



NOVA
NOVA SCHOOL OF
SCIENCE & TECHNOLOGY

DEPARTAMENTO DE
ENGENHARIA MECÂNICA E INDUSTRIAL

JOÃO ANTUNES LIMA PEREIRA LOPES

Licenciado em Ciências de Engenharia Mecânica

IMPACTO DE MODELOS DE TURBULÊNCIA NO ESTUDO AERODINÂMICO DO CORPO DE AHMED

MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA MECÂNICA

Universidade NOVA de Lisboa

JULHO, 2024



IMPACTO DE MODELOS DE TURBULÊNCIA NO ESTUDO AERODINÂMICO DO CORPO DE AHMED

JOÃO ANTUNES LIMA PEREIRA LOPES

Licenciado em Ciências de Engenharia Mecânica

Orientador: Doutor Duarte Manuel Salvador Freire Silva de Albuquerque,
Professor Auxiliar, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade NOVA de Lisboa

Júri:

Presidente: Doutor Daniel Cardoso Vaz

Professor Auxiliar, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade NOVA de Lisboa

Vogais: Doutor Moisés Gonçalves de Brito

Professor Auxiliar, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade NOVA de Lisboa

Doutor Duarte Manuel Salvador Freire Silva de Albuquerque

Professor Auxiliar, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade NOVA de Lisboa

Impacto de Modelos de Turbulência no Estudo Aerodinâmico do Corpo de Ahmed

Copyright © João Antunes Lima Pereira Lopes, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade NOVA de Lisboa.

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade NOVA de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer ao Professor Doutor Duarte Albuquerque por todo o tempo disponibilizado para ajudar e orientar o trabalho realizado ao longo da dissertação pois sem esta ajuda não teria sido possível a sua realização.

Deixo também um agradecimento à Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade Nova de Lisboa por disponibilizar todas as condições necessárias para os estudos que me permitiram obter o grau de Mestre em Engenharia Mecânica.

Tenho ainda de agradecer ao Instituto Superior Técnico da Universidade de Lisboa por ter disponibilizado as licenças necessárias para a utilização do programa onde se correram todas as simulações numéricas.

Agradeço a todos os que trabalham na faculdade, docentes e não docentes, deixando um agradecimento especial ao Departamento de Engenharia Mecânica e Industrial que me acompanhou nestes últimos cinco anos e meio.

Agradeço a todos os colegas que tive nestes anos de curso, a todos os amigos que fiz nesta vida académica e aos amigos que já me acompanhavam ainda não era eu estudante universitário pois, de uma forma ou de outra, ajudaram a ter sucesso.

Resta um agradecimento muito especial a toda a minha família pela companhia, pelos incentivos, pela motivação e pelo esforço realizado que me permitiu cumprir todos os estudos, desde a escola primária até à universidade.

RESUMO

A simulação numérica é uma componente muito importante no desenvolvimento da Indústria Automóvel pelo que é necessário que esta seja o mais fiel possível à realidade. A realização de estudos numéricos permite uma redução de custos financeiros e temporais relativamente aos estudos experimentais.

A escolha do modelo de turbulência a utilizar nos estudos aerodinâmicos é crucial para se obterem resultados mais precisos, ou seja, com um menor erro. Uma maior precisão dos estudos numéricos origina melhores resultados o que pode levar a que os estudos experimentais tenham o propósito único de validação de resultados.

Nesta dissertação estudou-se o escoamento em torno do corpo de Ahmed tridimensional recorrendo a quatro modelos de turbulência RANS com o objetivo de determinar qual o mais adequado para utilizar em estudos aerodinâmicos da Indústria Automóvel. Recorreu-se ao programa Simcenter STAR-CCM+ desenvolvido pela Siemens Digital Industries Software para a realização de todo o trabalho computacional desta dissertação.

De entre os modelos de turbulência *Standard Spalart-Allmaras*, *Realizable $k - \epsilon$ Two-Layer*, *SST $k - \omega$* e *RSM* o que se revelou mais preciso, por comparação com dados experimentais, foi o modelo *RSM*. Este obteve o menor erro relativo percentual no cálculo do Coeficiente de Arrasto.

Palavas chave: Estudos Numéricos, Indústria Automóvel, Corpo de Ahmed, Modelos de Turbulência RANS, Simcenter STAR-CCM+

ABSTRACT

Numerical studies are a very important component in the development of the Automotive Industry, therefore it is necessary that these are as faithful to reality as possible. Carrying out numerical studies allows a reduction in financial and time costs compared to those of experimental studies.

The choice of the turbulent model to use in aerodynamic studies is crucial to obtain the most accurate results, that is, with the smallest error. Greater accuracy in numerical studies leads to better results, which can lead to experimental studies having solely the purpose of validating results.

The flow around a three-dimensional Ahmed-Body was studied in this dissertation using four RANS turbulent models with the objective of determining which one is the most adequate for aerodynamic studies in Automotive Industry. The Siemens Digital Industries Software program STAR-CCM+ was used for all the computational work done in this dissertation.

Among the turbulent models Standard Spalart-Allmaras, Realizable $k - \varepsilon$ Two-Layer, SST $k - \omega$ and RSM the one proved to be more accurate, in comparison with experimental data, was RSM. This obtained the lowest percentage relative error in calculating the Drag Coefficient.

Keywords: Numerical Studies, Automotive Industry, Ahmed-Body, RANS Turbulence Models, Simcenter STAR-CCM+

ÍNDICE

AGRADECIMENTOS	V
RESUMO	VII
ABSTRACT	IX
ÍNDICE	XI
ÍNDICE DE FIGURAS	XIII
ÍNDICE DE TABELAS	XV
SIGLAS E ACRÓNIMOS	XVII
SÍMBOLOS.....	XIX
1 INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Aerodinâmica Automóvel	1
1.2 Corpo de Ahmed	2
1.3 Estudos Experimentais	2
1.4 Estudos Numéricos.....	3
1.5 Objetivos	4
1.6 Estrutura da dissertação.....	4
2 INTRODUÇÕES TEÓRICAS	7
2.1 Mecânica dos Fluidos Computacional	7
2.2 Método dos Volumes Finitos	7
2.3 Algoritmos de Acoplamento Velocidade-Pressão.....	9
2.4 Modelos de Turbulência.....	10
2.4.1 RANS	11

2.4.1.1	Standard Spalart-Allmaras	12
2.4.1.2	Realizable $k - \epsilon$ Two-Layer	13
2.4.1.3	SST $k - \omega$	15
2.4.1.4	RSM	16
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
3.1	Apresentação dos Critérios.....	19
3.2	Classificação dos Artigos	20
4	PROCEDIMENTOS	23
4.1	Condições de Fronteira.....	23
4.2	Critério de Paragem.....	25
4.3	Estudo da Independência de Malha.....	26
4.4	Estudo de Otimização da Malha.....	27
4.5	Estudo Comparativo Coupled/Segregated Flow	30
4.6	Dimensões do Domínio Computacional	31
4.6.1	Altura do Domínio Computacional	32
4.6.2	Largura do Domínio Computacional.....	32
4.6.3	Distância Inlet-Corpo do Domínio Computacional	33
4.6.4	Distância Corpo-Outlet do Domínio Computacional.....	34
5	ANÁLISE E DISCUSSÃO DE RESULTADOS	35
5.1	RSM	36
6	CONCLUSÕES E SUGESTÕES DE TRABALHO FUTURO.....	45
6.1	Conclusões	45
6.2	Sugestões de Trabalho Futuro	46
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	47

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 - Dimensões, em Milímetros, do corpo de Ahmed [2]	2
Figura 2.1 - Representação de Um Volume de Controle [5]	9
Figura 2.2 - Estudos do Escoamento em Torno do corpo de Ahmed 2D.....	11
Figura 4.1 - Domínio Cotado no Estudo da Independência de Malha, Dimensões em Metros	26
Figura 4.2 - Coeficiente de Arrasto em Função do Número de Elementos da Malha	27
Figura 5.1 - Plano de Simetria $y = 0$ com Pontos de Dados na Traseira do Corpo.....	37
Figura 5.2 - Comparação dos Coeficientes de Pressão na Traseira do Corpo	37
Figura 5.3 - Plano de Simetria $y = 0$ com Pontos de Dados no Fundo do Corpo	38
Figura 5.4 - Comparação dos Coeficientes de Pressão no Fundo do Corpo	39
Figura 5.5 - Plano de Simetria $y = 0$ com Linhas de Dados Verticais	40
Figura 5.6 - Plano de Simetria $y = 0$ com Linha de Dados $x = -3$ mm.....	41
Figura 5.7 - Perfil da Velocidade u da Linha de Dados $x = -3$ mm.....	41
Figura 5.8 - Perfil da Velocidade w da Linha de Dados $x = -3$ mm.....	42
Figura 5.9 - Plano de Simetria $y = 0$ com Linha de Dados $x = -243$ mm	42
Figura 5.10 - Perfil da Velocidade u da Linha de Dados $x = -243$ mm	43
Figura 5.11 - Perfil da Velocidade w da Linha de Dados $x = -243$ mm.....	43

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 3.1 - Classificação dos Artigos.....	20
Tabela 4.1 - Comparação de Critérios de Paragem.....	25
Tabela 4.2 - Estudo da Independência de Malha	27
Tabela 4.3 - Estudo de Otimização da Malha	30
Tabela 4.4 - Estudo da Altura do Domínio Computacional.....	32
Tabela 4.5 - Estudo da Largura do Domínio Computacional	33
Tabela 4.6 - Estudo da Distância <i>Inlet</i> -Corpo do Domínio Computacional	33
Tabela 5.1 - Comparação dos Modelos de Turbulência.....	35
Tabela 5.2 - Comparação dos Coeficientes de Pressão na Traseira do Corpo	38
Tabela 5.3 - Comparação dos Coeficientes de Pressão no Fundo do Corpo.....	39

SIGLAS E ACRÓNIMOS

2D	Bidimensional
3D	Tridimensional
B. S.	<i>Base Size</i>
CFD	<i>Computacional Fluid Dynamics</i>
DES	<i>Detached Eddy Simulation</i>
F. A.	Força de Arrasto [N]
LES	<i>Large Eddy Simulation</i>
MDF	Método das Diferenças Finitas
MEF	Método dos Elementos Finitos
MVF	Método dos Volumes Finitos
N. A.	Não Aplicável
N. D.	Não Disponível
N. I.	Número de Iterações
PISO	<i>Pressure-Implicit with Splitting of Operators</i>
RANS	Reynolds-Averaged Navier-Stokes
RSM	Reynolds <i>Stress Model</i>
SIMPLE	<i>Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equations</i>
SIMPLEC	<i>Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equations-Consistent</i>
SST	<i>Shear-Stress Transport</i>

SÍMBOLOS

$\nabla k \cdot \nabla \omega$	Termo de Difusão Cruzada Não Linear
$\nabla p'$	Gradiente das Correções da Pressão
β	Coefficiente de Modelo de Turbulência
β^*	Coefficiente de Modelo de Turbulência
β_1	Coefficiente de Modelo de Turbulência
β_1^*	Coefficiente de Modelo de Turbulência
β_2	Coefficiente de Modelo de Turbulência
β_2^*	Coefficiente de Modelo de Turbulência
ε	Dissipação Turbulenta Isotrópica [m^2/s^3] e Taxa de Dissipação Turbulenta [m^2/s^3]
$\underline{\varepsilon}$	Tensor da Taxa de Dissipação Turbulenta
ε_0	Valor da Turbulência Ambiente nos Termos Fonte que Contrariam o De-caimento da Turbulência [m^2/s^3]
μ	Viscosidade Dinâmica [$\text{N s}/\text{m}^2$]
μ_t	Viscosidade Turbulenta [$\text{kg}/\text{m s}$]
ν	Difusividade [m^2/s] e Viscosidade Cinemática [m^2/s]
$\tilde{\nu}$	Difusividade Modificada [m^2/s]
ρ	Massa Volúmica [kg/m^3]
σ_ε	Coefficiente de Modelo de Turbulência

$\sigma_{\bar{v}}$	Coeficiente de Modelo de Turbulência
σ_{ω}	Coeficiente de Modelo de Turbulência
σ_{ω_1}	Coeficiente de Modelo de Turbulência
σ_{ω_2}	Coeficiente de Modelo de Turbulência
σ_k	Coeficiente de Modelo de Turbulência
σ_{k_1}	Coeficiente de Modelo de Turbulência
σ_{k_2}	Coeficiente de Modelo de Turbulência
τ_{ω}	Tensão de Corte na Parede [Pa]
φ	Ângulo de Inclinação da Traseira do Corpo de Ahmed [°]
ϕ	Parâmetro Genérico
$\bar{\phi}$	Média do Parâmetro Genérico
ϕ'	Componente Variável do Parâmetro Genérico
$\underline{\phi}$	Tensor da Tensão de Pressão
Υ_M	Termo de Modificação da Compressibilidade
Υ_M	Dissipação da Dilatação
$\Upsilon_{\bar{v}}$	Termo de Dissipação Turbulenta
ω	Fator de Sub-Relaxamento para a Pressão e Taxa de Dissipação Específica [s ⁻¹]
ω_0	Valor Ambiente da Taxa de Dissipação Específica que Contraria o Decaimento da Turbulência [s ⁻¹]
a	Tamanho da Primeira Camada de Células [m]
\mathbf{a}_p^{rv}	Vetor dos Coeficientes Centrais para a Equação Discretizada da Velocidade
C_1	Coeficiente de Modelo de Turbulência
C_2	Coeficiente de Modelo de Turbulência

$C_{\varepsilon 1}$	Coeficiente de Modelo de Turbulência
$C_{\varepsilon 2}$	Coeficiente de Modelo de Turbulência
$C_{\varepsilon 3}$	Coeficiente de Modelo de Turbulência
C_{μ}	Coeficiente de Modelo de Turbulência
C_{v1}	Coeficiente de Modelo de Turbulência
C_d	Coeficiente de Arrasto
C_p	Coeficiente de Pressão
D	Difusão das Tensões de Reynolds
$D_{\tilde{v}}$	Termo da Difusão Não Conservativa
D_{ω}	Termo de Difusão Cruzada
d	Distância à Parede [m]
F_1	Função de Agregação
f_2	Função de Amortecimento
f_{β}	Fator de Modificação
f_{β^*}	Fator de Modificação
f_{μ}	Função de Amortecimento
f_{v1}	Função de Amortecimento
f_c	Fator de Correção da Curvatura
G	Produção da Flutuação
$G_{\tilde{v}}$	Termo de Produção Turbulenta
G_{ω}	Termo de Produção de Dissipação Específica
G_b	Termo de Produção de Flutuação
G_k	Termo de Produção Turbulenta
G_{nl}	Termo de Produção Não Linear

g	Aceleração Gravítica [m/s ²]
\mathbf{g}	Vetor Gravitacional [m/s ²]
H_1	Altura do Ponto 1 [m]
H_2	Altura do Ponto 2 [m]
\mathbf{I}	Tensor Identidade
k	Energia Cinética Turbulenta [m ² /s ²]
k_0	Valor Ambiente da Energia Cinética Turbulenta que Contraria o Decaimento da Turbulência [m ² /s ²]
L	Comprimento do Corpo de Ahmed [m]
l_ε	Função da Escala de Comprimento
\dot{m}_f^*	Fluxos de Massa Não Corrigidos nas Faces [kg/s]
n	Número de Camadas de Células
P	Pressão Estática [Pa]
\mathbf{P}	Produção Turbulenta
P_∞	Pressão de Estagnação [Pa]
P_1	Pressão na Fronteira 1 [Pa]
P_2	Pressão Atmosférica [Pa]
P_ε	Termo de Produção
$P_{\bar{v}}$	Termo de Produção
P_ω	Termo de Produção
P_k	Termo de Produção
p'	Correção da Pressão [Pa]
p'_b	Correção de Pressão nas Fronteiras [Pa]
\mathbf{R}	Tensor da Tensões de Reynolds

Re_d	Número de Reynolds da Distância à Parede
r	Rácio Entre Tamanhos de Células Consecutivas
S	Taxa de Deformação Média [s^{-1}]
S_ε	Termo Fonte
$S_{\bar{\nu}}$	Termo Fonte
S_ω	Termo Fonte
S_k	Termo Fonte
S_n	Comprimento “Extrudido” [m]
\mathbf{S}_R	Termo Fonte
T	Escala de Tempo Turbulenta
T_0	Escala de Tempo Especificada pela Imposição de uma Fonte Ambiente
T_e	Escala de Tempo dos Grandes Turbilhões [s]
t	Tempo [s]
$\text{tr}(X)$	Traço de uma Matriz Genérica X
u	Componente Da Velocidade Em x [m/s]
u_τ	Velocidade de Fricção [m/s]
\mathbf{u}_b	Componente da Velocidade Perpendicular ao Vetor Gravitacional \mathbf{g} [m/s]
uw	Tensão de Reynolds [m^2/s^2]
V	Volume da Célula [m^3]
V_∞	Velocidade do Escoamento Livre [m/s]
V_1	Velocidade do Fluido Imposta pela Condição de Fronteira do <i>Inlet</i> [m/s]
V_2	Velocidade na Fronteira do Topo [m/s]
v	Componente da Velocidade em y [m/s]
$\bar{\mathbf{v}}$	Velocidade Média [m/s]

\mathbf{v}^*	Campo da Velocidade Intermédia [m/s]
\mathbf{v}_b	Componente da Velocidade Paralelo ao Vetor Gravitacional \mathbf{g} [m/s]
w	Componente da Velocidade em z [m/s]
X	Matriz Genérica
x	Eixo das Abcissas do Referencial Cartesiano [m]
y	Distância à Parede [m] e Eixo das Ordenadas do Referencial Cartesiano [m]
y^+	Parâmetro Adimensional para Estudos de Aplicabilidade das Leis de Parede
z	Eixo das Cotas do Referencial Cartesiano [m]

INTRODUÇÃO

1.1 Aerodinâmica Automóvel

A Aerodinâmica na Indústria Automóvel sempre foi bastante importante, contudo tem vindo a ganhar cada vez mais importância devido às preocupações climáticas e às novas regulamentações na Indústria Automóvel.

A grande relevância da aerodinâmica deve-se a que esta influencia tanto a eficiência de um veículo como a sua performance pelo que é bastante útil o seu estudo para a conceção de todo o tipo de automóveis, desde o transporte de passageiros, transporte de carga e até ao desporto motorizado.

Nos veículos de transporte de passageiros e carga pretende-se que sejam o mais eficientes possível de forma a reduzir os consumos de combustível e/ou energia. Nos veículos do desporto motorizado pretende-se ser o mais rápido nos circuitos pelo que é obrigatório ter uma ótima performance.

Como forma de se estudar o escoamento do ar em torno de um veículo criou-se um corpo denominado de corpo de Ahmed, corpo este que será utilizado nesta dissertação e que será apresentado no Subcapítulo 1.2.

Para se estudarem os efeitos aerodinâmicos dos veículos pode-se recorrer a estudos experimentais e/ou a estudos numéricos, serão brevemente explicados no Subcapítulo 1.3 e Subcapítulo 1.4, respetivamente.

1.2 Corpo de Ahmed

O corpo de Ahmed foi criado no ano de 1984 com o objetivo de se ter algum corpo que permitisse estudar todos os tipos de escoamento em torno de veículos terrestres, por isso mesmo este corpo tem uma geometria aproximada à de um automóvel. Foi dado o nome de corpo de Ahmed a este corpo em honra ao seu criador Syed R. Ahmed.

O corpo foi criado unindo três partes, secções dianteira, intermédia e traseira, com características específicas que permitiriam visualizar e estudar os efeitos aerodinâmicos expectáveis de acontecer num veículo terrestre. Para se verificar a separação do escoamento na dianteira do corpo foi necessário arredondar as arestas desta mesma secção. A secção intermédia tem um formato parecido a uma caixa com arestas vivas e tem uma secção transversal retangular, é ainda necessário acrescentar na face inferior quatro cilindros de forma a simular as rodas do veículo. Na traseira do corpo está presente a componente geométrica variável deste corpo que é o seu ângulo de inclinação, φ [°], no entanto, a face inclinada tem um comprimento constante de 222 mm. [1] A Figura 1.1 apresenta a geometria do corpo de Ahmed devidamente cotada.

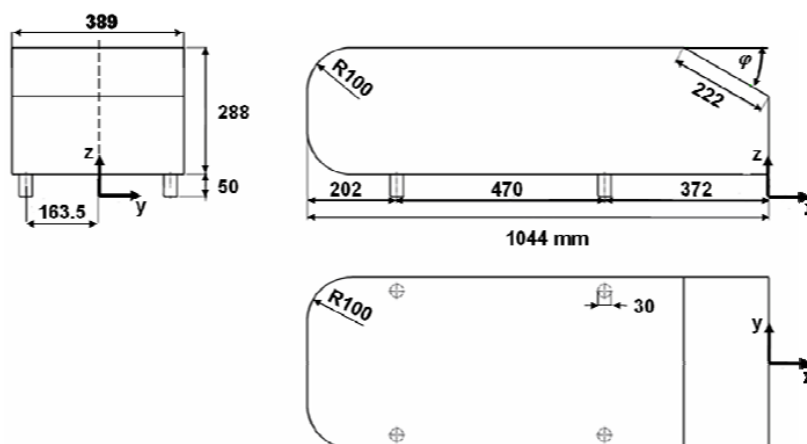


Figura 1.1 - Dimensões, em Milímetros, do corpo de Ahmed [2]

Syed. R. Ahmed fez estudos experimentais num túnel de vento utilizando o corpo de Ahmed e chegou à conclusão de que a maior parte do arrasto, cerca de 85 %, presentes nos automóveis é provocado pela variação de pressão causada pela separação do escoamento, sendo o restante, aproximadamente 15 %, provocado pela fricção. [1]

1.3 Estudos Experimentais

Os estudos experimentais são realizados em laboratórios próprios, sendo que estes variam muito consoante o estudo em questão. Para o caso desta dissertação o laboratório necessitaria

de ter um túnel de vento, ventoinhas para direcionarem o ar para o corpo, um modelo do corpo em estudo, que pode ser à escala geométrica, e diversos sensores para se garantir que as condições são as pretendidas. Para além do material já mencionado é ainda necessário algo que permita visualizar e analisar o escoamento do ar, para tal pode-se optar por fumo colorido ou pela colagem de fios de lã nas secções do modelo que se pretendem estudar. Estes permitem uma visualização bastante boa do escoamento pois ambos os métodos adquirem a direção do escoamento.

Estes estudos permitem desde logo perceber como será o escoamento do ar em torno do corpo em situações reais por ser feita em laboratório e não em meios digitais como os estudos numéricos. A grande desvantagem deste tipo de estudo é o seu custo pois exige uma grande quantidade de material e, para se obterem testes precisos, é necessário material de muito boa qualidade, ou seja, material com precisões elevadas e erros mínimos o que se torna verdadeiramente dispendioso.

1.4 Estudos Numéricos

Os estudos numéricos consistem em estudos que recorrem a programas específicos tais como Ansys Fluent, OpenFOAM ou Simcenter STAR-CCM+ que permitem simular o escoamento de fluidos em torno ou no interior de corpos. Estes estudos permitem a visualização e análise do escoamento dos fluidos sendo que permitem ainda uma rápida alteração de diversos parâmetros do estudo. Estes parâmetros podem ser a geometria do corpo, as condições de fronteira escolhidas ou as propriedades do fluido sendo que para se realizarem estas alterações nos estudos experimentais seria necessário bastante mais tempo dadas as suas características.

O único material necessário para a realização destes estudos é um computador que tenha nele instalado um dos programas referidos anteriormente que faça simulações numéricas. Apesar de ser apenas preciso um computador é aconselhável que este tenha boa capacidade de processamento pois, apesar de se obterem os mesmos resultados com pior processamento, o tempo necessário para se obterem os resultados é menor o que deixa mais tempo para a sua análise e compreensão. É ainda aconselhável ter-se uma boa memória no computador pois, quanto mais precisos forem os estudos, maiores são os ficheiros gerados pelo que convém garantir que não se obtém nenhum erro devido a falta de memória, evitando assim perdas de dados e tempo cruciais.

A principal vantagem na utilização deste método de estudos é o custo pois, como já foi referido anteriormente, não é necessária uma grande despesa em material. Pelo contrário a principal desvantagem destes testes é que os seus resultados necessitam de validação com os testes experimentais, apesar de que ao longo dos anos estes resultados tenham ficado cada mais próximos dos testes experimentais.

1.5 Objetivos

Esta dissertação tem dois grandes objetivos, sendo um deles a determinação de qual o modelo de turbulência mais adequado para as simulações numéricas para o estudo aerodinâmico do corpo de Ahmed, e conseqüentemente, para o estudo aerodinâmico dos corpos da Indústria Automóvel.

O outro grande objetivo é, após a visualização e análise das zonas do escoamento em que se verifiquem maiores discrepâncias entre os resultados numéricos e os resultados experimentais, entender e conseguir explicar o porquê de existirem estas diferenças nos resultados, de forma a reduzirem-se as mesmas.

1.6 Estrutura da dissertação

Esta dissertação está estruturada nos seguintes seis capítulos: Introdução; Introduções Teóricas; Revisão Bibliográfica; Procedimentos; Análise e Discussão de Resultados; Conclusões e Sugestões de Trabalho Futuro.

No **Capítulo 1, Introdução**, faz-se uma breve introdução aos tópicos fundamentais para o desenvolvimento deste trabalho tanto como os seus objetivos e apresenta-se a estrutura da dissertação.

No **Capítulo 2, Introduções Teóricas**, explica-se toda a componente teórica utilizada neste trabalho, estando este capítulo dividido em subcapítulos de forma que cada um apresente um tópico diferente.

No **Capítulo 3, Revisão Bibliográfica**, descreve-se a revisão bibliográfica realizada, como esta foi feita e a classificação dos artigos científicos considerados utilizando critérios determinados pelo autor desta dissertação.

No **Capítulo 4, Procedimentos**, apresentam-se todos os procedimentos realizados no âmbito desta dissertação e os resultados obtidos quando se fizeram estes procedimentos.

No **Capítulo 5, Análise e Discussão de Resultados**, estão presentes todos os resultados finais obtidos nesta dissertação assim como uma análise e discussão dos mesmos.

No **Capítulo 6, Conclusões e Sugestões de Trabalho Futuro**, apresentam-se todas as conclusões que se retiraram do trabalho realizado para esta dissertação e estão presentes sugestões para trabalhos futuros que complementem esta dissertação.

INTRODUÇÕES TEÓRICAS

2.1 Mecânica dos Fluidos Computacional

A Mecânica dos Fluidos Computacional consiste no estudo do escoamento de fluidos com recurso a meios computacionais tais como programas próprios para a realização destes mesmos estudos. Existem diversos programas disponíveis sendo que para esta dissertação foi utilizado o programa Simcenter STAR-CCM+ desenvolvido pela Siemens Digital Industries Software [3].

Para uma correta utilização destes programas é necessário definir a geometria que se pretende estudar, definir as condições de fronteira e definir o modelo de turbulência que se pretende estudar. Além destes é necessário definir as propriedades do fluido e selecionar todos os parâmetros do estudo tais como se o escoamento é permanente ou transiente, se a geometria é bidimensional ou tridimensional, entre outros.

Para efetuarem as simulações numéricas os programas necessitam de realizar muitos cálculos e recorrem, geralmente, a um destes três métodos: Método dos Volumes Finitos(MVF), Método dos Elementos Finitos(MEF) ou Método das Diferenças Finitas(MDF). Dado que o programa utilizado neste dissertação utiliza o Método dos Volumes Finitos este será descrito pormenorizadamente de seguida no Subcapítulo 2.2.

2.2 Método dos Volumes Finitos

O Método dos Volumes Finitos é um método de cálculo numérico muito utilizado, especialmente no estudo do comportamento de fluidos. Este método subdivide o domínio num

número finito de volumes de controlo de tamanho reduzido que correspondem às células do domínio computacional (P. 8158 [3]).

Para a realização dos cálculos necessários para se obter uma solução do problema é necessário obedecer às leis fundamentais da física e respeitar três condições cruciais: conservação de massa, conservação de quantidade de movimento e conservação de energia [4].

A condição de conservação de massa está representada pela Equação 2.1, sendo ρ [kg/m³] a massa volúmica, t [s] o tempo, u [m/s] a componente da velocidade em x , v [m/s] a componente da velocidade em y e w [m/s] a componente da velocidade em z .

$$\frac{\delta\rho}{\delta t} + \frac{\delta(\rho u)}{\delta x} + \frac{\delta(\rho v)}{\delta y} + \frac{\delta(\rho w)}{\delta z} = 0 \quad (2.1)$$

Dado que, neste caso, se considera o fluido como incompressível a sua massa volúmica não se altera, logo pode-se eliminar o primeiro termo da Equação 2.1 e fica-se com a Equação 2.2, apresentada de seguida.

$$\frac{\delta(\rho u)}{\delta x} + \frac{\delta(\rho v)}{\delta y} + \frac{\delta(\rho w)}{\delta z} = 0 \quad (2.2)$$

Representada pelas Equações 2.3, 2.4 e 2.5 está a condição da conservação da quantidade de movimento para as componentes x , y e z , respetivamente. De notar que μ [N s/m²] é a viscosidade dinâmica e P [Pa] é a pressão estática.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\rho u u - \mu \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\rho v u - \mu \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\rho w u - \mu \frac{\partial u}{\partial z} \right) = - \frac{\partial P}{\partial x} \quad (2.3)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\rho u v - \mu \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\rho v v - \mu \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\rho w v - \mu \frac{\partial v}{\partial z} \right) = - \frac{\partial P}{\partial y} \quad (2.4)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\rho u w - \mu \frac{\partial w}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\rho v w - \mu \frac{\partial w}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\rho w w - \mu \frac{\partial w}{\partial z} \right) = - \frac{\partial P}{\partial z} \quad (2.5)$$

Por fim tem-se a condição de conservação de energia que não vai ser utilizada neste trabalho por se desprezarem as transferências de calor.

Os métodos numéricos, tal como o Método dos Volumes Finitos, transformam os modelos matemáticos em sistemas de equações algébricas discretizando as equações governamentais no tempo e no espaço. Por fim as equações lineares resultantes são resolvidas por solucionadores algébricos. (P. 8159 [3])

Versões discretizadas das formas integrais das equações da conservação são aplicadas a cada volume de controlo tendo como objetivo a obtenção de um conjunto de equações

algébricas lineares. Os valores das variáveis dependentes são armazenados no centro de cada célula, isto é, usa-se um agrupamento de variáveis co-localizadas. (P. 8158 [3])

Este tipo de agrupamento e os volumes de controlo são melhor perceptíveis com a visualização da Figura 2.1, onde P é o nó central onde são armazenados os valores, T, E, S, B, W e N são nós vizinhos e t, e, s, b, w e n são as faces do volume de controlo. De notar que T, E, S, B, W e N são as iniciais para *Top*(Topo), *East*(Este), *South*(Sul), *Bottom*(Fundo), *West*(Oeste) e *North*(Norte), respetivamente, e as letras minúsculas correspondem às mesmas iniciais.

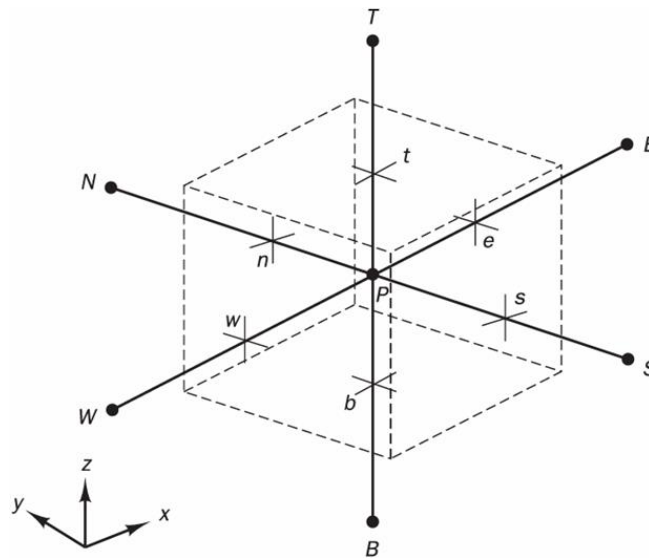


Figura 2.1 - Representação de Um Volume de Controlo [5]

2.3 Algoritmos de Acoplamento Velocidade-Pressão

O programa utilizado, Simcenter STAR-CCM+, tem disponíveis três algoritmos de acoplamento velocidade-pressão sendo estes o algoritmo SIMPLE, o algoritmo SIMPLEC e o algoritmo PISO.

Dadas as condições deste estudo, mais especificamente o facto de o escoamento ser permanente, o único algoritmo possível de utilizar é o algoritmo SIMPLE pelo que apenas este será apresentado.

O termo SIMPLE é um acrónimo de *Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equations*, que se traduz para método semi-implícito para as equações vinculadas à pressão [6].

A metodologia deste algoritmo consiste em definir as condições de fronteira, calcular os gradientes de reconstrução da velocidade e da pressão e calcular os gradientes da velocidade e da pressão. Posteriormente, o algoritmo resolve a equação discretizada do movimento, criando

assim um campo intermédio da velocidade, \mathbf{v}^* [m], e calcula os fluxos de massa não corrigidos nas faces, \dot{m}_f^* [kg/s]. De seguida é calculada a equação de correção da pressão, produzindo assim os valores de correção da pressão, p' [Pa], nas células e atualiza o campo de pressão recorrendo à Equação 2.6, sendo ω um fator de sub-relaxamento para a pressão. (P.8176 [3])

$$p^{n+1} = p^n + \omega p' \quad (2.6) \text{ (P.8176 [3])}$$

Por fim atualizam-se as correções da pressão nas fronteiras, p'_b [Pa], corrigem-se os fluxos de massa nas faces recorrendo à Equação 2.7 e corrigem-se as velocidades nas células recorrendo à Equação 2.8, sendo $\nabla p'$ o gradiente das correções da pressão, \mathbf{a}'_p o vetor dos coeficientes centrais para a equação discretizada da velocidade e V [m^3] o volume da célula. (P.8176 [3])

$$\dot{m}_f^{n+1} = \dot{m}_f^* + \dot{m}'_f \quad (2.7) \text{ (P.8176 [3])}$$

$$\mathbf{v}_p^{n+1} = \mathbf{v}_p^* - \frac{V \nabla p'}{\mathbf{a}'_p} \quad (2.8) \text{ (P.8176 [3])}$$

Além das etapas já descritas ainda existe uma etapa adicional porém não se aplica neste trabalho por se ter definido que a massa volúmica do fluido é constante.

2.4 Modelos de Turbulência

Os modelos de turbulência são um dos fatores mais importantes nos estudos numéricos não só por estes variarem bastante nos parâmetros de estudo e, consequentemente, nas equações e cálculos necessários para a sua resolução.

Existem dois grandes grupos de modelos de turbulência, sendo eles os LES (*Large Eddy Simulation*) e os RANS (*Reynolds-Averaged Navier-Stokes*) e têm vindo a ser criados modelos híbridos, tal como os DES (*Detached Eddy Simulation*), com o intuito de aproveitar características de diferentes modelos de forma a complementarem-se.

As variações existentes entre os resultados obtidos pelos diversos modelos de turbulência são um dos principais objetivos desta dissertação pois estas diferenças são bastante evidentes como é possível observar na Figura 2.2.

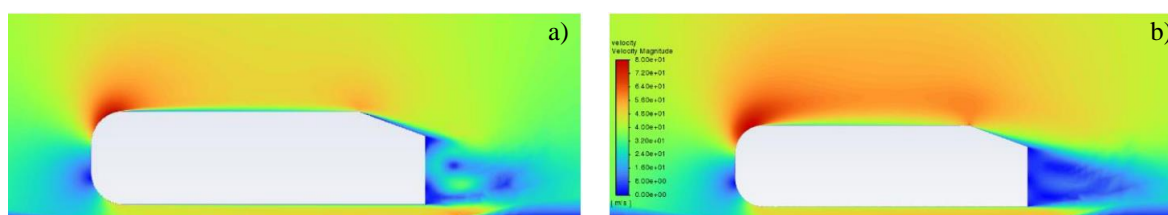


Figura 2.2 - Estudos do Escoamento em Torno do corpo de Ahmed 2D

a) Modelo RSM, b) Modelo *Standard k – ε*

Nesta Figura 2.2 são visíveis diferenças significativas, especialmente na traseira do corpo onde se verifica a existência de vórtices sendo que para estes dois estudos foram utilizadas as mesmas condições de fronteira, o mesmo domínio computacional, a mesma geometria e apenas se utilizaram modelos de turbulência diferentes: modelo RSM para a Figura 2.2 a) e modelo *Standard k – ε* para a Figura 2.2 b).

No trabalho realizado neste dissertação foram utilizados modelos de turbulência que se enquadram no grupo dos RANS pelo que este será aprofundado de seguida no Subcapítulo 2.4.1 e os modelos utilizados serão apresentados nos subcapítulos seguintes.

2.4.1 RANS

Os modelos RANS utilizam as equações de Navier-Stokes decompostas pela decomposição de Reynolds. A decomposição de Reynolds consiste em isolar o valor médio da componente variável dos parâmetros. A Equação 2.9 exemplifica uma decomposição de Reynolds genérica, sendo ϕ um parâmetro tal como velocidade ou pressão, $\bar{\phi}$ a média do parâmetro e ϕ' a componente variável do parâmetro. (P. 8226 [3])

$$\phi = \bar{\phi} + \phi' \quad (2.9) \text{ (P. 8226 [3])}$$

Dado que se considerou um escoamento em regime permanente a componente média do parâmetro é independente do tempo enquanto a componente variável é dependente do tempo. Esta decomposição de Reynolds permite reduzir a complexidade dos sistemas diferenciais de equações por se eliminar parcial ou totalmente a componente variável no tempo. (P. 8226 [3])

Apesar de estarem incluídos no grupo dos modelos de turbulência RANS estes variam bastante, por exemplo, alguns modelos não necessitam de equações de transporte adicionais, outros precisam apenas de uma equação, certos modelos necessitam de duas e existe ainda um modelo que requer sete equações adicionais.

Neste trabalho foram utilizados quatro modelos de turbulência, o *Standard Spalart-Allmaras*, o *Realizable k – ε Two-Layer*, o *SST k – ω* e o RSM.

No Subcapítulo 2.4.1.1 apresentar-se-á o modelo *Standard Spalart-Allmaras*, o Subcapítulo 2.4.1.2 aborda o modelo *Realizable k – ε Two-Layer*, o Subcapítulo 2.4.1.3 incide sobre o modelo SST *k – ω* e o modelo RSM é apresentado no Subcapítulo 2.4.1.4. Optou-se por esta estrutura para os subcapítulos estarem ordenados pelo número de equações de transporte adicionais necessárias.

2.4.1.1 Standard Spalart-Allmaras

O modelo de turbulência *Standard Spalart-Allmaras* é o primeiro modelo a ser apresentado neste trabalho por necessitar de apenas uma equação de transporte adicional. Este modelo é considerado uma boa opção para aplicar em estudos com camadas limites muito próximas dos corpos e, no caso de ocorrer separação, esta seja suave (P. 4217 [3]).

Este modelo de turbulência resolve a equação de transporte da difusividade modificada, $\tilde{\nu}$ [m²/s], para conseguir determinar a viscosidade turbulenta, μ_t [kg/m s] (P.8228 [3]). A equação de transporte utilizada por este modelo é a Equação 2.10, sendo \bar{v} [m/s] a velocidade média, $\sigma_{\tilde{\nu}}$ um coeficiente do modelo, $P_{\tilde{\nu}}$ um termo de produção e $S_{\tilde{\nu}}$ um termo fonte.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\tilde{\nu}) + \nabla \cdot (\rho\tilde{\nu}\bar{v}) = \frac{1}{\sigma_{\tilde{\nu}}} \nabla \cdot [(\mu + \rho\tilde{\nu})\nabla\tilde{\nu}] + P_{\tilde{\nu}} + S_{\tilde{\nu}} \quad (2.10) \text{ (P. 8229 [3])}$$

O termo de produção $P_{\tilde{\nu}}$ é obtido pela Equação 2.11, sendo $D_{\tilde{\nu}}$ o termo da difusão não conservativa, $G_{\tilde{\nu}}$ o termo de produção turbulenta, G_{nl} o termo de produção não linear e $Y_{\tilde{\nu}}$ o termo de dissipação turbulenta.

$$P_{\tilde{\nu}} = D_{\tilde{\nu}} + G_{\tilde{\nu}} + G_{nl} - Y_{\tilde{\nu}} \quad (2.11) \text{ (P. 8229 [3])}$$

Como já foi referido o modelo de turbulência *Standard Spalart-Allmaras* determina a viscosidade turbulenta, μ_t [kg/m s], e fá-lo recorrendo à Equação 2.12, sendo f_{v1} uma função de amortecimento.

$$\mu_t = \rho f_{v1} \tilde{\nu} \quad (2.12) \text{ (P. 8228 [3])}$$

O valor da função de amortecimento f_{v1} calcula-se recorrendo à Equação 2.13, sendo $\chi = \frac{\tilde{\nu}}{\nu}$, onde ν [m²/s] representa a difusividade e C_{v1} representa um coeficiente do modelo.

$$f_{v1} = \frac{\chi^3}{\chi^3 + C_{v1}^3} \quad (2.13) \text{ (P. 8231 [3])}$$

Os coeficientes $\sigma_{\tilde{\nu}}$ e C_{v1} adquirem os valores 2/3 e 7,1, respetivamente.

2.4.1.2 Realizable k – ε Two-Layer

O modelo de turbulência apresentado neste subcapítulo, o modelo *Realizable k – ε Two-Layer*, requer duas equações de transporte para determinar a viscosidade turbulenta, μ_t [kg/m s]. Este modelo de turbulência caracteriza-se por ter um bom compromisso entre eficácia e custo computacional. Geralmente é aplicado a casos de estudo em que ocorra uma recirculação complexa, existindo ou não transferências de calor. (P. 4217 [3])

Uma das equações de transporte é utilizada para resolver a taxa de dissipação turbulenta, ε [m²/s³], sendo a outra equação para a resolução da energia cinética turbulenta, k [m²/s²].

Para o cálculo da viscosidade turbulenta, μ_t [kg/m s], utiliza-se a Equação 2.14, sendo C_μ um coeficiente do modelo, f_μ uma função de amortecimento e T_e [s] a escala de tempo dos grandes turbilhões.

$$\mu_t = \rho C_\mu f_\mu k T_e \quad (2.14) \text{ (P. 8234 [3])}$$

A Equação 2.15 resolve a taxa de dissipação turbulenta, ε [m²/s³], sendo C_2 um coeficiente do modelo, σ_ε um coeficiente do modelo, C_1 um coeficiente do modelo e S [s⁻¹] a taxa de deformação média.

$$\begin{aligned} -C_2 \frac{\varepsilon^2}{k} + \bar{U} \frac{d\varepsilon}{dx} + \bar{V} \frac{d\varepsilon}{dy} + \bar{W} \frac{d\varepsilon}{dz} \\ = \frac{d \left(\frac{C_\mu k^2}{\sigma_\varepsilon \varepsilon} \left(\frac{d\varepsilon}{dx} + \frac{d\varepsilon}{dy} + \frac{d\varepsilon}{dz} \right) \right)}{dx} + \frac{d \left(\frac{C_\mu k^2}{\sigma_\varepsilon \varepsilon} \left(\frac{d\varepsilon}{dx} + \frac{d\varepsilon}{dy} + \frac{d\varepsilon}{dz} \right) \right)}{dy} \\ + \frac{d \left(\frac{C_\mu k^2}{\sigma_\varepsilon \varepsilon} \left(\frac{d\varepsilon}{dx} + \frac{d\varepsilon}{dy} + \frac{d\varepsilon}{dz} \right) \right)}{dz} + C_1 S \varepsilon - C_2 \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{\nu \varepsilon}} \end{aligned} \quad (2.15) \quad \text{(Adaptado de [7])}$$

A resolução da energia cinética turbulenta, k [m²/s²], faz-se recorrendo à Equação 2.16, sendo σ_k um coeficiente do modelo, P_k um termo de produção, ε_0 [m²/s³] um valor de turbulência ambiente nos termos fonte que contrariam o decaimento da turbulência e S_k um termo fonte.

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho k) + \nabla \cdot (\rho k \bar{\mathbf{v}}) = \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \nabla k \right] + P_k - \rho (\varepsilon - \varepsilon_0) + S_k \quad (2.16) \text{ (P. 8234 [3])}$$

A Equação 2.17 permite o cálculo do termo de produção P_k , sendo f_c um fator de correção da curvatura, G_k um termo de produção turbulenta, G_b um termo de produção de flutuação e Y_M um termo de modificação da compressibilidade.

$$P_k = f_c G_k + G_b - Y_M \quad (2.17) \text{ (P. 8235 [3])}$$

Os coeficientes C_μ , C_2 , σ_ε e σ_k adquirem os valores 0,09, 1,9, 1,2 e 1, respetivamente. O valor que o coeficiente C_1 adquire é obtido pela Equação 2.18, sendo $\eta = \frac{Sk}{\varepsilon}$.

$$C_1 = \max \left\{ 0,43 \quad \frac{\eta}{5 + \eta} \right\} \quad (2.18) [7]$$

A escolha da variante *Two-Layer* leva a uma melhor resolução da lei de parede por permitir a sua utilização para todos os valores de y^+ , parâmetro adimensional muito usado nos estudos de aplicabilidade das leis de parede [8]. A Equação 2.19 permite calcular o valor deste parâmetro adimensional y^+ , sendo y [m] a distância à parede, u_τ [m/s] a velocidade de fricção e ν [m²/s] a viscosidade cinemática.

$$y^+ = \frac{yu_\tau}{\nu} \quad (2.19) [8]$$

A velocidade de fricção apenas pode ser obtida após a determinação da tensão de corte na parede, τ_ω [Pa], pelo que é necessário resolver a Equação 2.20.

$$\tau_\omega = \rho \nu \left(\frac{d \langle U \rangle}{dy} \right)_{y=0} \quad (2.20) [8]$$

Posteriormente à resolução da Equação 2.21 pode-se obter a velocidade de fricção, u_τ [m/s], necessária para o cálculo do parâmetro y^+ , para tal resolve-se a Equação 2.21.

$$u_\tau = \sqrt{\frac{\tau_\omega}{\rho}} \quad (2.21) [8]$$

A variante *Two-Layer* deste modelo de turbulência adiciona ainda uma nova equação, Equação 2.22, para a taxa de dissipação turbulenta perto da parede, sendo l_ε uma função da escala de comprimento.

$$\varepsilon = \frac{k^{\frac{3}{2}}}{l_\varepsilon} \quad (2.22) \text{ (P.8238 [3])}$$

A função de escala de comprimento l_ε está representada pela Equação 2.23, sendo $c_l = 0,42C_\mu^{-\frac{3}{4}}$, d [m] a distância à parede e Re_d o número de Reynolds da distância à parede.

$$l_\varepsilon = c_l d \left[1 - e^{-\frac{Re_d}{2c_l}} \right] \quad (2.23) \text{ (P.8239 [3])}$$

O número de Reynolds da distância à parede tem uma fórmula diferente da comumente utilizada pelo que foi necessário representá-la pela Equação 2.24.

$$Re_d = \frac{\sqrt{k}d}{\nu} \quad (2.24) \text{ (P.8224 [3])}$$

2.4.1.3 SST $k - \omega$

O modelo de turbulência SST $k - \omega$ recorre à equação de transporte da taxa de dissipação turbulenta, ε [m^2/s^3], do modelo Standard $k - \varepsilon$ para combater a principal desvantagem da utilização do modelo Standard $k - \omega$. Desvantagem esta que é a alta sensibilidade dos cálculos computacionais das camadas limites relativamente aos valores da taxa de dissipação específica, ω [s^{-1}], no escoamento livre. (P.8242 [3])

A equação de transporte retirada do modelo Standard $k - \varepsilon$ é transformada, através da substituição de variáveis, numa equação de transporte da taxa de dissipação específica, ω [s^{-1}], e acrescenta-se ainda o termo de difusão cruzada não linear, $\nabla k \cdot \nabla \omega$. (P.8242 [3])

O cálculo da viscosidade turbulenta, μ_t [$\text{kg}/\text{m s}$], é realizado recorrendo à Equação 2.25.

$$\mu_t = \rho k T \quad (2.25) \text{ (P. 8243 [3])}$$

A equação de transporte utilizada para a resolução da energia cinética turbulenta, k [m^2/s^2], é a Equação 2.26, sendo β^* um coeficiente do modelo, f_{β^*} um fator de modificação, ω_0 [s^{-1}] o valor ambiente da taxa de dissipação específica que contraria o decaimento da turbulência e k_0 [m^2/s^2] o valor ambiente da energia cinética turbulenta que contraria o decaimento da turbulência e S_k um termo fonte.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \nabla \cdot (\rho k \bar{\mathbf{v}}) = \nabla \cdot [(\mu + \sigma_k \mu_t) \nabla k] + P_k - \rho \beta^* f_{\beta^*} (\omega k - \omega_0 k_0) + S_k \quad (2.26) \text{ (P. 8244 [3])}$$

O termo de produção P_k é obtido pela soma de um termo de produção turbulenta, G_k , um termo de produção não linear, G_{nl} e um termo de produção de flutuabilidade, G_b , estando a sua fórmula representada pela Equação 2.27.

$$P_k = G_k + G_{nl} + G_b \quad (2.27) \text{ (P. 8244 [3])}$$

Para resolver a taxa de dissipação específica, ω [s^{-1}], recorre-se à Equação 2.28, sendo σ_ω um coeficiente do modelo, P_ω um termo de produção, β um coeficiente do modelo, f_β um fator de modificação e S_ω um termo fonte.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \omega) + \nabla \cdot (\rho \omega \bar{\mathbf{v}}) = \nabla \cdot [(\mu + \sigma_\omega \mu_t) \nabla \omega] + P_\omega - \rho \beta f_\beta (\omega^2 - \omega_0^2) + S_\omega \quad (2.28) \text{ (P. 8244 [3])}$$

O termo de produção P_ω é obtido pela soma de um termo de produção de dissipação específica, G_ω , e um termo de difusão cruzada, D_ω , estando a sua fórmula representada pela Equação 2.29.

$$P_\omega = G_\omega + D_\omega \quad (2.29) \text{ (P. 8244 [3])}$$

Neste modelo, os valores dos coeficientes σ_k , β^* , σ_ω , β são obtidos através da resolução das Equações 2.30, 2.31, 2.32 e 2.33, respetivamente. De notar que F_1 é uma função de agregação, σ_{k_1} é um coeficiente do modelo, σ_{k_2} é um coeficiente do modelo, β_1^* é um coeficiente do modelo, β_2^* é um coeficiente do modelo, σ_{ω_1} é um coeficiente do modelo, σ_{ω_2} é um coeficiente do modelo, β_1 é um coeficiente do modelo e β_2 é um coeficiente do modelo.

$$\sigma_k = F_1\sigma_{k_1} + (1 - F_1)\sigma_{k_2} \quad (2.30) \text{ (P. 8246 [3])}$$

$$\beta^* = F_1\beta_1^* + (1 - F_1)\beta_2^* \quad (2.31) \text{ (P. 8246 [3])}$$

$$\sigma_\omega = F_1\sigma_{\omega_1} + (1 - F_1)\sigma_{\omega_2} \quad (2.32) \text{ (P. 8246 [3])}$$

$$\beta = F_1\beta_1 + (1 - F_1)\beta_2 \quad (2.33) \text{ (P. 8246 [3])}$$

Os coeficientes do modelo numérico, SST $k - \omega$, σ_{k_1} , σ_{k_2} , β_1^* , β_2^* , σ_{ω_1} , σ_{ω_2} , β_1 e β_2 adquirem os valores de 0,85, 1, 0,09, 0,09, 0,5, 0,856, 0,075 e 0,0828, respetivamente.

2.4.1.4 RSM

O modelo RSM é o modelo de turbulência mais complexo de entre os quatro modelos de turbulência utilizados ao longo deste trabalho pois requer sete equações adicionais: seis para o tensor das tensões de Reynolds, \mathbf{R} , e uma para a dissipação turbulenta isotrópica, $\varepsilon[\text{m}^2/\text{s}^3]$ (P. 8268 [3]).

O tensor das tensões de Reynolds, \mathbf{R} , define-se pela Equação 2.34. É de notar que o tensor é simétrico, motivo pelo qual apenas é necessário resolver seis equações para a obtenção de todos os seus termos.

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} \overline{u'u'} & \overline{u'v'} & \overline{u'w'} \\ \overline{u'v'} & \overline{v'v'} & \overline{v'w'} \\ \overline{u'w'} & \overline{v'w'} & \overline{w'w'} \end{bmatrix} \quad (2.34) \text{ (P. 8267 [3])}$$

Apresentada pela Equação 2.35 está a equação de transporte usada para resolver o tensor das tensões de Reynolds, \mathbf{R} , sendo \mathbf{D} a difusão das tensões de Reynolds, \mathbf{P} a produção turbulenta, \mathbf{G} a produção da flutuação, \mathbf{I} o tensor identidade, Y_M a dissipação da dilatação, $\underline{\phi}$ o tensor da tensão de pressão, $\underline{\varepsilon}$ o tensor da taxa de dissipação turbulenta e \mathbf{S}_R um termo fonte.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \mathbf{R}) + \nabla \cdot (\rho \mathbf{R} \bar{\mathbf{v}}) = \nabla \cdot \mathbf{D} + \mathbf{P} + \mathbf{G} - \frac{2}{3} \mathbf{I} \gamma_M + \underline{\phi} - \rho \underline{\varepsilon} + \mathbf{S}_R \quad (2.35) \text{ (P. 8268 [3])}$$

Este modelo utiliza uma equação de transporte análoga à equação utilizada pelo modelo *Standard k - ε* para a taxa de dissipação turbulenta, ε [m²/s³]. Representada pela Equação 2.36 está a equação de transporte utilizada pelo modelo RSM para resolver a dissipação turbulenta isotrópica, ε [m²/s³], sendo σ_ε um coeficiente do modelo, $C_{\varepsilon 1}$ um coeficiente do modelo, $\text{tr}(\mathbf{X})$ o traço da matriz \mathbf{X} , sendo \mathbf{X} uma matriz genérica, $C_{\varepsilon 3}$ um coeficiente do modelo e $C_{\varepsilon 2}$ um coeficiente do modelo.

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \nabla \cdot (\rho \varepsilon \bar{\mathbf{v}}) & \quad (2.36) \\ = \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \nabla \varepsilon \right] + \frac{\varepsilon}{k} \left[C_{\varepsilon 1} \left(\frac{1}{2} \text{tr}(\mathbf{P}) + \frac{1}{2} C_{\varepsilon 3} \text{tr}(\mathbf{G}) \right) - C_{\varepsilon 2} \rho \varepsilon \right] & \quad \text{(P. 8270 [3])} \end{aligned}$$

Neste modelo de turbulência os coeficientes σ_ε , $C_{\varepsilon 1}$ e $C_{\varepsilon 2}$ adquirem os valores 1,22, 1,44 e 1,92, respetivamente.

O coeficiente $C_{\varepsilon 3}$ é calculado recorrendo à Equação 2.37, onde \mathbf{v}_b [m/s] é a componente da velocidade paralelo ao vetor gravitacional \mathbf{g} [m/s²] e \mathbf{u}_b [m/s] é a componente da velocidade perpendicular ao vetor gravitacional \mathbf{g} [m/s²].

$$C_{\varepsilon 3} = \tanh \left(\frac{|\mathbf{v}_b|}{|\mathbf{u}_b|} \right) \quad (2.37) \text{ (P. 8238 [3])}$$

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Apresentação dos Critérios

Para a realização de um bom trabalho para a dissertação é necessária uma extensa pesquisa bibliográfica de forma a ler diversos artigos científicos relacionados com a área de estudo.

A revisão bibliográfica foi realizada recorrendo ao motor de busca Google Scholar por este permitir uma pesquisa que incide apenas em documentos científicos, documentos estes que possuem a credibilidade científica necessária. No motor de busca foram utilizadas as expressões “Ahmed-Body” e “CFD”(Computacional Fluid Dynamics) de forma a se obterem apenas resultados diretamente relacionados com o estudo, é de notar ainda que os termos pesquisados estão na língua inglesa para se aumentar a bibliografia disponível.

Após realizada a revisão bibliográfica selecionaram-se alguns artigos científicos considerados mais completos e relevantes para o estudo a ser feito nesta dissertação. Estes foram classificados seguindo nove critérios de forma a permitir ter uma melhor noção de qual o artigo que seria utilizado para comparação de resultados.

Os critérios utilizados foram o ano de publicação do artigo, o ângulo de inclinação da traseira do corpo de Ahmed, a velocidade inicial, o número de elementos da malha utilizada, o programa utilizado, o modelo de turbulência escolhido, o tempo de execução das simulações realizadas, se o estudo foi só experimental, só numérico ou ambos e por fim o erro percentual do Coeficiente de Arrasto (Cd) calculado pelos autores dos artigos.

A escolha destes critérios permitiu obter uma classificação geral dos artigos. A data de publicação indica o quão atualizado o artigo está, o ângulo da traseira e a velocidade inicial indicam a geometria e as condições do escoamento em estudo e o critério do estudo

experimental, numérico ou ambos permite uma comparação de resultados. Os restantes critérios são úteis para se saberem as condições em que os estudos foram realizados pelos autores e a precisão dos mesmos.

3.2 Classificação dos Artigos

Como foi referido no subcapítulo anterior, Subcapítulo 3.1, foram escolhidos e classificados alguns artigos científicos. De forma a facilitar a leitura organizou-se tudo na Tabela 3.1, é de notar que “N. D.” nas células significa Não Disponível e “N. A.” significa Não Aplicável.

A Tabela 3.1 foi organizada de forma a agrupar o tipo de estudo feito nos artigos e colocaram-se primeiro os artigos com estudos experimentais.

Tabela 3.1 - Classificação dos Artigos

Referência	Ano Publicação	ϕ [°]	Velocidade [m/s]	N° Elementos	Software	Modelo	Tempo Execução	Estudo		Erro [%]
								Experimental	Numérico	
[1]	1984	[0-40]	60	N. A.	N. A.	N. A.	N. A.	Sim	Não	N. A.
[2]	2011	25; 35	[10-40]	[4.5-5]E6	Ansys Fluent v6.3.26	RSM	N. D.	Sim	Sim	N. D.
[9]	2017	25	40	6000000	Ansys Fluent 16.2 SolidWorks Flow Simulation 2014	Realizable k- ϵ	43 min 65 h	Não	Sim	0,1 9,7
[10]	2020	25	25	206443	Ansys Fluent 19	k- ϵ	N. D.	Não	Sim	N. D.
[11]	2019	25	40	1697845	Ansys Fluent	SST k- ϵ k- ω	N. D.	Não	Sim	2,474 13,074 6,007
[12]	2022	25	40	1186788	Ansys Fluent	k- ϵ k- ω SST SST	N. D.	Não	Sim	5,72 1,39 0,82
[13]	2010	12,5	9	[2-15]E6	OpenFOAM	k- ω SST	N. D.	Não	Sim	N. D.

Observando a coluna do ano de publicação nota-se logo que o artigo referenciado por [1] é bastante mais antigo que os restantes mas considerou-se importante a sua classificação pois é neste artigo científico que aparece pela primeira vez o corpo que viria a ser denominado de corpo de Ahmed.

Verificando os valores da coluna do ângulo destaca-se o valor de 25 ° por ser o valor mais utilizado pelos artigos pelo que é este valor que também será usado neste trabalho. Seguindo o mesmo processo mas para a coluna da velocidade entende-se que o valor a utilizar neste trabalho será de 40 m/s.

Após a determinação dos valores do ângulo da traseira do corpo e da velocidade inicial foi necessário escolher um artigo que serviria de comparação sendo que os valores utilizados no artigo têm de coincidir com os determinados para este estudo.

Apesar de na coluna do erro da Tabela 3.1 do artigo com a referência [2] estar indicado que o erro não está disponível, por não ter sido calculado pelos autores, os valores obtidos para

o coeficiente de arrasto no estudo experimental e no estudo numérico estão bastante próximos, 0,299 e 0,295, respetivamente. Optou-se por escolher este artigo científico para servir de comparação por ter esta grande proximidade de valores e por ter realizado estudos experimentais e numéricos.

PROCEDIMENTOS

4.1 Condições de Fronteira

Uma das componentes mais importantes para os estudos numéricos é a correta definição das condições de fronteira pois estas influenciam grandemente o escoamento do fluido e, por consequência, influenciam os resultados obtidos.

A fronteira por onde entra o fluido que escoar pelo domínio computacional tem o nome de *Inlet* e a fronteira por onde sai o fluido denomina-se de *Outlet*.

Para a fronteira *Inlet* utilizou-se uma condição de *Velocity Inlet* que determina a velocidade e direção do escoamento nesta fronteira. Neste trabalho utilizou-se um escoamento unidirecional com uma velocidade de $u = 40$ m/s, como já foi referido no Subcapítulo 3.2.

Para a fronteira *Outlet* foi utilizada a condição de *Outlet*, mais especificamente, a condição de *Split Ratio* que determina a fração de escoamento que sai por esta fronteira (P. 8135 [3]). Visto que se pretende que exista apenas uma fronteira por onde possa sair o fluido utilizou-se um *Split Ratio* de 1,0 por forma a garantir que todo o escoamento de fluido saia pela fronteira *Outlet*.

Na fronteira do Chão utilizou-se uma condição de *Wall* com *Slip*, isto é, impôs-se que esta fronteira não deixasse passar escoamento do fluido através dela e que tivesse atrito nulo (P. 8139 [3]). Utilizou-se este tipo de fronteira pois o objetivo deste trabalho é simular o movimento do corpo pelo que é necessário garantir que se simula o movimento do Chão relativamente ao corpo de Ahmed e com esta condição de fronteira cumpre-se esse objetivo.

Para as laterais do domínio computacional utilizou-se a mesma condição de fronteira que foi *Symmetry Plane*. Esta condição de fronteira foi utilizada para ambas as fronteiras laterais

pois pode-se assumir que o escoamento é simétrico dada a simetria do corpo e na outra lateral o escoamento é simétrico por não existir nada que o possa perturbar, poupando-se nas dimensões do domínio computacional. Uma das características desta condição de fronteira é que a componente normal da velocidade e a componente normal dos gradientes das restantes variáveis são nulos pelo que não há fluxo de escoamento de fluido a atravessar estas fronteiras (P. 8138 [3]).

No corpo de Ahmed utilizou-se uma condição de fronteira de *Wall* com *No Slip* por se pretender estudar o escoamento em torno deste corpo. Esta condição de fronteira é semelhante à utilizada para o Chão mas difere na condição de *No Slip* que implica que não haja escorregamento na superfície do corpo e por isso a velocidade do escoamento nesta superfície é nula. Também nesta fronteira não se verifica passagem de fluxo de escoamento através da mesma.

Para o Topo do domínio computacional utilizou-se uma condição de *Pressure Outlet* que impõe uma pressão específica para essa fronteira. Neste trabalho utilizou-se a Equação 4.1 para determinar qual o valor da pressão nessa fronteira, sendo P_1 [Pa] a pressão na fronteira 1, ρ [kg/m³] a massa volúmica do fluido, V_1 [m/s] a velocidade do fluido imposta pela condição de fronteira do *Inlet*, g [m/s²] a aceleração gravítica, H_1 [m] a altura do ponto 1, P_2 [Pa] a pressão atmosférica, V_2 [m/s] a velocidade na fronteira do Topo e H_2 [m] a altura do ponto 2. De notar que os pontos 1 e 2 são dois pontos pertencentes à mesma linha de escoamento na fronteira do Topo.

$$P_1 + \frac{1}{2}\rho V_1^2 + \rho g H_1 = P_2 + \frac{1}{2}\rho V_2^2 + \rho g H_2 \quad (4.1)$$

Como os pontos 1 e 2 se encontram na fronteira do Topo têm a mesma altura, podendo-se excluir a terceira parcela de ambos os lados da Equação 4.1. Pode-se excluir ainda a segunda parcela do lado direito da Equação 4.1 por ser imposta velocidade nula no ponto 2. Reorganizando a Equação 4.1 e resolvendo em ordem à pressão que se pretende determinar, pressão na fronteira P_1 , obtém-se a Equação 4.2.

$$P_1 = P_2 - \frac{1}{2}\rho V_1^2 \quad (4.2)$$

Para os cálculos que determinam a pressão P_1 , através da resolução da Equação 4.2, considerou-se uma pressão atmosférica $P_2 = 10^5$ Pa, uma massa volúmica $\rho = 1,18415$ kg/m³ e a velocidade no *Inlet* $V_1 = 40$ m/s e chegou-se ao valor da pressão na fronteira de $P_1 = 99052,688$ Pa pelo que será este o valor a utilizar na definição da condição de fronteira *Pressure Outlet*.

4.2 Critério de Paragem

Para a obtenção de resultados das simulações numéricas é necessário esperar que os resíduos destas estabilizem ou que se cumpram critérios de paragem definidos.

Para averiguar qual o melhor método de término foram realizadas simulações em tudo iguais variando apenas no critério de paragem que determinaria a sua terminação. Um dos métodos foi a estabilização dos resíduos e o outro foi o critério *Asymptotic*, critério este que averigua se um parâmetro não varia mais do que um valor especificado numa quantidade de iterações definidas.

Nestes testes utilizou-se o critério *Asymptotic* com um limite de variação de 1E-5 ao longo de 100 iterações para o Coeficiente de Arrasto e para a Força de Arrasto. Este critério foi usado para os dois parâmetros já referidos por redundância para se garantir que as simulações cumpriam com o critério de paragem pretendido.

Após a realização destes testes analisaram-se os resultados e compararam-se os dois métodos de paragem para entender qual deverá ser utilizado para a obtenção dos resultados finais deste trabalho. Na Tabela 4.1 apresentam-se os resultados obtidos para ambos os critérios de paragem, a quantidade de iterações, o tempo necessário para se alcançarem as condições de paragem e as variações existentes. Na Tabela 4.1 "F. A." refere-se à Força de Arrasto, "N. I." ao Número de Iterações realizadas, "T" ao Tempo de computação utilizado ("s" - segundos; "m" - minutos; "h" - horas), "B. S." ao *Base Size* (comprimento do lado dos cubos que compõem o domínio computacional) da malha computacional, "R" aos resultados após estabilização dos resíduos, "S" aos resultados obtidos após verificação do critério de paragem *Asymptotic* e " Δ " ao valor absoluto da diferença entre os valores correspondentes.

Tabela 4.1 - Comparação de Critérios de Paragem

	B. S. [m]	Cd			F. A. [N]			N. I.			T		
		R	S	Δ	R	S	Δ	R	S	Δ	R	S	Δ
2D	0,1	0,8	0,8	0	218,223	218,222	0,001	1000	690	321	40s	26s	14s
	0,05	0,358	0,358	0	97,759	97,759	0	18000	714	17286	18m	1m	17m
	0,025	0,222	0,222	0	60,589	60,593	0,004	26500	4132	22368	54m	10m	44m
3D	0,1	0,391	0,391	0	20,768	20,768	0	18500	631	17869	40m	2m	38m
	0,05	0,348	0,348	0	18,476	18,476	0	4500	556	3944	95m	15m	80m
	0,025	0,32	0,32	0	17,003	17,003	0	4500	774	3726	10h	3h	7h

Pela leitura da Tabela 4.1 é perceptível que os valores do Coeficiente de Arrasto e da Força de Arrasto são praticamente iguais para ambos os critérios de paragem pelo que são os dois igualmente precisos quanto a estes parâmetros. Observando agora as colunas do número de iterações e do tempo da Tabela 4.1 é bastante notória a diferença nos valores, sendo o método de paragem *Asymptotic* constantemente o método que necessita de menor tempo computacional pelo que foi este o método utilizado para a obtenção dos resultados finais deste trabalho.

4.3 Estudo da Independência de Malha

Antes da obtenção de resultados é necessário garantir que estes são independentes da malha computacional utilizada pelo que se fazem estudos com malhas cada vez mais refinadas até que se verifique uma convergência dos valores.

Para este estudo utilizou-se um domínio computacional tridimensional com a distância entre o *Inlet* e o Corpo, a distância entre o Corpo e o *Outlet*, a Altura e a Largura sempre iguais a 1 comprimento do corpo de Ahmed, ou seja, comprimento de 1,044 m. Este domínio computacional encontra-se representado na Figura 4.1. É de notar que foi utilizado o corpo sem os pés cilíndricos e, dada a simetria do corpo, foi apenas considerado metade do mesmo por questões de poupança de domínio computacional sem que os resultados tenham sido prejudicados.

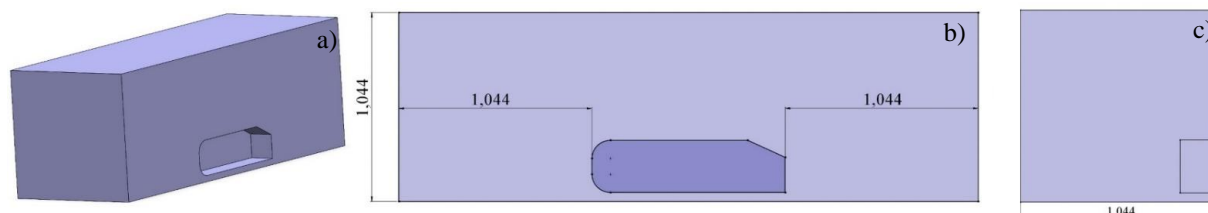


Figura 4.1 - Domínio Cotado no Estudo da Independência de Malha, Dimensões em Metros
a) Em Perspetiva, b) Vista Lateral, c) Vista Frontal

O estudo implicou um refinamento progressivo da malha computacional, mantendo o domínio constante, e a cada refinamento fazia-se uma nova simulação até se obter o valor do Coeficiente de Arrasto. Neste estudo utilizou-se uma malha estruturada uniforme em todo o domínio e iniciou-se com uma malha muito pouco refinada, com apenas 4595 elementos e as sucessivas refinações resultaram numa malha final com cerca de 27 milhões de elementos. O modelo de turbulência utilizado neste estudo foi o *Realizable $k - \varepsilon$ Two-Layer*.

Os valores obtidos para o Coeficiente de Arrasto do corpo bem como o número de elementos da malha utilizada e o seu *Base Size* foram agrupados de forma a permitir uma melhor compreensão dos mesmos. Estes encontram-se apresentados na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 - Estudo da Independência de Malha

	<i>Base Size</i> [m]					
	0,1	0,05	0,025	0,0125	0,00625	0,005
Nº Elementos	4595	30659	218850	1752559	13949200	27216949
Cd	0,427	0,376	0,315	0,293	0,272	0,272

Para além de se agruparem os valores na Tabela 4.2 fez-se um gráfico do Coeficiente de Arrasto em função do número de elementos da malha computacional pois permite uma melhor observação da estabilização do parâmetro, gráfico este que está representado na Figura 4.2 apresentada de seguida.



Figura 4.2 - Coeficiente de Arrasto em Função do Número de Elementos da Malha

Pela leitura dos valores presentes na Tabela 4.2 e do gráfico representado na Figura 4.2 entende-se que há uma clara estabilização do valor obtido do Coeficiente de Arrasto. Por haver esta estabilização do parâmetro prova-se que este é independente da malha desde que a malha esteja suficientemente refinada, isto é, desde que o seu *Base Size* seja inferior ou igual a 0,00625 m porque foi a partir deste valor que se verificou a independência.

Provada a independência de malha pode-se definir o *Base Size* utilizado para as malhas a utilizar nesta dissertação. O valor de *Base Size* utilizado foi de 0,00625 m por já se ter provado que um maior refinamento não afeta os resultados e por questões de economia de recursos computacionais.

4.4 Estudo de Otimização da Malha

Uma malha estruturada uniforme em todo o domínio pode apresentar melhores resultados do que uma malha constante apenas em torno do corpo em estudo, no entanto, ocupa bastante

mais domínio computacional. Em consequência do maior domínio computacional as simulações numéricas realizadas demoram mais tempo pelo que é necessário um estudo de otimização da eficiência da malha a utilizar.

Este estudo tem como objetivo determinar as dimensões necessárias de malha estruturada uniforme de forma a reduzir os tempos de simulação numérica sem nunca perder a precisão dos resultados obtidos.

Na realização deste estudo utilizou-se, como termo de comparação, a malha obtida no Subcapítulo 4.3 com *Base Size* de 0,00625 m. Para a verificação da precisão da malha utilizaram-se os valores do Coeficiente de Arrasto e da Força de Arrasto. A averiguação da eficiência da malha é realizada comparando-se os tempos de processamento necessários para a obtenção dos resultados das simulações numéricas.

Para este estudo utilizou-se uma ferramenta de geração de malhas, o *Extruder*, que permite aumentar o domínio computacional sem aumentar, em demasia, o número de células da malha computacional. Esta ferramenta permite que se tenha um escoamento completamente desenvolvido com um reduzido número de células nas secções onde não se verificam alterações significativas no escoamento. Outro dos benefícios da utilização desta ferramenta que podem-se evitar perturbações devido às alterações abruptas no tamanho das células da malha computacional. (P. 2625 [3])

Neste estudo utilizou-se uma malha em que metade das dimensões do domínio computacional continham malha uniforme e a outra metade continha a malha gerada pela ferramenta *Extruder*. Como se tem uma largura de $1L$, sendo L o comprimento do corpo, utilizou-se malha estruturada uniforme com largura de $0,5L$ centrada no eixo das ordenadas e utilizou-se o *Extruder* com dimensão de $0,5L$ em cada lado do corpo para perfazer os $1L$ do domínio computacional.

Seguiu-se o mesmo critério para as restantes dimensões, ou seja, para a distância entre o *Inlet* e o corpo, entre o corpo e o *Outlet* e para a altura.

Para se poder utilizar a ferramenta *Extruder* é necessário definir alguns parâmetros, sendo eles a distância da malha “extrudida”, o número de camadas de células na secção da malha “extrudida” e a relação existente entre os tamanhos das camadas de células.

Estão disponíveis quatro opções para a escolha da relação entre tamanhos das células: constante, ou seja, todas as camadas de células têm o mesmo tamanho; geométrico unilateral, utiliza uma progressão geométrica para determinar os tamanhos das camadas das células e

hiperbólico unilateral e bilateral. A relação hiperbólica segue uma função hiperbólica para a determinação dos tamanhos das camadas de células e esta variante pode ser unilateral, ou seja, o tamanho das camadas vai aumentando de uma extremidade à outra ou pode ser bilateral, ou seja, as camadas vão aumentando de tamanho das extremidade opostas até ao meio das mesmas. (P. 2695 [3])

Posteriormente, e caso não se opte pelo tamanho constante das camadas, é ainda necessário definir o comportamento das mesmas. Estão disponíveis três opções: relação entre tamanhos de camadas consecutivas, tamanho da primeira camada e relação entre os tamanhos da primeira e da última camada.

Neste estudo utilizou-se a relação geométrica unilateral definida pelo rácio entre os tamanhos de camadas consecutivas. O número de camadas, n , foi calculado recorrendo à Equação 4.3, onde S_n [m] corresponde ao comprimento “extrudido”, a [m] corresponde ao tamanho da primeira camada de células e r corresponde ao rácio entre os tamanhos de camadas de células consecutivas.

$$S_n = \frac{a * (1 - r^n)}{1 - r} \quad (4.3) [14]$$

Para a realização deste estudo utilizou-se a ferramenta *Extruder* com um comprimento de $0,5L \text{ m} = 0,5 * 1,044 \text{ m} = 0,522 \text{ m}$, pelo que se substituiu, na Equação 4.3, o termo S_n por $0,522 \text{ m}$. Escolheu-se um rácio r de $1,2$, pelo que este valor substitui o termo respetivo na Equação 4.3. Para o termo a já foi considerado o rácio de $1,2$ e, sabendo o valor do *Base Size* da malha definido no Subcapítulo 4.3, determina-se o seu valor com o produto do *Base Size* pelo rácio ficando-se com $a = 1,2 * 0,00625 \text{ m} = 0,0075 \text{ m}$.

Determinados todos os parâmetros resolveu-se a Equação 4.3 em ordem a n para se determinar o número de camadas de células e obteve-se $n \sim 15$, note-se que o seu valor foi arredondado por excesso de forma a garantir o número mínimo de camadas necessárias para uma correta utilização da ferramenta *Extruder*.

Tal como referido anteriormente neste estudo compararam-se os resultados obtidos com a utilização da malha uniforme e da malha gerada recorrendo à ferramenta *Extruder*, estando os resultados compilados na Tabela 4.3.

Tabela 4.3 - Estudo de Otimização da Malha

	<i>Base Size Constante</i>	<i>Extruder</i>
Nº Elementos	13949200	3348581
Força de Arrasto [N]	15,277	15,246
Coefficiente de Arrasto	0,288	0,287
<i>Total Solver CPU Time [h]</i>	194	36

Pela leitura da Tabela 4.3 consegue-se entender que o uso da ferramenta *Extruder* reduz o número de elementos da malha em cerca de dez milhões o que equivale, neste caso, a uma redução de aproximadamente 75 %. É ainda possível verificar que os valores obtidos para a Força de Arrasto e para o Coeficiente de Arrasto são praticamente iguais, existindo um erro relativo de 0,2 %. Uma análise da última linha da Tabela 4.3, referente ao tempo de computação necessário até que o critério de paragem fosse cumprido revela que a simulação numérica que utilizou a malha gerada com a ferramenta *Extruder* necessitou de bastante menos tempo, cerca de cento e trinta horas a menos, o que equivale a uma redução ligeiramente superior a 80 %.

Com base nos factos enunciados pode-se confirmar que a malha foi otimizada como pretendido pelo que para nos restantes estudos serão utilizadas malhas geradas com recurso à ferramenta *Extruder*.

4.5 Estudo Comparativo Coupled/Segregated Flow

Com o objetivo de se obterem resultados de simulações numéricas o mais corretos possíveis optou-se por fazer um estudo comparativo entre a utilização dos modelos *Coupled Flow* e *Segregated Flow*.

A metodologia deste estudo consiste em realizar pares de simulações idênticas em todos os parâmetros exceto nos modelos já referidos, *Coupled Flow* e *Segregated Flow*. Após se verificarem os critérios de paragem, descritos pormenorizadamente no Subcapítulo 4.2, compararam-se os resultados obtidos a fim de se utilizar o método que mais se aproxima dos resultados experimentais.

Este estudo não foi possível de realizar pois as simulações numéricas onde foi utilizado o modelo Segregated Flow não cumpriram os critérios de paragem definidos previamente, Subcapítulo 4.2. Dada esta impossibilidade de realização do estudo determinou-se como a escolha mais correta a utilização do modelo Coupled Flow por este ter cumprido com os critérios de paragem.

O modelo *Coupled Flow* resolve as equações da continuidade e da conservação de movimento de forma simultânea como um vetor de equações. Os campos de velocidade e de pressão são obtidos através das equações da conservação de movimento e da continuidade, respetivamente. (P.3748 [3])

4.6 Dimensões do Domínio Computacional

Um dos fatores mais importantes a ter em conta quando se realizam estudos numéricos é o domínio computacional e as suas dimensões. Dimensões incorretas podem levar a que se obtenham erros grandes pois estas podem estar a condicionar o escoamento do fluido.

Para determinar as dimensões ideais do domínio computacional realizam-se simulações em que a única variável é a dimensão que se pretende determinar, isto é, mantêm-se os parâmetros e altera-se unicamente a dimensão em estudo. Finalizadas as simulações é preciso obter o valor do Coeficiente de Arrasto e verificar se este se alterou com a alteração da dimensão. Caso se verifique que o valor se manteve constante pode-se concluir que a dimensão a utilizar será a menor dimensão onde se verificou o valor constante. No entanto, caso o valor sofra alterações é necessário ir incrementando gradualmente a dimensão em estudo até que já não ocorram alterações.

As malhas computacionais utilizadas nestes estudos tiveram como *Base Size* o valor determinado previamente de 0,00625 m para se respeitar a independência de malha e foram criadas com o domínio completo, ou seja, não se utilizou a simetria mencionada previamente no Subcapítulo 4.3 para melhor se compararem os resultados com os do artigo científico comparativo.

Os estudos das dimensões do domínio computacional e os valores obtidos estão devidamente organizados em subcapítulos, Subcapítulo 4.6.1 para a Altura, Subcapítulo 4.6.2 para a Largura, Subcapítulo 4.6.3 para a Distância *Inlet-Corpo* e Subcapítulo 4.6.4 para a Distância *Corpo-Outlet*.

4.6.1 Altura do Domínio Computacional

O estudo da altura do domínio computacional iniciou-se com a altura utilizada aquando do estudo da independência de malha que era de 1L, ou seja, a altura era 1,044 m.

A dimensão da altura foi aumentada gradualmente até se atingir o valor utilizado pelos autores do artigo de comparação, artigo referenciado por [2], que foi de 1,4 m. Foram anotados os dados relativos ao número de elementos da malha utilizada, o valor da Força de Arrasto e o valor do Coeficiente de Arrasto.

Um domínio computacional reduzido pode induzir efeitos de confinamento que levam à obtenção de valores incorretos, por excesso, do Coeficiente de Arrasto e da Força de Arrasto. Por este motivo é expectável uma redução do Coeficiente de Arrasto e da Força de Arrasto com o aumento gradual da altura do domínio computacional.

Na Tabela 4.4 apresentam-se os resultados das simulações numéricas realizadas no âmbito deste estudo, ordenadas por ordem crescente da altura do domínio computacional.

Tabela 4.4 - Estudo da Altura do Domínio Computacional

	Base	Altura [m]	
	Altura = 1L = 1,044 m	1,222	1,4
Nº Elementos	6697058	6841202	6913274
Força de Arrasto [N]	20,160	24,761	29,828
Coeficiente de Arrasto	0,225	0,276	0,333

Pela leitura da Tabela 4.4 é perceptível que não só não se verificou uma estabilidade do Coeficiente de Arrasto como a sua variação foi contrária à expectável pelo que nada se pode concluir deste estudo.

Pelos motivos apresentados utilizar-se-á a dimensão da altura do domínio computacional igual à altura presente no artigo científico comparativo.

4.6.2 Largura do Domínio Computacional

Tal como realizado no estudo da altura do domínio computacional também neste estudo utilizou-se o domínio computacional com as dimensões do estudo da independência de malha, ver Subcapítulo 4.3.

Como neste caso a dimensão utilizada previamente é maior do que a utilizada pelos autores do artigo [2] foi necessário reduzir progressivamente a dimensão em estudo de forma que fosse possível determinar a dimensão ideal para cumprir com o objetivo desta dissertação.

De seguida apresentam-se os dados obtidos nas simulações numéricas referentes a este estudo estando compilados na Tabela 4.5 e listados por ordem decrescente da largura do domínio computacional.

Tabela 4.5 - Estudo da Largura do Domínio Computacional

	Base	Largura
	Largura = 2L = 2,088 m	
Nº Elementos	6697058	6624986
Força de Arrasto [N]	20,160	20,333
Coefficiente de Arrasto	0,225	0,227

Após uma leitura da Tabela 4.5 é perceptível que os valores do Coeficiente de Arrasto obtidos em cada simulação numérica não sofrem alterações significativas pelo que se concorda com a utilização da largura definida pelos autores do artigo científico considerado para comparação.

4.6.3 Distância Inlet-Corpo do Domínio Computacional

O estudo da dimensão entre o *Inlet* e o Corpo seguiu o mesmo procedimento dos restantes estudos das dimensões com a realização de várias simulações com aumentos graduais na dimensão.

O valor da distância inicial foi de 1L, correspondente ao comprimento do corpo de Ahmed de 1,044 m e o valor final foi de 5,456 m para se obter a dimensão igual ao artigo comparativo, artigo referenciado por [2].

Foram realizadas diversas simulações com os aumentos graduais já referidos e retiraram-se os valores da Força de Arrasto e do Coeficiente de Arrasto, estando estes organizados na Tabela 4.6. Note-se que, por questões de simplificação da leitura da Tabela 4.6, não se incluíram todos os valores da distância testados.

Tabela 4.6 - Estudo da Distância *Inlet*-Corpo do Domínio Computacional

	Base	<i>Inlet</i>-Corpo [m]			
	<i>Inlet</i>-Corpo = 1L = 1,044 m				
		1,5955	2,147	3,25	5,456
Nº Elementos	6697058	6775466	6814670	6873476	6932282
Força de Arrasto [N]	20,160	19,711	19,647	19,635	19,626
Coefficiente de Arrasto	0,225	0,220	0,219	0,219	0,219

Pela leitura da Tabela 4.6 é perceptível que os valores da Força de Arrasto e do Cd não sofrem alterações significativas desde a distância de 2,147 m até à distância dos autores do

artigo científico [2]. Por este motivo não se considera necessária uma distância maior que 2,147 m.

4.6.4 Distância Corpo-Outlet do Domínio Computacional

Este estudo da dimensão entre o Corpo e o *Outlet* não pôde ser realizado pois não se obteve uma convergência nos resíduos das simulações numéricas considerada aceitável. Outro motivo que levou à impossibilidade de realização deste estudo foi o incumprimento dos critérios de paragem estudados e definidos previamente, ver Subcapítulo 4.2.

Por estes motivos nada se pode concluir acerca de qual a distância *Corpo-Outlet* do domínio computacional que providencie os resultados mais corretos.

ANÁLISE E DISCUSSÃO DE RESULTADOS

Como referido no Subcapítulo 2.4.1, foram utilizados e estudados quatro modelos de turbulência, o modelo *Standard Spalart-Allmaras*, o modelo *Realizable $k - \epsilon$ Two-Layer*, o modelo *SST $k - \omega$* e o modelo *RSM*.

Utilizando a malha com o *Base Size* constante de 0,00625 m, definido no Subcapítulo 4.3, foram realizadas simulações numéricas com os três modelos de turbulência que não foram utilizados no estudo da independência de malha.

Destas simulações retiraram-se os valores referentes à Força de Arrasto e ao Coeficiente de Arrasto. Os dados destas simulações e do estudo da independência da malha foram agrupados na Tabela 5.1, onde estão ainda os erros relativos percentuais do Coeficiente de Arrasto comparativamente com o valor experimental do artigo comparativo, 0,299.

Tabela 5.1 - Comparação dos Modelos de Turbulência

	Modelos				Experimental
	Spalart	K- ϵ	K- ω	RSM	
F. A. [N]	13,440	14,420	14,129	15,277	—————
Cd	0,253	0,272	0,266	0,288	0,299
Erro (Cd)	15%	9%	11%	4%	—————

Pela leitura da Tabela 5.1 é perceptível que o modelo de turbulência cujo erro foi menor é o modelo *RSM* com um erro de 4 %, motivo pelo qual será utilizado para comparar com o artigo científico de referência [2].

5.1 RSM

As simulações numéricas apresentadas no Capítulo 5 foram realizadas com um número de Reynolds diferente do utilizado pelos autores do artigo referenciado por [2]. O número de Reynolds, calculado utilizando o comprimento do corpo de Ahmed, utilizado foi de 2,666E6 e o valor dos autores do artigo foi de 2,784E6. Esta ligeira diferença nos números de Reynolds não causa desvios significativos pois, utilizando a equação de cálculo do Coeficiente de Arrasto presente na Figura 3 de [2], obtém-se uma variação nos resultados de duas milésimas, ou seja, uma variação relativa percentual de cerca de 0,4 %.

Apesar deste desvio no valor de Reynolds ser insignificativo alteraram-se as propriedades físicas do fluido para se obter o mesmo número de Reynolds e realizou-se uma nova simulação numérica. Devido a esta alteração nas propriedades físicas do fluido, mais especificamente a massa volúmica e a viscosidade dinâmica, foi necessário corrigir o valor da pressão na condição de fronteira do Topo para um valor de 99200 Pa, recorrendo à Equação 4.2 apresentada no Subcapítulo 4.1.

Efetou-se esta nova simulação numérica pois assim garante-se que quaisquer erros obtidos advêm apenas das condições do estudo, excluindo uma vez mais a possível influência do número de Reynolds.

O valor obtido para o Coeficiente de Arrasto foi praticamente igual ao obtido antes de se efetuar esta correção no número de Reynolds, tal como era expectável. Verificou-se uma variação de apenas uma milésima, 0,288 antes da correção e 0,287 após a correção mantendo a mesma percentagem de erro de 4 %.

O primeiro parâmetro a ser avaliado foi o Coeficiente de Pressão, C_P , cujos valores são obtidos resolvendo a Equação 5.1, sendo P_∞ [Pa] a pressão de estagnação de 99200 Pa e V_∞ [m/s] a velocidade do escoamento livre de 40 m/s.

$$C_P = \frac{P - P_\infty}{\frac{1}{2} \rho V_\infty^2} \quad (5.1)$$

Os dados experimentais do artigo científico comparativo estão disponíveis para consulta pelo que se podem comparar todos os dados disponíveis sem serem necessárias aproximações. Esta disponibilidade de consulta de dados é ideal nos estudos comparativos pois só assim se tem a garantia de estar a comparar os dados corretos sem estimativas nem interpolações.

Para a comparação do C_p dividiram-se os dados em duas zonas distintas, uma na traseira do corpo de Ahmed e outra na secção posterior do fundo do corpo, estando ambas no plano de simetria $y = 0$.

Os pontos de onde se retiraram os dados na traseira do corpo de Ahmed estão apresentados na Figura 5.1, de onde se percebe que houve um foco de atenção nos limites superior e inferior da face.



Figura 5.1 - Plano de Simetria $y = 0$ com Pontos de Dados na Traseira do Corpo

Retiraram-se os dados dos pontos apresentados pela Figura 5.1 e fez-se um gráfico com os valores experimentais e numéricos, estando este gráfico representado pela Figura 5.2.

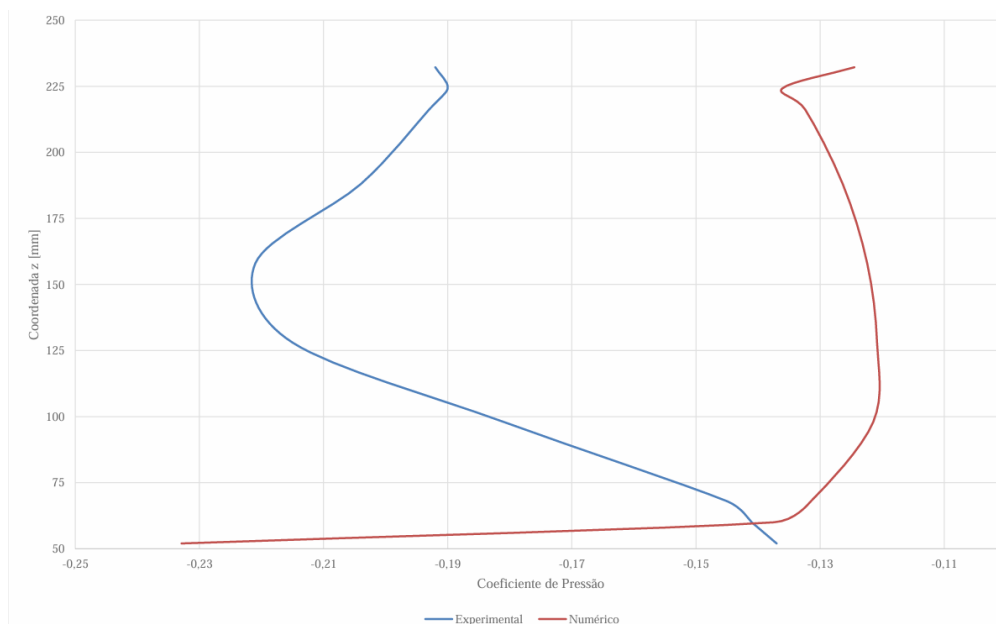


Figura 5.2 - Comparação dos Coeficientes de Pressão na Traseira do Corpo

Na Tabela 5.2 agruparam-se as coordenadas, os valores do C_p experimental, numérico e o erro relativo percentual calculado.

Tabela 5.2 - Comparação dos Coeficientes de Pressão na Traseira do Corpo

x [mm]	y [mm]	z [mm]	C_p		Erro
			Experimental	Numérico	
0	0	232,18	-0,192	-0,124	35%
0	0	224,18	-0,190	-0,136	28%
0	0	216,18	-0,193	-0,132	31%
0	0	188	-0,204	-0,126	38%
0	0	158	-0,221	-0,122	45%
0	0	128	-0,215	-0,121	44%
0	0	98	-0,181	-0,121	33%
0	0	68	-0,145	-0,131	9%
0	0	60	-0,141	-0,137	3%
0	0	52	-0,137	-0,233	70%

Após a visualização da Figura 5.2 e uma leitura da Tabela 5.2 é perceptível que se verificaram erros elevados, sendo a média dos mesmos de 33,6 %. Um dos motivos que pode explicar os erros é a de que nesta zona verifica-se uma esteira do corpo o que pode levar a alguma instabilidade no escoamento e consequentemente nos valores obtidos para o parâmetro do Coeficiente de Pressão.

Tal como mencionado anteriormente, estudaram-se também pontos pertencentes ao fundo do corpo estando os mesmos representados na Figura 5.3.



Figura 5.3 - Plano de Simetria $y = 0$ com Pontos de Dados no Fundo do Corpo

Mais uma vez existiu um cuidado especial no limite da face, mais precisamente, no final do fundo do corpo de Ahmed, como é possível comprovar pela Figura 5.3.

Utilizou-se o mesmo método de organização dos dados da traseira do corpo para se agruparem os dados do fundo do corpo, estando os mesmos apresentados na Figura 5.4 e na Tabela 5.3.

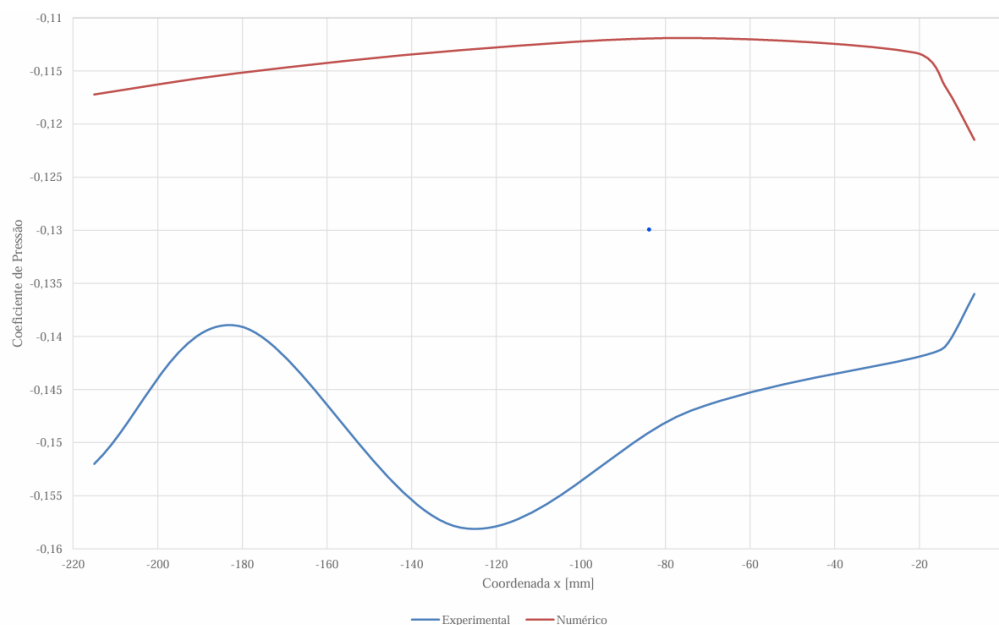


Figura 5.4 - Comparação dos Coeficientes de Pressão no Fundo do Corpo

Tabela 5.3 - Comparação dos Coeficientes de Pressão no Fundo do Corpo

x [mm]	y [mm]	z [mm]	C_p		Erro
			Experimental	Numérico	
-215	0	50	-0,152	-0,117	23%
-181,01	0	50	-0,139	-0,115	17%
-128,45	0	50	-0,158	-0,113	28%
-74,07	0	50	-0,147	-0,112	24%
-21	0	50	-0,142	-0,113	20%
-14	0	50	-0,141	-0,116	17%
-7	0	50	-0,136	-0,121	11%

Pela visualização da Figura 5.4 e leitura da Tabela 5.3 percebe-se que os erros verificados no fundo do corpo foram inferiores, em média, aos calculados para a traseira do corpo pois a média destes é de 20 %. A média dos erros verificados no fundo do corpo é inferior pois aqui o escoamento é mais estável pelo que é mais simples a obtenção de valores mais corretos do que na traseira onde se verifica uma grande instabilidade.

Uma das zonas críticas do escoamento é na inclinação do corpo pelo que é fundamental verificar a eficácia dos modelos de turbulência nessa mesma zona. Para tais verificações

utilizaram-se linhas verticais no plano de simetria $y = 0$. Foram criadas doze linhas verticais de onde se retiraram os valores das velocidades u [m/s] e w [m/s] e o valor da tensão de Reynolds uw [m²/s²].

Estas linhas de dados tinham como abcissa os valores de $x = -3, -23, -43, -63, -83, -103, -123, -143, -163, -183, -203, -223$ e -243 , com os valores em milímetros. Para permitir uma melhor percepção da localização destas linhas verticais de dados apresenta-se em seguida a Figura 5.5.



Figura 5.5 - Plano de Simetria $y = 0$ com Linhas de Dados Verticais

Após a retirada dos dados pretendidos efetuou-se uma comparação com os valores experimentais. Estas comparações apresentaram resultados muito díspares para as velocidades, no caso da tensão de Reynolds obtiveram-se, na globalidade, erros relativos médios de 100 %. Os erros elevados verificados no parâmetro da tensão de Reynolds indicam que a simulação numérica não foi eficaz na sua determinação.

Relativamente à velocidade u verificou-se que os erros diminuía com o afastamento ao corpo sendo que na zona do topo horizontal os erros verificados foram sempre mais reduzidos, máximos de 20 %, do que na zona inclinada com os erros percentuais a atingirem os milhares, ainda que pontualmente.

No caso da velocidade w obteve-se um padrão de erros semelhante ao verificado na velocidade u , com a diminuição do erro a corresponder a um afastamento da superfície do corpo. Os valores calculados do erro relativos à velocidade w foram consistentemente superiores aos verificados pela velocidade u .

Apresentar-se-ão de seguida os gráficos dos perfis de velocidade obtidos nas linhas de dados dos extremos, $x = -3$ mm e $x = -243$ mm, para se ter uma melhor noção do que foi

explicado previamente. Note-se que os gráficos dos perfis de velocidade das restantes linhas verticais de dados estão apresentados nos Apêndices B.

Na Figura 5.6 está representado o plano de simetria $y = 0$ e a linha vertical de dados com abcissa $x = -3$ mm sendo bastante notório que está no limiar do corpo pelo que está numa zona de bastante instabilidade do escoamento.



Figura 5.6 - Plano de Simetria $y = 0$ com Linha de Dados $x = -3$ mm

Localizada a linha de dados podem-se apresentar os perfis das velocidades u e w . Na Figura 5.7 está apresentado o perfil da velocidade u .

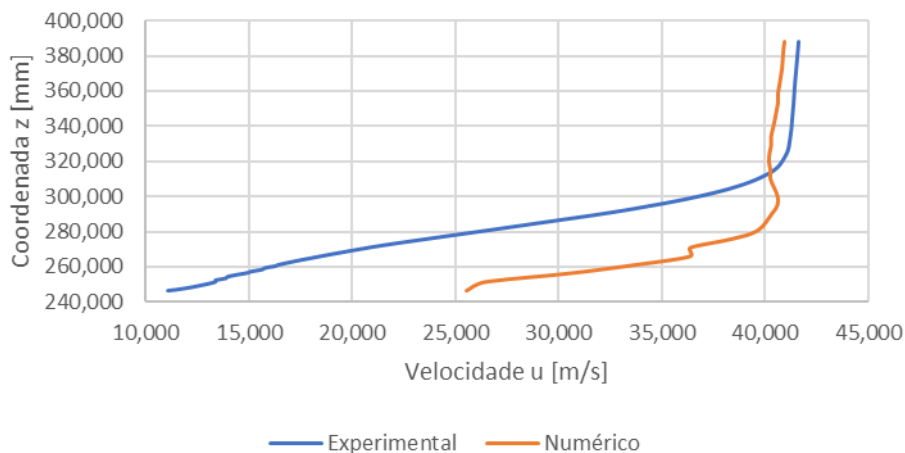


Figura 5.7 - Perfil da Velocidade u da Linha de Dados $x = -3$ mm

Pela leitura da Figura 5.7 é perceptível que o modelo de turbulência consegue replicar o perfil de velocidade mas falha nos seus valores. É ainda notório o que foi referido anteriormente de o erro aumentar com a aproximação ao corpo pois verifica-se um maior afastamento dos perfis com menores valores de cota. Os valores dos erros relativos calculados nos extremos

superior e inferior da linha de dados foram de 2 % e 130 %, respectivamente, e um erro médio de 101 %.

Para se avaliarem os perfis da velocidade w na mesma linha de dados é necessária uma leitura atenta da Figura 5.8 apresentada de seguida.

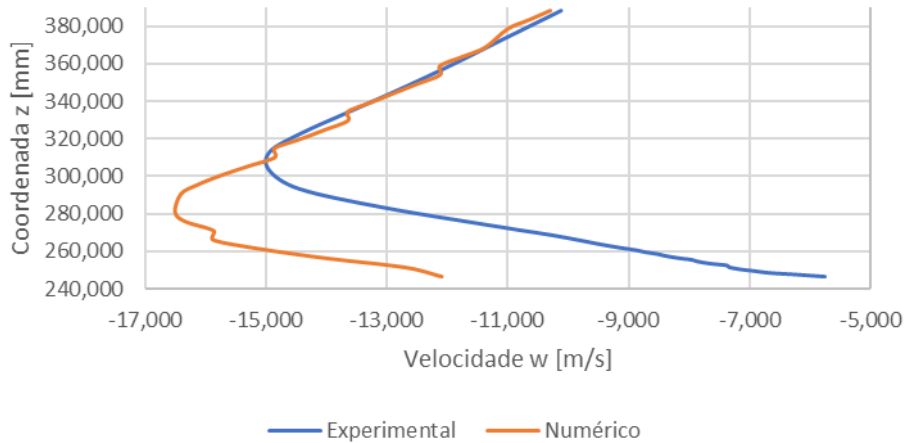


Figura 5.8 - Perfil da Velocidade w da Linha de Dados $x = -3$ mm

Tal com aconteceu com o perfil da velocidade u , os perfis são bastante semelhantes contendo o mesmo problema da incorreção nos valores. Por leitura da Figura 5.6 é perceptível que os perfis dos dados numéricos e experimentais são quase coincidentes para valores de cota superiores a 320 mm, provando mais uma vez que a precisão aumenta com o afastamento do corpo de Ahmed. No extremo superior da linha vertical de dados obteve-se um erro de 2 %, no extremo inferior o erro foi de 110% e um valor médio foi de 61 %.

Apresente-se agora a linha vertical de dados com o menor valor de abcissa, $x = -243$ mm, estando esta linha de dados e o plano de simetria $y = 0$ representados na Figura 5.9.



Figura 5.9 - Plano de Simetria $y = 0$ com Linha de Dados $x = -243$ mm

Pela leitura da Figura 5.9 é notório que esta linha de dados está colocada sobre a face horizontal do topo do corpo de Ahmed, sendo por isso expectável obterem-se erros menores do que os verificados para a linha vertical de dados representada pela Figura 5.6.

Devidamente apresentada e localizada a linha de dados $x = -243$ mm podem-se representar os perfis das velocidades u e w , sendo que na Figura 5.10 está ilustrado o perfil da velocidade u .

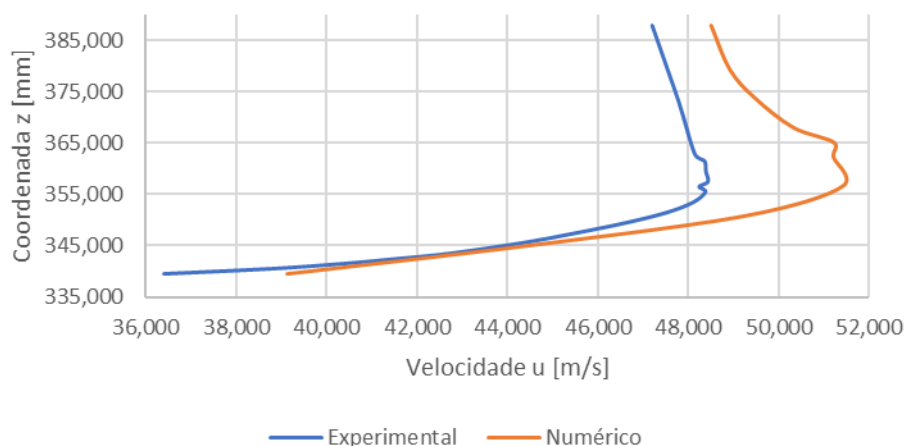


Figura 5.10 - Perfil da Velocidade u da Linha de Dados $x = -243$ mm

O perfil da velocidade u dos dados da simulação numérica aproxima-se, novamente, do perfil dos dados experimentais, incorrendo no mesmo problema de incorreção dos valores das velocidades mas com menor gravidade. Os valores dos erros calculados nos extremos superior e inferior desta linha de dados foram de 3 % e 7 %, respetivamente, e obteve-se um valor médio do erro de 7 %.

Relativamente aos perfis da velocidade w da linha vertical de dados com abcissa $x = -243$ mm estes foram representados pela Figura 5.11 apresentada de seguida.

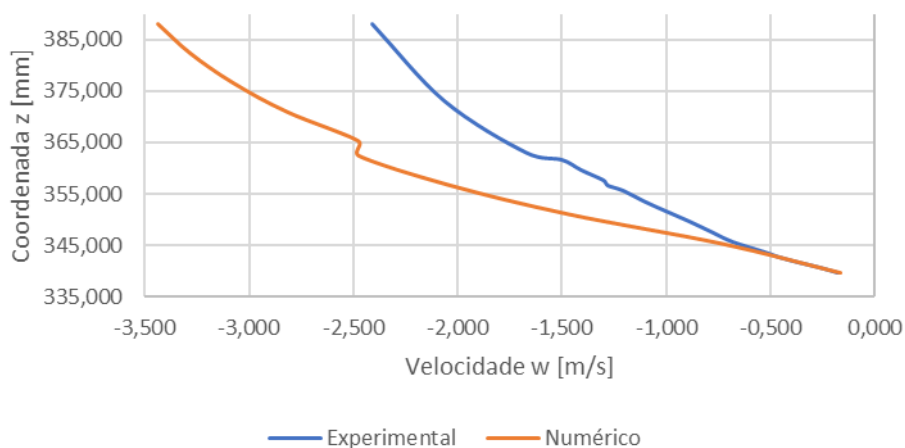


Figura 5.11 - Perfil da Velocidade w da Linha de Dados $x = -243$ mm

Após uma leitura atenta da Figura 5.11 é perceptível que o modelo de turbulência RSM conseguiu aproximar o perfil da velocidade w ao perfil dos dados experimentais, com alguma incorreção apenas nos valores dos mesmos. Neste caso, os maiores erros verificaram-se na zona de maior cota, contrariamente ao ocorrido no exemplo anterior da linha de dados $x = -3$ mm pois verificou-se a formação de uma bolha de recirculação nesta zona. No extremo inferior verificou-se um erro de 7 %, no extremo superior um erro de 43 % e um erro médio de 110%, valor este devido aos erros elevados na secção intermédia desta linha de dados.

CONCLUSÕES E SUGESTÕES DE TRABALHO FUTURO

6.1 Conclusões

Com esta dissertação concluiu-se que o modelo de turbulência, de entre os modelos RANS testados, que mais se adequa aos estudos aerodinâmicos do corpo de Ahmed e, consequentemente, da Indústria Automóvel é o RSM.

Utilizando este modelo de turbulência atingiu-se o menor valor de erro relativo do Coeficiente de Arrasto, C_d , com um erro de apenas 4 %, relativamente aos dados experimentais da literatura, o que se considera ser um erro reduzido.

Pode-se concluir que os perfis de velocidade determinados pelo modelo RSM aproximam-se dos verificados experimentalmente, no entanto os seus valores não coincidem.

Conclui-se ainda que o modelo determinado como o mais adequado foi incapaz de determinar corretamente os valores das tensões de Reynolds, obtiveram-se constantemente erros de 100 %, sendo que não se conseguiram verificar zonas do escoamento onde os erros verificados para estas tensões fossem mais reduzidos.

Finalmente concluiu-se que o modelo RSM determina os Coeficiente de Pressão com uma precisão incerta pois o erro máximo foi de 70 % e o mínimo de 3 %. As médias calculadas verificaram-se mais próximas do valor mínimo, 33,6 % para a Traseira e 20 % para o Fundo do corpo.

6.2 Sugestões de Trabalho Futuro

Para trabalhos futuros sugere-se a realização do estudo comparativo entre o modelo *Segregated Flow* e o modelo *Coupled Flow* pois não foi possível a sua realização por motivos não compreendidos pelo autor desta dissertação.

Sugere-se ainda a realização do estudo do dimensionamento do domínio computacional, mais precisamente, o estudo da altura e da distância entre o corpo de Ahmed e o *Outlet*. O estudo da altura é sugerido pois obtiveram-se resultados incoerentes com a teoria. Dado que não foi possível a realização do estudo da distância entre o corpo e o *Outlet* sugere-se a realização do mesmo num trabalho futuro.

Deixa-se a sugestão de realizar um estudo comparativo entre as condições de fronteira *Pressure Outlet* e *Outlet* tanto para o topo do domínio computacional como para o *Outlet* e entre as condições *Wall* com *Slip* e *Wall* sem *Slip* para o chão do domínio computacional.

Por fim, o autor desta dissertação sugere a realização de um estudo comparativo da malha utilizada com uma malha do tipo poliédrico ou com uma malha estruturada gerada por outro programa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Ahmed, S. R., Ramm, G., & Faltin, G. (1984). Some Salient Features of the Time -Averaged Ground Vehicle Wake. In *Transactions* (Vol. 93). <https://about.jstor.org/terms>
- [2] Meile, Walter & Brenn, Günter & Reppenhagen, Aaron & Lechner, Bernhard & Fuchs, Anton. (2011). Experiments and numerical simulations on the aerodynamics of the Ahmed body. *CFD Letters*. 3
- [3] Manual do utilizador do SIMCENTER STAR-CCM+ Versão 2302
- [4] <https://kotengenharia.com.br/diferencas-metodos-elementos-volumes-finitos-elementos-discretos/> Acedido em: Agosto 8, 2023
- [5] Versteeg, H. K., & Malalasekera, W. (2007). *An Introduction to Computational Fluid Dynamics Second Edition*. www.pearsoned.co.uk/versteeg
- [6] Jang, D. S., Jetli, R., & Acharya, S. (1986). Comparison of the piso, simpler, and simplec algorithms for the treatment of the pressure-velocity coupling in steady flow problems. *Numerical Heat Transfer*, 10(3), 209–228. <https://doi.org/10.1080/10407788608913517>
- [7] Hsing Shih, T., Liou, W. W., Shabbir, A., & Yang, Z. (1994). *A New k-(Eddy Viscosity Model for High Reynolds Number Turbulent Flows-Model Development and Validation*. <https://www.researchgate.net/publication/24292638>
- [8] <https://www.simscale.com/forum/t/what-is-y-plus/82394> Acedido em: Março 22, 2024
- [9] Muhič, S., & Štefanič, M. (2017). Numerical Analysis of an Ahmed Body with Different Software Packages Numerična Analiza Ahmedovega Telesa Z Različnima Programskima Paketoma. In *JET 11 JET* (Vol. 10). www.fe.um.si/en/jet.html
- [10] Saha, I., Mukherjee, T., Saha, A., & Pandey, R. (2020). *Aerodynamic Study of an Ahmed Body with the help of CFD Simulation*. <https://doi.org/10.20944/preprints202006.0149.v1>
- [11] Igali, D., Mukhmetov, O., Zhao, Y., Fok, S. C., & Teh, S. L. (2019). Comparative Analysis of Turbulence Models for Automotive Aerodynamic Simulation and Design. *International Journal of Automotive Technology*, 20(6), 1145–1152. <https://doi.org/10.1007/s12239-019-0107-7>

- [12] Hachimy, F. Z., Omar, A. A., & Elsayed, O. (2022). The Accuracy of the Numerical Solution in Predicting Ahmed Body Components Drag Coefficients. *CFD Letters*, *14*(5), 24–32. <https://doi.org/10.37934/cfdl.14.5.2432>
- [13] Gagnon, L., Gagnon, M. S. L., & Richard, M. J. (2010). Parallel CFD of a prototype car with OpenFOAM. In *5 th OpenFOAM Workshop*. <https://www.researchgate.net/publication/296678913>
- [14] <https://www.cuemath.com/algebra/sum-of-a-gp/> Acedido em: Fevereiro 15, 2024

MODELOS DE TURBULÊNCIA

a. Standard $k - \varepsilon$

O modelo de turbulência apresentado neste subcapítulo, o modelo *Standard* $k - \varepsilon$, requer duas equações de transporte. Este modelo de turbulência caracteriza-se por ter um bom compromisso entre eficácia e custo computacional. Geralmente é aplicado a casos de estudo em que ocorra uma recirculação complexa, existindo ou não transferências de calor (P. 4217 [3]).

Uma das equações de transporte é utilizada para resolver a energia cinética turbulenta, k [m^2/s^2], sendo a outra equação para a resolução da taxa de dissipação turbulenta, ε [m^2/s^3].

Para o cálculo da viscosidade turbulenta, μ_t [$\text{kg}/\text{m s}$], utiliza-se a Equação a.1, sendo C_μ um coeficiente do modelo, f_μ uma função de amortecimento e T [s] a escala de tempo turbulenta.

$$\mu_t = \rho C_\mu f_\mu k T \quad (\text{a.1}) \text{ (P. 8234 [3])}$$

A Equação a.2 resolve a energia cinética turbulenta, k [m^2/s^2], sendo σ_k um coeficiente do modelo, P_k um termo de produção, ε_0 [m^2/s^3] o valor da turbulência ambiente dos termos fonte que contrariam o decaimento da turbulência e S_k um termo fonte.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \nabla \cdot (\rho k \bar{\mathbf{v}}) = \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \nabla k \right] + P_k - \rho(\varepsilon - \varepsilon_0) + S_k \quad (\text{a.2}) \text{ (P. 8234 [3])}$$

A resolução da taxa de dissipação turbulenta, ε [m^2/s^3], faz-se recorrendo à Equação a.3, sendo σ_ε um coeficiente do modelo, T_e [s] a escala de tempo dos grandes turbilhões, $C_{\varepsilon 1}$ um coeficiente do modelo, P_ε um termo de produção, $C_{\varepsilon 2}$ um coeficiente do modelo, f_2 uma função de amortecimento, T_0 [s] uma escala de tempo especificada pela imposição de uma fonte ambiente e S_ε um termo fonte.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\varepsilon) + \nabla \cdot (\rho\varepsilon\bar{\mathbf{v}}) = \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \nabla \varepsilon \right] + \frac{1}{T_e} C_{\varepsilon 1} P_\varepsilon - C_{\varepsilon 2} f_2 \rho \left(\frac{\varepsilon}{T_e} - \frac{\varepsilon_0}{T_0} \right) + S_\varepsilon \quad (\text{a.3}) \text{ (P. 8235 [3])}$$

Os coeficientes C_μ , σ_k , σ_ε , $C_{\varepsilon 1}$ e $C_{\varepsilon 2}$ adquirem os valores 0,09, 1, 1,3, 1,44 e 1,92, respectivamente.

b. Standard k – ω

O modelo de turbulência *Standard k – ω* , tal como o modelo *Standard k – ε* , ver Apêndice A.a, necessita de duas equações de transporte adicionais. Os modelos *k – ω* , *k – ε* têm similaridades como a que já foi referida de requererem duas equações de transporte adicionais mas também têm diferenças, por exemplo num dos parâmetros que resolvem, taxa de dissipação específica, ω [s^{-1}], para o modelo *Standard k – ω* e taxa de dissipação turbulenta, ε [m^2/s^3], para o modelo *Standard k – ε* .

O modelo *Standard k – ω* resolve as equações de transporte para a energia cinética turbulenta, k [m^2/s^2], e a taxa de dissipação específica, ω [s^{-1}], de forma a obter a viscosidade turbulenta, μ_t [$kg/m s$].

Utilizando a Equação b.1 chega-se à viscosidade turbulenta, μ_t [$kg/m s$].

$$\mu_t = \rho k T \quad (\text{b.1}) \text{ (P. 8243 [3])}$$

A equação de transporte utilizada para a resolução da energia cinética turbulenta, k [m^2/s^2], é a Equação b.2, sendo β^* um coeficiente do modelo, f_{β^*} um fator de modificação, ω_0 [s^{-1}] o valor ambiente da taxa de dissipação específica que contraria o decaimento da turbulência e k_0 [m^2/s^2] o valor ambiente da energia cinética turbulenta que contraria o decaimento da turbulência.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \nabla \cdot (\rho k \bar{\mathbf{v}}) = \nabla \cdot [(\mu + \sigma_k \mu_t) \nabla k] + P_k - \rho \beta^* f_{\beta^*} (\omega k - \omega_0 k_0) + S_k \quad (\text{b.2}) \text{ (P. 8244 [3])}$$

Para resolver a taxa de dissipação específica, ω [s^{-1}], recorre-se à Equação b.3, sendo σ_ω um coeficiente do modelo, β um coeficiente do modelo, f_β um fator de modificação e S_ω um termo fonte.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \omega) + \nabla \cdot (\rho \omega \bar{\mathbf{v}}) = \nabla \cdot [(\mu + \sigma_\omega \mu_t) \nabla \omega] + P_\omega - \rho \beta f_\beta (\omega^2 - \omega_0^2) + S_\omega \quad (\text{b.3}) \text{ (P. 8244 [3])}$$

Neste modelo, as constantes σ_k , β^* , σ_ω e β adquirem os valores 0,5, 0,09, 0,5 e 0,072, respetivamente.

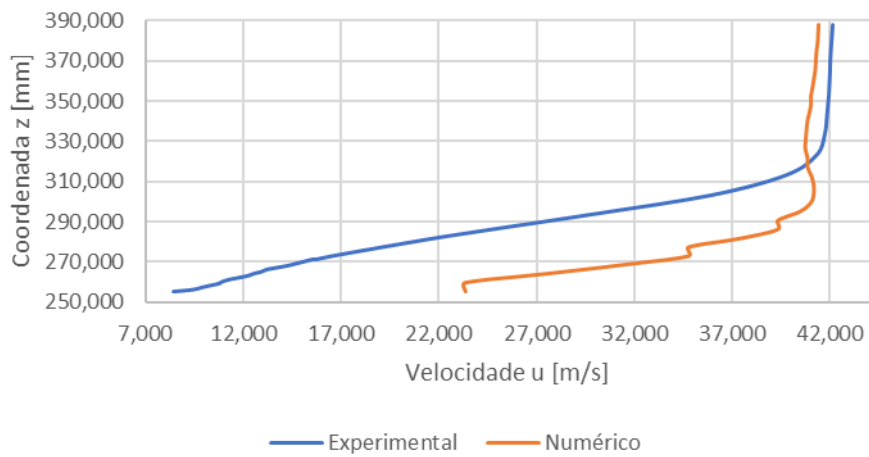
| B

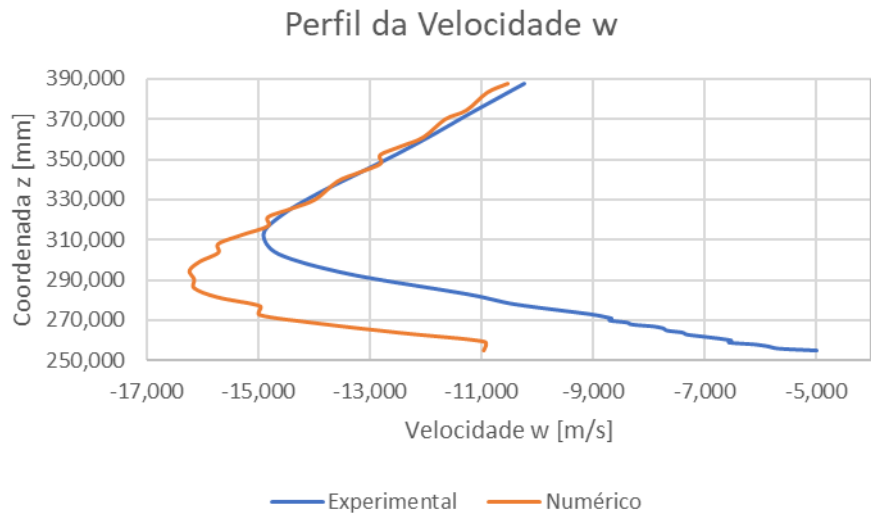
PLANO DE SIMETRIA $y = 0$

a. $x = -23 \text{ mm}$

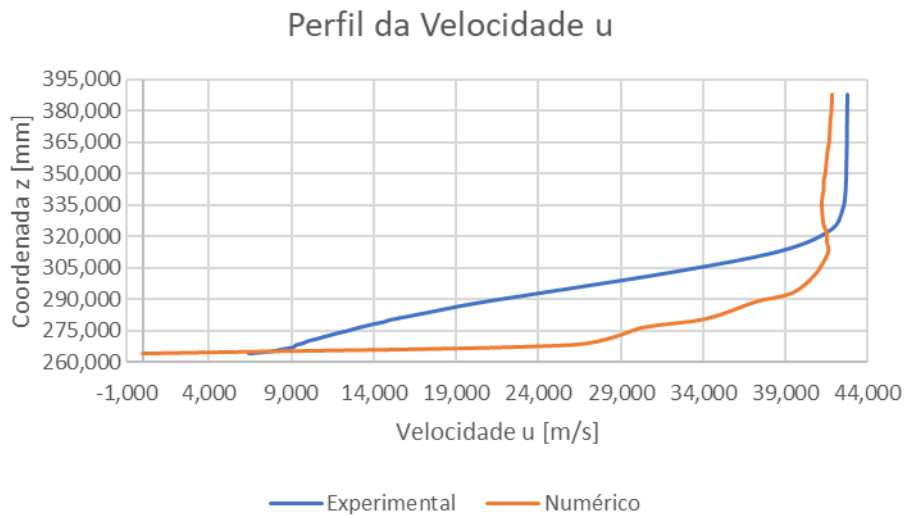


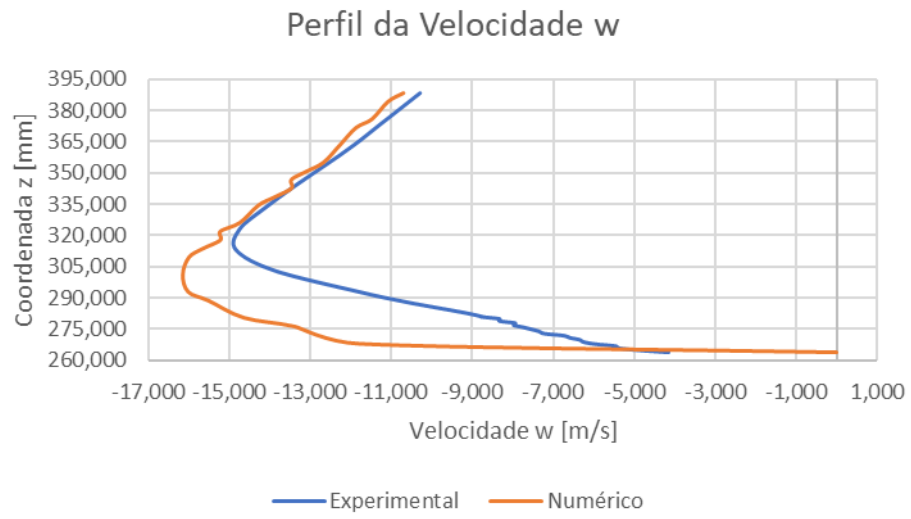
Perfil da Velocidade u



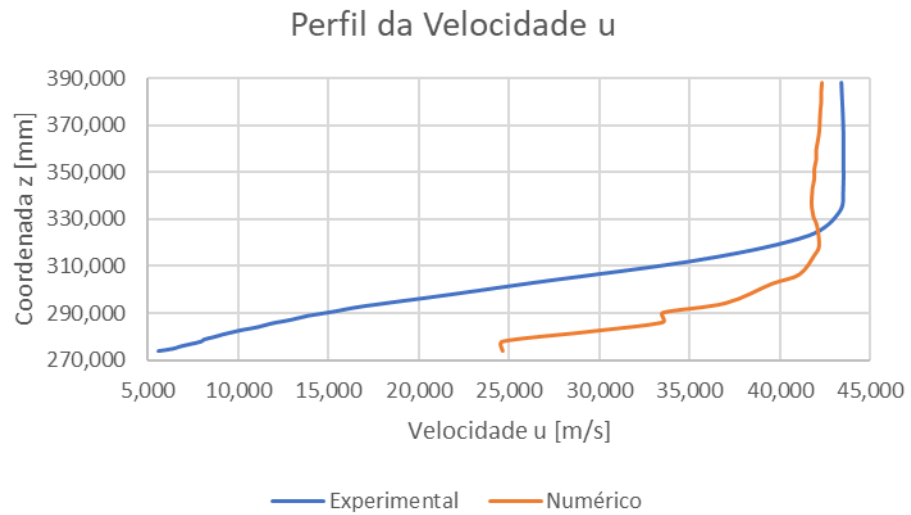


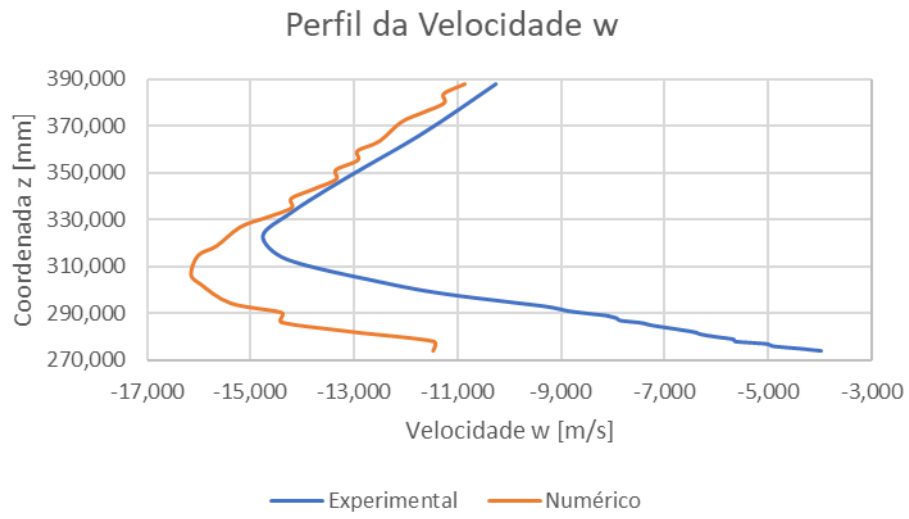
b. $x = -43 \text{ mm}$



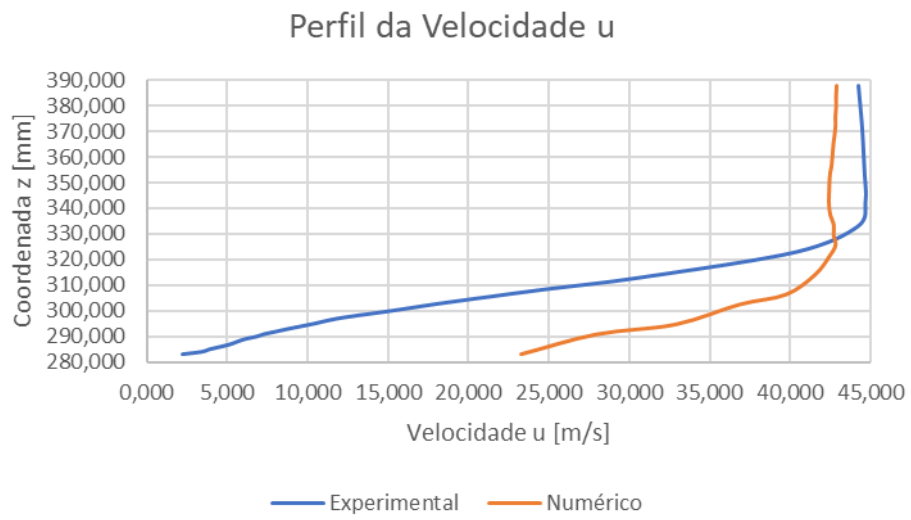


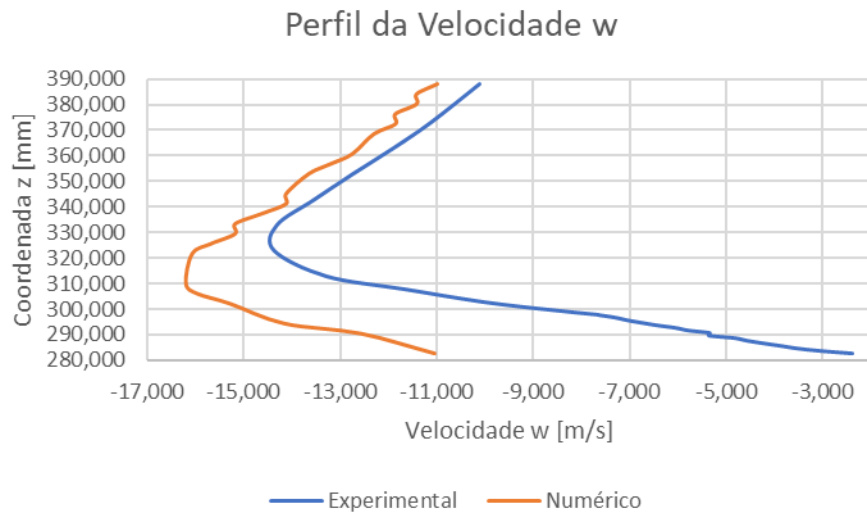
c. $x = -63 \text{ mm}$



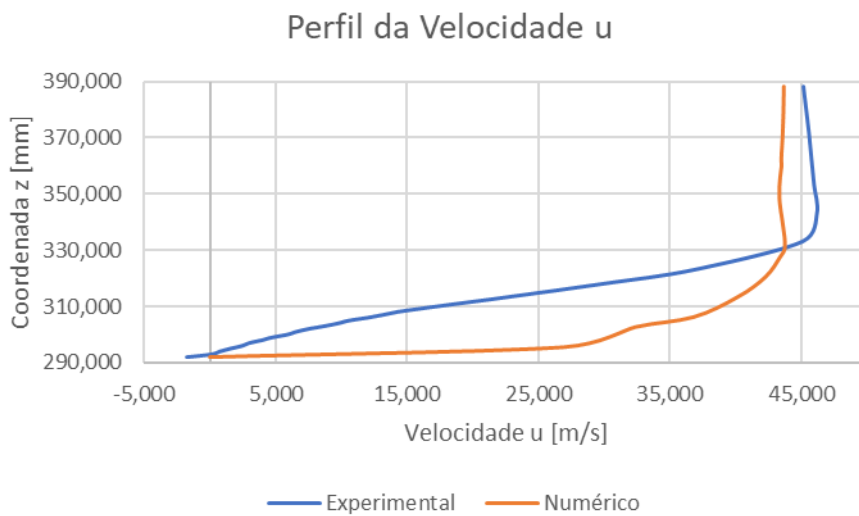
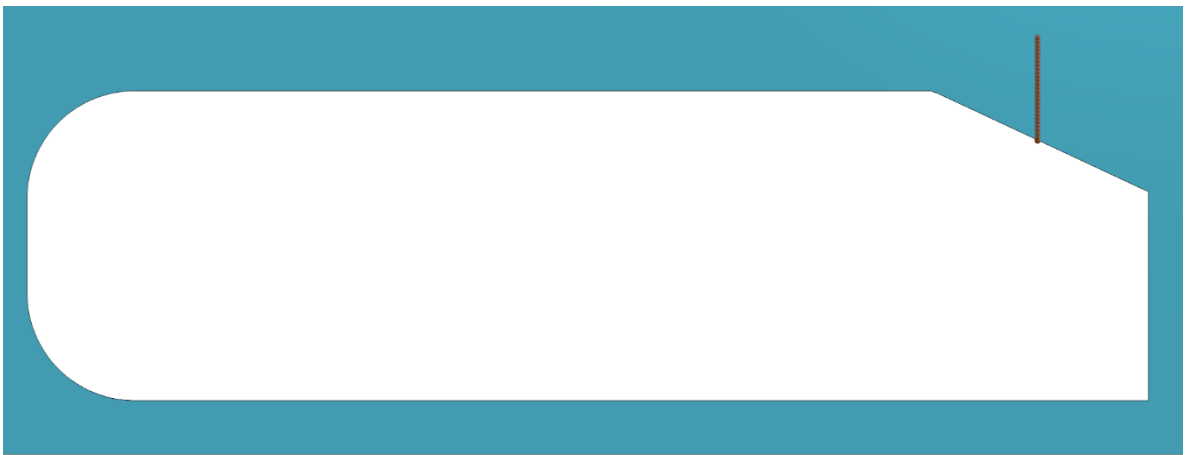


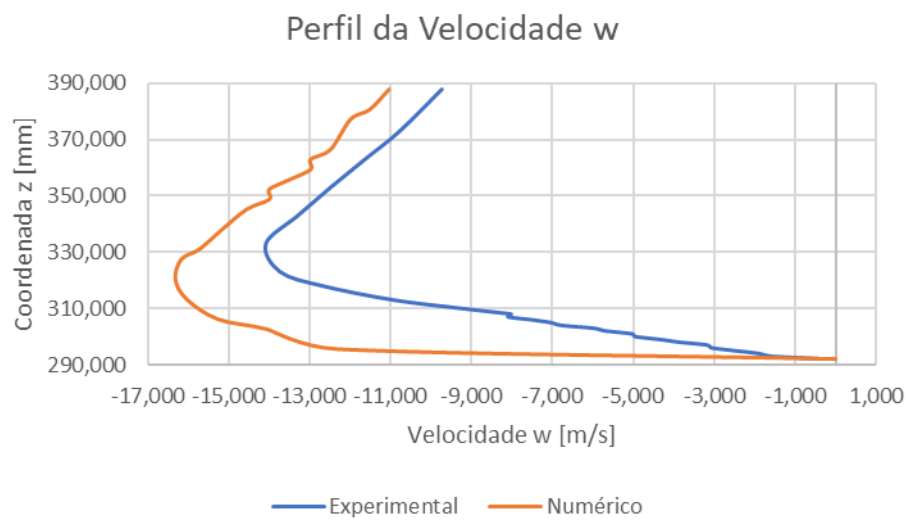
d. $x = -83$ mm





e. $x = -103 \text{ mm}$

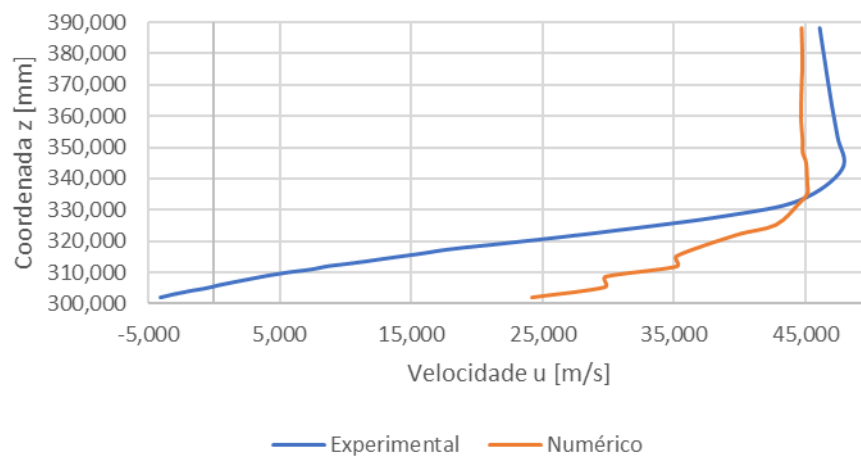




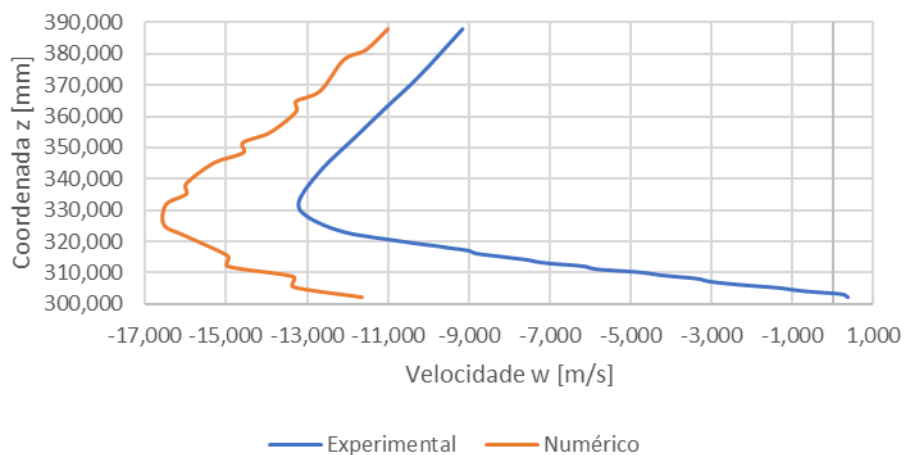
f. $x = -123 \text{ mm}$



Perfil da Velocidade u



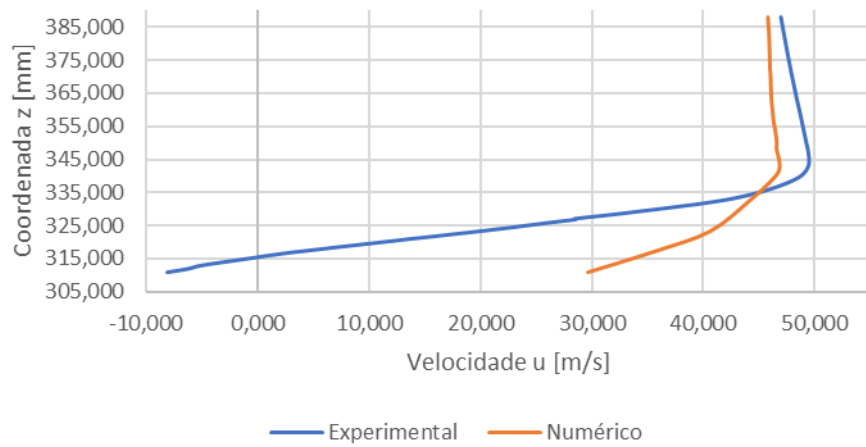
Perfil da Velocidade w



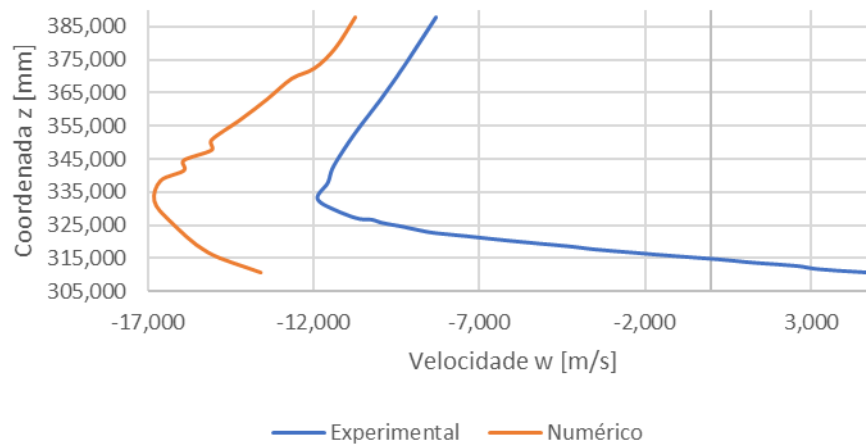
g. $x = -143 \text{ mm}$



Perfil da Velocidade u



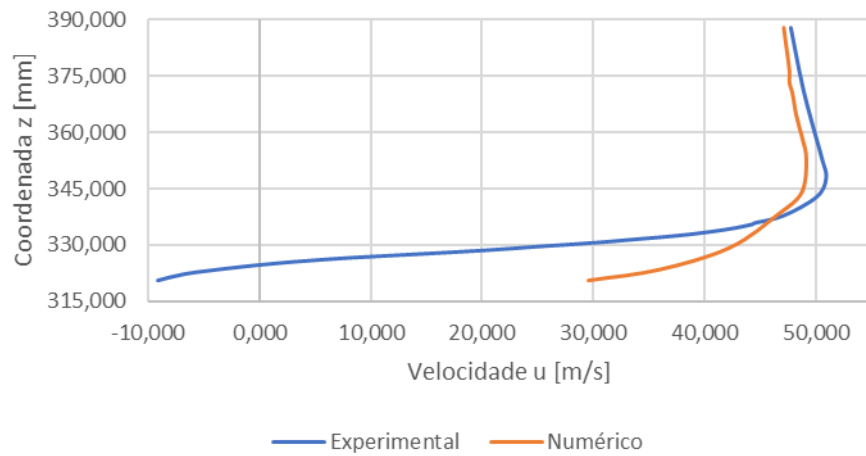
Perfil da Velocidade w



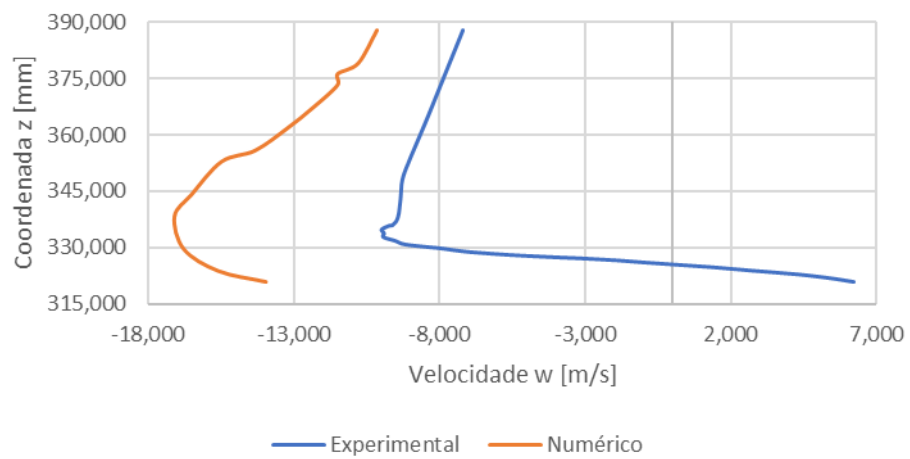
h. $x = -163$ mm



Perfil da Velocidade u



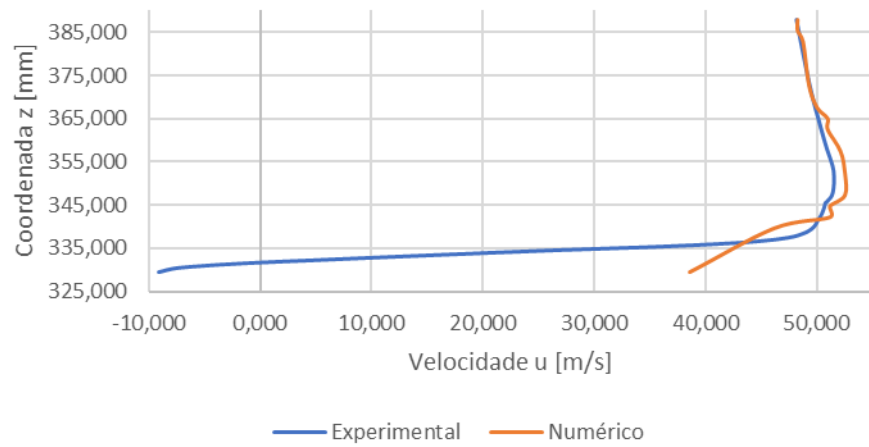
Perfil da Velocidade w



i. $x = -183 \text{ mm}$



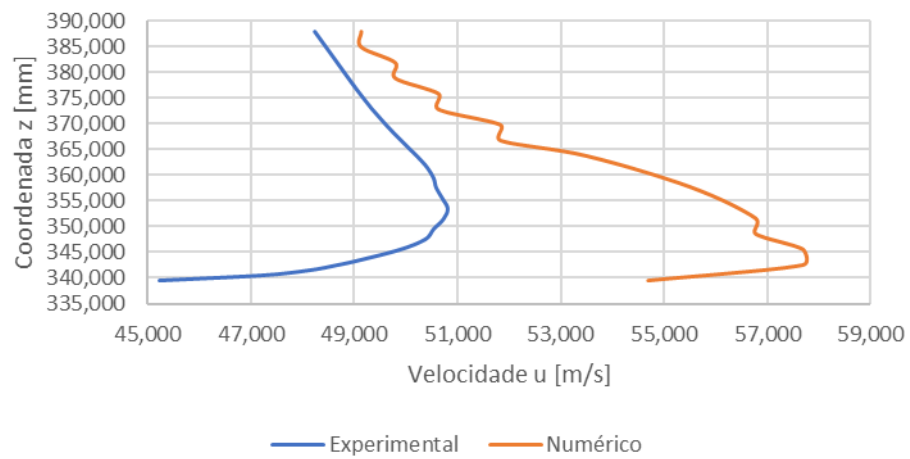
Perfil da Velocidade u



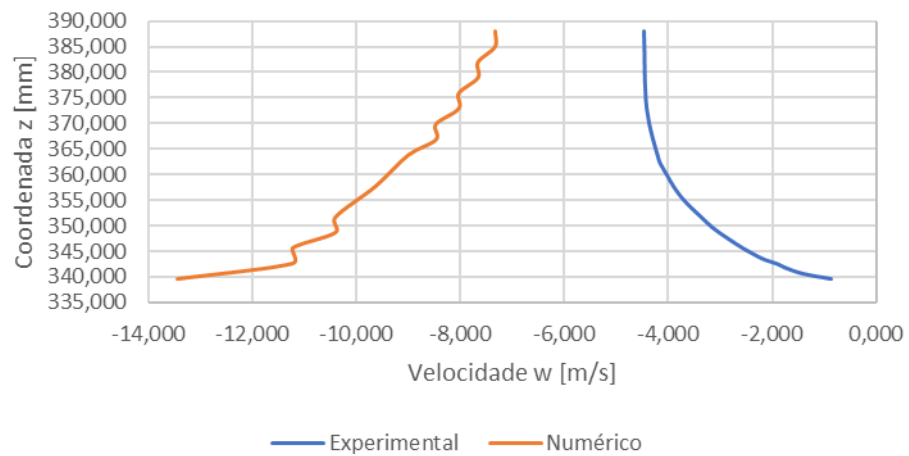
j. $x = -203 \text{ mm}$



Perfil da Velocidade u



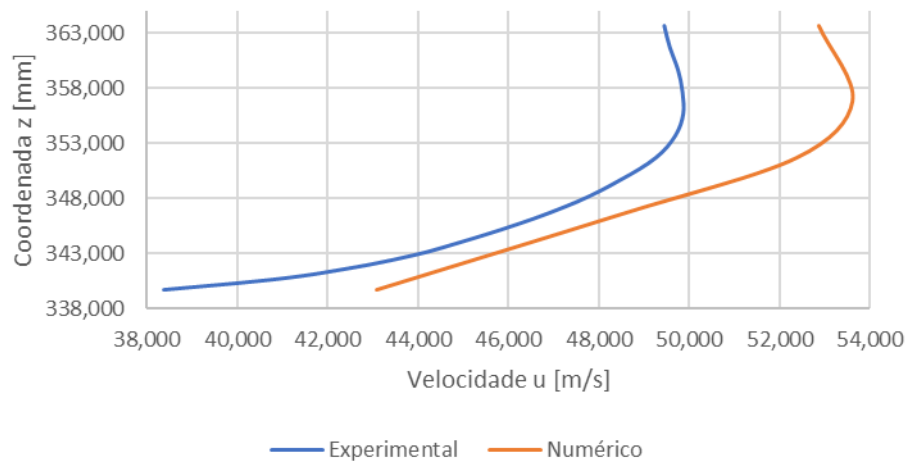
Perfil da Velocidade w



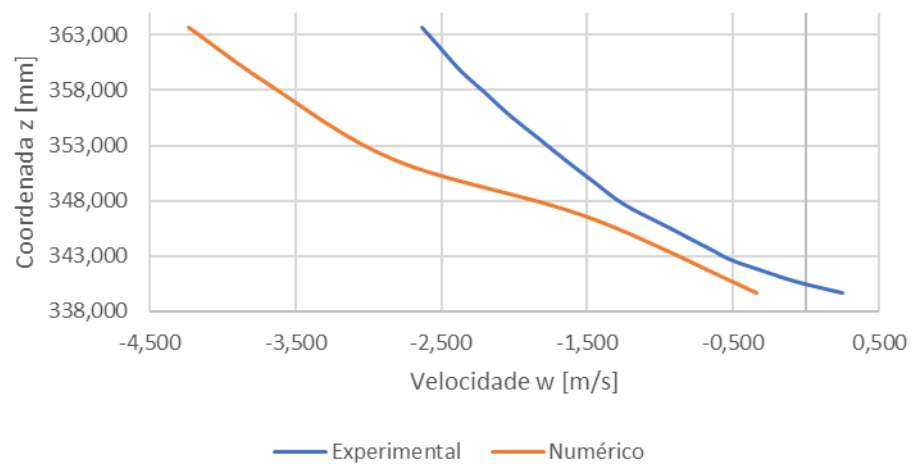
k. $x = -223 \text{ mm}$



Perfil da Velocidade u



Perfil da Velocidade w





2024

JOÃO LOPES

IMPACTO DE MODELOS DE TURBULÊNCIA NO ESTUDO AERODINÂMICO DO CORPO DE AHMED