

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

SIMULAÇÃO NUMÉRICA DE UM ESCOAMENTO EM TORNO A UM CORPO DE AHMED  
EMPREGANDO UMA MALHA POLIÉDRICA

por

Guilherme Rost Zucco

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul como parte dos requisitos para a obtenção do diploma de Engenheiro Mecânico.

Orientadora: Prof. Adriane P. Petry

Porto Alegre, julho de 2017



Universidade Federal do Rio Grande do Sul  
Escola de Engenharia  
Departamento de Engenharia Mecânica

SIMULAÇÃO NUMÉRICA DE UM ESCOAMENTO EM TORNO A UM CORPO DE AHMED  
EMPREGANDO UMA MALHA POLIÉDRICA

por

Guilherme Rost Zucco

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS  
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE  
**ENGENHEIRO MECÂNICO**  
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA DO  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Profa. Thammy Cristina Hayashi  
Coordenadora do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: **Energia e Fenômenos de Transporte**

Orientador: Profa. Adriane P. Petry

Comissão de Avaliação:

Profa. Thammy Cristina Hayashi

Prof. Sergio Viçosa Moller

Prof. Guilherme Crivelli Fraga

Porto Alegre, 20 de julho de 2017

ZUCCO, G.R. **SIMULAÇÃO NUMÉRICA DE UM ESCOAMENTO EM TORNO A UM CORPO DE AHMED EMPREGANDO UMA MALHA POLIÉDRICA**. 2017. 15 folhas. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2017.

## RESUMO

O presente trabalho consiste na validação de desempenho de simulações com o emprego de métodos de fluidodinâmica computacional (CFD) em um corpo conhecido: o corpo de Ahmed. Uma vez que se encontram resultados na literatura do escoamento sobre este objeto, os resultados obtidos no presente trabalho foram comparados com outros estudos realizados. Foi utilizado o *software* comercial STAR-CCM+ para efetuar as simulações. O modelo de turbulência escolhido foi o RANS  $k-\omega$  SST. O tipo de malha utilizado no presente trabalho foi a do tipo poliédrica (*poly*). A malha mais refinada possui aproximadamente 5,6 milhões de elementos. Um estudo sobre a qualidade das malhas geradas e sua convergência foi realizado utilizando o método GCI (*Grid Convergence Index*). A comparação do desempenho feita na análise dos coeficientes de arrasto total, viscoso e de pressão mostrou-se satisfatória. Os coeficientes de arrasto obtidos no presente trabalho apresentaram erros menores que 4% em relação aos coeficientes medidos no trabalho original sobre o corpo de Ahmed.

**PALAVRAS-CHAVE:** Corpo de Ahmed, CFD, RANS  $k-\omega$  SST

ZUCCO, G.R. **NUMERICAL SIMULATION OF THE FLOW AROUND AN AHMED BODY USING A POLYHEDRAL MESH**. 2017. 15 folhas. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2017.

## **ABSTRACT**

The present work consists in a performance validation of computational fluid dynamics (CFD) simulations in a known body: the Ahmed body. Given that results of the flow around this body are found in literature, the results obtained in the present work were compared with other studies. The commercial software STAR-CCM+ was used to run the simulations. The turbulence model chosen was the RANS  $k-\omega$  SST. The polyhedral (poly) type of mesh was used. The most refined mesh had approximately 5,6 million elements. A study about the quality of the mesh generated and its convergence was made using the GCI (Grid Converge Index) method. The performance comparison was made analyzing the total drag, skin friction and pressure drag and it was considered valid. The coefficients found in the present work had an error smaller than 4% regarding measurements made in the original work related to the Ahmed body

**KEYWORDS:** Ahmed body, CFD, RANS  $k-\omega$  SST.

## ÍNDICE

	Pág.
<b>1. INTRODUÇÃO.....</b>	<b>1</b>
<b>2. OBJETIVOS.. ..</b>	<b>1</b>
<b>3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA. ....</b>	<b>1</b>
<b>4. METODOLOGIA.. ..</b>	<b>2</b>
4.1. Modelagem Matemática.....	2
4.2. Modelo Numérico.....	4
4.3. Geometria e Domínio.....	4
4.4. Condições de Contorno.....	5
4.5. Discretização do Domínio.....	6
4.6. Pós-Processamento.....	7
4.7. Qualidade de Malha.....	8
<b>5. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>	<b>8</b>
5.1. Qualidade de Malha.....	9
5.2. Coeficientes Aerodinâmicos e Perfis de Velocidade.....	10
5.3. Discussão dos Resultados Frente a Outros Estudos.....	12
<b>6. CONCLUSÕES.....</b>	<b>14</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>15</b>

## 1. INTRODUÇÃO

O uso de técnicas computacionais para a solução de problemas fluidodinâmicos cresceu nas últimas décadas. Simulações em CFD, do inglês *Computational Fluid Dynamics* (Fluidodinâmica computacional em tradução livre), vêm sendo utilizadas para solucionar problemas em uma vasta gama de diferentes áreas acadêmicas e industriais, tais como aeroespacial, automotiva, geração de energia e meteorologia, entre outros. O avanço na capacidade computacional aliado ao crescente uso de simulações em CFD reduziram os custos nos processos de desenvolvimento e otimização, os quais em consequência produziram uma queda nos preços dos produtos finais. A principal vantagem obtida ao adotar-se o uso de técnicas de CFD foi a criação de uma alternativa à experimentação como meio para a obtenção de resultados confiáveis [Davidson, 2003].

Existem, entretanto, desafios no uso de técnicas de CFD. Um dos principais problemas, senão o principal, seria a simulação de escoamentos turbulentos. Nos fenômenos que surgem em problemas com turbulência em geral emprega-se descrição estatística. Ainda assim o custo computacional necessário para resolvê-los é alto, ao ponto de torná-lo proibitivo. Isso se deve a necessidade de discretização do domínio em células tão diminutas quanto a menor escala relevante.

Para solucionar as extremamente complexas leis que regem o escoamento de um fluido são usadas técnicas para reduzir esta complexidade como, por exemplo, estudar somente as quantidades médias do escoamento. O fenômeno da turbulência é de natureza intrinsecamente transitória, porém ao não considerar pequenas variações o escoamento pode ser considerado como em regime permanente. Ao desconsiderar estas flutuações as equações se simplificam, surge porém um novo termo indeterminado e conseqüentemente o problema de fechamento.

## 2. OBJETIVOS

O objetivo principal do presente trabalho é a análise do escoamento em torno a um corpo de Ahmed [Ahmed e Ramm, 1984] utilizando-se de um *software* de CFD comercial, STAR-CCM+. Os principais pontos a serem analisados são os coeficientes aerodinâmicos, arrasto total, devido à pressão e viscoso, e a influência do tipo de malha e o seu refinamento assim como a comparação do método de turbulência utilizado, o *k- $\omega$ SST* [Menter, 1994], com outros já publicados na literatura e também com resultados experimentais.

## 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O corpo descrito por Ahmed *et al*, 1984 é um dos principais modelos simplificados usados como referência pela indústria automotiva, principalmente no estudo de veículos do tipo *hatchback*. Sua geometria, embora simples, exhibe características aerodinâmicas análogas à de veículos reais com geometrias mais complexas [Corallo, 2015]. A formação de vórtices, esteiras e outros parâmetros comumente analisados em função do ângulo de inclinação de sua parte posterior (em inglês "*C-pillar*") em um veículo do tipo *hatchback* [Buccini, 2014] podem então ser analisadas usando um corpo de geometria bem mais simples e conseqüentemente de custos reduzidos e de fácil fabricação.

O corpo de Ahmed consiste em um longo paralelepípedo modificado. Sua parte anterior possui arestas arredondadas, de raio de curvatura elevado, constante e igual nas duas dimensões principais ortogonais à longitudinal do corpo. A parte posterior superior possui um corte oblíquo em ângulo variável porém com secção da face criada pelo mesmo constante. Quatro cilindros são dispostos para simular as rodas de um veículo.

O corpo de Ahmed pode ser visto na Figura 3.1.

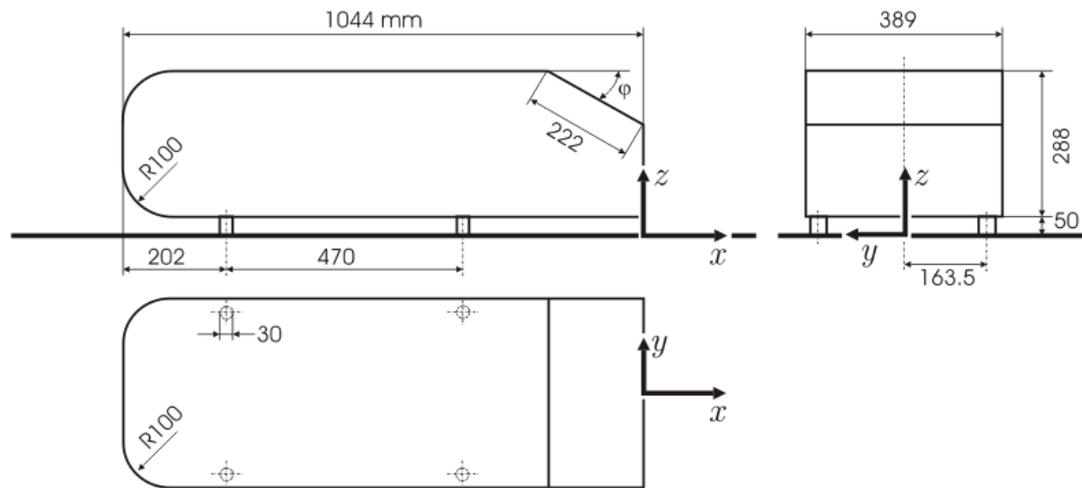


Figura 3.1 – Corpo de Ahmed

Ahmed e Ramm, 1984 e, posteriormente, Lienhart *et al.*, 2000, realizaram vários experimentos com o corpo de Ahmed, em túnel aerodinâmico e por meio de simulações numéricas para diferentes ângulos de corte e número de Reynolds. Os resultados obtidos servem de base atualmente para a comparação de diversos métodos e modelos, sejam de CFD ou de túneis de vento. O presente trabalho utilizou-se destes e outros resultados para a comparação e validação das simulações numéricas realizadas.

## 4. METODOLOGIA

### 4.1. Modelagem Matemática

O software comercial utilizado para a geração da malha assim como para a simulação em si foi o STAR-CCM+ 2011, desenvolvido pela companhia americana CD-adapco. O software utiliza-se de métodos numéricos iterativos para resolver o conjunto de equações diferenciais não lineares que regem o escoamento.

As equações que regem o sistema são as chamadas leis de conservação de momento linear e massa. O modelo usado para simplificá-las é o modelo da média de Reynolds, também conhecido como RANS (*Reynolds Average Navier-Stokes*) [Wilcox, 1998], além de considerar, devido às baixas velocidades, o escoamento incompressível. O método consiste basicamente em usar grandezas médias no tempo para anular os termos com derivadas temporais, para fazê-lo aplica-se o operador de média nos dois lados da equação original e utilizando-se de relações matemáticas conhecidas do operador reduzem-se assim termos da equação.

As equações fundamentais para a análise de escoamentos turbulentos e incompressíveis, de fluidos Newtonianos, pelo método RANS [Wilcox, 1998] são:

$$\bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = G_i + \nu \frac{\partial^2 \bar{u}_i}{\partial x_j \partial x_j} - \frac{\partial (\overline{\tilde{u}_i \tilde{u}_j})}{\partial x_j} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} \quad (4.1)$$

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (4.2)$$

sendo  $\rho$  a massa específica,  $x_i$  a variável espacial nas direções  $i = (1,2,3)$ ,  $\nu$  a viscosidade cinemática,  $\bar{u}_i$  a velocidade média nas direções  $i = (1,2,3)$ ,  $G_i$  a força de campo nas direções  $i = (1,2,3)$ ,  $\bar{p}$  a pressão média e  $\tilde{u}_i$  a flutuação temporal da velocidade nas direções  $i = (1,2,3)$ .

Como também mencionado a metodologia RANS resulta em um tensor de termos não resolvidos relacionado as flutuações da velocidade (Eq 4.1), fazendo com que o sistema tenha mais incógnitas que equações e conseqüentemente o problema de fechamento. Faz-se então necessário o uso de um modelo de turbulência e o escolhido para o presente trabalho foi a aproximação de Boussinesq (Eq. 4.3) em conjunto com o modelo  $k-\omega$  SST. O modelo selecionado é robusto e opera em condições com gradiente de pressão adverso, motivo pelo qual foi empregado. É um modelo de duas equações que utiliza um equacionamento do modelo  $k-\omega$  padrão nas regiões onde se encontra um gradiente de pressão adversa e o modelo  $k-\varepsilon$ , também de duas equações, no restante do domínio [CD-adpaco, 2016].

As equações do modelo escolhido são:

$$\overline{\tilde{u}_i \tilde{u}_j} = \nu_t \left( \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} k \delta_{ij} \quad (4.3)$$

$$S = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \quad (4.4)$$

$$\nu_t = \min \left( \frac{a^*}{\omega}, \frac{a_1}{SF_2} \right) \quad (4.5)$$

$$F_2 = \tanh \left( \left( \max \left( \frac{2\sqrt{k}}{\beta^* \omega d}, \frac{500\nu}{d^2 \omega} \right) \right)^2 \right) \quad (4.6)$$

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( [v + \sigma_k \nu_t] \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + P_k - \beta^* f_{\beta^*} (\omega k - \omega_0 k_0) + S_k \quad (4.7)$$

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \omega}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( [v + \sigma_{\omega_1} \nu_t] \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right) + P_{\omega} - \beta f_{\beta} (\omega^2 - \omega_0^2) + S_{\omega} \quad (4.8)$$

sendo  $\nu_t$  a viscosidade cinemática turbulenta,  $k$  a energia cinética turbulenta,  $\omega$  a taxa de dissipação por unidade de energia cinética turbulenta,  $\delta_{ij}$  o delta Kronecker,  $P_k$  o termo de produção de  $k$ ,  $P_{\omega}$  o termo de produção de  $\omega$ ,  $S_k$  o termo fonte de  $k$  e  $S_{\omega}$  o termo fonte de  $\omega$ . O restante consiste em constantes auxiliares a serem especificadas de acordo com o problema.

## 4.2. Modelo Numérico

As equações diferenciais que descrevem o sistema de acordo com o modelo escolhido foram resolvidas com o uso do software comercial STAR-CCM+ que por sua vez utiliza-se do método numérico iterativo dos volumes finitos [Patankar, 1980].

O método dos volumes finitos consiste em discretizar as equações que governam o sistema no tempo e espaço a fim de transformá-las em equações algébricas lineares [CD-adapco, 2011]. No caso analisado no presente trabalho o tempo não foi discretizado, devido à utilização de um modelo de turbulência em regime permanente.

As equações de conservação utilizadas, massa (continuidade), momento (em x, y e z) e as duas extras do modelo de turbulência, são integradas dentro de cada elemento do domínio discretizado [Patankar, 1980].

As integrais e derivadas são simplificadas dentro do elemento discretizado do domínio considerando-se apenas variações de ordens menores em uma expansão das funções em serie de Taylor [Patankar, 1980].

As equações são resolvidas por meio do método chamado “*segregated flow*” que resolve as equações resultantes em uma ordem sequencial. As equações não lineares são resolvidas uma após a outra de forma iterativa. O método utiliza um algoritmo que acopla pressão e velocidade de tal forma que as equações de continuidade e de conservação do momento são resolvidas por meio de uma equação de correção da pressão [CD-adapco, 2011]. O *software* comercial STAR-CCM+ utiliza-se de dois algoritmos de correlação entre pressão e velocidade: PISO e SIMPLE [CD-adapco, 2011]. O presente trabalho utilizou-se do algoritmo SIMPLE.

O método de solução acima descrito tem suas raízes em escoamentos de massa específica constante e mesmo que seja capaz de resolver escoamentos de compressibilidade não muito alta não é recomendado para casos com números de Mach ou Rayleigh elevados ou com ondas de choque [CD-adapco, 2011]. Observando que o presente trabalho utilizou um modelo de turbulência considerando o regime permanente e escoamento incompressível a escolha do método de solução é assim justificada..

### 4.3. Geometria e Domínio

O corpo de Ahmed foi escolhido devido a sua simplicidade e semelhança com um veículo terrestre real, possuindo vasta literatura e, portanto, de fácil comparação para a validação de novos métodos e técnicas. O corpo de Ahmed foi descrito pela primeira vez em Ahmed e Ramm, 1984. O modelo usado neste trabalho foi feito utilizando-se de uma ferramenta CAD e sua configuração pode ser vista na Figura 4.1 onde  $\varphi \sim 25^\circ$ .

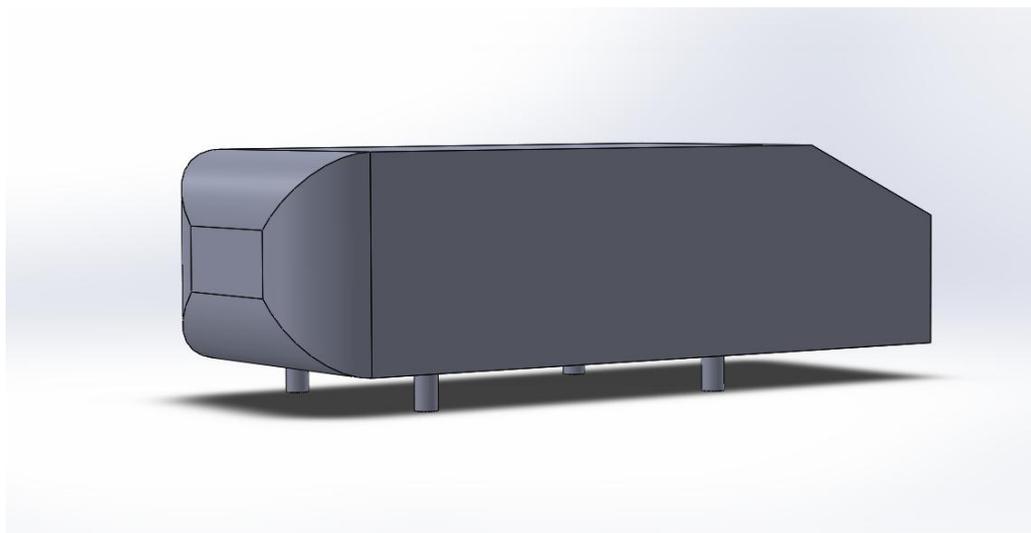


Figura 4.1 – Modelo CAD do corpo de Ahmed

O modelo criado foi seccionado no plano de simetria com o intuito de diminuir o tamanho do domínio e assim reduzir os custos computacionais.

O domínio criado para o presente trabalho foi gerado de forma análoga ao usado por Abramchuk, 2014 e Duarte, 2015 e pode ser visto na Figura 4.2:

- Entrada e saída localizadas a 5 e 15 comprimentos do veículo respectivamente, adicionado o comprimento do corpo (1040 mm) o domínio resulta em um comprimento de 16 vezes o valor do comprimento do corpo (16640 mm);
- Altura do domínio 7,5 vezes maior que altura do corpo (338 mm) resultando numa altura de 2535 mm;
- Largura do domínio 9 vezes a largura do corpo já seccionado em seu eixo de simetria (194,5 mm) resultando em largura de 1750,5 mm

A partir do modelo CAD original foi feita uma verificação topológica a fim de analisar a validade da geometria. Uma geometria para ser considerada válida não pode possuir interseções em suas superfícies e todas as suas arestas devem ser duplamente conectadas [CD-adpaco, 2016]. A geometria analisada foi considerada válida.

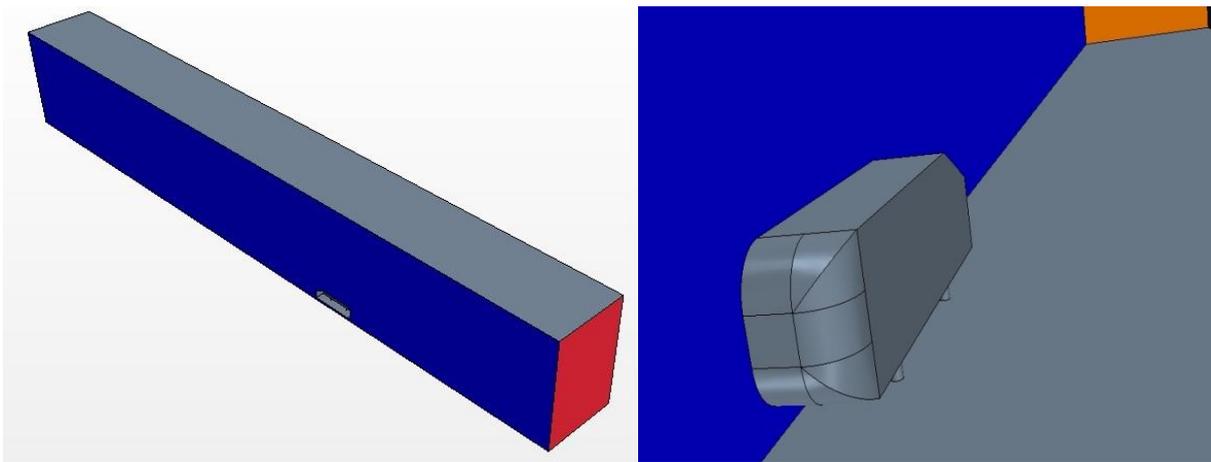


Figura 4.2 – Modelo CAD do domínio

#### 4.4. Condições de Contorno

As condições de contorno e as propriedades do fluido foram impostas de forma análoga às condições usadas por Abramchuk, 2014 e Duarte, 2015:

- Entrada de velocidade definida e saída de pressão manométrica nula ambos com intensidade de turbulência imposta em 1% e 5% respectivamente e razão de viscosidade turbulenta igual 10;
- Superfície do corpo de Ahmed com condição de não deslizamento;
- Piso com condição de não deslizamento;
- Superfície lateral e superior com condição de deslizamento e impermeabilidade;
- Plano de simetria com condição de simetria.

As propriedades do ar, fluido escolhido, foram consideradas como:

- $\rho = 1,225 \text{ kg/m}^3$
- $\mu = 1,789 \cdot 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{s}$

#### 4.5. Discretização do Domínio

O *software* comercial utilizado (STAR-CCM+) para resolver o sistema de equações diferenciais também foi utilizado para geração da malha. No presente trabalho foram utilizadas malhas com células poliédricas, geradas a partir de um malha de superfície de elementos triangulares, esta também gerada pelo mesmo *software*.

Uma vez importado o modelo CAD original do domínio a malha de superfície é gerada. A malha de superfície serve como base para a criação da malha volumétrica que, por sua vez, se utiliza dos valores base configurados como valores alvo [CD-adpaco, 2016]. Uma nova verificação topográfica é feita e após constatar-se que a malha de superfície não apresenta defeitos em sua geometria a qualidade de seus elementos é então analisada. A malha volumétrica é subseqüentemente gerada e substitui a malha de superfície, que por sua vez torna-se constituída de elementos poligonais, faces dos poliedros que constituem a malha volumétrica [Zucco, 2016].

O *software* utilizado para a criação da malha utiliza-se de algoritmos adaptáveis de convergência de células híbridas. A malha é feita aglutinando vários elementos tetraédricos em um único elemento, os elementos são dispostos pelo método “*top-down*”, ou seja, são gerados de dentro para fora, começando com a criação de elementos distantes das paredes para posteriormente serem criados elementos adjacentes que aproximam-se a cada iteração das paredes [CD-adapco, 2011].

A utilização deste algoritmo soluciona de forma satisfatória vários problemas comumente encontrados ao se gerar uma malha poliédrica, que muitas vezes levam a utilização de malhas hexaédricas mesmo em casos onde a geometria do escoamento favorece o uso de malha poliédrica. A malha poliédrica normalmente conduz à convergência dos resíduos em menos iterações e requer um menor número de elementos, porém, além dos mais variados empecilhos na sua implementação, requer mais tempo por iteração [Zucco, 2016].

Outro ponto importante ao se discretizar o domínio é o cuidado para obter-se uma malha mais fina em regiões de grande importância para o desenvolvimento do escoamento. Praticamente toda a região onde a camada limite se desenvolve é considerada importante e portanto recebe um tratamento espacial. Adicionam-se então células prismáticas nesta região, sendo que o tamanho da primeira célula, a espessura da camada e outros fatores são normalmente calculados em função do parâmetro adimensional  $y^+$  [Abramanchuk, 2014].

O presente trabalho utilizou-se das relações e técnicas utilizadas pelo *software* comercial STAR-CCM+ de tal forma que a função de parede pode ser calculada para qualquer valor de  $y^+$  (*all  $y^+$  treatment*). Uma camada de elementos prismáticos foi gerada nas proximidades das fronteiras com condição de não deslizamento, sendo que sua espessura, número de elementos e razão de crescimento foram escolhidos e mantidos constante. Os valores foram escolhidos utilizando-se como parâmetros os trabalhos realizados por Corallo *et al.*, 2015, Buccini, 2015 e Zucco, 2016.

Os valores escolhidos podem ser vistos na Tabela 4-1.

Tabela 4.1 – Parâmetros da camada prismática	
Espessura da camada prismática	10 mm
Número de camadas	14
Razão de crescimento	1.2

#### 4.6. Pós-processamento

Os valores de interesse para o presente trabalho são os coeficientes de arrasto total, viscoso e de pressão. Os coeficientes de arrasto são definidos segundo a equação 4.9.

$$c_{Dj} = \frac{\|\mathbf{F}_{Dj}\|}{\frac{1}{2}\rho A_t V_\infty^2} \quad (4.9)$$

$$\mathbf{F}_{Dtotal} = \iint_A \boldsymbol{\sigma} \cdot \mathbf{n} dA = \mathbf{F}_{Dviscoso} + \mathbf{F}_{Dpress\tilde{a}o} \quad (4.10)$$

$$\mathbf{F}_{Dviscoso} = \iint_A \mathbf{S} \cdot \mathbf{n} dA \quad (4.11)$$

$$\mathbf{F}_{Dpress\tilde{a}o} = \iint_A -p\mathbf{I} \cdot \mathbf{n} dA \quad (4.12)$$

onde  $\mathbf{F}_{Dtotal}$  é força de arrasto total,  $\mathbf{F}_{Dviscoso}$  é a força de arrasto viscosa,  $\mathbf{F}_{Dpress\tilde{a}o}$  é a força de arrasto de pressão,  $c_{Dj}$  o coeficiente de arrasto correspondente (onde  $j = total, viscoso, press\tilde{a}o$ ),  $\rho$  a massa específica do ar,  $A_t$  é a área do corpo transversal ao escoamento,  $V_\infty$  é velocidade do escoamento não perturbado,  $\boldsymbol{\sigma}$  é o tensor de tensões,  $\mathbf{S}$  é o tensor de tensões devido a efeitos viscosos,  $A$  é área de superfície do corpo,  $p$  é a pressão e  $\mathbf{I}$  é o tensor identidade.

#### 4.7. Qualidade de Malha

Como explicado previamente, uma malha com refinamento excessivo pode elevar o custo computacional da simulação para um patamar inaceitável, entretanto uma malha muito grosseira pode ocasionar erros de convergência, tornando assim a simulação inválida. Utiliza-se então o maior tamanho de malha possível sem acarretar em perdas na exatidão dos resultados, para tanto foi escolhida a técnica do índice de convergência de malha, conhecido como GCI [Roache, 1994].

A aplicação do método GCI é realizada utilizando-se das três malhas mais refinadas, sendo que a malha mais refinada é considerada como possuindo índice um (1) e a mais grosseira como índice três (3), como observado nas equações [Roache, 1994]:

$$r_{ij} = \left(\frac{N_i}{N_j}\right)^{\frac{1}{3}} \quad (4.13)$$

$$p = \frac{\ln\left(\left(\frac{r_{12}^p - 1}{r_{23}^p - 1}\right)\left(\frac{f_3 - f_2}{f_2 - f_1}\right)\right)}{\ln(r_{12})} \quad (4.14)$$

onde  $r_{ij}$  é a razão de refinamento entre duas malhas não estruturadas,  $N$  o número de células da malha,  $p$  é a ordem de convergência e  $f_i$  o parâmetro a ser analisado no método GCI.

O presente trabalho utilizou como parâmetro a ser analisado o coeficiente de arrasto total.

O método GCI extrapola um valor de  $f$  para malha de refinamento infinita, sendo o valor que o valor GCI representa o erro relativo desta malha. O resultado exato estaria portanto dentro desta faixa calculada.

$$\epsilon_{ij} = \frac{f_j - f_i}{f_i} \quad (4.14)$$

$$GCI_{ij} = \frac{F_{Seg} |\epsilon|}{r^p - 1} \quad (4.15)$$

$$f_{exato} \cong f_j + \frac{(f_i - f_j)r_{ij}^p}{r_{ij}^p - 1} \quad (4.16)$$

sendo  $\epsilon_{ij}$  o erro relativo entre duas malhas,  $F_{Seg}$  um coeficiente de segurança considerado neste trabalho igual a 1,25,  $GCI_{ij}$  o erro extrapolado para uma malha de refinamento infinito e  $f_{exato}$  o valor extrapolado para uma malha infinitamente refinada.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados elencados a seguir foram obtidos seguindo os métodos e utilizando os *softwares* acima descritos. Os valores encontrados foram, em sua maioria, reduzidos em seu número de algarismos significativos para uma melhor comparação com outros estudos também levando-se em conta a precisão do modelo.

### 5.1. Qualidade de Malha

A análise da qualidade de malha foi realizada utilizando o método GCI descrito no capítulo 4 e pode ser vista na Tabela 5.1

$f_3$	0,296
$f_2$	0,299
$f_1$	0,300
$GCI_{12}$	0,00208333
$f_{exato}$	0,3005

Com base nos resultados da Tabela 5.1 pode-se constatar que o valor obtido na malha de maior refinamento é muito próximo do valor extrapolado para uma malha de refinamento infinito e encontra-se também dentro da margem de erro calculada.

O gráfico contido na Figura 5.1 mostra como o caso simulado possui independência de malha, apresentando resultados concisos mesmo com malhas com número de elementos inferior a 400.000 elementos.

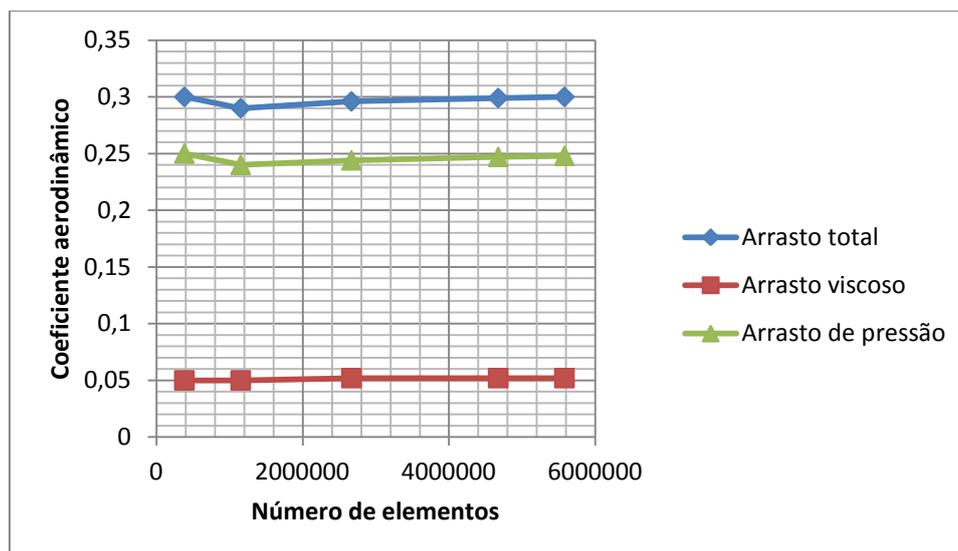


Figura 5.1 – Coeficientes aerodinâmicos em função

Faz-se importante notar também que os dois primeiros casos simulados, os que possuem malhas mais grosseiras, não foram obtidos com a mesma configuração dos últimos três casos. Durante a realização do trabalho a fim de reduzir a ordem de magnitude dos resíduos, os quais foram considerados inaceitáveis, a malha foi refinada nas regiões consideradas críticas. Logo os primeiros casos têm não somente uma malha mais grosseira como menor detalhamento nas proximidades do corpo e um resíduo em algumas ordens de grandeza acima do aceitável. Estas duas malhas não foram, portanto consideradas na aplicação do método GCI. Pode-se ver, contudo, que o coeficiente de arrasto mantém-se praticamente inalterado.

## 5.2. Coeficientes Aerodinâmicos e Perfis de Velocidade

Os resultados obtidos precisaram ser validados antes de serem analisados, para tanto foram utilizados dois critérios: controle dos resíduos e dos coeficientes aerodinâmicos.

Os resíduos para serem considerados válidos devem ser da ordem de grandeza menor que  $10^{-5}$  e apresentarem valores estáveis nas subseqüentes iterações. Devido à complexidade da geometria envolvida e fatores transientes não analisados, entre outros, o resíduo da equação da intensidade de turbulência, conhecido como Tdk, não atingiu a ordem de grandeza desejada, entretanto o valor apresentou-se estável e devido ao controle feito em paralelo dos coeficientes de arrasto e ter um valor não muito superior ( $\sim 10^{-4}$ ) foi considerado como válido.

Os coeficientes de arrasto, além de apresentarem valores concisos mesmo em malhas grosseiras, nas quais o resíduo foi considerado inaceitável, mostraram-se estáveis após poucas iterações. O valor obtido para o coeficiente de arrasto viscoso mostrou-se estável com variações menores que  $10^{-5}$ . O valor apresentado na tabela 5.2 foi considerado como o valor médio do coeficiente de arrasto viscoso. O valor obtido para o coeficiente de arrasto de pressão, e conseqüentemente o arrasto total, mostrou-se estável, porém oscilando com uma amplitude de três milésimos, o valor apresentado na Tabela 5.2 foi considerado como o valor médio do coeficiente de arrasto de pressão.

Os coeficientes aerodinâmicos encontrados são apresentados na Tabela 5.2

Arrasto total	0,300
Arrasto viscoso	0,052
Arrasto de pressão	0,248

Foram também analisados os perfis de velocidade mostrados nas Figuras 5.2, 5.3, 5.4 e 5.5.

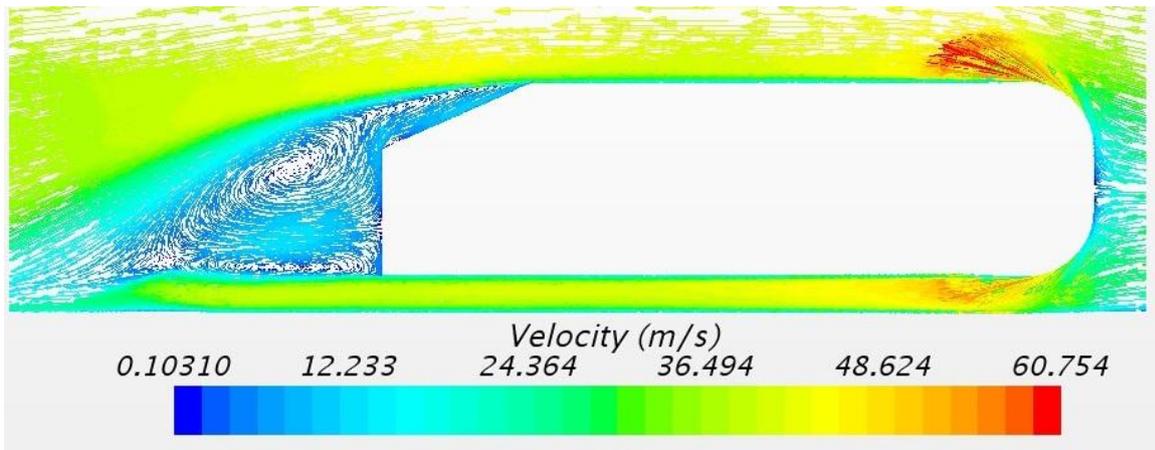


Figura 5.2 – Perfil de velocidade com representação vetorial no plano de simetria

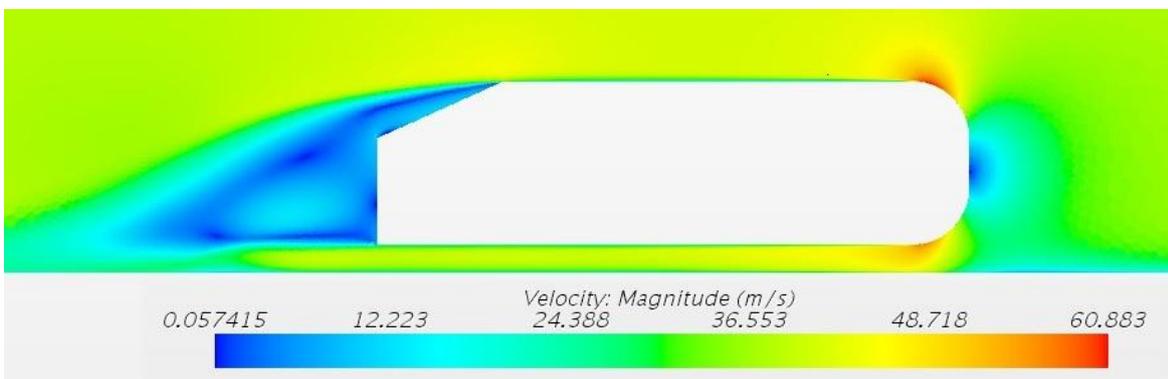


Figura 5.3 – Perfil de velocidade com representação escalar no plano de simetria

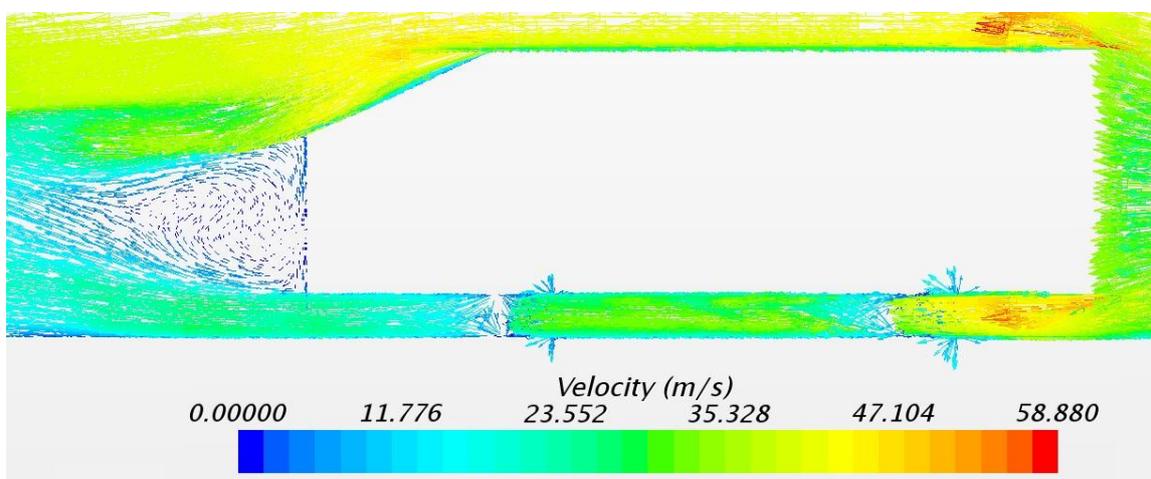


Figura 5.4 – Perfil de velocidade com representação vetorial no plano que contém o centro dos cilindros.

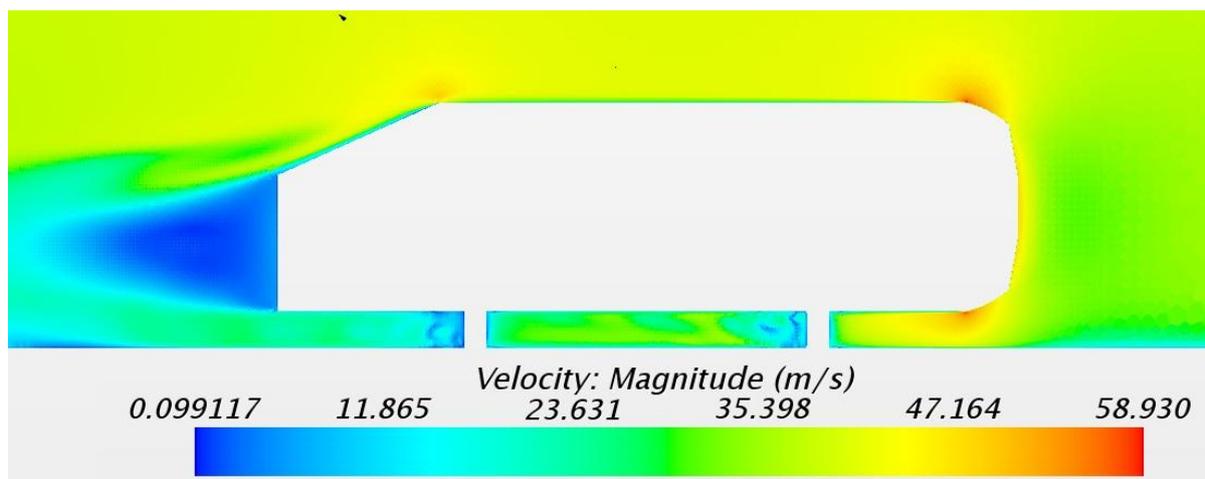


Figura 5.5 – Perfil de velocidade com representação escalar no plano que contém o centro dos cilindros

Foram considerados, analisados e comparados somente os resultados obtidos pela malha mais refinada.

### 5.3. Discussão dos Resultados frente a Outros Estudos

Os resultados obtidos no presente trabalho foram comparados com outros já encontrados na literatura. A Tabela 5.3 apresenta os resultados encontrados por outros estudos. Os estudos onde foram empregados mais de um método foram diferenciados com a mesma nomenclatura utilizada pelo autor em seu artigo original.

Tabela 5.3 – Comparação dos resultados encontrados frente a outros estudos

Caso	Tipo de malha	Numero de elementos	Arrasto total	Arrasto viscoso	Arrasto de pressão
Ahmed, F.R. 1984	Experimental		0,29	0,05	0,24
Corallo, M. 2015	Poliédrica	~22.000.000	0,32	0,06	0,26
Liu, Y. 2003 $k-\varepsilon+WF$	Hexaédrica	~460.000	0,242		
Liu, Y. 2003 $k-\varepsilon-\nu^2$	Hexaédrica	~460.000	0,264		
Liu, Y. 2003 SSG	Hexaédrica	~460.000	0,210		
Liu, Y. 2003 RSM	Hexaédrica	~460.000	0,282		
Liu, Y. 2003 SST	Hexaédrica	~460.000	0,241		

A Tabela 5.3 mostra que os resultados encontrados neste trabalho são condizentes com outros encontrados na literatura. Considerando-se o estudo original feito por Ahmed e Ramm, 1984 como valor real, o presente trabalho apresentou resultados com erro não superior a 4%. Os resultados obtidos por Corallo *et al.*, 2015 apresentaram uma discrepância maior, porém baixa também. A diferença relativa entre o arrasto viscoso foi superior a todas as outras, todavia o valor apresentado por Corallo *et al.*, 2015 apresenta seus coeficientes arredondados nos centésimos, seja por instabilidade no resultado, opção do autor ou outro motivo, e avaliando-se que os dois resultados são arredondados nos centésimos vê-se uma diferença mínima, a menor possível inclusive, mas como os valores por si são baixos qualquer diferença absoluta acarreta em um diferença relativa grande.

A Tabela 5.4 mostra a comparação feita com os estudos realizados por Ahmed e Ramm, 1984 e Corallo *et al.*, 2015 visto que são os estudos que também analisaram separadamente as contribuições do arrasto de pressão e viscoso.

Tabela 5.4 – Diferença percentual entre estudos			
Diferença percentual entre os coeficientes de arrasto encontrados			
Estudo	Total	Viscoso	Pressão
Ahmed, 1984	3,45%	4%	3,33%
Corallo, 2015	-6,25%	-13%	-4,62%

Os valores da Tabela 5.4 foram calculados considerando o valor dos outros estudos como base de referimento.

Os perfis de velocidades encontrados estão de acordo com o esperado. A formação de dois vórtices na parte posterior no plano de simetria concorda com resultados apresentados por Lienhart *et al.*, 2000 e Liu *et al.*, 2003. O ponto de estagnação, a formação da esteira assim como as regiões que apresentam as maiores velocidades também estão conforme o esperado [Lienhart, 2000].

O perfil de velocidades obtido por Liu e Moser, 2003 pode ser visto na Figura 5.6

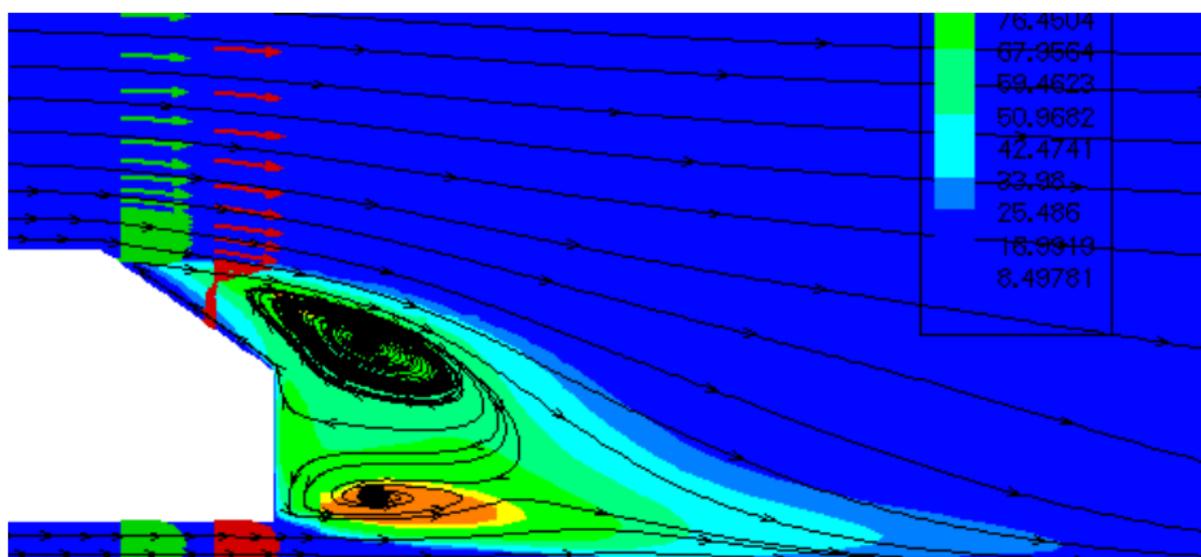


Figura 5.6 – Formação de vórtices na parte posterior no plano de simetria encontrados em outros estudos. (Fonte: Liu e Moser, 2003).

Comparando-se o tipo de malha utilizada no presente trabalho com os outros tipos usados nos estudos anteriormente descritos pode-se constatar que as malhas do tipo hexaédricas apresentaram resultados mais distantes do originalmente medido por Ahmed e Ramm, 1984. A malha utilizada por Corallo *et al.*, 2015, embora também poliédrica e com quase quatro vezes mais elementos, não apresentou resultados melhores que as usadas no presente trabalho.

As simulações realizadas por Liu e Moser, 2003 foram feitas em malhas estruturadas e com menos de meio milhão de elementos. Considerando que estas simulações foram efetuadas 12 anos antes que as realizadas por Corallo *et al.*, 2015 e 14 anos antes que as realizadas neste trabalho pode-se hipotetizar que o fator tecnológico pode ter sido principal motivo da melhoria dos resultados, ao invés do tipo de malha. Faz-se atenção, porém ao fato que mesmo na malha de 400.000 elementos o presente trabalho obteve resultados significativamente melhores que os encontrados tanto por Liu e Moser, 2003 quanto por Corallo *et al.*, 2015.

## 6. CONCLUSÕES

Neste trabalho foi realizado um estudo sobre os coeficientes aerodinâmicos, de arrasto, em um corpo de Ahmed, corpo simplificado de um veículo terrestre do tipo “hatchback”, por meio de simulações numéricas aplicando-se um modelo de turbulência de duas equações, RANS  $k-\omega$  SST. As equações de continuidade, de conservação de momento e as duas equações adicionais provenientes do modelo de turbulência escolhido foram resolvidas com o uso de um software comercial, STAR-CCM+, que por sua vez emprega o método numérico iterativo dos volumes finitos com aproximações de segunda ordem utilizando o “*segregated flow*”. As simulações foram realizadas em malhas poliédricas, sendo que a de maior refino possuía cerca de 5,6 milhões de elementos.

O corpo de Ahmed foi modelado por meio de uma ferramenta CAD e simplificado devido a sua simetria em apenas uma de suas metades. As regiões consideradas críticas para o escoamento foram designadas como regiões onde a malha seria refinada. As zonas próximas às superfícies as quais foram atribuídas como condição de contorno a condição de parede sem deslizamento foram designadas como regiões onde seria gerada a camada prismática.

Foi obtida uma boa independência de malha, com resultados apresentando uma variação muito pequena nos seus respectivos coeficientes de arrasto total, viscoso e de pressão. O presente trabalho realizou também uma extrapolação para resultados com malha de refino infinito assim como seu respectivo erro, o método GCI.

Fez-se, por último, uma comparação com outros estudos encontrados na literatura, incluindo o estudo original realizado por Ahmed *et al*, 1984. Os resultados obtidos no presente trabalho apresentaram valores próximos aos encontrados em literatura. Os valores encontrados na literatura apresentam uma grande variação e não raramente não contém informações sobre o ângulo de inclinação de sua parte posterior, o “*C-pillar*”, o que pode explicar a discrepância entre os resultados encontrados. Os outros estudos foram realizados com um intervalo de tempo considerável (12 anos), algo que também pode contribuir para a dispersão dos valores obtidos.

Ao fazer-se uma breve análise sobre os tipos de malha utilizadas nas simulações constata-se uma tendência ao uso de malhas não estruturadas, principalmente de malhas poliédricas, devido à geometria do sistema. As malhas poliédricas apresentaram em média resultados mais satisfatórios que as hexaédricas. O padrão de malha poliédrica empregada neste trabalho também mostrou-se superior, obtendo resultados mais precisos que uma malha do mesmo tipo e com quase quatro vezes mais elementos.

A metodologia utilizada neste trabalho mostrou-se apropriada para simular o caso tratado, obtendo inclusive um resultado melhor que o encontrado por Liu *et al*, 2003, o qual também utilizou o modelo de turbulência RANS  $k-\omega$  SST. O presente trabalho também obteve um resultado mais satisfatório que o obtido por Corallo *et al.*, 2015, que, além de também utilizar o modelo de RANS  $k-\omega$  SST, usou também uma malha do tipo poliédrica e com quase quatro vezes mais elementos. Como sugestão para trabalhos futuros, propõe-se que sejam realizadas simulações com outros parâmetros, variando-se o número de Reynolds e ângulo de inclinação da parte posterior, além do uso de outros modelos de turbulência, métodos numéricos (como o “*coupled flow*”) e com o uso de um modelo inteiro sem ser seccionado em seu plano de simetria, além de um estudo sobre a influência do tipo de malha no resultado. Faz-se também a sugestão de um trabalho experimental em túnel de vento.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Abramchuk, V. “**Estudo de força de arrasto sobre veículos de transporte de pessoas empregando CFD**”. Dissertação de mestrado em engenharia mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2014.

Ahmed, S.R. and Ramm G. “**Some Salient Features of the Time-Averaged Ground Vehicle Wake**”. SAE-Paper 840300, 1984.

Buccini, G. “**Valutazione Numerico Sperimentale delle Caratteristiche Aerodinamiche di un Veicolo Hath-Back**”, Master degree thesis, Politecnico di Torino, 2014.

CD-adapco “**STAR-CCM+ User Guide**”, 2011.

Corallo, M.; Sheridan, J.; Thompson, M.C. “**Effects of aspect ratio on the near-wake flow structure of an Ahmed body**”, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol 147, 2015, p. 95-103.

Davidson, D. “**The role of computational fluid dynamics in process industries**”. In: Frontiers of Engineering: Reports on Leading-Edge Engineering from the 2002 NAE Symposium on Frontiers of Engineering. National Academies Press, 2003. p. 21.

Duarte, F.L. “**Análise das forças aerodinâmicas sobre um veículo de competição empregando CFD**” Trabalho de conclusão de curso em engenharia mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2015.

Menter, F.R. “**Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications**”. AIAA-Journal, 328, p. 269-289, 1994.

Lienhart H.; Stoots C.; Becker S. “**Flow and turbulence structures on the wake of a simplified car model (Ahmed model)**”, DGLR Fach. Symp. der AG ATAB, Stuttgart University, 2000.

Liu, Y.; and Moser, A. “**Numerical modeling of airflow over the Ahmed body**”, Proceedings of CFD2003, Cana, V2, P507-512,2003

Patankar, S. “**Numerical Heat Transfer and Fluid Flow**”, ISBN, 0-89116-522-3, 1980.

Roache, P. J. “**Perspective: A Method for Uniform Reporting of Grid Refinement Studies**”, Journal of Fluid Engineering, v. 116, p. 405-413, 1994

Wilcox, D.C. “**Turbulence Models for CFD**”, DCW Industries, Inc., 1998

Zucco, G.R. “**CFD Improvements Analysis: form RANS to DES simulations**”, Master degree thesis, Politecnico di Torino, 2015.