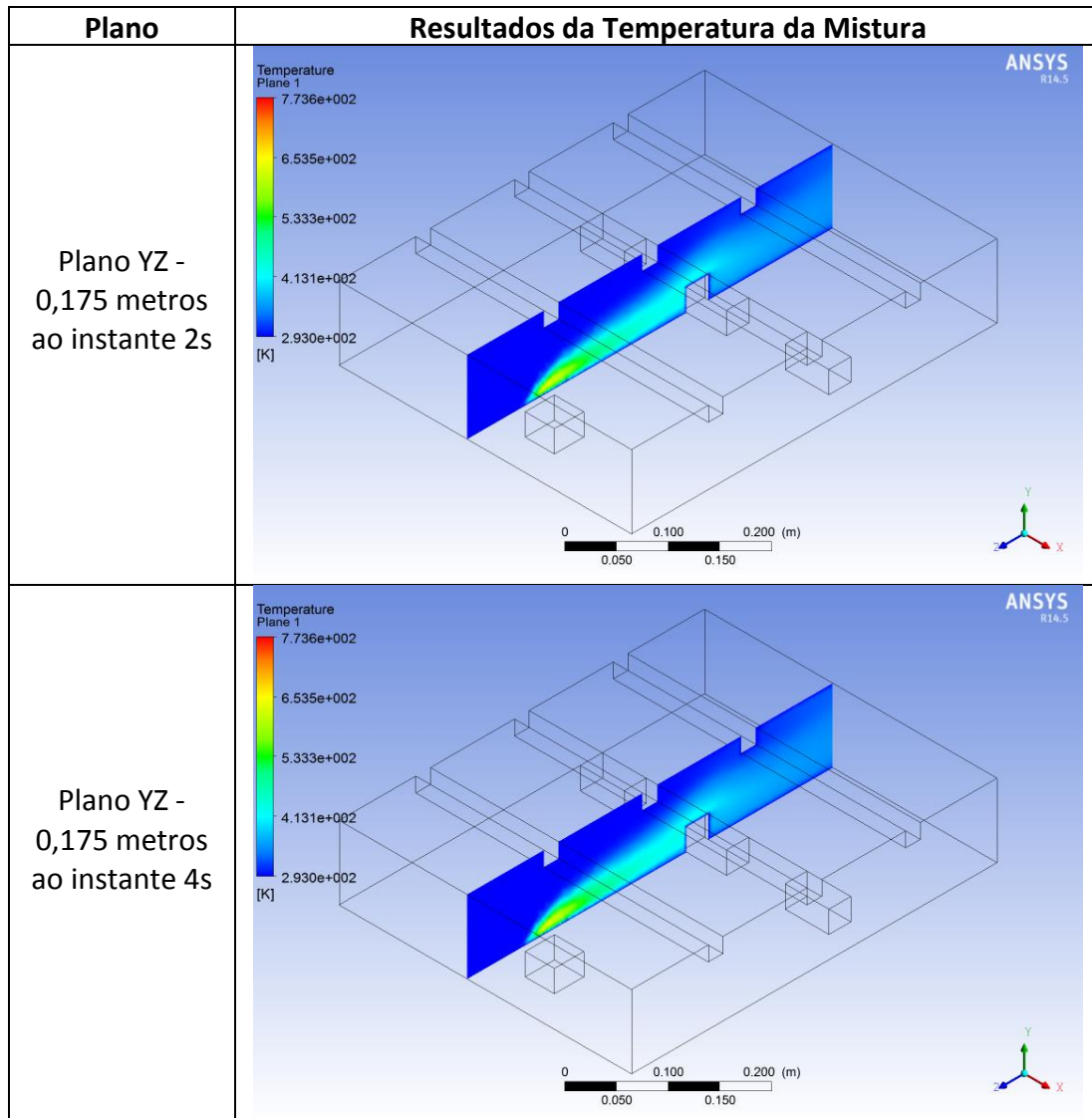


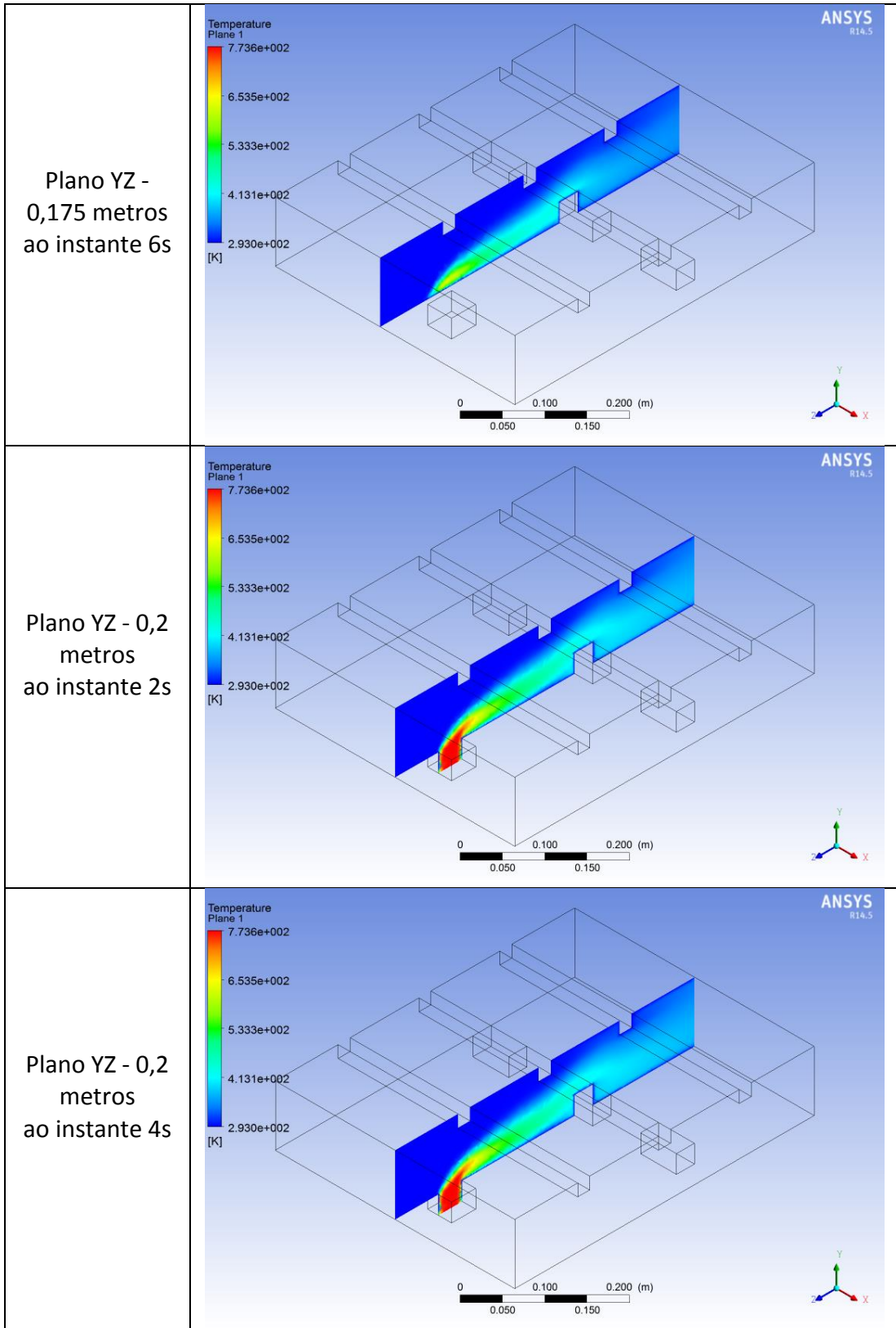


Pelos resultados apresentados na tabela 6.7, verifica-se que a concentração de CO é fortemente direcionada para a saída, devido à influência das condições exteriores no desenvolvimento do escoamento. A existência de “veículos” no interior do meio influencia a

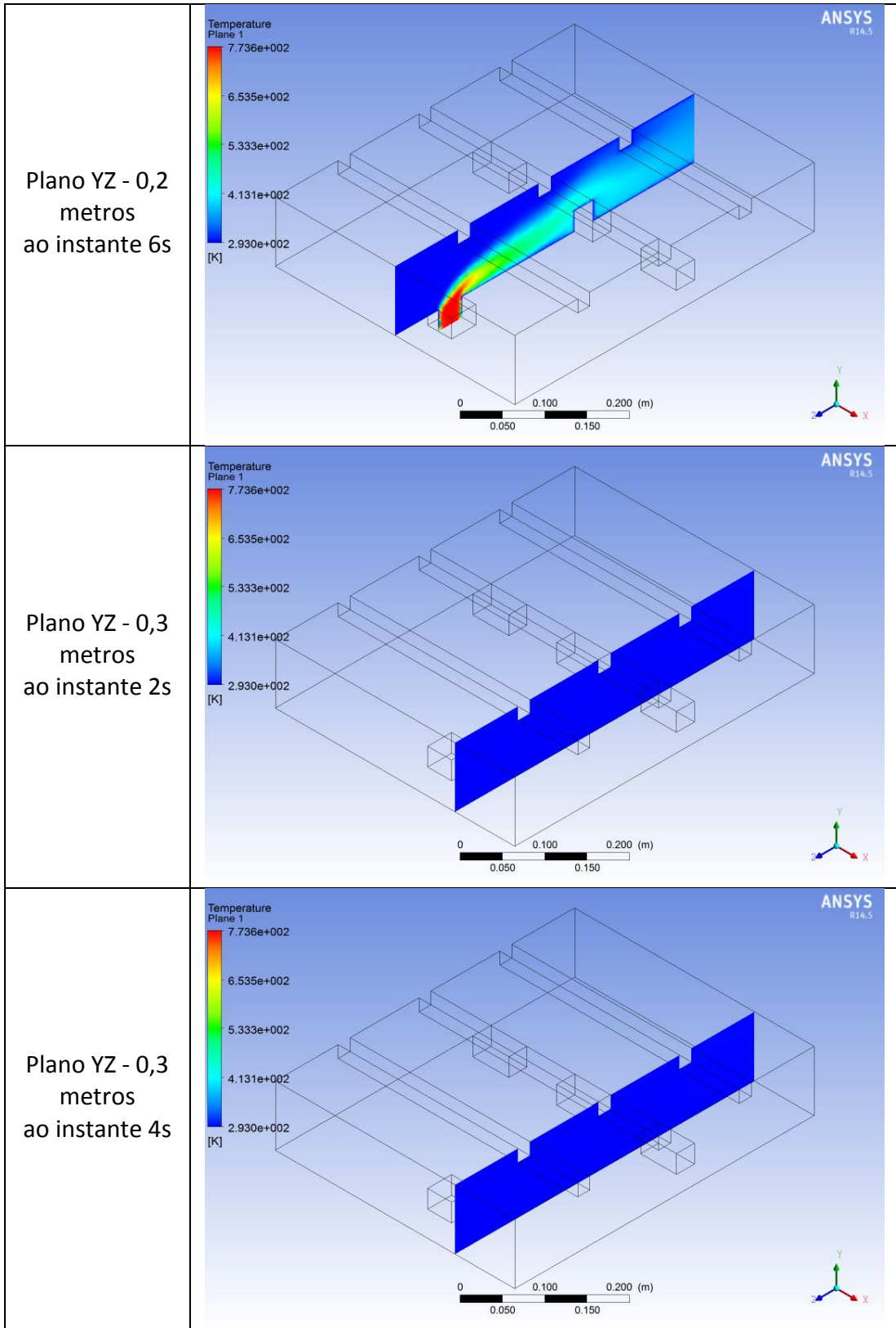
direção do escoamento. A concentração de CO tende a subir de forma a contornar o obstáculo, ao contrário do que se sucede no caso 2, onde a concentração de CO é escoada a um nível muito baixo. Ao longo do tempo verifica-se que as zonas a seguir aos “veículos” tendem a ser locais de concentração de CO, uma vez que a condições de exteriores não interferem nessas zonas. Ao contrário do caso anterior, neste caso verifica-se que a dispersão do CO não é tão acentuada por todo o meio, apenas envolve a zona central do meio.

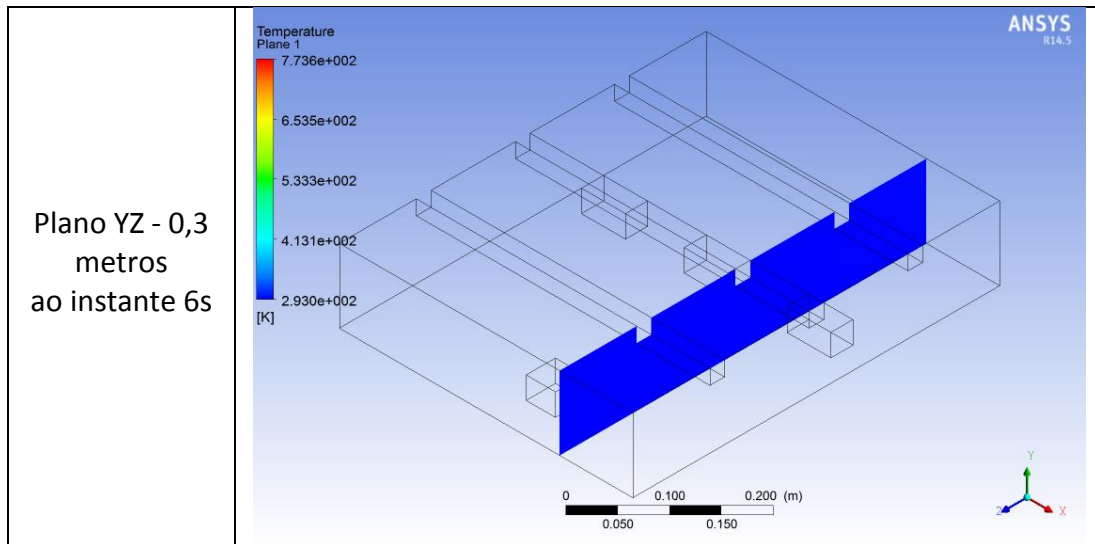
Tabela 6.8 - Resultados da temperatura da mistura do caso 4







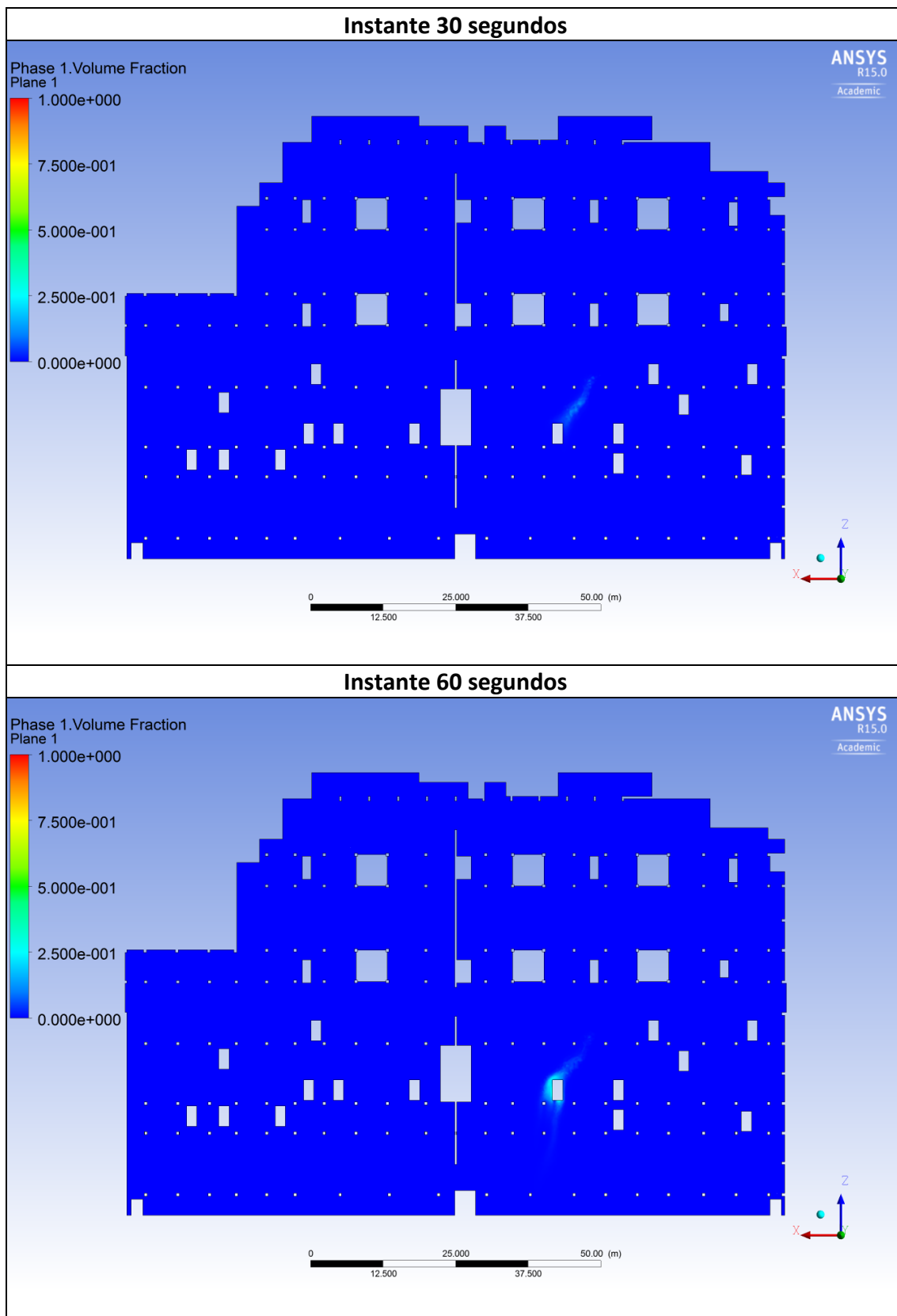


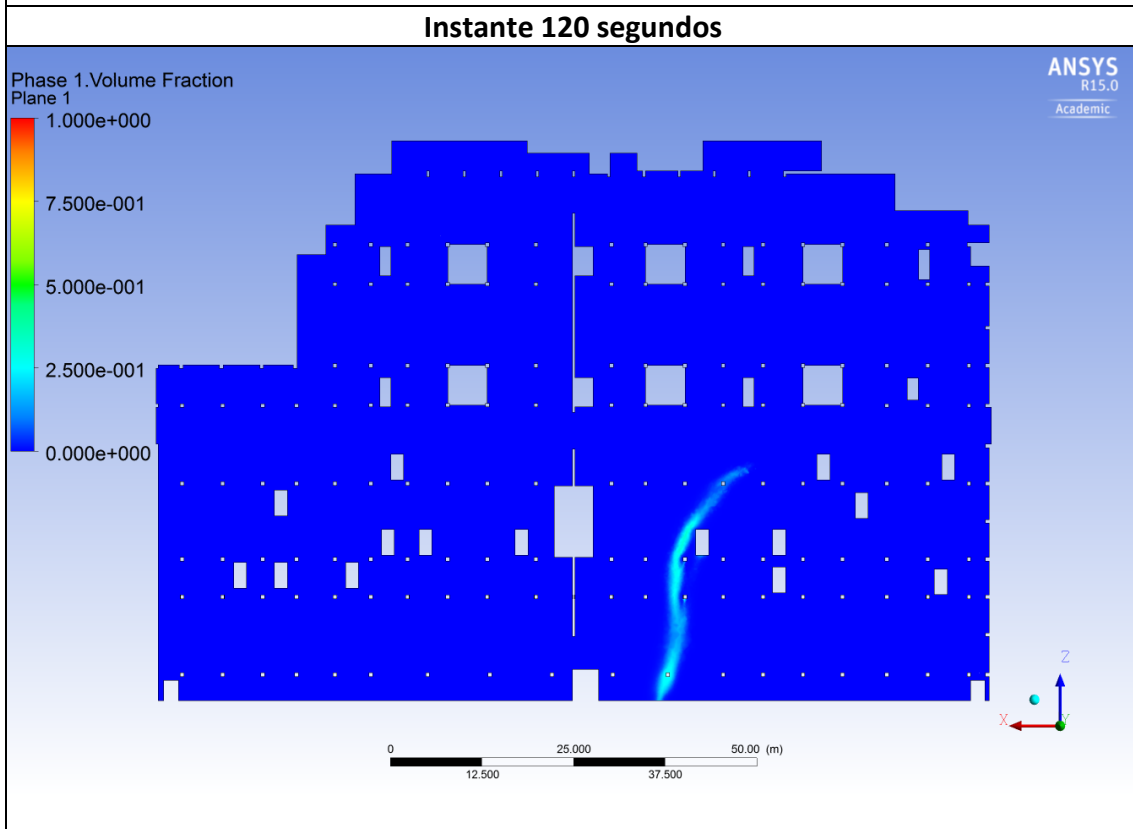
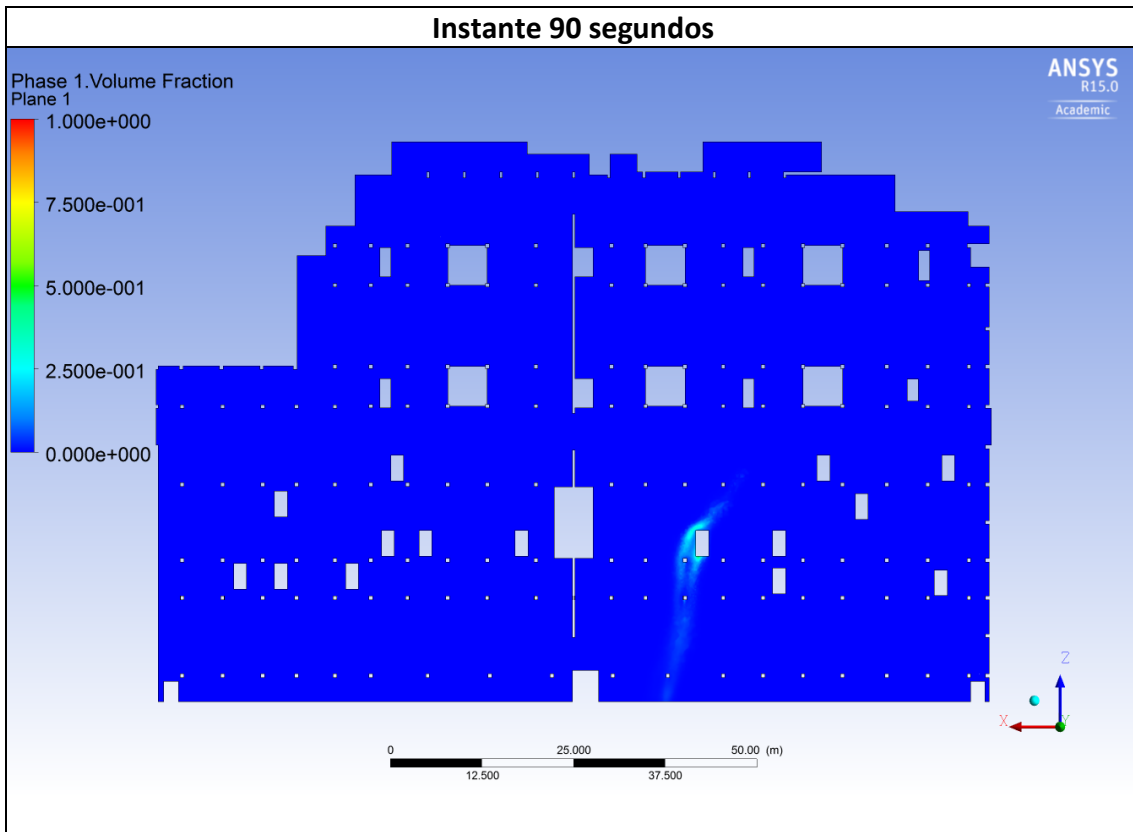


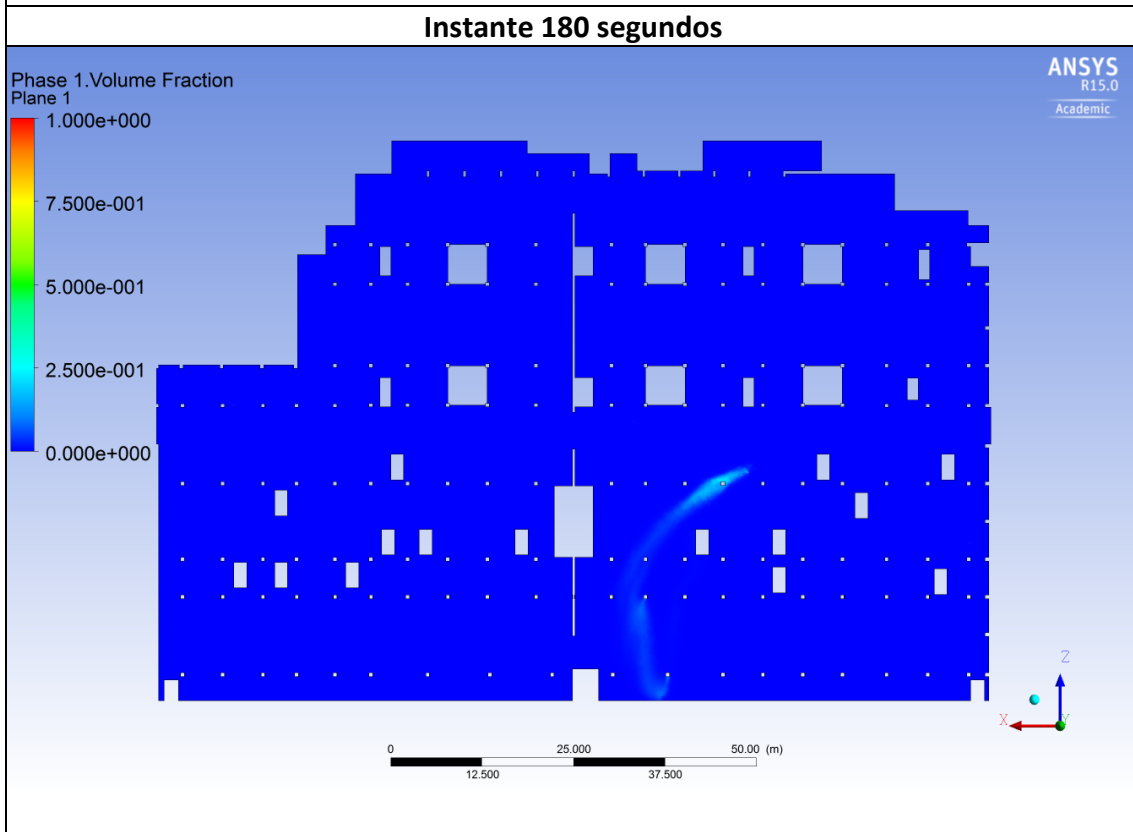
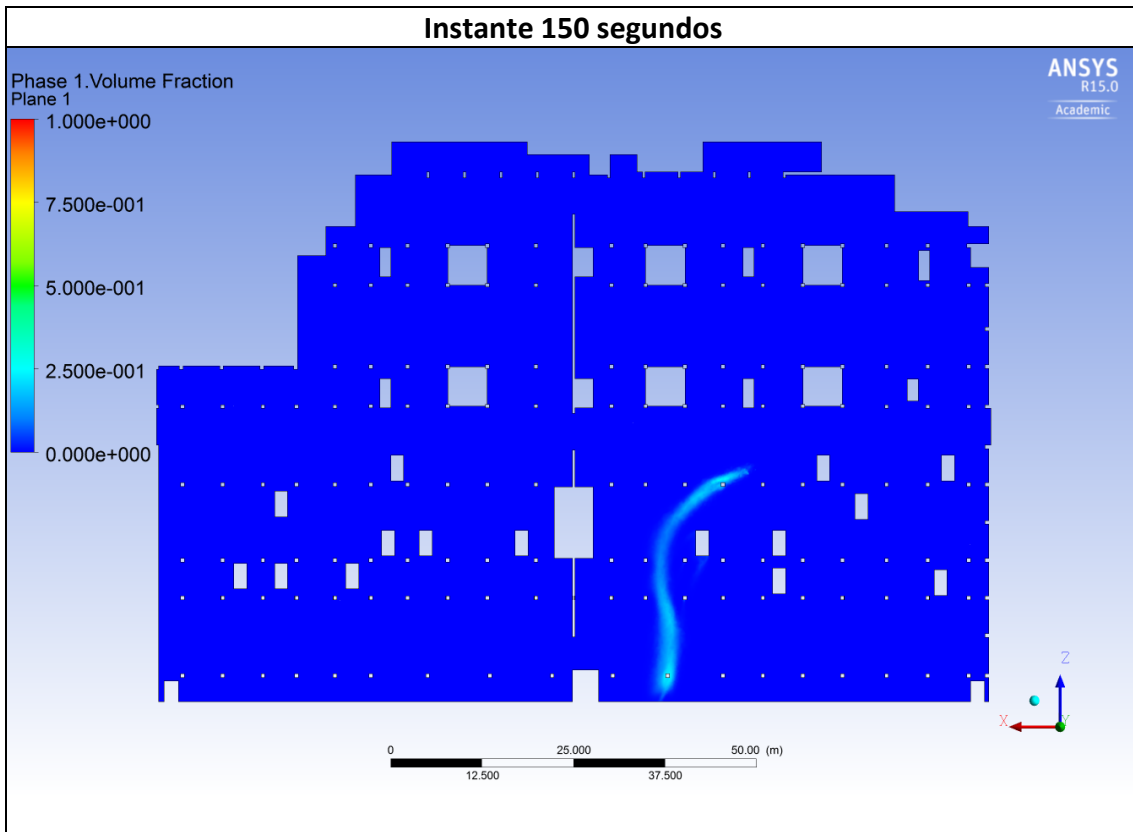
Pelos resultados apresentados na tabela 6.8 relativos à temperatura da mistura, verifica-se que a temperatura da mistura não sofre grandes alterações ao longo do tempo. Apenas na zona central do meio se verifica um gradiente de temperaturas, no restante meio a temperatura da mistura mantém-se constante à temperatura ambiente. Isto é resultado da pouca dispersão da concentração do CO pelo meio.

## 6.2 Resultados e Discussão da Modelação do Incêndio no Parque de Estacionamento (Primeiro Caso)

Tabela 6.9 – Resultados da fração volúmica de CO no plano XZ (1.5 metros)







Pelos resultados de fração volúmica de CO apresentados na tabela 6.9, verifica-se que o desenvolvimento do escoamento é influenciado pelas condições exteriores (vento). Apesar da baixa velocidade da convecção natural (vento), com valor de 1m/s, verifica-se que a propagação de CO não é uniforme até à saída. A convecção natural influencia intensamente a direção do escoamento do CO, acentuando-se cada vez mais ao longo do tempo. Contrariamente ao segundo caso, verifica-se uma maior concentração de CO no plano ao longo do tempo. A razão para tal deve-se sobretudo pela forte influência das condições exteriores no escoamento do CO. De realçar que a fração volúmica de CO, para o plano apresentando, atinge valores máximos na ordem dos 25%.

Através do *table viewer* do *CFD Post*, é possível determinar o volume de cada fase no meio num determinado instante. Posto isto, determinou-se o volume de cada fase presente no meio aos 180 segundos, onde os resultados estão apresentados na tabela 6.10.

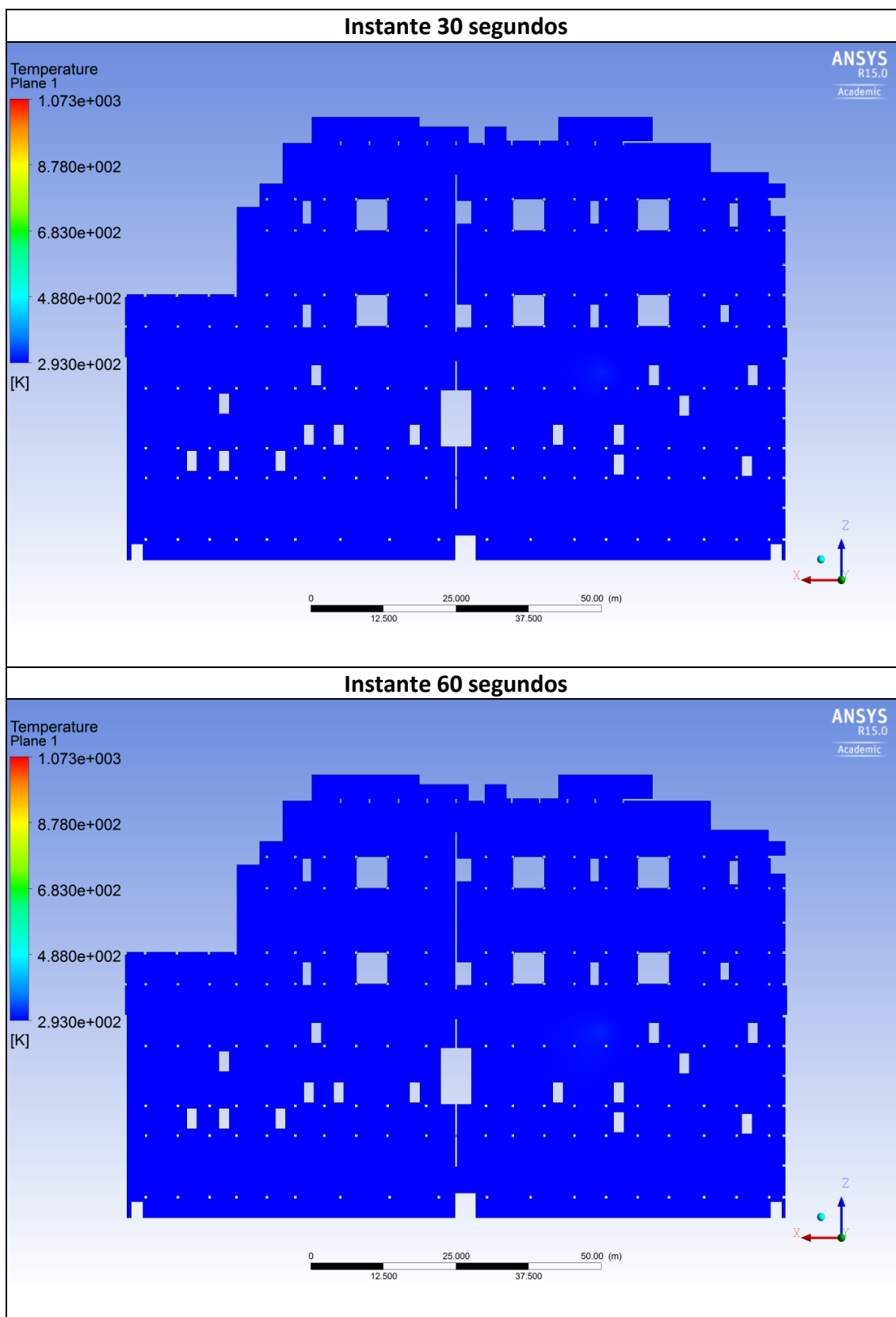
**Tabela 6.10 - Resultados do volume de cada fase aos 180s**

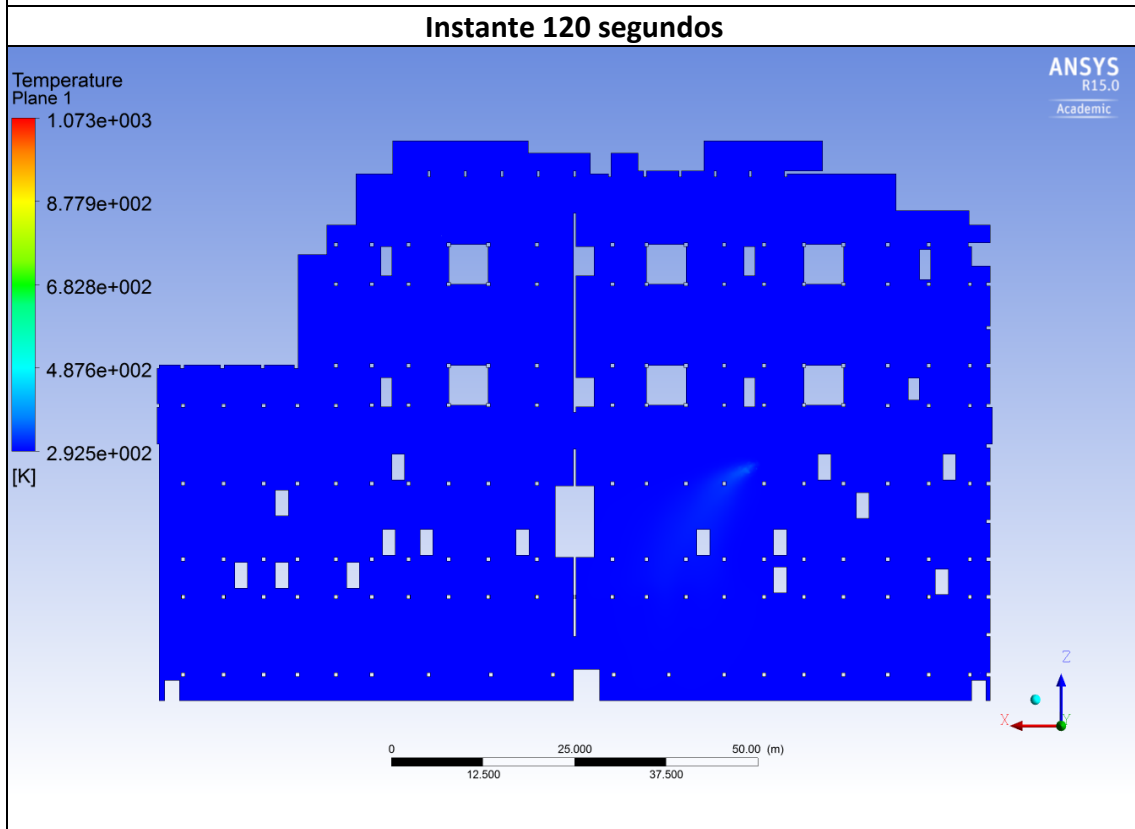
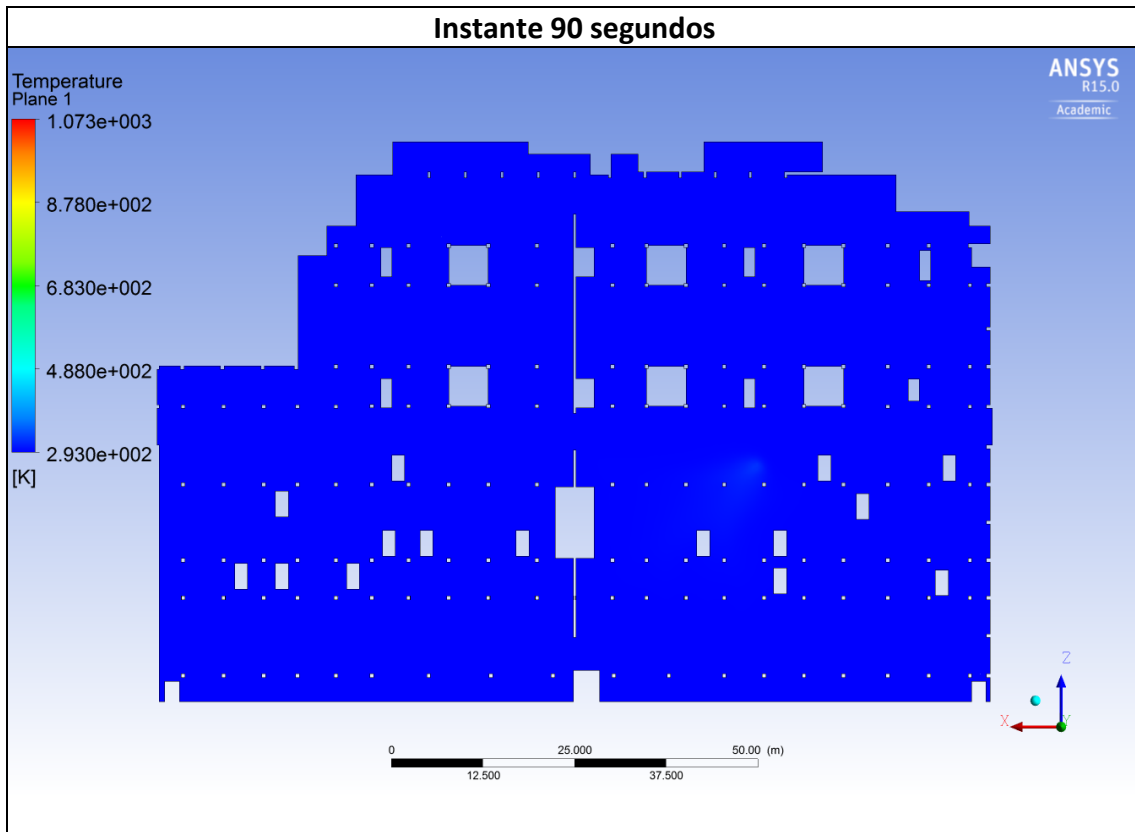
<b>Fase</b>	<b>Volume [m<sup>3</sup>]</b>	<b>% Volúmica</b>	<b>ppm</b>
<b>CO</b>	14	0,06	600
<b>O<sub>2</sub></b>	4428	20,1	-
<b>N<sub>2</sub></b>	17281	79,3	-
<b>Total</b>	21723	100	-

Pelos resultados da fração volúmica é possível verificar que o escoamento de CO para o exterior inicia-se por volta dos 100 segundos, sendo assim todo o caudal debitado de CO encontra-se no interior do parque. Pela legislação em vigor, a concentração de CO não deve atingir os 200 ppm instantâneos. Sabendo que o caudal debitado de CO é de 0,33 kg/s, ao fim de 16 segundos, o volume de CO no interior do parque atinge os 4,5 m<sup>3</sup>, cerca de 200 ppm. A partir deste instante o valor da concentração de CO no interior excede o estabelecido por lei.

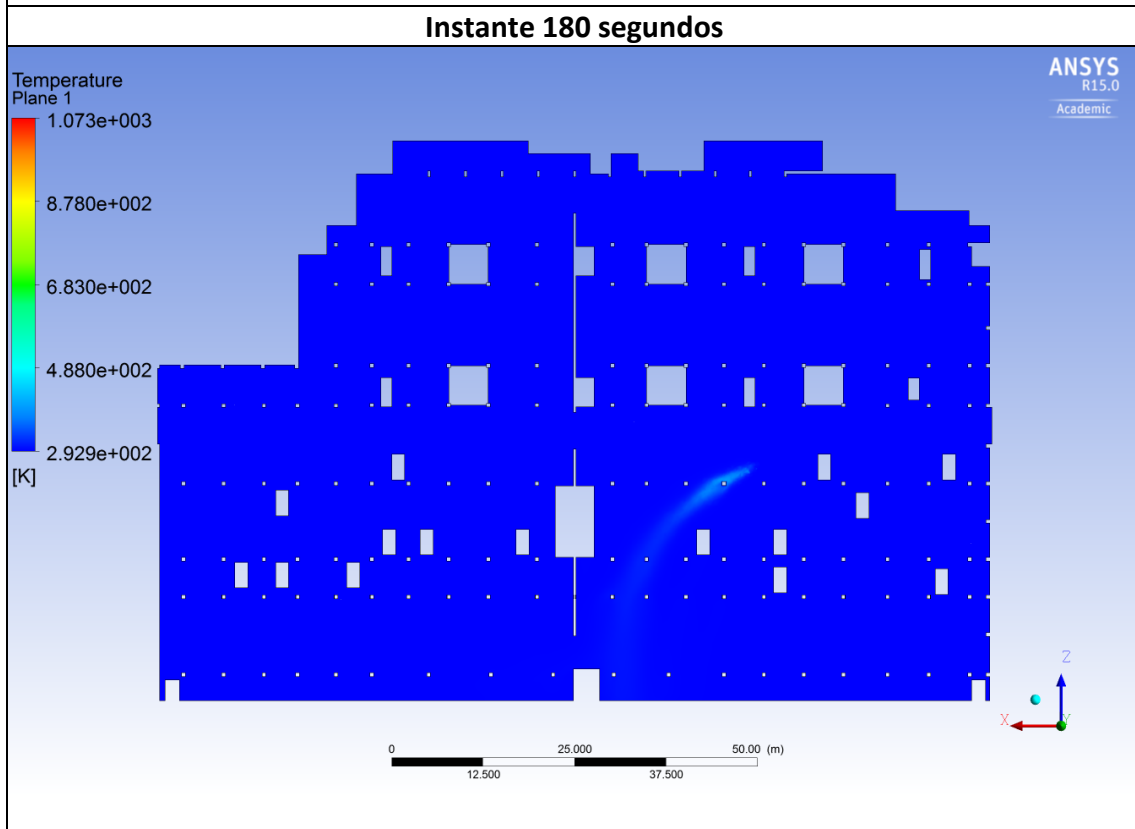
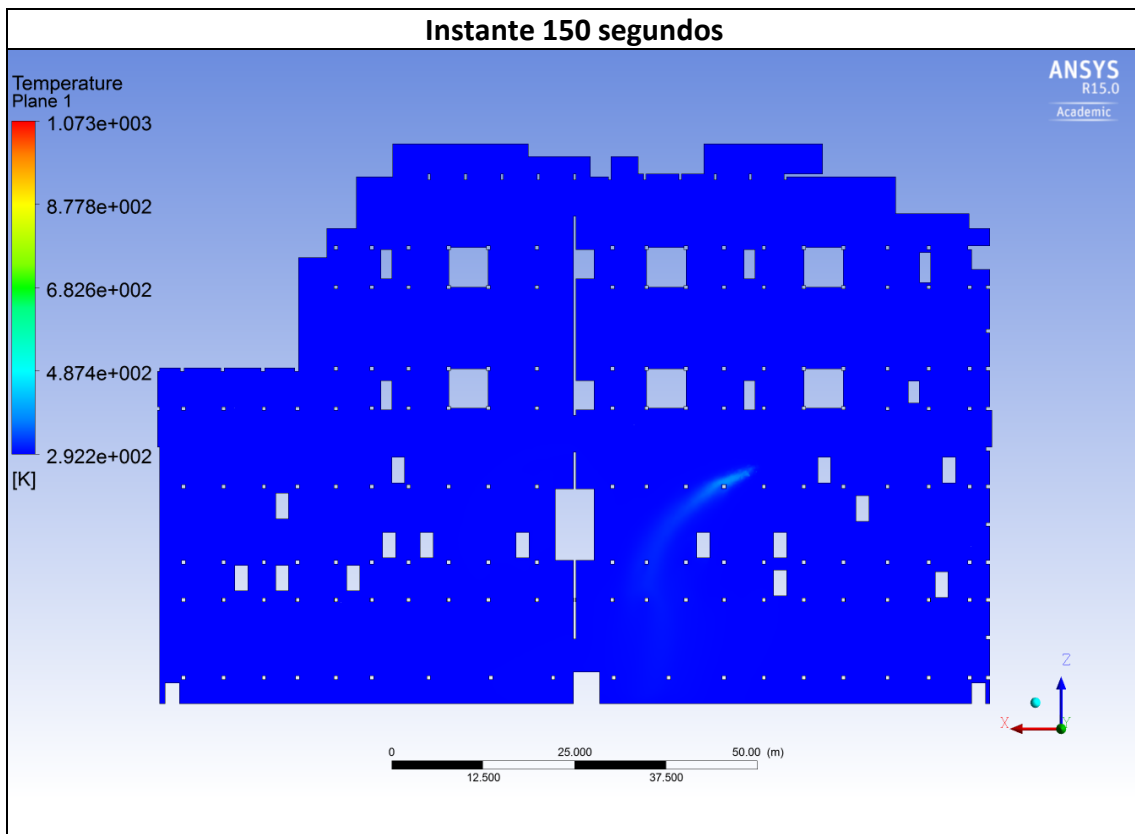
Pelos resultados apresentados na tabela 6.10, verifica-se que ao fim de 180 segundos a concentração de CO no interior do parque de estacionamento é de 14 m<sup>3</sup>. Sabendo que ao fim de 180 segundos foi libertado 53 m<sup>3</sup> de CO, apura-se que foi escoado para o exterior do parque cerca de 39 m<sup>3</sup> de CO. Ao fim de 180 segundos, a concentração de CO no interior do parque de estacionamento atinge os 600 ppm, o que quer dizer que não está em conformidade com a legislação em vigor em parques de estacionamento.

Tabela 6.11 – Resultados da temperatura da mistura no plano XZ (1.5 metros)





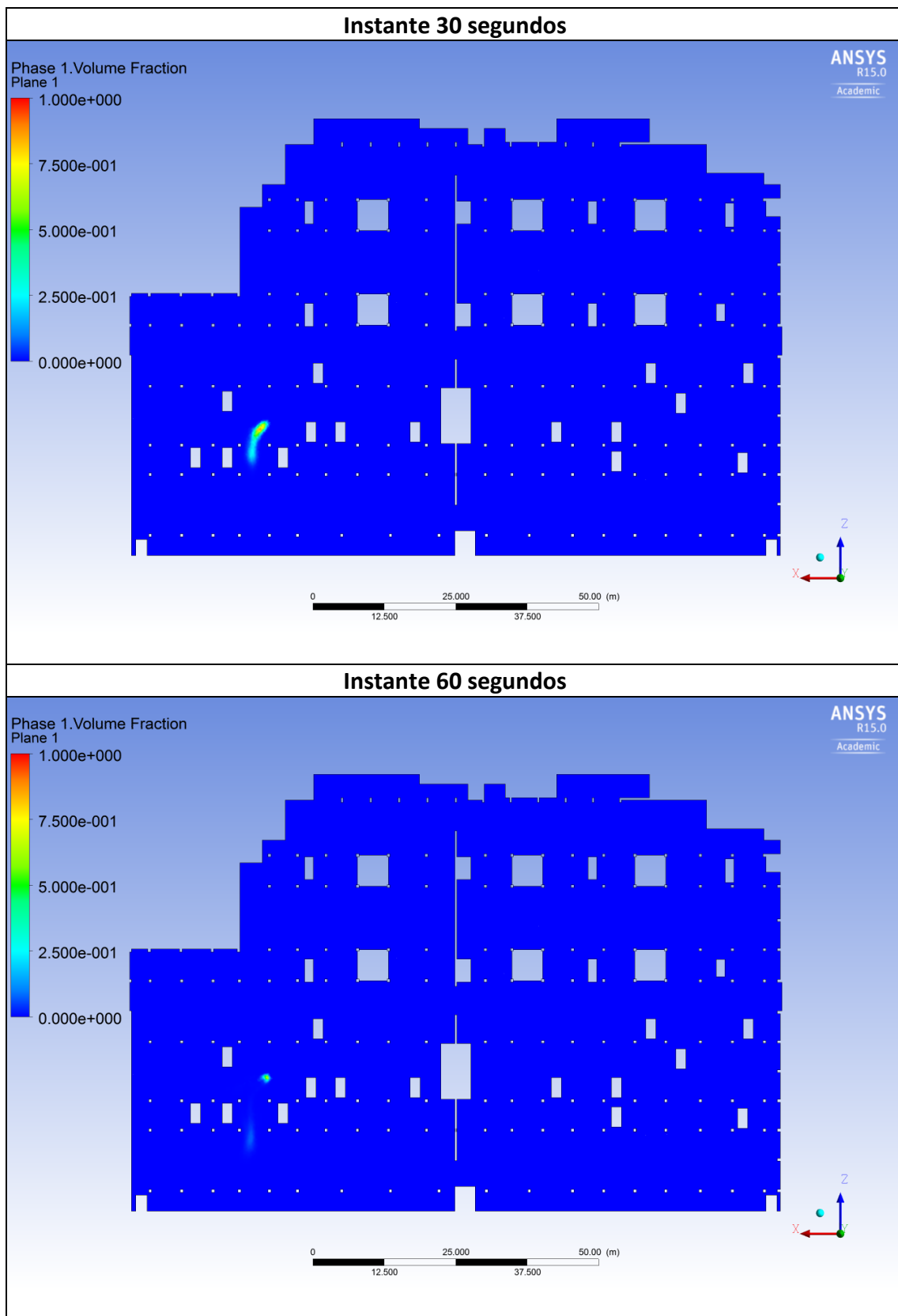


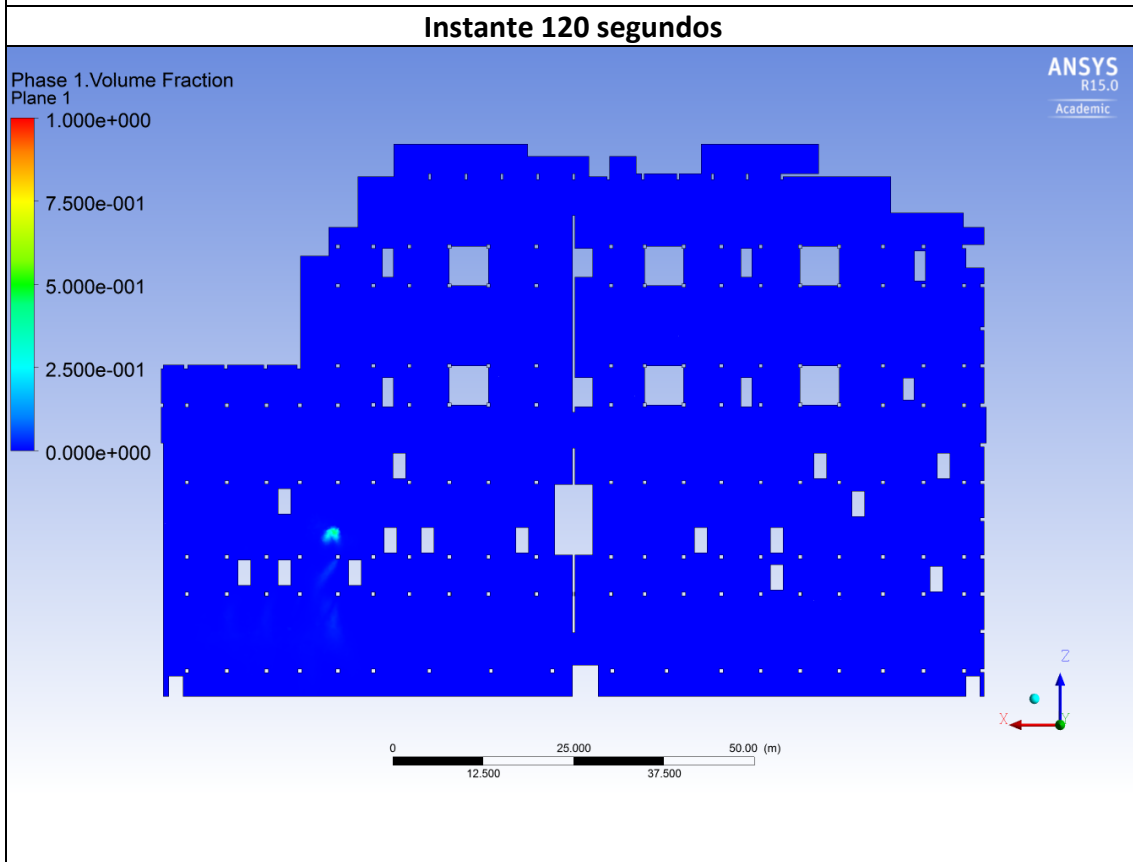
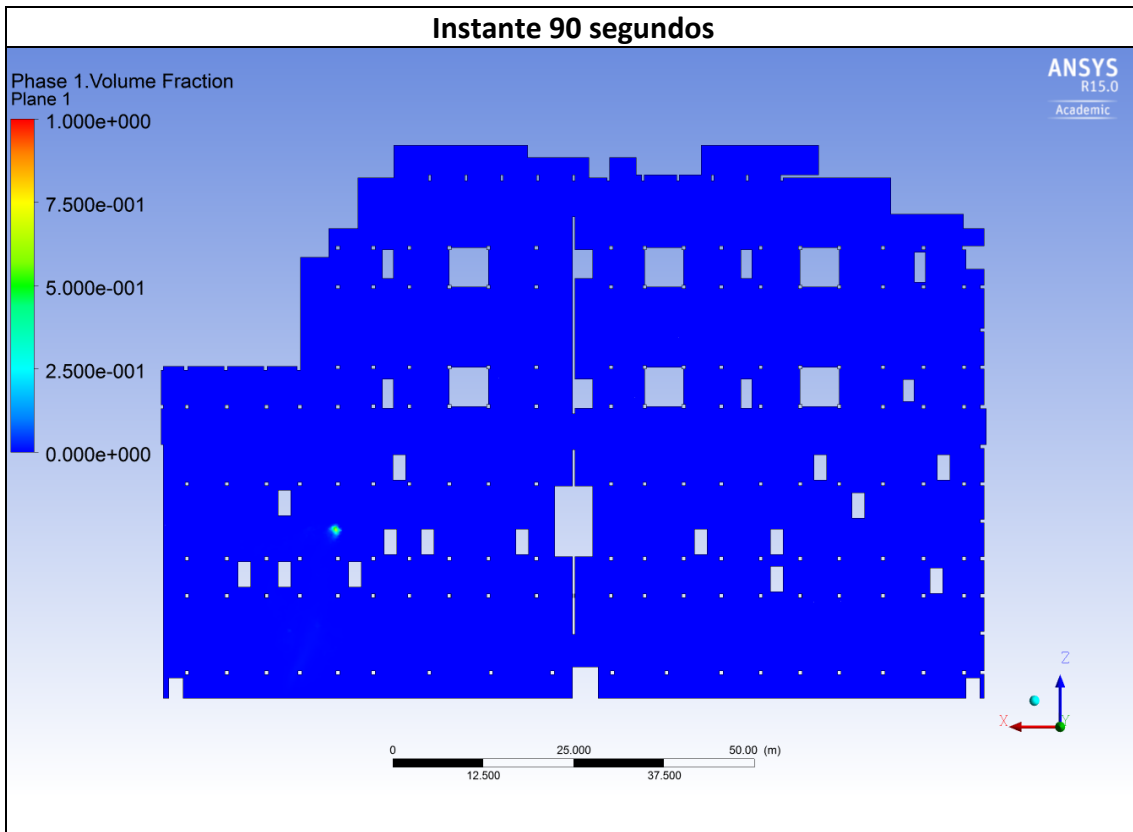


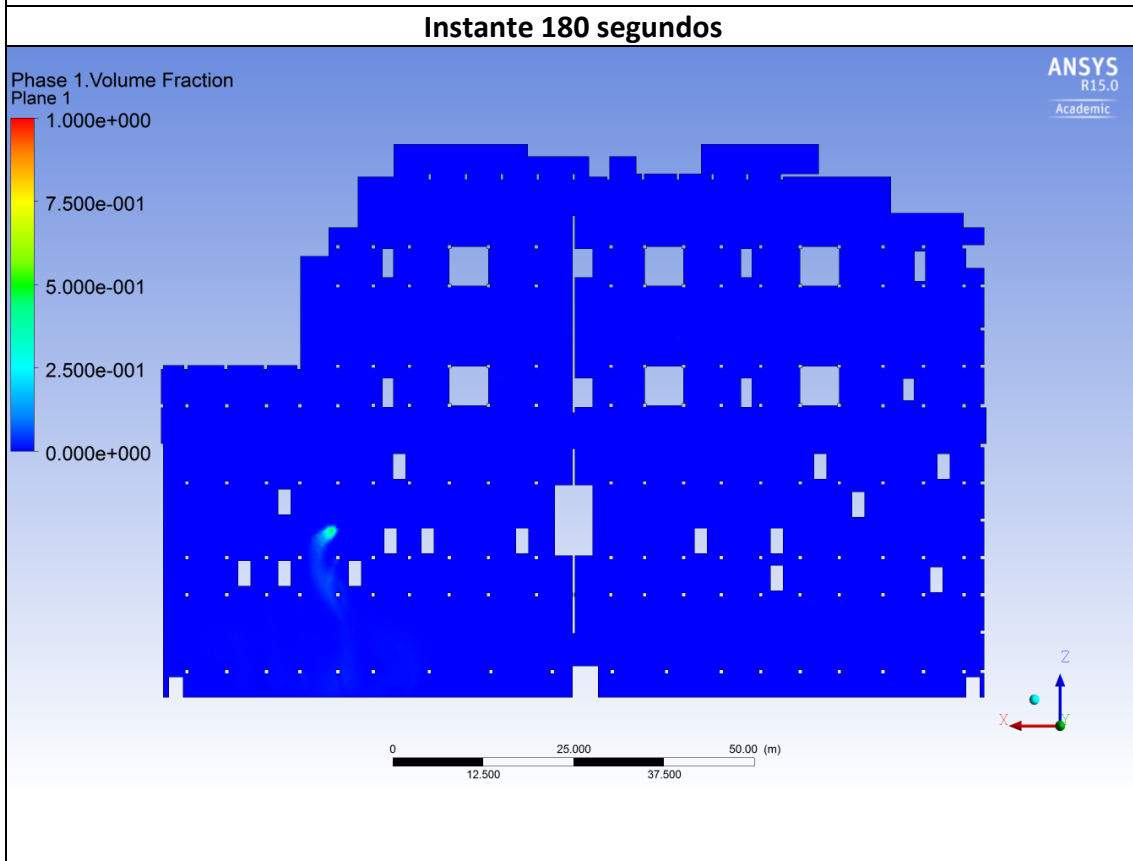
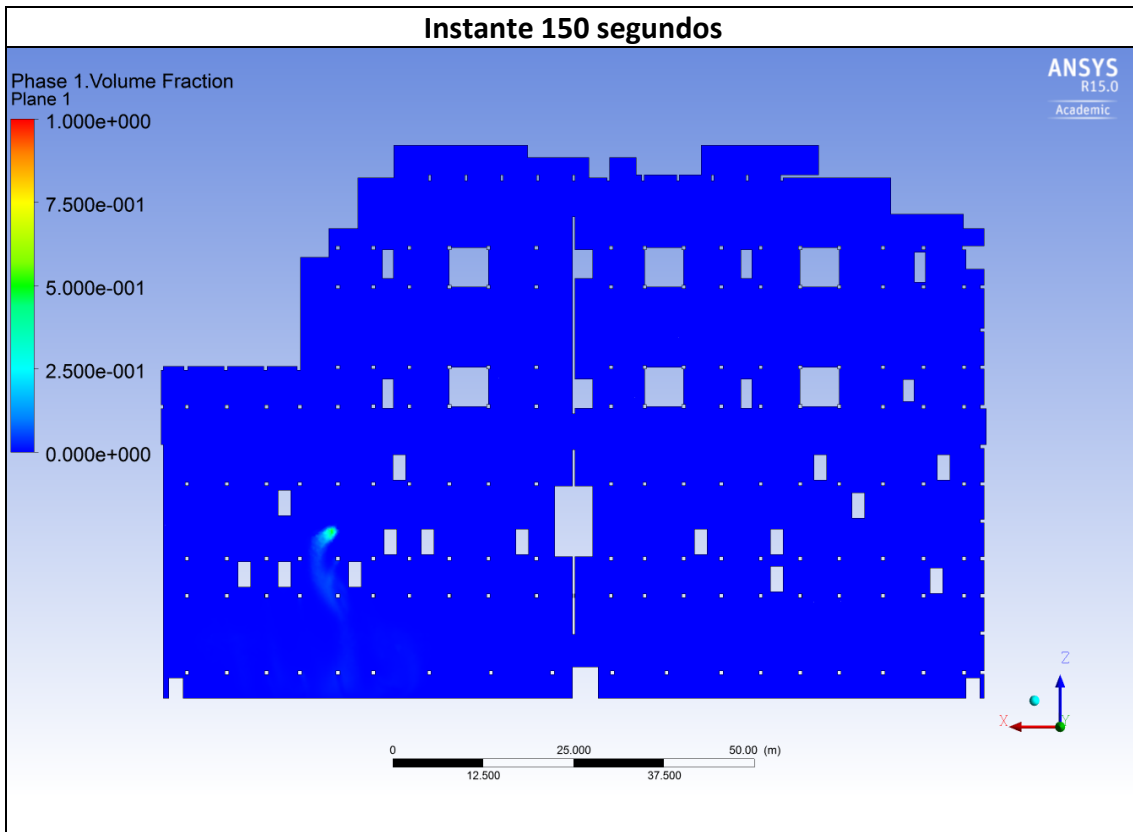
Relativamente aos resultados da temperatura da mistura apresentados na tabela 6.11, verifica-se que a libertação de CO a temperatura elevada influencia a temperatura da mistura no meio. No entanto a temperatura do CO sofre um elevado choque térmico, descendo cerca de 500K, devido à grande massa de ar no meio à temperatura ambiente, mas também pela convecção natural (vento). Ao longo do tempo verifica-se que a temperatura da mistura sofre um gradiente crescente, devido à constante libertação de CO à temperatura de 1093K. Em termos de valores, verifica-se para o plano apresentado que a temperatura máxima da mistura atinge valores na ordem dos 500K.

### 6.3 Resultados e Discussão da Modelação do Incêndio no Parque de Estacionamento (Segundo Caso)

Tabela 6.12 – Resultados da fração volúmica de CO no plano XZ (1.5 metros)







Pelos resultados apresentados na tabela 6.12, verifica-se que a entrada de ar ( $O_2$  e  $N_2$ ) tem pouca ou nenhuma influência no escoamento de CO, devido à elevada distância entre a entrada do ar e o local de libertação de CO, mas sobretudo pelos obstáculos existentes entre os dois locais, particularmente a parede corta-fogo a meio do parque de estacionamento. O escoamento de CO desloca-se livremente até à saída, sem qualquer influência da convecção natural. Relativamente ao caso anterior, verifica-se pouca concentração de CO neste plano (1,5 metros), uma vez que o monóxido de carbono ascende para uma altura superior, como se pode verificar no Anexo VI. A subida deve-se à menor densidade do CO comparativamente às restantes fases, a qual é acentuada com a elevada temperatura do CO. Em termos de fração volúmica de CO, comparativamente ao caso anterior, verifica-se uma maior concentração de CO no interior do parque de estacionamento, como apresentados nas tabelas 6.10 e 6.13. Esta acumulação superior deve-se à pouca influência da convecção natural nesta parte do parque, enquanto no caso anterior as condições exteriores aligeiram o escoamento para o exterior.

Através do *table viewer* do *CFD Post*, é possível determinar o volume de cada fase no meio num determinado instante. Posto isto, determinou-se o volume de cada fase presente no meio aos 180 segundos, onde os resultados estão apresentados na tabela 6.13.

**Tabela 6.13 - Resultados do volume de cada fase aos 180s**

<b>Fase</b>	<b>Volume [m<sup>3</sup>]</b>	<b>% Volúmica</b>	<b>ppm</b>
<b>CO</b>	17	0,08	800
<b>O<sub>2</sub></b>	4426	20,0	-
<b>N<sub>2</sub></b>	17280	79,2	-
<b>Total</b>	21723	100	-

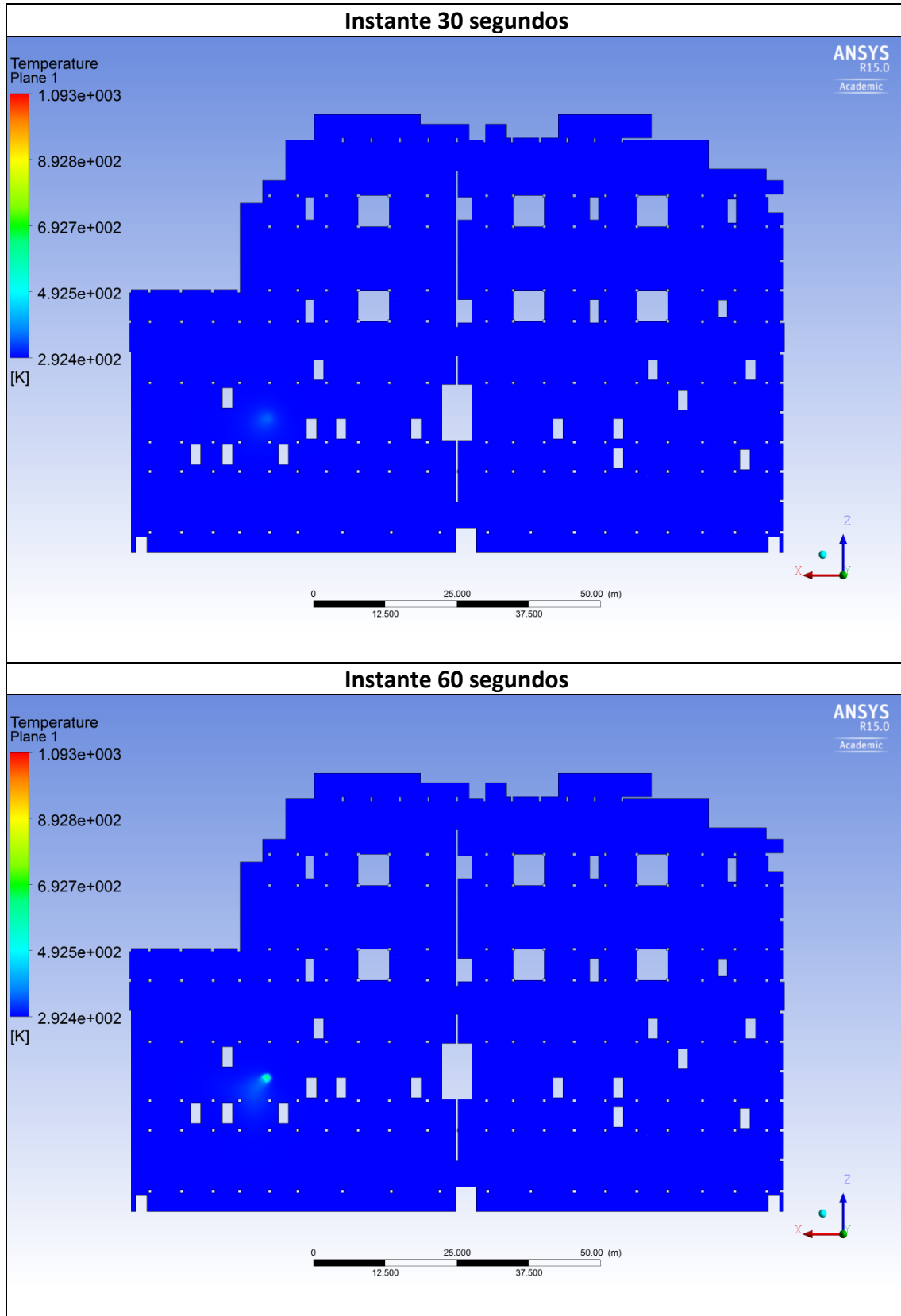
Pelos resultados da fração volúmica é possível verificar que o escoamento de CO para o exterior inicia-se por volta dos 120 segundos, sendo assim todo o caudal debitado de CO até esse instante encontra-se no interior do parque. Pela legislação em vigor, a concentração de CO não deve atingir os 200 ppm instantâneos. Sabendo que o caudal debitado de CO é de 0,33 kg/s, ao fim de 16 segundos, o volume de CO no interior do parque atinge os 4,5 m<sup>3</sup>, cerca de 200 ppm. A partir deste instante o valor da concentração de CO no interior excede o estabelecido por lei.

Pelos resultados apresentados na tabela 6.13, verifica-se que ao fim de 180 segundos a concentração de CO no interior do parque de estacionamento é de 17 m<sup>3</sup>. Sabendo que ao fim de 180 segundos foi libertado 53 m<sup>3</sup> de CO, apura-se que foi escoado para o exterior do parque cerca de 36 m<sup>3</sup> de CO. Ao fim de 180 segundos, a concentração de CO no interior do parque de estacionamento atinge os 800 ppm, o que quer dizer que não está em conformidade com a

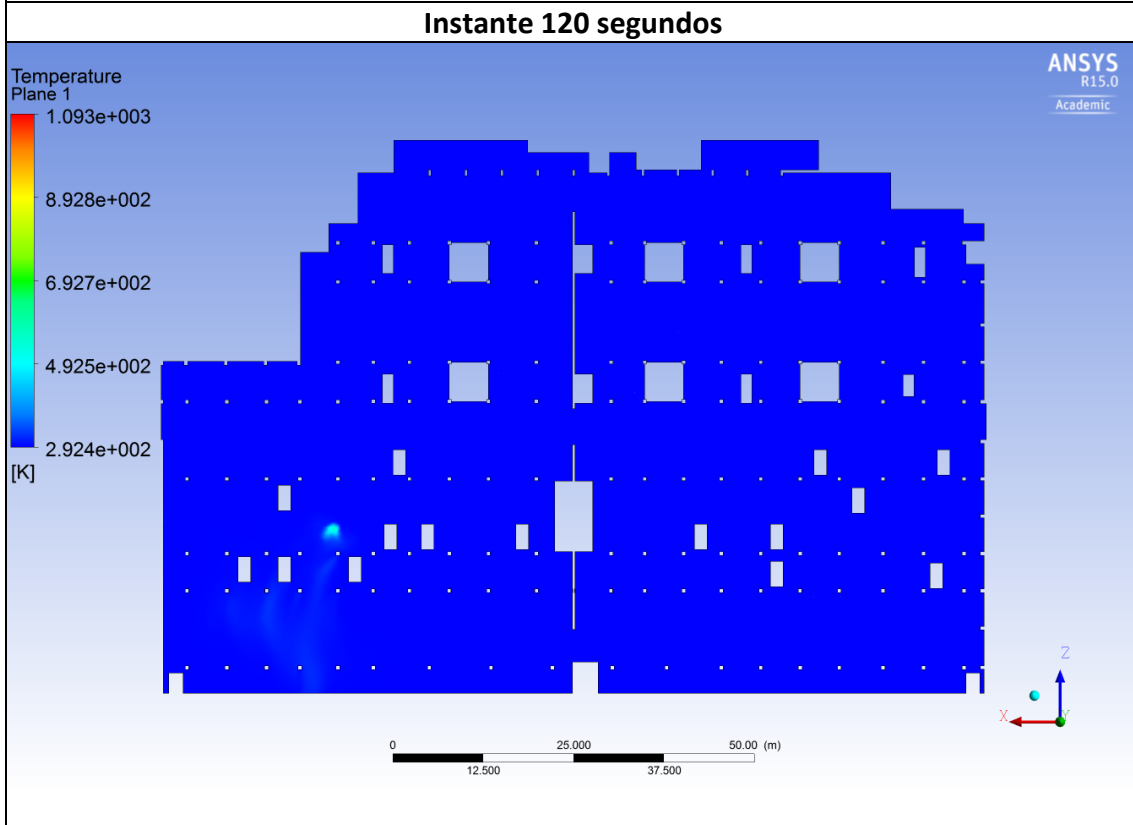
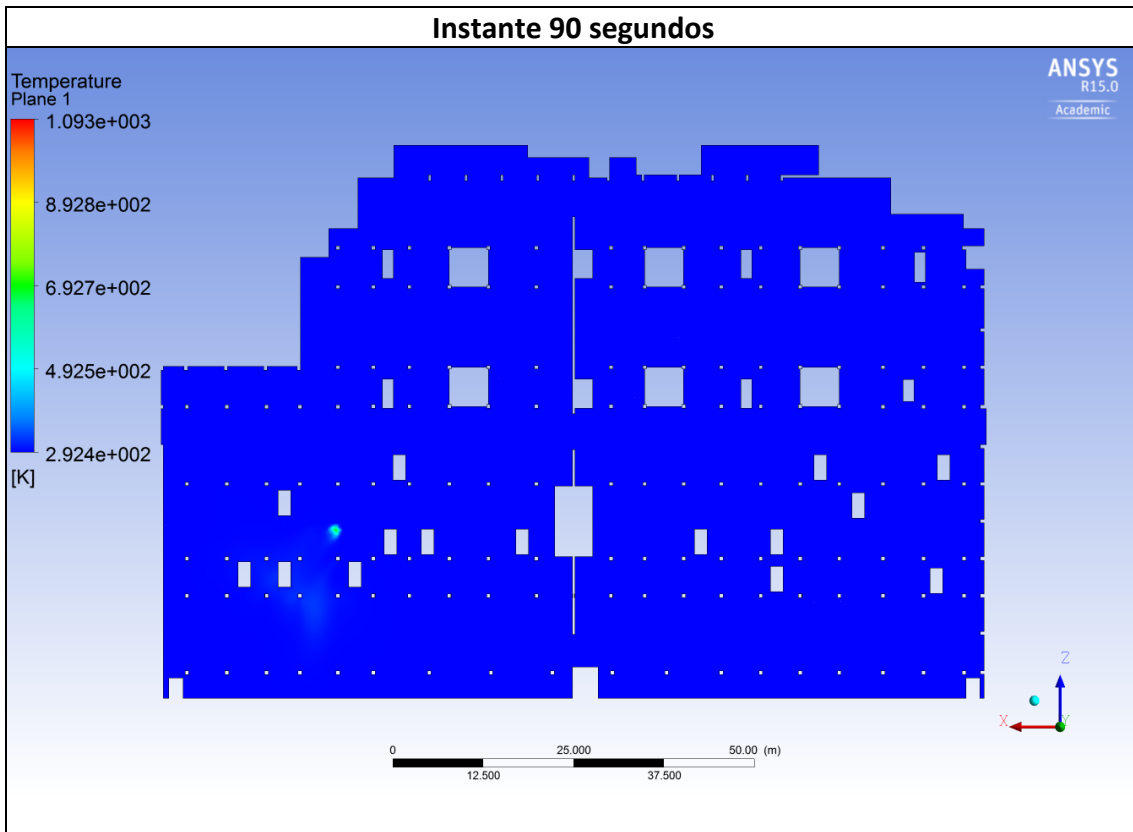
legislação em vigor em parques de estacionamento.

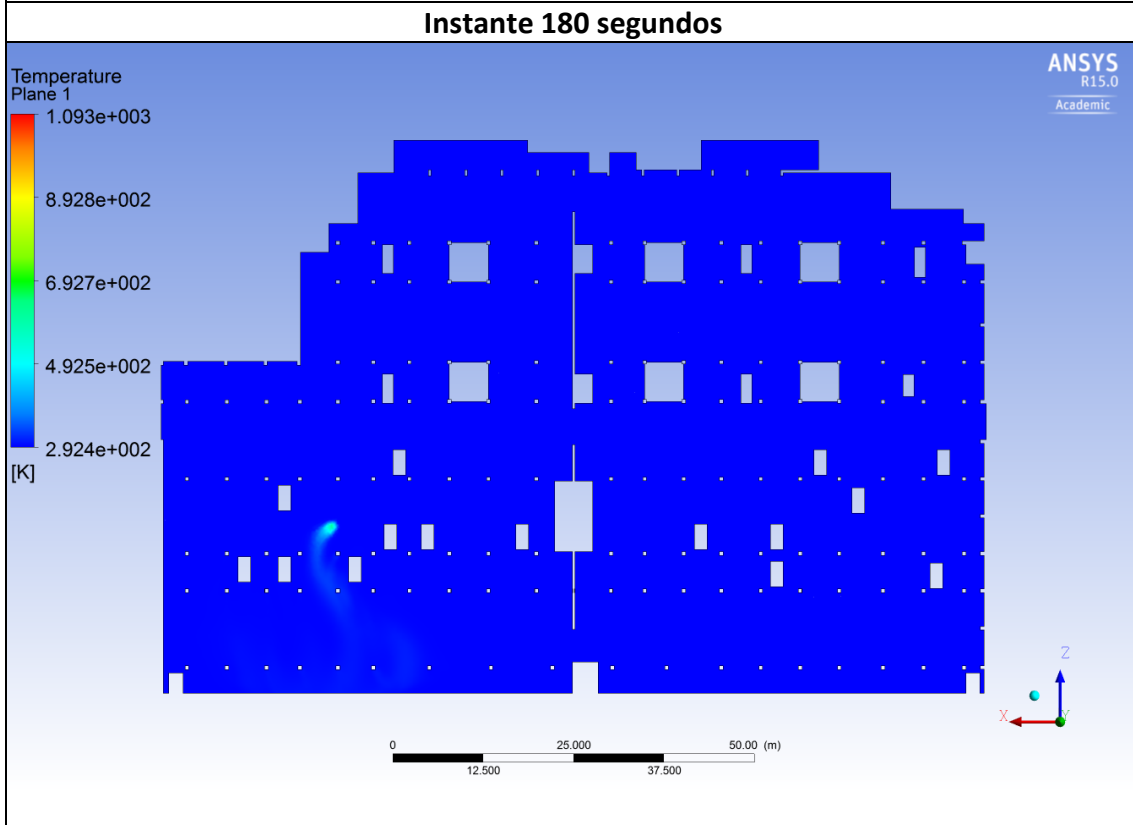
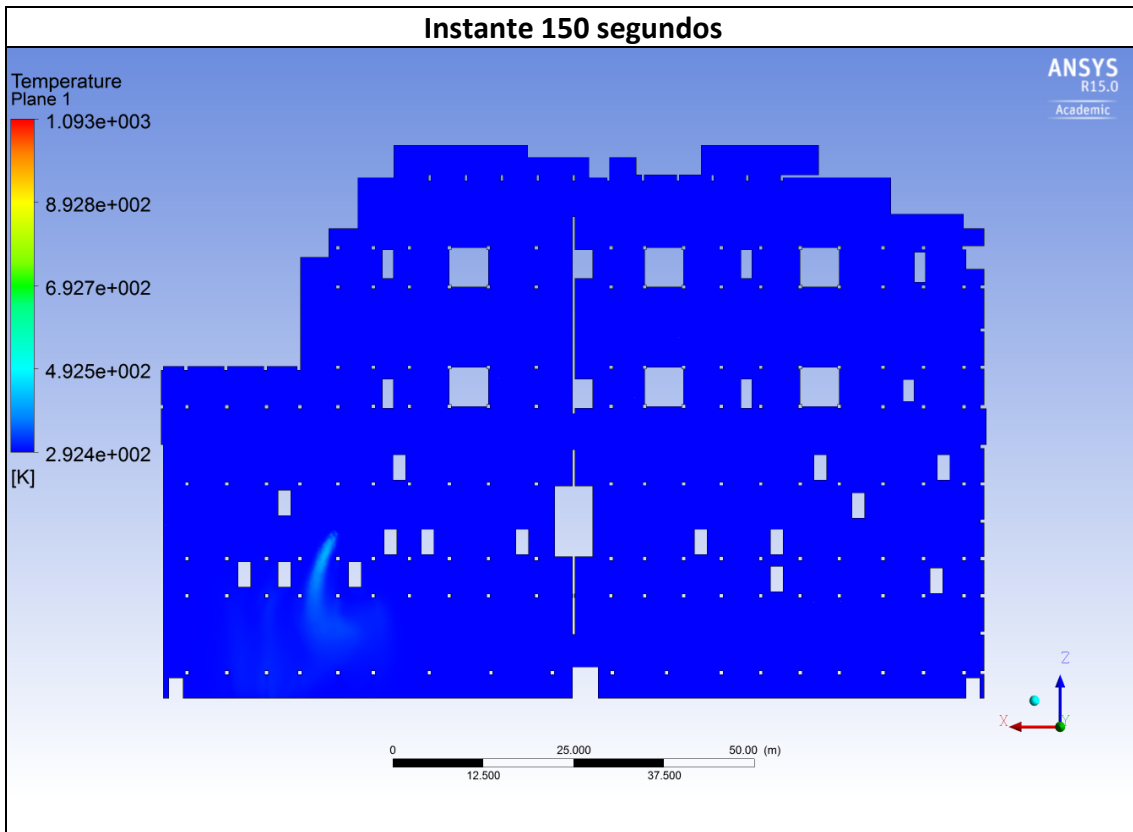
Comparando os dois casos anteriores, verifica-se que a convecção natural para o primeiro caso influencia o escoamento do CO para o exterior, uma vez que para o mesmo instante (180 segundos), a concentração de CO no interior do parque é menor do que no segundo caso. Posto isto, admite-se que as condições exteriores (vento) aceleram o escoamento de CO para o exterior do meio. No segundo caso, a existência da porta corta-fogo a meio do parque de estacionamento, impede que a convecção natural influencie da mesma forma o escoamento do CO como no primeiro caso.

Tabela 6.14 - Resultados da temperatura da mistura no plano XZ (1.5 metros)









Relativamente aos resultados apresentados na tabela 6.13, verifica-se que a temperatura da mistura, nos locais adjacentes ao incêndio, é influenciada pela temperatura elevada do CO (1093K). Os resultados da temperatura da mistura são muito similares à modelação anterior, em que a temperatura do CO sofre um choque térmico por força da quantidade mássica de ar no interior do parque de estacionamento. No entanto a descida da temperatura do CO não é tão acentuada na zona próxima do incêndio como no caso anterior, uma vez que a descida apenas é influenciada pela temperatura do ar existente no interior do parque. A temperatura máxima da mistura nas zonas próximas ao incêndio atinge valores máximos ligeiramente superiores ao caso anterior na ordem dos 550K.

## 7 Conclusões

Concluída esta dissertação é possível, de um modo geral, assegurar que os objetivos propostos foram cumpridos. No entanto de ressaltar que as modelações do incêndio no parque de estacionamento criaram dificuldades computacionais e temporais, devido ao refinamento da malha e à discretização temporal. A razão para estas dificuldades deve-se, sobretudo à dimensão e complexidade do meio em estudo. Por outro lado, as quatro modelações demonstrativas não impuseram tantas dificuldades, uma vez que as dimensões do meio são significativamente menores e a sua geometria simples. Comparativamente aos restantes objetivos, de uma forma geral foram alcançados com facilidade. Em termos de legislação dos regulamentos técnicos em parques de estacionamento, a sua compreensão ao nível do controlo de fumos e seus sistemas deu um auxílio na definição do problema e, serviu como base na discussão dos resultados das modelações, no que diz respeito aos limites de concentração de CO. Outro dos objetivos passou pela compreensão da formulação dos métodos dos volumes finitos, a qual é utilizada pelo *software Ansys Fluent*. A compreensão do método dos volumes finitos facilita consideravelmente a utilização do *software*, uma vez que se adquire sensibilidade e se compreende os parâmetros envolventes na sua formulação e, com isso, supera-se as dificuldades que surgem ao longo da modelação. As diversas modelações efetuadas em *Fluent* ao longo do trabalho foram cruciais para compreender toda a sua estrutura, essencialmente ao nível da concepção da malha, da definição dos modelos, das abordagens de discretização e de iteração e por fim, dos fatores que envolvem a execução do cálculo. O uso intenso do *software* permitiu adquirir sensibilidade dos vários parâmetros que envolvem uma modelação. Desta forma, o modelo computacional do escoamento no parque de estacionamento foi adquirindo ao longo do trabalho maior exatidão.

Outro problema que surgiu no trabalho foi a definição do problema, uma vez que este depende de fatores não controláveis, nomeadamente as condições da convecção natural (vento) e o caudal de CO debitado no incêndio. Em termos das condições exteriores, sabe-se que estas variam ao longo do tempo, tornando a sua quantificação complexa. No entanto, admitiu-se uma baixa influência das condições exteriores (vento), com velocidade de 1m/s, de forma a definir um caso extremo. Relativamente ao caudal de CO libertado, sabe-se que o seu valor depende da dimensão do incêndio e da quantidade de oxigénio presente para a reação química. Sabendo destes pressupostos, definiu-se que o incêndio envolveria um “veículo” e em termos oxigénio admitiu-se que a reação é incompleta (ausência de oxigénio). Também como na definição das condições de convecção natural, admitiu-se um caso extremo no incêndio, em que toda a

quantidade de gasolina produziria CO.

O principal objetivo dos quatro casos de estudo foi compreender como o escoamento se comporta com determinadas condições de fronteira e geométricas, mas também testar e compreender os modelos e sub-modelos caracterizadores do escoamento. Aliado a isso, também, se tentou perceber e testar quais as melhores abordagens e formulações dos métodos de solução numérica para as diversas variáveis de campo. A grande vantagem de modelar em meios de menores dimensões está na redução de tempo de processamento, mas, também, na menor exigência computacional. Além disso, os resultados oferecem maior precisão, devido à possibilidade de criar malhas estruturadas e refinadas, e aperfeiçoar a discretização temporal com menores intervalos de tempo (*time step*).

Relativamente aos resultados das quatro modelações demonstrativas, verifica-se a influência das condições exteriores e das características geométricas no escoamento. Quando as condições exteriores interferem no escoamento do meio, verifica-se um varrimento acentuado da mistura (ar e CO) na direção da saída. Evidentemente que a concentração de CO no interior do meio é menor quando comparada com o escoamento sem convecção natural. Além de que a dispersão da concentração de CO no interior do meio é menos intensificada, a qual apenas afeta uma parte do meio. Em relação ao escoamento com ausência de condições exteriores verifica-se uma maior dispersão da concentração de CO por todo o meio. Também se assegura que as condições geométricas, nomeadamente, as zonas das “vigas” e dos “veículos” afetam o escoamento. Estas zonas irregulares são pontos de concentração de CO, acabando por permanecer ao longo do tempo, uma vez que o escoamento contorna estes obstáculos ao longo do seu percurso. Em termos de temperatura, claramente que quando há convecção natural, a temperatura do CO libertado diminui drasticamente, tendo menor influencia na temperatura média da mistura. Enquanto na ausência de condições exteriores, a temperatura do CO não sofre uma descida tão acentuada, acabando por aumentar a temperatura média da mistura do meio. Esta diferença de temperaturas está obviamente relacionada com a renovação do ar, sendo que quando há convecção natural, a constante entrada de ar afeta consideravelmente a temperatura da mistura no interior do meio. Além deste fator, de realçar também a influência da temperatura das paredes e da temperatura inicial do meio ( $O_2$  e  $N_2$ ) na temperatura da mistura.

Em termos dos resultados das modelações do incêndio no parque de estacionamento, de realçar a influência das condições exteriores (convecção natural) no desenvolvimento do

escoamento no interior do parque de estacionamento. Para o primeiro caso apresentado, verificou-se que a convecção natural acentua o escoamento do CO para o exterior, enquanto no segundo caso, a presença da parede corta-fogo impede esse efeito da convecção natural no escoamento do CO. Também de ressaltar a influência da convecção natural na propagação do CO no interior do meio, alterando a sua trajetória ao longo do tempo. Outro aspeto fundamental é a influência das condições exteriores na temperatura do CO, diminuindo acentuadamente a temperatura da mistura do meio. Em termos de concentração de CO ao fim dos 180 segundos, verifica-se para o primeiro caso uma concentração de CO de 600 ppm, enquanto para o segundo caso uma concentração de 800 ppm. Em ambos os casos, a concentração de CO atinge o limite (200ppm) decretado por lei em parques de estacionamento. Em termos de volume de CO escoado para o exterior, verifica-se que para o primeiro caso foram escoados 39 m<sup>3</sup> e para o segundo caso 36 m<sup>3</sup>. O anexo V apresenta os resultados da fração volúmica de CO e da temperatura da mistura da modelação de um incêndio com a definição semelhante ao primeiro caso apresentado, exceptuando o caudal de CO libertado durante o incêndio. Para este caso, o caudal de CO libertado diz respeito a um incêndio que envolve cinco veículos.

Por fim de salientar que para simulação de um incêndio num parque de estacionamento existem fatores que não são possíveis de controlar, nomeadamente a dimensão do incêndio, tendo em conta o número de veículos envolvidos, as condições exteriores, principalmente a presença ou ausência de vento, e o local do incêndio. Sendo que para um problema deste tipo a alteração destes aspetos assinalados conduziriam a múltiplos resultados.

## 7.1 Atividades Futuras

Nesta secção sugere-se futuras atividades que deem continuidade ao desenvolvimento do trabalho, de forma a melhorar os resultados obtidos neste projeto.

- ◆ Conceber uma malha estruturada por blocos;
- ◆ Utilizar um *software* de simulações de incêndios, avaliando os caudais de gases libertados, particularmente o de CO;
- ◆ Utilizar diferentes modelos de turbulência nas modelações;
- ◆ Desenvolver novas modelações do incêndio no parque de estacionamento, modificando:
  - O caudal de CO;
  - O local da libertação de CO;
  - As condições de fronteira: entrada da convecção natural (vento) e saída do

escoamento;

- A velocidade de entrada do vento;

## Referências Bibliográficas

- [1] André, Rui Alexandre (2010). *Modelação de um Sistema de Conversão de Energia das Ondas*. Tese de Mestrado em Eng. Mecânica – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- [2] Cruz e Campos, Teresa Maria (2004). *Modelação do Escoamento de Polímeros Fundidos em Moldes de Injecção*. Tese de Doutoramento em Eng. Polímeros – Universidade do Minho.
- [3] Gonçalves, Nelson Daniel (2007). *Método dos Volumes Finitos em Malhas Não-Estruturadas*. Tese de Mestrado em Matemática Aplicada – Faculdade de Ciências da Universidade do Porto.
- [4] Silva, Luiz Fernando (2008). *Desenvolvimento de Metodologias para Simulação de Escoamentos Polidispersos usando Código Livre*. Tese de Doutoramento em Eng. Química – Universidade Federal do Rio de Janeiro.
- [5] Vilar, Filipe Sacchetti (2010). *Segurança Contra Incêndio em Parques de Estacionamento Cobertos*. Tese de Mestrado em Eng. Civil, especialização em Construções – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- [6] Ferziger, J.H. e Peric, M. (2002). *Computational Methods for Fluid Dynamics*. 3ª Edição, Springer.
- [7] Versteeg, H. K. e Malalasekera, W. (1995). *An Introduction to Computational Fluid Dynamics*. Longman.
- [8] White, Frank. M. (2006). *Viscous Fluid Flow*. 3ª Edição. McGraw-Hill, Inc. Nova Iorque.
- [9] Decreto-Lei nº 66/95 de 8 de Abril - *Regulamento de Segurança contra Incêndio em Parques de Estacionamento Cobertos*. Ministério da Administração Interna – Autoridade Nacional de Protecção Civil.
- [10] Decreto-Lei n.º 220/2008, de 12 de Novembro – *Regime Jurídico da Segurança Contra Incêndio em Edifícios*, 1ª Edição 2009. Ministério da Administração Interna – Autoridade Nacional de Protecção Civil.



- [11] Portaria n.º 1532/2008, de 29 de Dezembro – *Regulamento Técnico de Segurança Contra Incêndio em Edifícios (RT-SCIE)*, 1ª Edição 2009. Ministério da Administração Interna – Autoridade Nacional de Proteção Civil.
- [12] Teixeira, José Carlos. (2009). *Escoamento em Conduitas*. Apontamentos de Mecânica de Fluidos. Universidade do Minho, Guimarães.
- [13] ANSYS, Inc. (2009). ANSYS FLUENT 12.0 User's Guide. [Consultado 2014-07-01] Disponível na www: <URL: <http://users.ugent.be/~mvbelleg/flug-12-0.pdf>>;
- [14] ANSYS, Inc. (2010). *Solver Settings – Introduction to Ansys Fluent*. [Consultado 2014-09-18] Disponível na www: <URL: [http://imechanica.org/files/fluent\\_13.0\\_lecture05-solver-settings.pdf](http://imechanica.org/files/fluent_13.0_lecture05-solver-settings.pdf)>;
- [15] ANSYS, Inc. (2010). *Transient Flow Modeling – Introduction to Ansys Fluent*. [Consultado 2014-09-22] Disponível na www: <URL: [http://imechanica.org/files/fluent\\_13.0\\_lecture10-transient.pdf](http://imechanica.org/files/fluent_13.0_lecture10-transient.pdf)>;
- [16] Fluent, Inc. (2003). *Velocity-Pressure Coupling*. [Consultado 2014-09-19] Disponível na www: <URL: <http://jullio.pe.kr/fluent6.1/help/html/ug/node827.htm>>;
- [17] Kallio, Sirpa e Akademi, Abo (1996). *On the mixture model for multiphase flow*. [Consultado 2014-09-24] Disponível na www: <URL: <http://www.vtt.fi/inf/pdf/publications/1996/P288.pdf>>;
- [18] SAS IP, Inc. *Interphase Exchange Coefficients*. [Consultado 2014-10-15] Disponível na www: <URL: [http://www.arc.vt.edu/ansys\\_help/flu\\_th/flu\\_th\\_sec\\_eulermp\\_theory\\_exchange.html](http://www.arc.vt.edu/ansys_help/flu_th/flu_th_sec_eulermp_theory_exchange.html)>;
- [19] Gaspar, P. D. e Pitarma, R. A. *Esquemas de discretização em escoamentos com regime convecção mista: Estudo de caso*. [Consultado 2014-09-24] Disponível na www: <URL: [http://webx.ubi.pt/~dinis/Papers/art\\_isec\\_03.pdf](http://webx.ubi.pt/~dinis/Papers/art_isec_03.pdf)>;
- [20] (2013) *Teorema de Equivalência de Lax* [Consultado 2014-05-14] Disponível na www: <URL: [http://pt.wikipedia.org/wiki/Teorema\\_de\\_Equival%C3%Aancia\\_de\\_Lax](http://pt.wikipedia.org/wiki/Teorema_de_Equival%C3%Aancia_de_Lax)>;

- [21] Gama Gases. (2005) *Monóxido de Carbono* [Consultado 2014-10-14] Disponível na www: <URL: [http://www.gamagases.com.br/Monoxido de Carbono2.pdf](http://www.gamagases.com.br/Monoxido_de_Carbono2.pdf)>;
- [22] (2014) *Reynolds number* [Consultado 2014-09-10] Disponível na www: <URL: [http://en.wikipedia.org/wiki/Reynolds number](http://en.wikipedia.org/wiki/Reynolds_number)>;
- [23] Amaral, Rodrigo. (2010) *Estudo da característica inerente de fluxo de uma válvula de controlo utilizando fluidodinâmica computacional* [Consultado 2014-07-15] Disponível na www: <URL: <http://www.ebah.pt/content/ABAAABgWQAF/estudo-caracteristica-inerente-fluxo-valvula-controle-utilizando-fluidodinamica-computacional?part=2>>;
- [24] Arcelor. (2006) *Steel Sheet Piles – Underground car parks: Fire resistance* [Consultado 2014-10-20] Disponível na www: <URL: [http://www.szs.ch/user\\_content/editor/files/Downloads\\_Brandschutz/steel%20sheet%20piles%20in%20underground%20car%20parks\\_fire%20resistance.pdf](http://www.szs.ch/user_content/editor/files/Downloads_Brandschutz/steel%20sheet%20piles%20in%20underground%20car%20parks_fire%20resistance.pdf)>;

# Anexos

## **Anexo I – Descrição dos artigos do Decreto-Lei nº 66/95 de 8 de Abril - Regulamento de Segurança contra Incêndio em Parques de Estacionamento Cobertos**

O **artigo nº 16** ressalva o controlo do fumo nas escadas protegidas enclausuradas, no qual a renovação do ar é obrigatória. Esta pode ser efectuada por ventilação natural, caso a renovação do ar seja assegurada, ou por ventilação mecânica em cada escada. Também de realçar a necessidade de garantir uma velocidade do ar através da porta do piso onde ocorre incêndio não inferior a 0,5 m/s.

Os **artigos nº 17 e 18** referem-se ao controlo da poluição do ar e de fumo nas câmaras de corta-fogo, no qual também é realizado por ventilação natural ou por ventilação mecânica. O controlo da poluição do ar nas câmaras corta-fogo que servem o piso onde ocorre excesso de monóxido de carbono pode ser realizado por condutas de ventilação natural, de secção não inferior a 0,10 m<sup>2</sup>, capazes de promover a renovação do ar no interior das câmaras ou por vias de ventilação mecânica. O mesmo sucede para o caso de ocorrência de um incêndio, no qual o fumo é controlado por ventilação natural ou por ventilação mecânica.

O **artigo nº 25** refere-se às exigências de controlo da poluição do ar, em que o teor de monóxido de carbono existente no ar dos pisos dos parques não deve exceder 50 ppm em valores médios durante oito horas, 100 ppm em valores médios durante vinte minutos e 200 ppm em valores instantâneos.

O **artigo nº 26** menciona o processo de controlo da poluição do ar, mais uma vez na qual pode ser realizada por ventilação natural ou ventilação mecânica. No que se refere à ventilação natural, o controlo da poluição do ar por excesso de monóxido de carbono em cada piso de um parque pode ser realizado por aberturas permanentes, umas de admissão de ar exterior e outras de evacuação de ar alterado. Em ambas, a área total nunca deve ser inferior a 0,06 m<sup>2</sup>/veículo, distribuídas de modo a, em conjugação com a ação do vento, promover a renovação do ar de acordo com exigências indicadas. Relativamente à ventilação mecânica, o controlo da poluição do ar por excesso de monóxido de carbono tem que ser capaz de promover a renovação do ar nesse piso, com um caudal de extração não inferior a 300 m<sup>3</sup>/h por veículo, sempre que o teor de monóxido de carbono exceder 50 ppm, e um caudal de extração não inferior a 600 m<sup>3</sup>/h por veículo, sempre que o teor de monóxido de carbono exceder 100 ppm. Ainda neste artigo de realçar que o acionamento das instalações de ventilação mecânica deve ser realizado automaticamente por ativação, nesse piso, do sistema de detecção de monóxido de carbono.

O **artigo nº27** está relacionado com a detecção de monóxido de carbono. O sistema de detecção de monóxido de carbono nos pisos do parque deve ser servido por detectores de gás distribuídos de modo uniforme em toda a extensão de cada piso e cobrindo cada um uma área não superior a 600 m<sup>2</sup>. Sempre que o teor de monóxido de carbono num piso do parque exceder 200 ppm, a ativação, nesse piso, do sistema de detecção de monóxido de carbono nos pisos do parque deve também acionar uma instalação de alarme sonoro e luminoso.

Os **artigos nº 29 e nº 30** estão relacionados com o controlo do fumo nos pisos do parque de estacionamento. É obrigatório, em caso de incêndio num piso de um parque, a quantidade de fumo libertada deve ser controlada para permitir a saída dos ocupantes e facilitar a intervenção dos bombeiros no combate ao incêndio. Os processos de controlo do fumo são por ventilação natural ou por ventilação mecânica. Para tal devem satisfazer as seguintes indicações: a renovação do ar deve ser feita com um caudal de extração não inferior a 600 m<sup>3</sup>/h por veículo nesse piso, conjugada com admissão ou insuflação de ar exterior nos pisos adjacentes superior e inferior; a admissão ou insuflação de ar exterior no piso sinistrado e a extração de ar nos pisos adjacentes superior e inferior devem estar interrompidas; os grupos moto-ventiladores de extração do piso sinistrado devem poder funcionar com fumo a 200°C durante sessenta minutos.

O **artigo nº 41** refere-se às condutas de ventilação usadas no controlo da poluição do ar e no controlo de fumo nos parques realizados por meios mecânicos, sendo que as condutas de admissão ou de insuflação de ar novo e as condutas de extração de ar viciado e de fumo devem ser independentes por piso ou por sector. Ainda, as condutas de ventilação para controlo da poluição do ar e para controlo do fumo, nos pisos dos parques, devem ser construídas com materiais de classe de reação ao fogo não superior a M0 e ser de classe de resistência ao fogo não inferior a CF30.

## **Anexo II – Descrição do Decreto-Lei n.º 220/2008, de 12 de Novembro – Regime Jurídico da Segurança Contra Incêndio em Edifícios**

### **Definições:**

«**Utilização-tipo**» a classificação do uso dominante de qualquer edifício ou recinto, incluindo os estacionamento, os diversos tipos de estabelecimentos que recebem público, os industriais, oficinas e armazéns.

«**Plano de referência**» o 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.

«**Categorias de risco**» a classificação em quatro níveis de risco de incêndio de qualquer utilização-piso de um edifício e recinto, atendendo a diversos factores de risco, como a sua altura, o efetivo, o efetivo em locais de risco, a carga de incêndio e a existência de pisos abaixo do plano de referência.

«**Efetivo**» o número máximo estimado de pessoas que pode ocupar em simultâneo um dado espaço de um edifício ou recinto.

«**Altura da utilização-tipo**» a diferença de cota entre o plano de referência e o pavimento do último piso acima do solo, susceptível de ocupação por essa utilização-tipo.

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

«**Carga de incêndio**» a quantidade de calor susceptível de ser libertada pela combustão completa da totalidade de elementos contidos num espaço, incluindo o revestimento das paredes, divisórias, pavimentos e tectos.

### **- Descrição das condições do Regulamento Técnico de Segurança Contra Incêndio em Edifícios**

#### **Condições exteriores comuns**

As condições exteriores comuns do RT-SCIE definem um leque de regras, a fim de possibilitar e facilitar a intervenção dos bombeiros e limitar a propagação de incêndios para os edifícios adjacentes. Deste título consta três capítulos, Condições Exteriores de Segurança e Acessibilidade, Limitações à propagação do incêndio pelo exterior e Abastecimento e prontidão dos meios de socorro.

#### **Capítulo I - Condições Exteriores de Segurança e Acessibilidade**

Os edifícios devem ser servidos por vias de acesso adequadas a veículos de socorro em caso de

incêndio, possuir ligação permanente à rede viária pública e respeitar as diversas exigências. De salientar, que as características destas vias dependem da altura do edifício onde está inserido o parque de estacionamento, sendo esta diferenciação para edifícios com altura superior e inferior a 9 metros. A acessibilidade às fachadas é outro aspeto em foco neste capítulo, sendo um outro meio de acesso ao interior do edifício. Estas características das vias de acesso ao edifício estão, detalhadamente, descritas no capítulo I.

### Capítulo II - Limitações à propagação do incêndio pelo exterior

A volumetria dos edifícios, a resistência e a reação ao fogo das suas coberturas, paredes exteriores e seus revestimentos, os vãos abertos nas fachadas e a distância de segurança entre eles, ou entre eles e outros vãos abertos de edifícios vizinhos, devem ser estabelecidos de forma a evitar a propagação do incêndio pelo exterior, no próprio edifício, ou entre este e outros edifícios vizinhos ou outros locais de risco. Neste capítulo é evidente a distinção de exigências entre as paredes exteriores, a tradicional e não tradicional, para além das características pressupostas da cobertura do edifício.

### Capítulo III - Abastecimento e prontidão dos meios de socorro

Nas imediações dos edifícios e dos recintos deve existir disponibilidade de água para abastecimento dos veículos de socorro no combate a um incêndio. Os marcos de incêndio devem ser instalados a uma distância não superior a 30 m de qualquer das saídas do edifício que façam parte dos caminhos de evacuação. As bocas-de-incêndio devem ser instaladas a uma cota de nível entre 0,6 e 1,0 m acima do pavimento, devendo prever-se uma por cada 15 m de comprimento de parede.

O grau de prontidão do socorro para cada categoria de risco depende do tempo de resposta e dos meios humanos e materiais adequados ao combate a incêndios.

## **Condições Gerais de Comportamento ao Fogo, Isolamento e Proteção**

### Capítulo I - Resistência ao fogo de elementos estruturais e incorporados

Os elementos estruturais de um edifício devem garantir um determinado grau de estabilidade ao fogo. Consoante o seu tipo, os elementos estruturais de edifícios devem possuir uma resistência ao fogo que garanta as suas funções de suporte de cargas, de isolamento térmico e de estanquidade durante todas as fases de combate ao incêndio, incluindo o rescaldo, ou, em alternativa, devem possuir a resistência ao fogo padrão mínima indicada na figura abaixo.

Utilizações-tipo	Categorias de risco				Função do elemento estrutural
	1. <sup>a</sup>	2. <sup>a</sup>	3. <sup>a</sup>	4. <sup>a</sup>	
I, III, IV, V, VI, VII, VIII, IX e X	R 30	R 60	R 90	R 120	Apenas suporte
	REI 30	REI 60	REI 90	REI 120	Suporte e compartimentação
II, XI e XII	R 60	R 90	R 120	R 180	Apenas suporte
	REI 60	REI 90	REI 120	REI 180	Suporte e compartimentação

**Figura 7.1 - Resistência ao fogo padrão mínima de elementos estruturais de edifícios [10]**

## Capítulo II - Compartimentação geral de fogo

Os edifícios e estabelecimentos devem conter o número de compartimentos corta-fogo necessários e suficientes para garantir a proteção de determinadas áreas, impedir a propagação do incêndio ou fraccionar a carga de incêndio. Nos espaços cobertos, os diversos pisos devem, em regra, constituir compartimentos corta-fogo diferentes, sem prejuízo das condições de isolamento e proteção referentes a locais de risco existentes nesses pisos.

Utilizações tipo	Áreas máximas de compartimento corta-fogo por piso	Observações
II - Estacionamentos	6400 m <sup>2</sup>	Acima do plano de referência
	3200 m <sup>2</sup>	Abaixo do plano de referência

**Figura 7.2 - Áreas máximas de compartimentação corta-fogo [10]**

## Capítulo III - Isolamento e proteção de locais de risco

Os locais de risco C devem em regra ser separados dos espaços adjacentes por elementos da construção que garantam, pelo menos, as classes de resistência ao fogo padrão indicadas na figura abaixo.

Elementos de construção	Resistência ao fogo padrão mínima
Paredes não resistentes	EI 60
Pavimentos e paredes resistentes	REI 60
Portas	E 30 C

**Figura 7.3 - Resistência ao fogo padrão mínima dos elementos da envolvente de locais de risco C [10]**

## Capítulo IV - Isolamento e proteção das vias de evacuação

Exige-se proteção das vias horizontais de evacuação, caso a via ou troço de via tenha um comprimento superior a 10 metros.



Altura	Paredes não resistentes	Paredes resistentes	Portas
Pequena	EI 30	REI 30	E 15 C
Média ou grande	EI 60	REI 60	E 30 C
Muito grande	EI 90	REI 90	E 45 C

**Figura 7.4 - Resistência ao fogo padrão mínima dos elementos da envolvente de vias horizontais de evacuação interiores protegidas [10]**

Exige-se proteção para todas as vias verticais de evacuação, com a exceção de escadas que interligam níveis diferentes num mesmo compartimento corta-fogo. Os acessos às vias devem ser protegidos nas condições indicadas nas figuras abaixo, em função da altura do edifício e do tipo de via.

Saídas de vias enclausuradas	Via acima do plano de referência		Via abaixo do plano de referência
	Altura do piso mais elevado «H»		
	H ≤ 28 m	H > 28 m	
Directa ao exterior	Sem exigências	Sem exigências	Sem exigências
Em átrio com acesso directo ao exterior e sem ligação a outros espaços interiores com excepção de caixas de elevadores protegidas	Sem exigências	Portas E 30 C	Portas E 30 C
Restantes situações	Portas E 30 C	Portas EI 60 C	Portas E 30 C

**Figura 7.5 - Proteção dos acessos a vias de evacuação verticais protegidas localizados no piso de saída para o exterior [10]**

Tipo de via	Acesso	Via acima do plano de referência		Via abaixo do plano de referência
		Altura do piso mais elevado «H»		
		H ≤ 28 m	H > 28 m	
Enclausurada	Do interior	Portas E 30 C	Câmaras corta-fogo	Câmaras corta-fogo
	Do exterior	Portas E 15 C	Portas E 15 C	Portas E 15 C
Ao ar livre	Do interior	Portas E 30 C	Portas EI 60 C	Portas EI 30 C
	Do exterior	Sem exigências	Sem exigências	Sem exigências

**Figura 7.6 - Proteção dos acessos a vias de evacuação verticais protegidas não localizados no piso de saída para o exterior [10]**

Especificamente no caso dos estacionamento, os acessos aos elevadores devem ser protegidos por uma câmara de corta-fogo, que pode ser comum às caixas de escadas previstas na tabela 6.

## Capítulo V - Isolamento e proteção de canalizações e condutas

Por canalizações e condutas aplicam-se a canalizações eléctricas, de esgoto, de gases, incluindo as de ar comprimido e de vácuo, bem como a condutas de ventilação, de tratamento de ar, de evacuação de efluentes de combustão, de desenfumagem e de evacuação de lixos.

O isolamento das condutas e das canalizações dos edifícios pode ser obtido por alojamento em ductos; atribuição de resistência ao fogo às próprias canalizações ou condutas; ou Instalação de dispositivos no interior das condutas para obturação automática em caso de incêndio.

Com exceção das condutas de ventilação e tratamento de ar, devem ser alojadas em ductos as canalizações e condutas que estejam situadas em edifícios de grande altura e atravessem pavimentos ou paredes de compartimentação corta-fogo e possuam um diâmetro nominal superior a 315 mm ou secção equivalente.

## Capítulo VI - Proteção de vãos interiores

Excepto em casos particulares referidos no RT-SCIE, as portas que isolam os compartimentos corta-fogo devem ser de um escalão de tempo no mínimo de metade do valor das paredes em que se inserem. Assim, para isolamento e proteção através de câmaras corta-fogo, estas devem ser separadas do restante edifício por elementos de construção que garantam, por um período de tempo que permita a evacuação do edifício, a segurança no seu interior. Assim as paredes não resistentes têm de garantir a classe de resistência ao fogo padrão EI 60, os pavimentos e paredes resistentes REI60 e E30 C para as portas.

De acordo com o RT-SCIE, as câmaras corta-fogo devem dispor de meios de controlo de fumos e dentro das mesmas não podem existir ductos, acesso a ductos, canalizações que contenham líquidos ou gases combustíveis ou comburentes que, por isso possam contribuir para o fogo.

As portas resistentes ao fogo de acesso ou integradas em caminhos de evacuação devem ser sempre providas de dispositivos de fecho que as reconduzam automaticamente.

## Capítulo VII - Reação ao fogo

A classificação de reação ao fogo dos materiais de construção de edifícios e recintos, nos termos do presente regulamento, aplica-se aos revestimentos de vias de evacuação e câmaras corta-fogo, de locais de risco e de comunicações verticais, como caixas de elevadores, condutas e ductos, bem como a materiais de construção e revestimento de elementos de decoração e mobiliário fixo.

## **Condições Gerais de Evacuação**

Os espaços interiores dos edifícios e dos recintos contemplados no presente regulamento devem

ser organizados para permitir que, em caso de incêndio, os ocupantes possam alcançar um local seguro no exterior pelos seus próprios meios, de modo fácil, rápido e seguro.

De maneira a alcançar os objectivos definidos no número anterior:

- a) Os locais de permanência, os edifícios e os recintos devem dispor de saídas, em número e largura suficientes, convenientemente distribuídas e devidamente sinalizadas;
- b) As vias de evacuação devem ter largura adequada e, quando necessário, ser protegidas contra o fogo, o fumo e os gases de combustão;
- c) As distâncias a percorrer devem ser limitadas.

### **Condições Gerais das Instalações Técnicas**

As instalações técnicas dos edifícios e dos recintos devem ser concebidas, instaladas e mantidas, nos termos legais, de modo que não constituam causa de incêndio nem contribuam para a sua propagação, devendo satisfazer as exigências.

As instalações técnicas dos edifícios e recintos, essenciais ao funcionamento de sistemas e dispositivos de segurança e, ainda, à operacionalidade de alguns procedimentos de autoproteção e de intervenção dos bombeiros, devem igualmente satisfazer as exigências específicas expressas neste título.

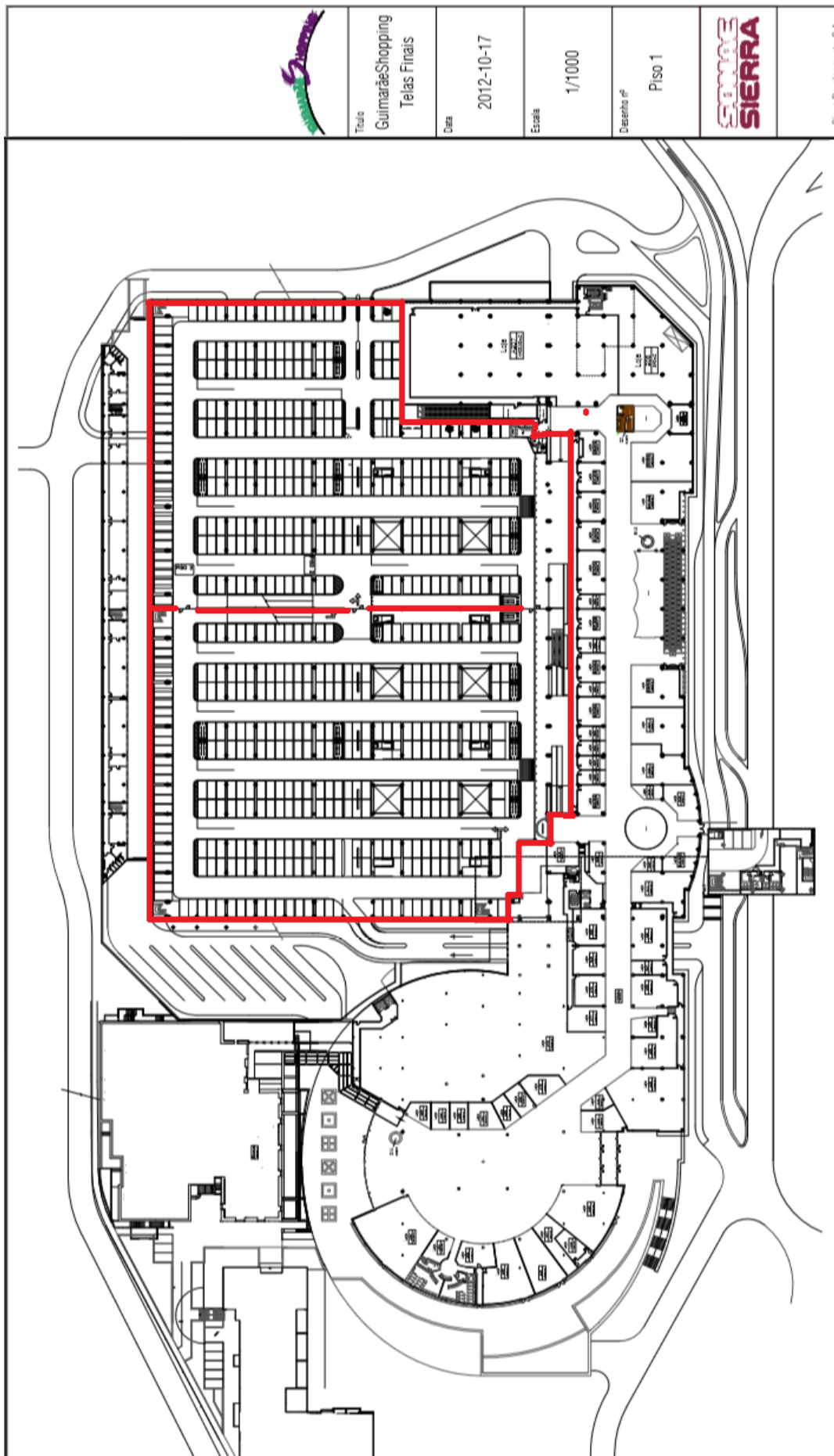
### **As condições de autoproteção**

Os parques de estacionamento devem ser dotados de medidas denominadas medidas de autoproteção.

Devem, para os parques de estacionamento, ser definidos e cumpridos os procedimentos e as técnicas de atuação em caso de emergência, a adoptar pelos ocupantes.

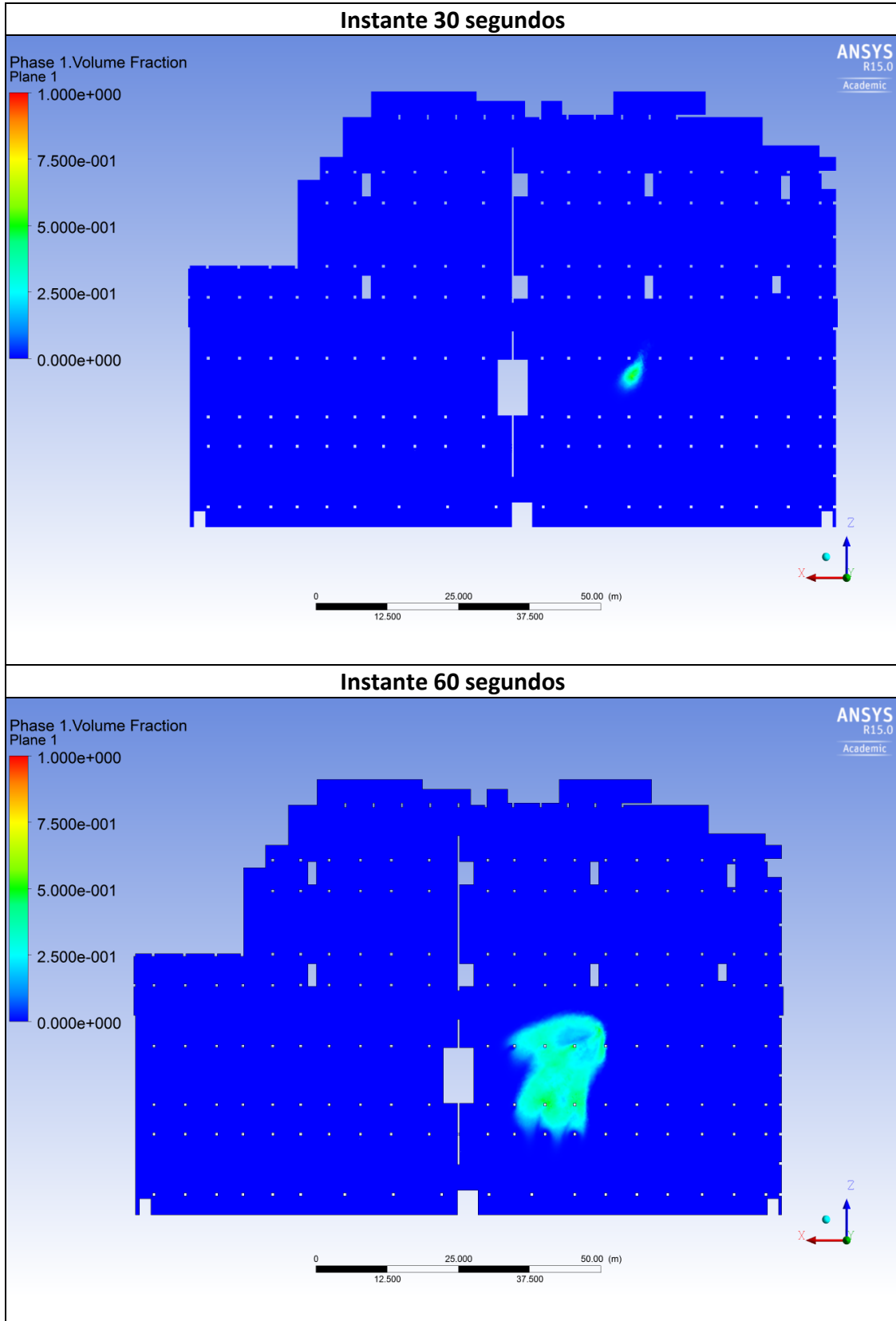
O objectivo dos planos de emergência internos dos parques de estacionamento inclui a sistematização da evacuação dos ocupantes que se encontrem em risco e a limitação da propagação e das consequências de incêndio, recorrendo a meios próprios.

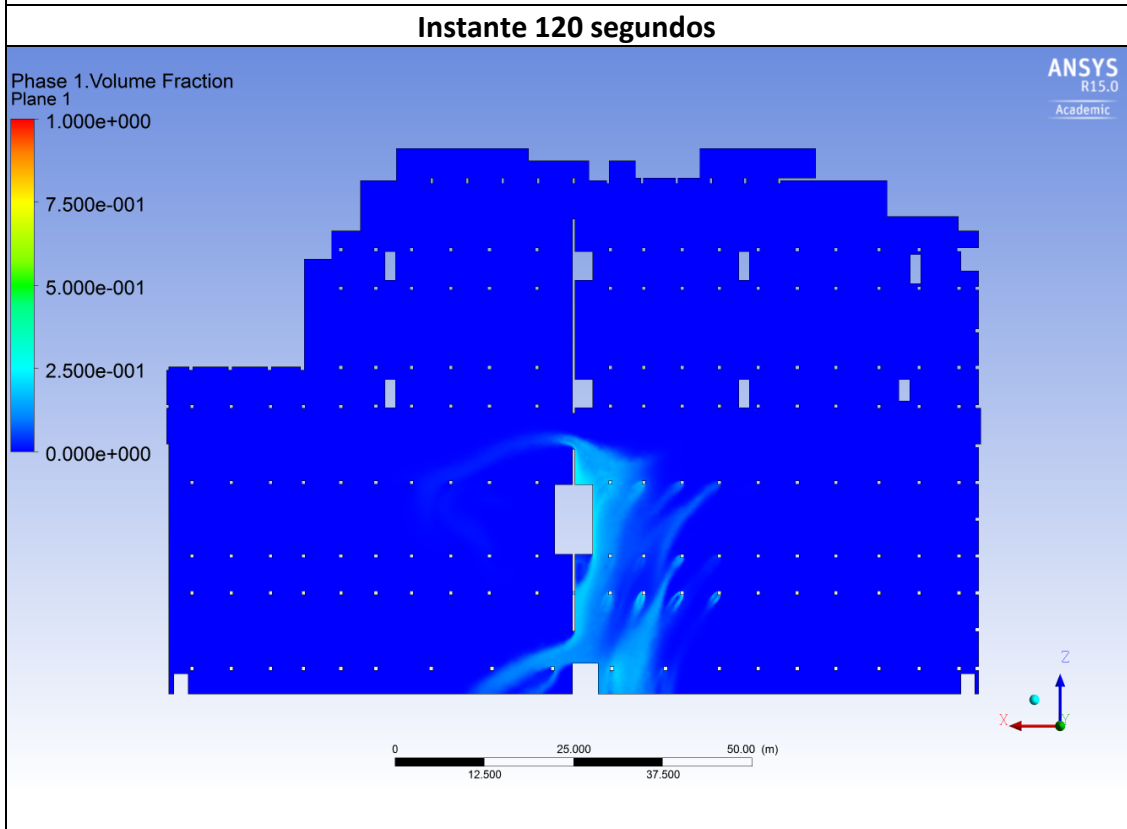
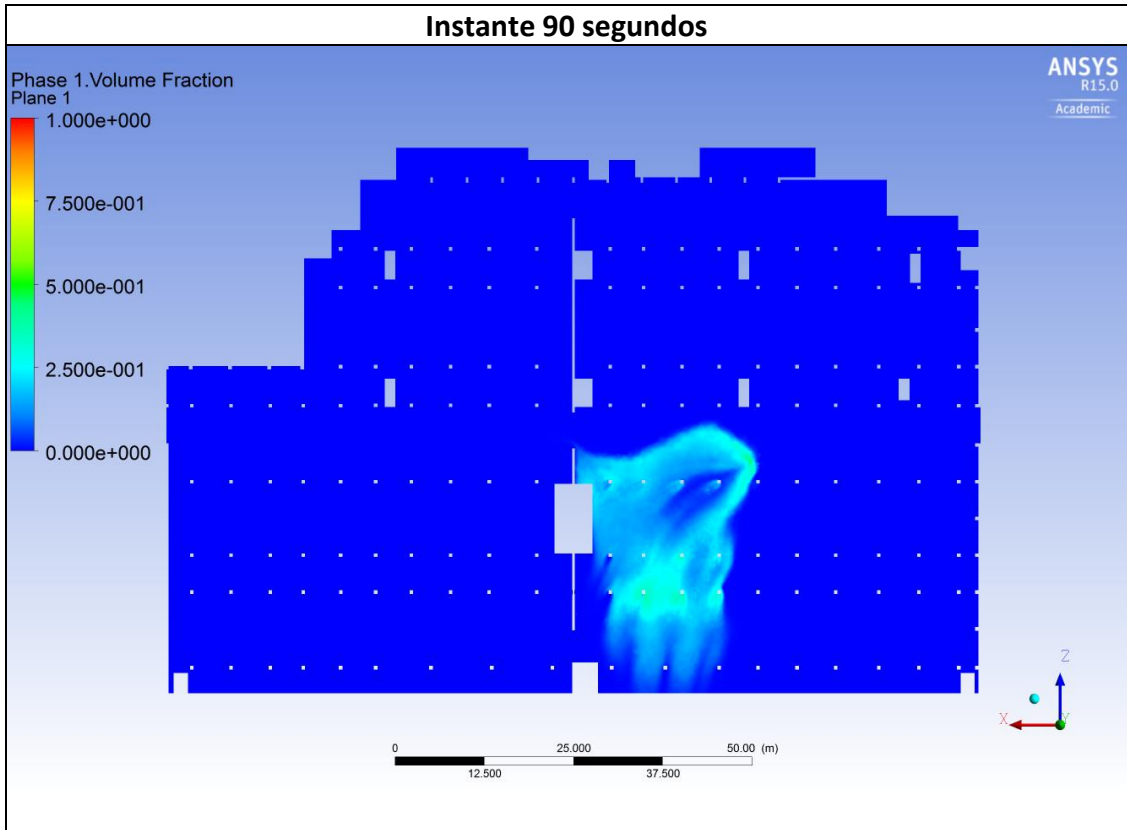
Anexo III – Planta do piso 1 do parque de estacionamento do *GuimarãesShopping*

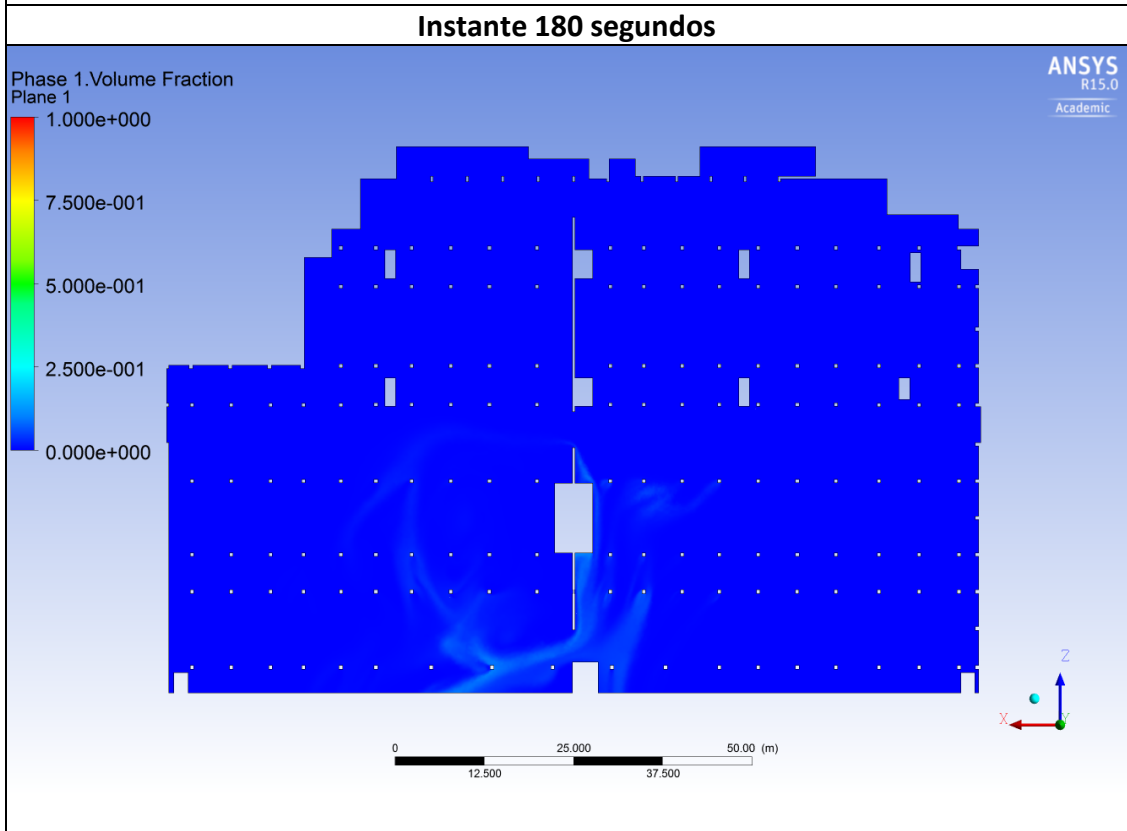
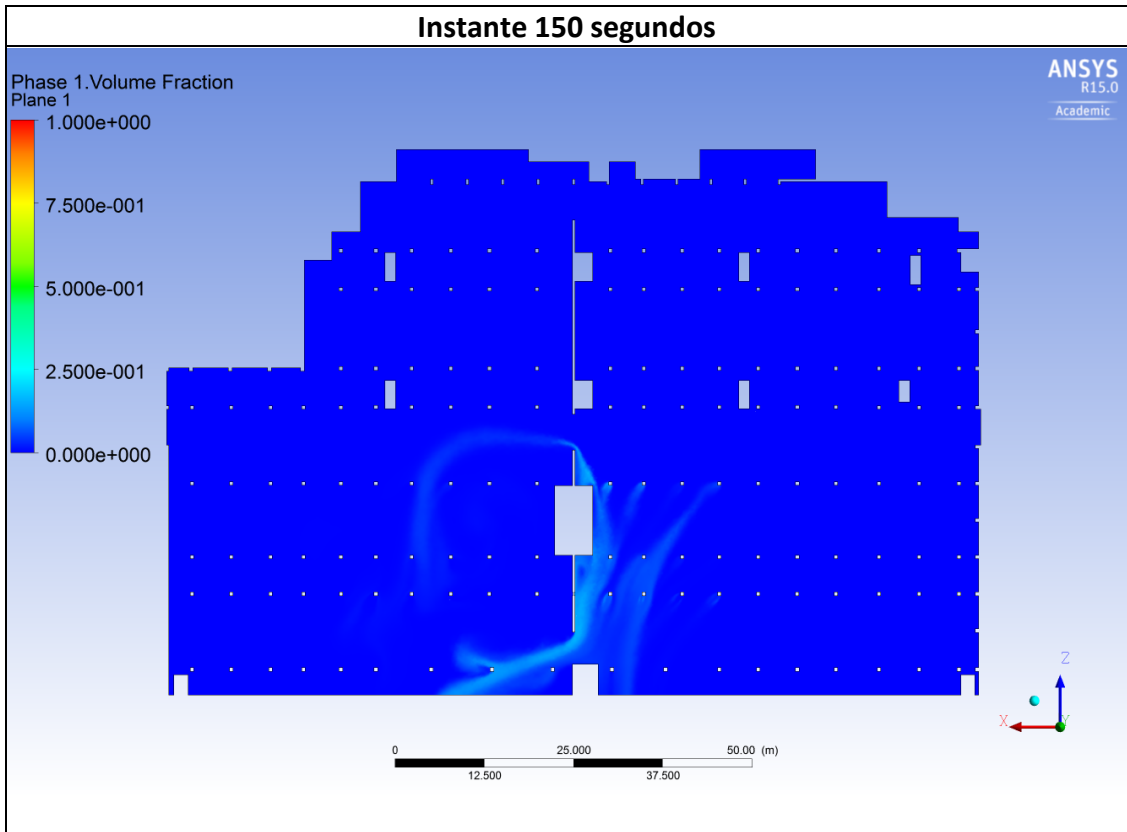


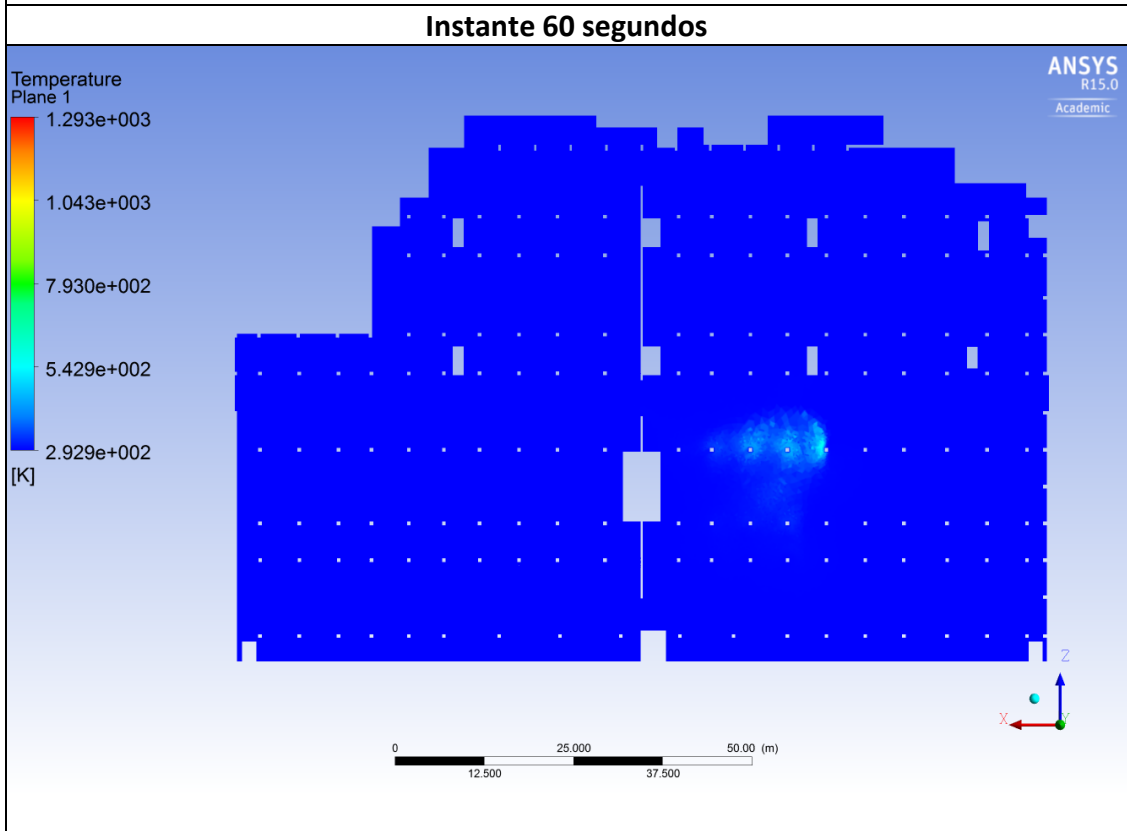
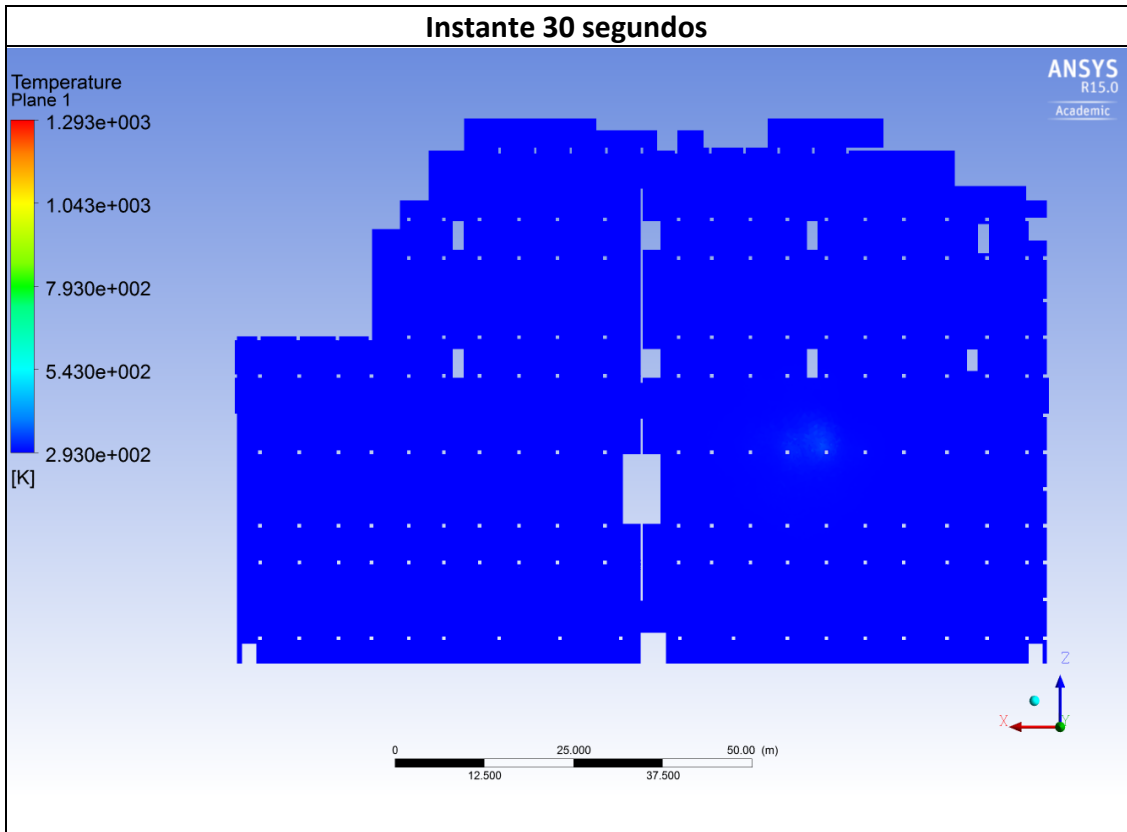
## Anexo IV – Resultados da Modelação do Incêndio no Parque de Estacionamento (Primeiro Caso) – Plano XZ 3 metros (Teto)

Neste anexo verifica-se os resultados (fração volúmica e temperatura) da simulação do incêndio no parque de estacionamento com um caudal de CO de 1kg/s.

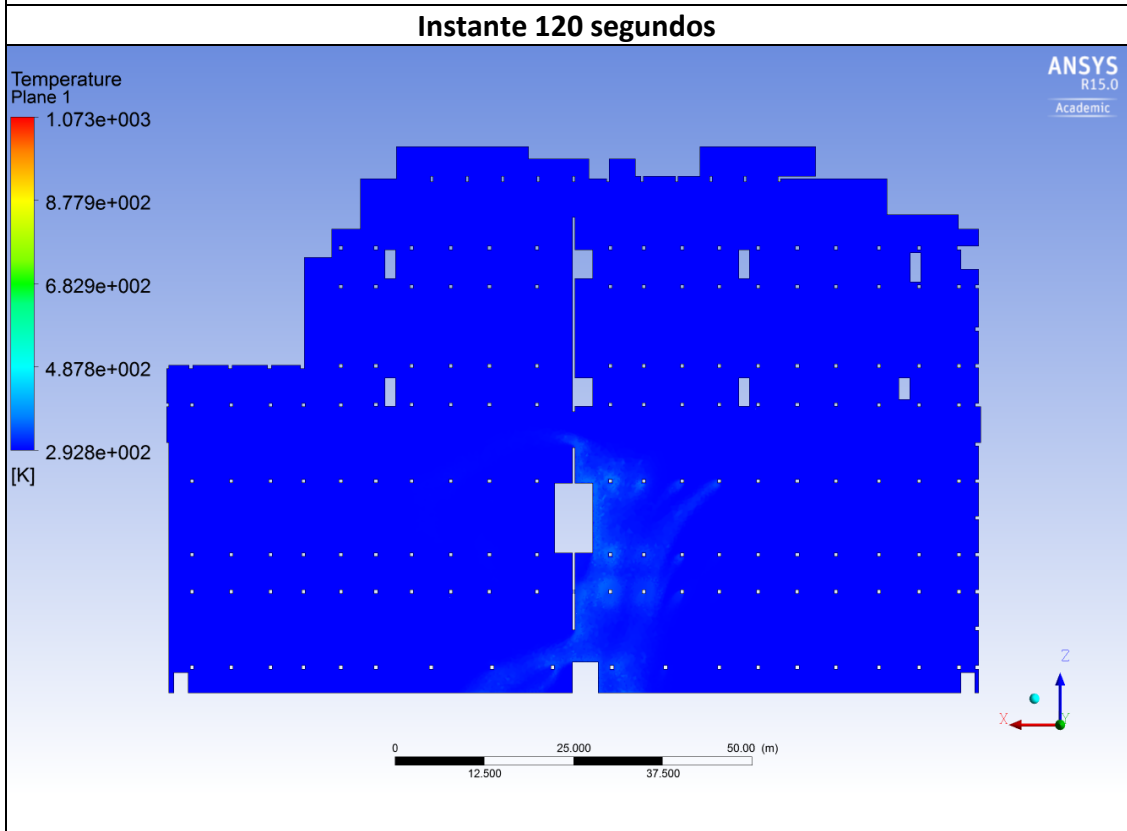
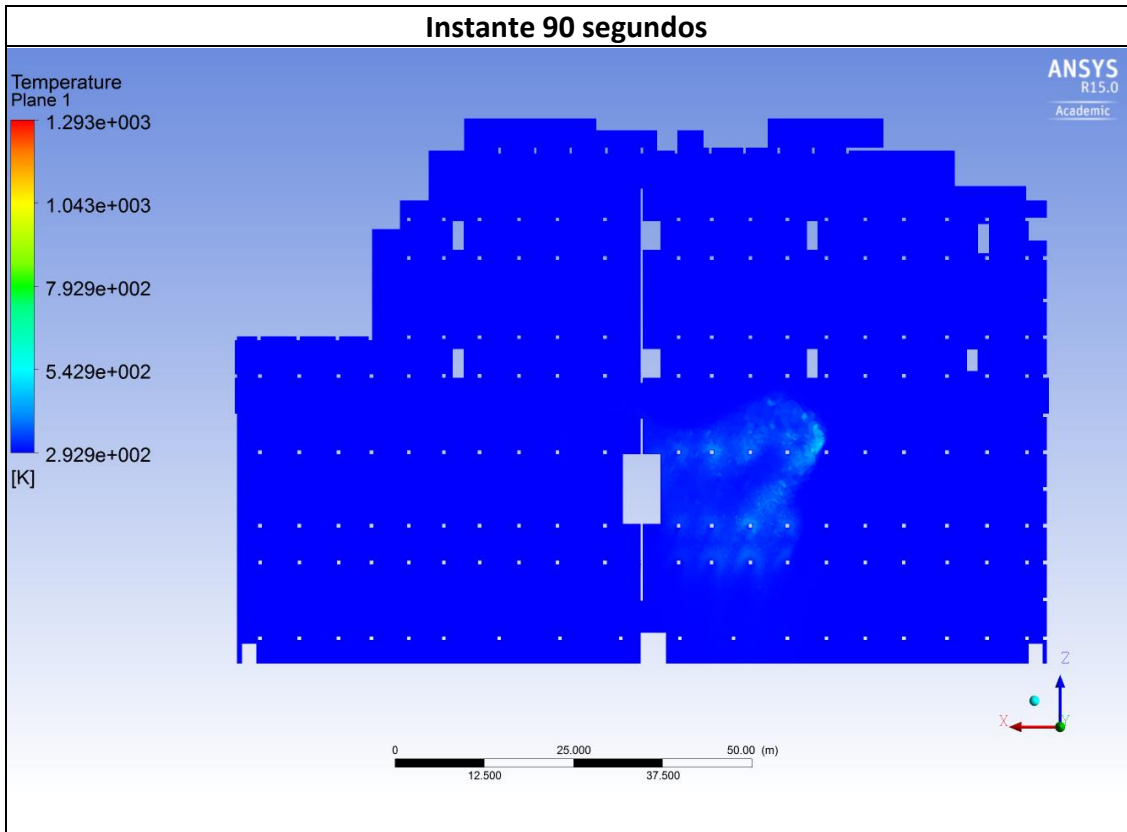


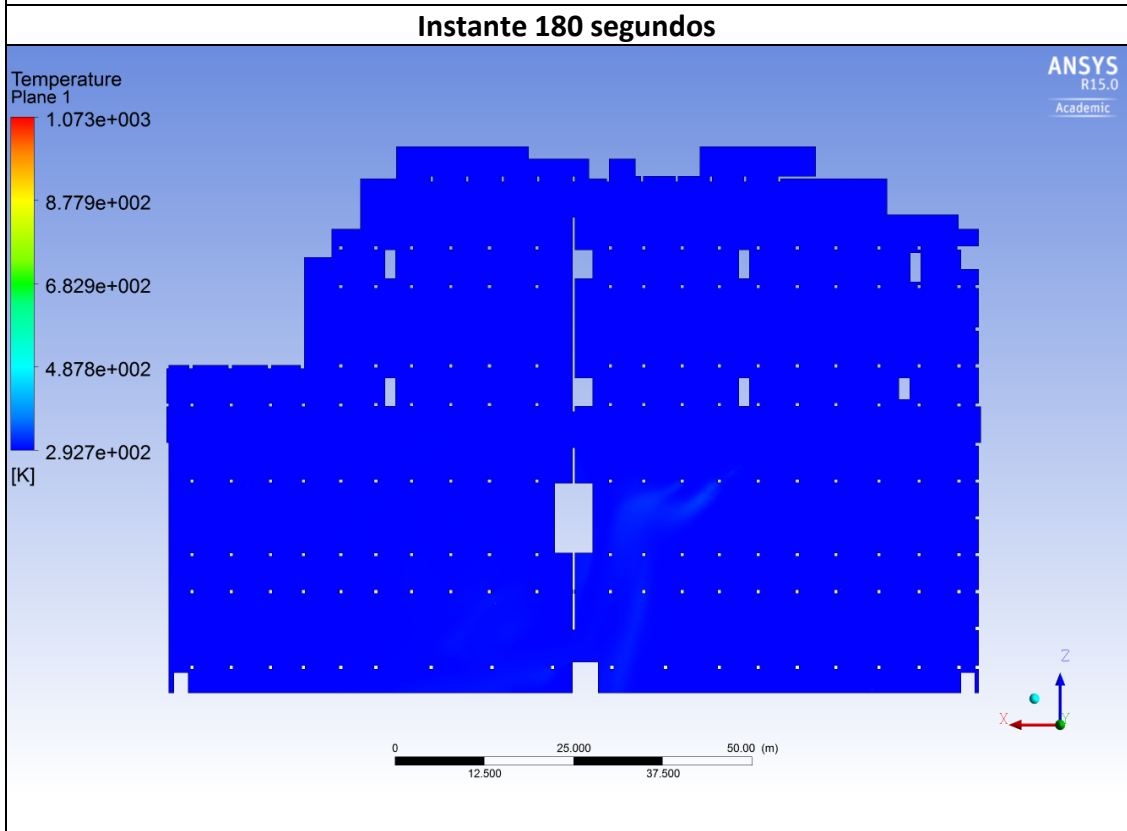
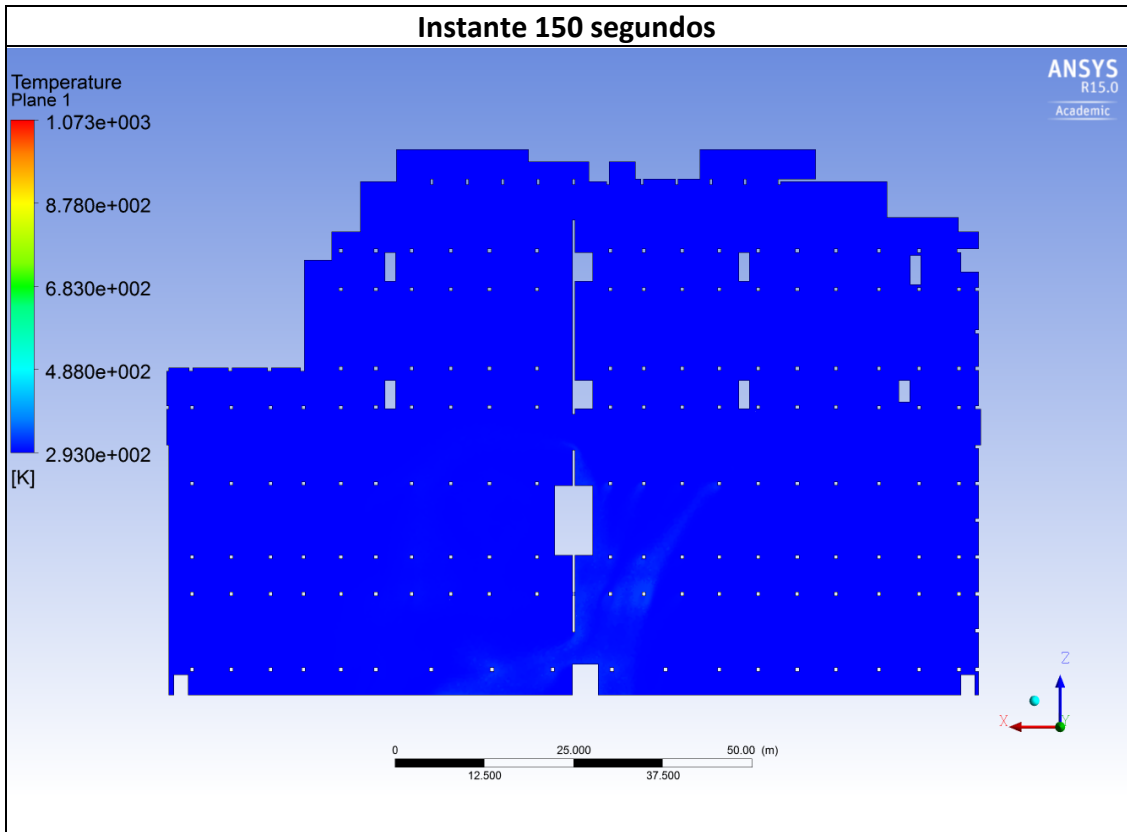












## Anexo V – Resultados da Modelação do Incêndio no Parque de Estacionamento (Segundo Caso) – Plano XZ 3 Metros (Teto)

Neste anexo são apresentados os resultados (fração volúmica do CO e temperatura da mistura) da modelação do incêndio no parque de estacionamento do segundo caso.

