



FCTUC FACULDADE DE CIÊNCIAS
E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE COIMBRA

DEPARTAMENTO DE
ENGENHARIA MECÂNICA



Avaliação do desempenho de um código de simulação numérica de escoamentos em coordenadas generalizadas

Dissertação apresentada para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia
Mecânica na Especialidade de Energia e Ambiente

Autor

João Vitor Baptista da Costa

Júri

Presidente: Prof. Doutor Pedro de Figueiredo Vieira Carvalheira

Orientador: Prof. Doutor António Manuel Gameiro Lopes

Vogal: Prof. Doutor José Joaquim da Costa

Coimbra, Setembro, 2010

Agradecimentos

O trabalho que aqui se apresenta só foi possível graças à colaboração e apoio de algumas pessoas, às quais não posso deixar de prestar o meu reconhecimento e o meu agradecimento, embora seja impossível agradecer a todos que contribuíram de uma forma directa ou indirecta para a realização deste trabalho, gostava de agradecer em particular:

Ao Senhor Professor Doutor António Manuel Gameiro Lopes pela dedicação na orientação, pela paciência, pela disponibilidade constante e pela confiança que em mim depositou.

À minha família especialmente aos meus pais e ao meu irmão por todo o apoio prestado durante o meu percurso.

A todos os meus amigos pelos bons momentos passados, pela ajuda nos momentos menos bons e especialmente pela amizade.

À Sandra por TUDO...

A todos, o meu **MUITO OBRIGADO**

Resumo

O presente trabalho visa avaliar o desempenho do código “EasyCFD_G”, para a simulação numérica de escoamentos em coordenadas generalizadas. O objectivo é avaliar o desempenho deste software para diversas situações de teste em confronto com soluções conhecidas. Pretende-se, assim, estabelecer limites de utilização e zonas de fiabilidade, em conjugação com as características das malhas usadas, particularmente o seu grau de enviesamento e refinamento.

O código “EasyCFD_G” foi desenvolvido pelo Professor Doutor António Manuel Gameiro Lopes, e permite o estudo de escoamentos em duas dimensões de diversos fluidos em torno de superfícies curvas ou planas de sólidos de diferentes materiais. Esta segunda versão tem como novidade, relativamente à primeira versão, a utilização de coordenadas generalizadas.

A primeira fase do trabalho consistiu na pesquisa bibliográfica e uma pesquisa online para um levantamento de problemas possíveis de serem utilizados como casos de teste. Foram encontrados diversos problemas que podiam ser usados como teste ao código.

Como a novidade do código relativamente à primeira versão é a utilização de superfícies curvas, o trabalho foi realizado fazendo simulações sobre superfícies curvas, mais propriamente o escoamento sobre um cilindro, escoamento sobre perfil alar e a convecção natural sobre superfícies curvas.

A segunda fase do trabalho consistiu na simulação de casos diversos. Para cada caso foram feitos estudos de dependência de malha, alterando a resolução da mesma e o seu grau de enviesamento, tendo sido analisados os resultados para diversos valores de parâmetros que governem o problema, como o número de Reynolds, Nusselt e Prandtl.

Palavras-chave: Código, Simulação Numérica, Escoamentos, Convecção Natural, Superfícies Curvas, Cilindro, Enviesamento, CFD, EasyCFD_G.

Abstract

The present work aims to evaluate the performance of the code "EasyCFD_G", for the numerical simulation of flows in generalized coordinates. The objective is to evaluate the performance of this software for several test cases in comparison with known solutions. The aim is thus to establish limits on use and areas of reliability, in conjunction with the characteristics of the meshes used particularly the degree of skewness and refinement.

The code "EasyCFD_G" was developed by Prof. António Manuel Gameiro Lopes, and it allows the study of two-dimensional flows of various fluids around curved or straight surfaces of different materials. This second version has the novelty, in relation to the first version, of the use of generalized coordinates.

The first phase of work is the literature search and an online search for a survey of possible problems to be used as test cases; several problems were found that could be used to test the code.

As the novelty of the code in relation to the first version is the use of curved surfaces, the work was done by doing simulations on curved surfaces more properly the flow over a cylinder, flow over aerofoil and natural convection on curved surfaces.

The second phase of work is the simulation of different cases. For every case, studies were made of mesh dependence, changing the resolution and the same degree of skewness, delivering results for various values of parameters that govern the problem, as the Reynolds number, Nusselt and Prandtl.

Keywords CFD, Code, Simulation, Flows, Natural Convection, Aerofoil, Curved Surfaces, Cylinder, Skewness.

Índice

Índice de Figuras	v
Simbologia.....	vi
1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1. Introdução ao Código.....	2
2. PESQUISA BIBLIOGRÁFICA	7
2.1. Cilindro	7
2.2. Perfil alar.....	8
2.3. Convecção natural.....	10
3. CASOS DE ESTUDO	12
3.1. Cilindro	12
3.2. Perfil alar.....	15
3.3. Convecção natural.....	18
4. ANÁLISE E DISCUSSÃO DE RESULTADOS	21
4.1. Cilindro	21
4.2. Perfil alar.....	28
4.3. Convecção natural.....	34
5. CONCLUSÕES	39
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	40

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 – EasyCFD_G: Geometria	2
Figura 2 – EasyCFD_G: Malha	3
Figura 3 – EasyCFD_G: Física.....	3
Figura 4 – EasyCFD_G: Condições de Fronteira.....	4
Figura 5 – EasyCFD_G: Parâmetros de Cálculo	4
Figura 6 – EasyCFD_G: Inicialização.....	5
Figura 7 – EasyCFD_G: Cálculo.....	5
Figura 8 – EasyCFD_G: Pós-Processamento, Contornos	6
Figura 9 – EasyCFD_G: Pós-Processamento, Valores.....	6
Figura 10 - Perfil alar.....	8
Figura 11 - Convecção natural	10
Figura 12 - Escoamento em torno de um cilindro	12
Figura 13 – Gráfico Cd - Rey	13
Figura 14 - Gráfico α - Cd	15
Figura 15 - Gráfico α - CL	16
Figura 16 - Elipse inserida na circunferência	18
Figura 17 - Gráfico coeficiente de arrasto experimental	21
Figura 18 - Malha 1 do cilindro.....	22
Figura 19 - Malha 2 do cilindro.....	22
Figura 20 - Malha 3 do cilindro.....	23
Figura 21 - Resultados obtidos da malha 1,2 e 3.....	24
Figura 22 - Malha 4 do cilindro.....	25
Figura 23 - Malha 5 do cilindro.....	25
Figura 24 - Malha 6 do cilindro.....	26
Figura 25 - Resultados obtidos da malha 4,5 e 6.....	27
Figura 26 - Gráfico dos valores experimentais de C_L	28
Figura 27 – Gráfico dos valores experimentais de C_d	29
Figura 28 - Malha 1 do perfil alar.....	30
Figura 29 - Valores de CL da malha 1	30
Figura 30 – Valores de Cd da malha 1	31
Figura 31 - Malha 2 do perfil alar.....	32
Figura 32 - Malha 3 do perfil alar.....	32
Figura 33 - Resultados da malha 1 e malha 2.....	33
Figura 34 - Gráfico Nu – α	34
Figura 35 - Malha do cilindro – elipse	35
Figura 36 - Resultados obtidos para Ra = 1.12e7	36
Figura 37 - Resultados obtidos para Ra = 1.90e7	36
Figura 38 - Resultados obtidos para Ra = 3.40e7	37
Figura 39 - Resultados obtidos para Ra = 4.92e7	37
Figura 40 – Variação do número de Nusselt	38

SIMBOLOGIA

a - Aceleração	[m/s ²]
A - Área	[m ²]
Cd- Coeficiente de arrasto	
CFD - Computational Fluid Dynamics (Dinâmica dos Fluidos Computacional)	
CL- Coeficiente de sustentação	
Cp - Calor específico	[J/(kg K)]
F - Força	[N]
g - Aceleração da gravidade	[m ² /s]
Gr - Número de Grashof	
h - Coeficiente de convecção	[W/(m ² K)]
Kf - Condutividade térmica	[W/(mK)]
L - Comprimento	[m]
m - Massa	[kg]
NACA - National Advisory Committee for Aeronautics (Comité Nacional de Aconselhamento para Aeronáutica)	
Nu- Número de Nusselt	
Pr – Número de Prandtl	
Ra - Número de Rayleigh	
Re – Número de Reynolds	
T - Temperatura	[°C]
V- Velocidade	[m/s]
α - Difusividade térmica	[m ² /s]
β - Coeficiente de expansão volúmica	[1/°C]
μ – Viscosidade dinâmica	[(N s)/ m ²]
ν - Viscosidade cinemática	[m ² /s]
ρ - Massa volúmica	[kg/m ³]

1. INTRODUÇÃO

O presente trabalho insere-se na tese final de curso do Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra.

O tema proposto para investigação, neste trabalho, é “Avaliação do desempenho de um código de simulação numérica de escoamentos em coordenadas generalizadas.”

O código em estudo denomina-se por EasyCFD_G e foi desenvolvido pelo Professor Doutor António Manuel Gameiro Lopes. O código realiza simulações numéricas de escoamentos em coordenadas generalizadas, isto é, realiza simulações de escoamentos em duas dimensões de diversos fluidos sobre superfícies curvas ou planas.

Especificando, um fluido é uma substância que se deforma continuamente quando submetida a uma tensão de corte ou a forças tangenciais, por mais pequenas que estas possam ser. Os fluidos partilham a propriedade de não resistir à deformação e apresentam a capacidade de fluir. Estas propriedades resultam da sua incapacidade de suportar uma tensão de corte em equilíbrio estático.

Na abordagem do trabalho consideram-se diferentes etapas, tendo como objectivo dividir o estudo e apresentar resultados de uma forma organizada e consistente.

Como tal, a sua estrutura divide-se em três etapas:

- Pesquisa bibliográfica para um levantamento de problemas possíveis de ser utilizados como casos de teste;
- Familiarização com o código;
- Simulação de casos diversos e, para cada caso:
 - Fazer estudos de dependência de malha, alterando a resolução da mesma e o seu grau de enviesamento;
 - Obter resultados para diversos valores de parâmetros que governem o problema.

Este relatório encontra-se dividido em seis partes. O primeiro capítulo apresenta uma primeira parte introdutória ao trabalho e uma segunda parte referente ao código.

No segundo capítulo é feita referência a pesquisa bibliográfica de estudos que foram base de teste ao código.

No terceiro capítulo é descrita como foi feita a abordagem para cada tipo de problemas em estudo.

O capítulo quatro é totalmente dedicado à análise e discussão dos resultados obtidos.

Por fim, no capítulo cinco, é apresentada uma discussão geral de todos os aspectos do trabalho, assim como a análise dos resultados obtidos, expondo as conclusões mais relevantes obtidas na realização deste trabalho.

No capítulo seis apresenta-se toda a bibliografia utilizada para a realização do trabalho.

1.1. Introdução ao Código

O EasyCFD_G é um código de simulação numérica de escoamentos de fluidos bidimensionais sobre superfícies curvas ou planas.

O código suporta situações de escoamento laminar ou turbulento, regime estacionário ou transiente, considerando os efeitos térmicos, com condução em sólidos e transferência de calor conjugada, transporte de escalares passivos e escoamentos multicomponente.

No presente capítulo vai ser feita uma introdução ao código para uma melhor compreensão das suas funcionalidades.

Para resolver um problema através do EasyCFD_G, devemos prosseguir as seguintes etapas:

- 1) **Construção da Geometria:** a construção da geometria do problema, como o próprio nome indica, é a construção de toda a geometria do nosso problema através de diferentes comandos, como se pode observar na figura 1.

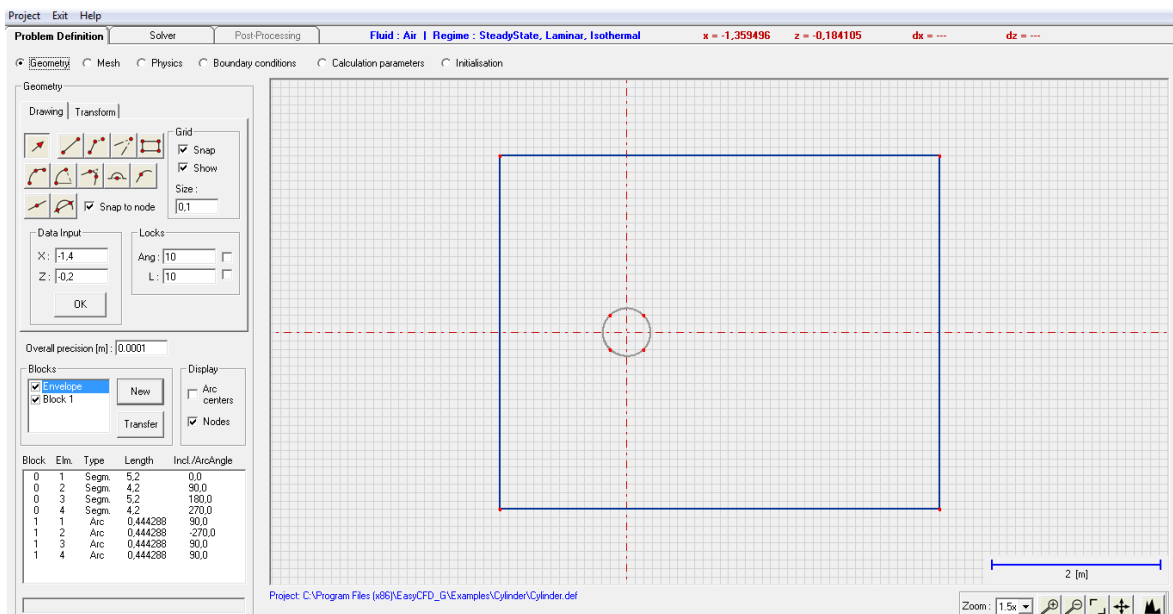


Figura 1 – EasyCFD_G: Geometria

- 2) **Malha:** nesta etapa podemos construir malhas pouco ou muitas refinadas alterando o número de pontos, o espaçamento entre si e a posição dos blocos no domínio computacional, como se verifica na figura 2.

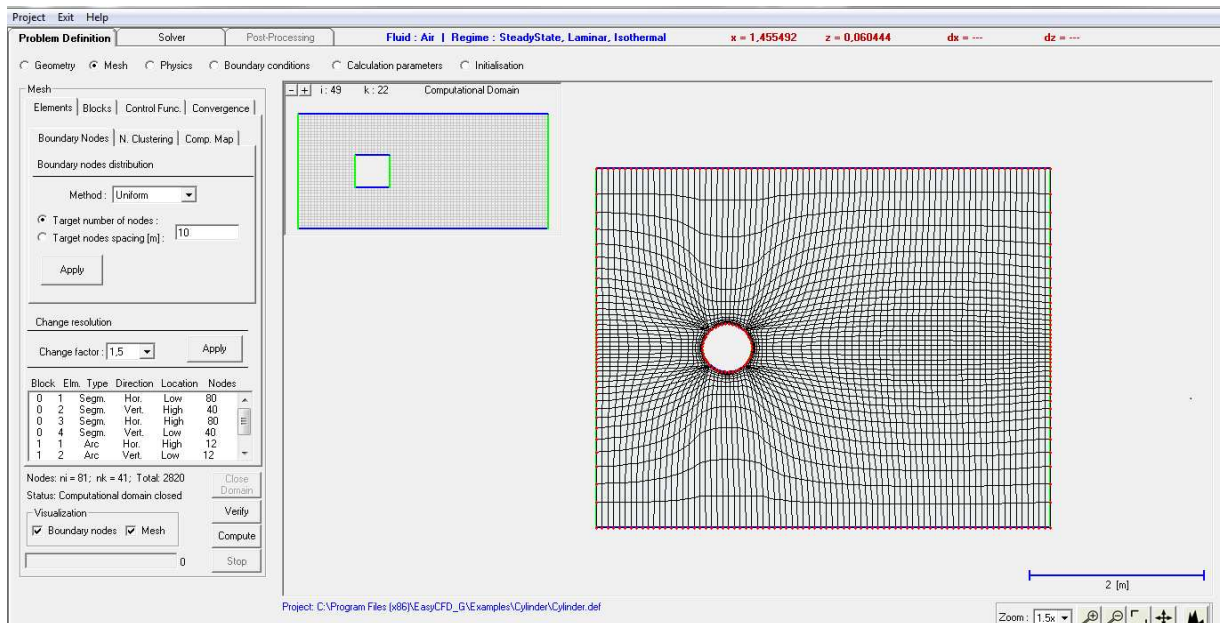


Figura 2 – EasyCFD_G: Malha

- 3) **Física do Problema:** para se estabelecer a física do nosso problema temos de definir o fluido que vai ser usado, assim como o sólido, o regime (se é estacionário ou transiente), escoamento laminar ou turbulento e os efeitos térmicos, como se observa na figura 3.

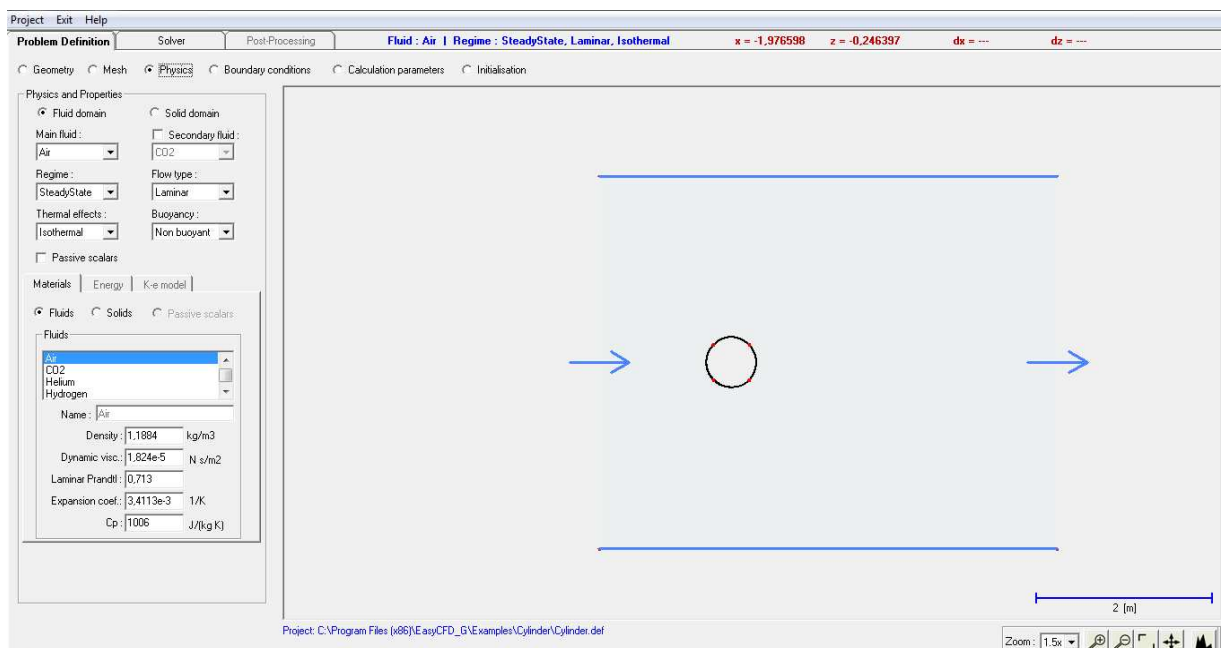


Figura 3 – EasyCFD_G: Física

- 4) **Condições de Fronteira:** as condições de fronteira podem ser uma temperatura imposta, a entrada do fluido com uma determinada velocidade, a saída do fluido, paredes, e se um objecto é vazio, permeável ou sólido, etc.

A definição das condições de fronteira no código pode ser observada na figura 4.

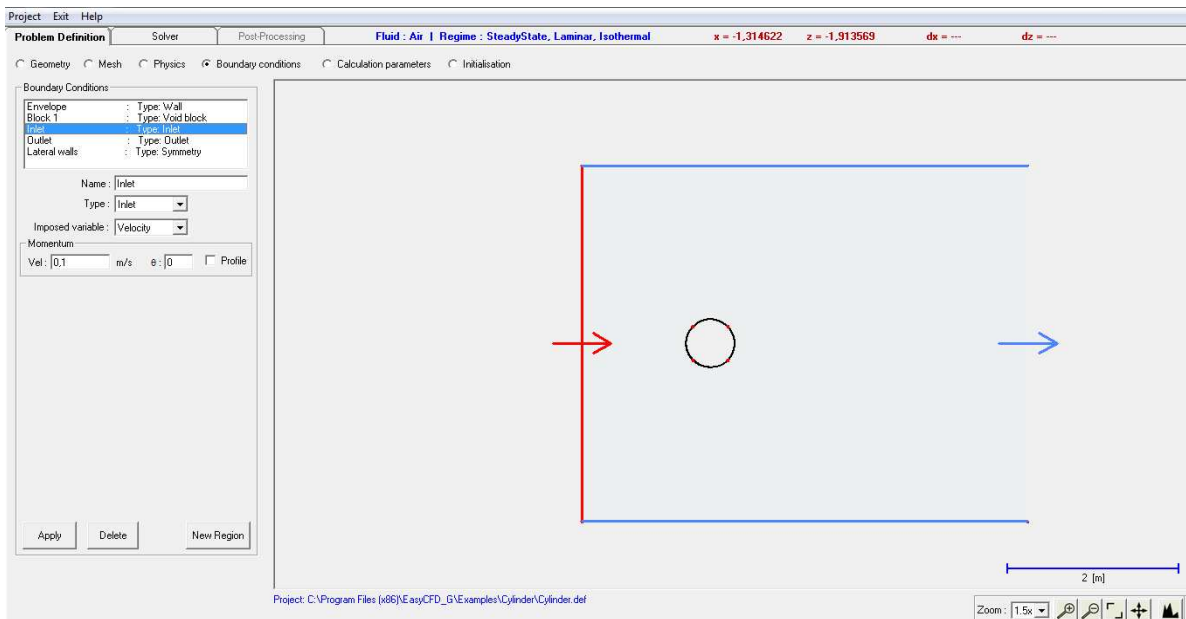


Figura 4 – EasyCFD_G: Condições de Fronteira

- 5) **Parâmetros de Cálculo:** a definição dos parâmetros de cálculo passa por estabelecer o número máximo de iterações, o resíduo máximo e a definição de outros parâmetros, como pode ser observado na figura 5.

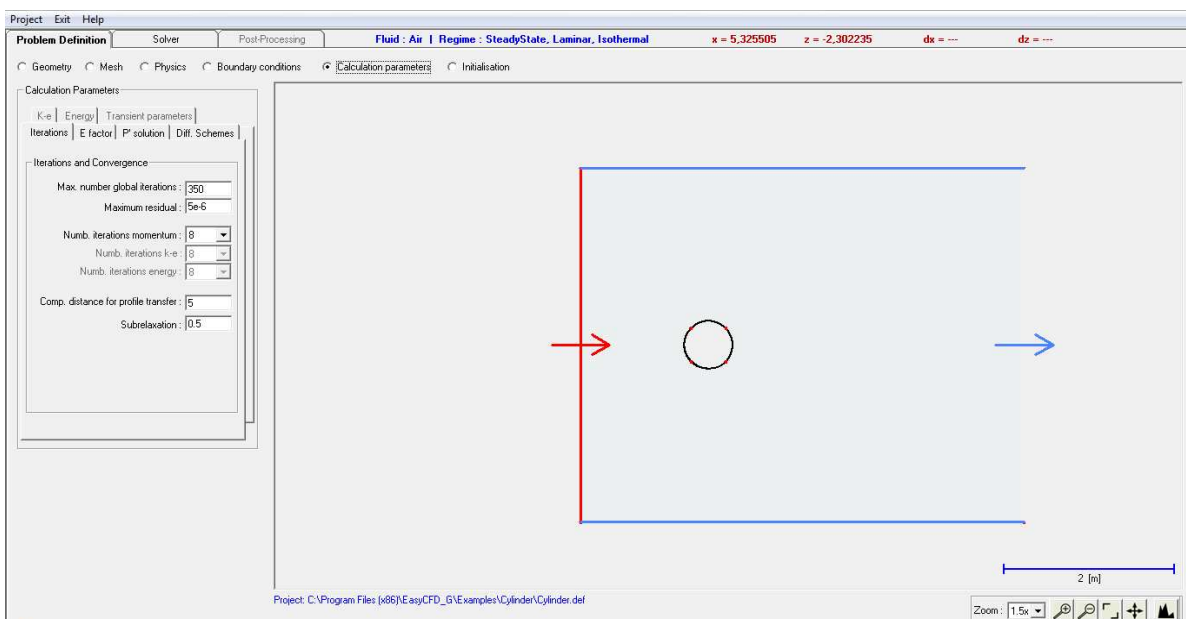


Figura 5 – EasyCFD_G: Parâmetros de Cálculo

6) **Inicialização:** esta etapa serve para definir velocidades, assim como temperaturas iniciais do domínio de cálculo, como se verifica na figura 6.

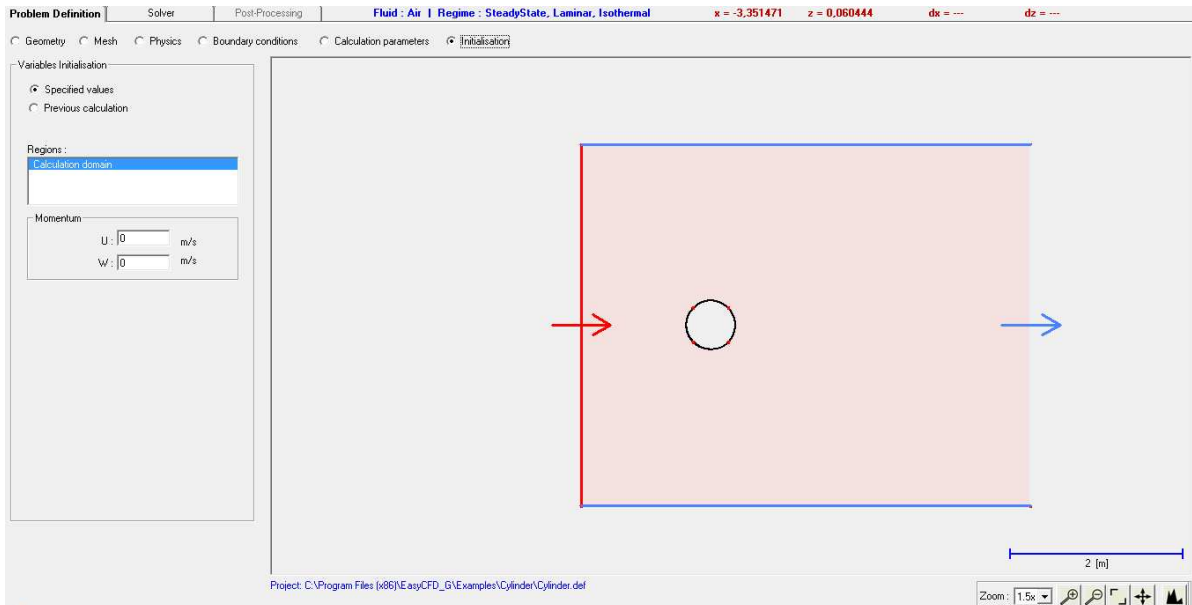


Figura 6 – EasyCFD_G: Inicialização

7) **Cálculo:** à medida que o código realiza o cálculo das diferentes equações, pode-se visualizar a variação dos resíduos assim como as linhas de contorno do campo de velocidades, como se observa na figura 7.

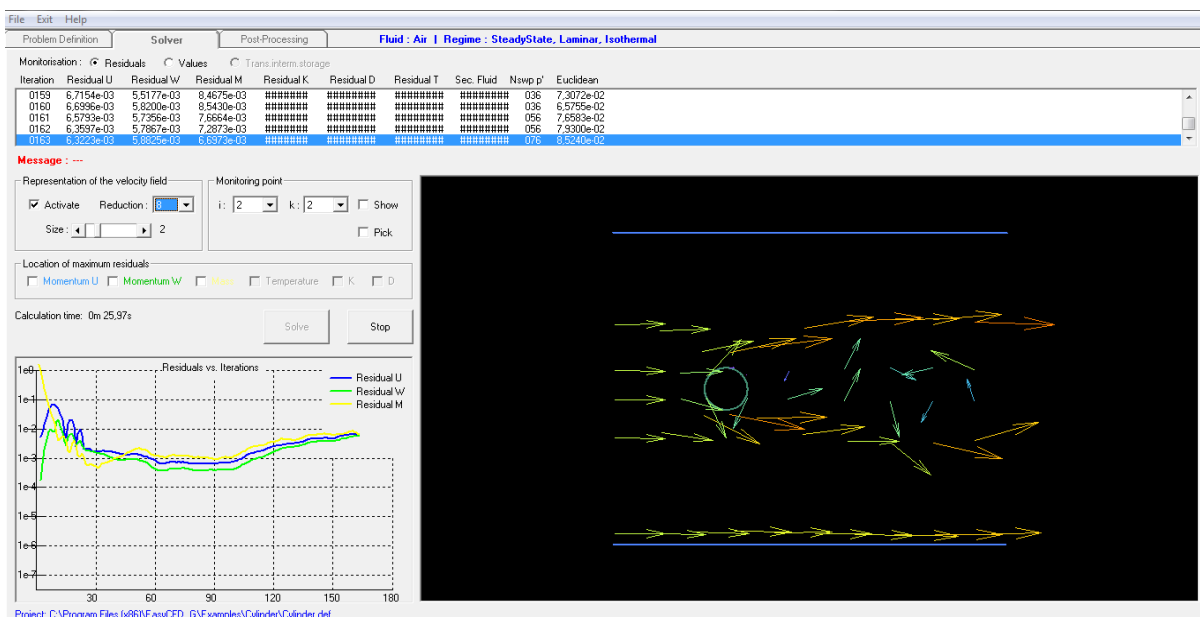


Figura 7 – EasyCFD_G: Cálculo

- 8) Pós-Processamento:** nesta etapa final podemos visualizar todos os resultados obtidos após o cálculo, isto é, podemos visualizar as linhas de contorno do campo de velocidade, temperatura, pressão, fluxo de calor etc. A visualização dos contornos pode ser observada na figura 8.
Ou podemos obter os seus valores como representado na figura 9.

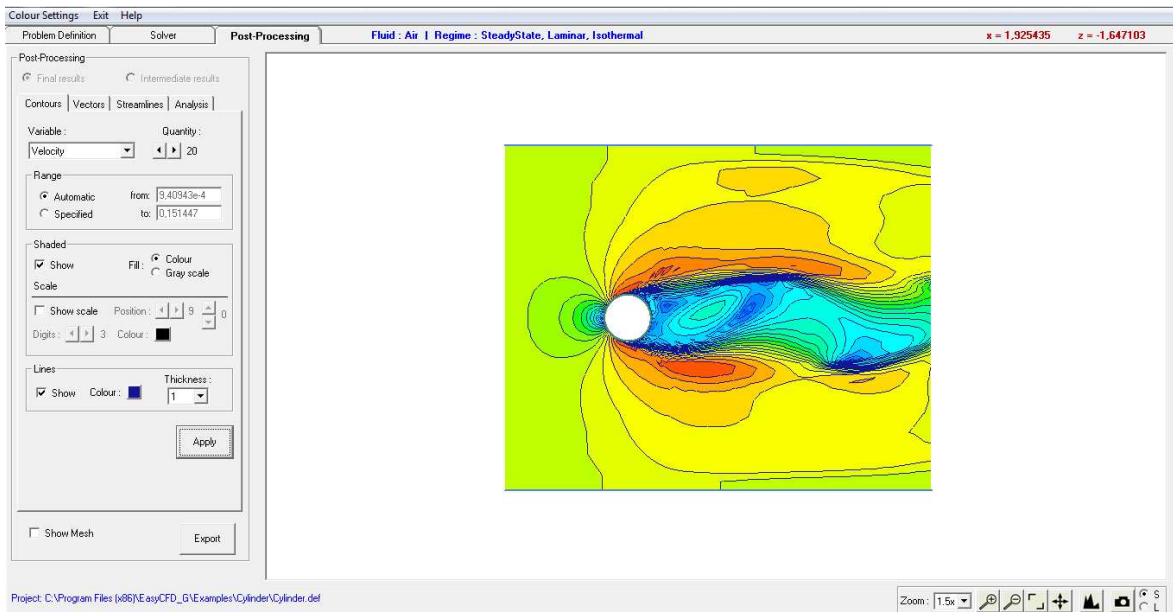


Figura 8 – EasyCFD_G: Pós-Processamento, Contornos

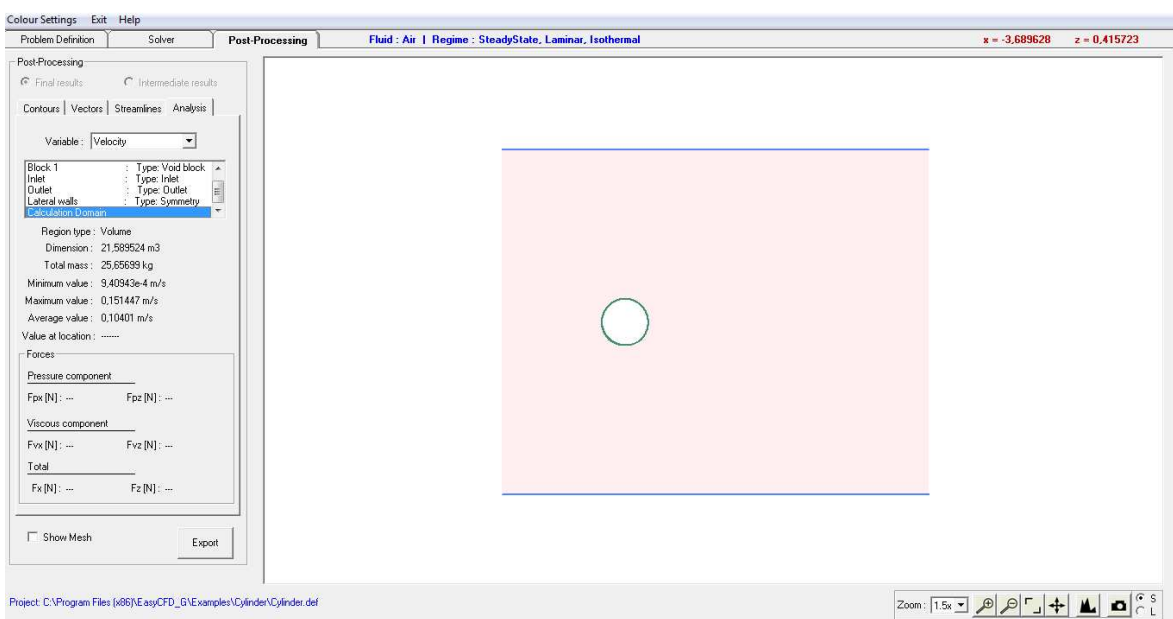


Figura 9 – EasyCFD_G: Pós-Processamento, Valores

2. PESQUISA BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo apresenta-se toda a pesquisa bibliográfica realizada sobre alguns estudos relacionados com o tema da presente tese. Procurou-se abordar o tema de uma forma sintética mas, ao mesmo tempo, geral.

O objectivo foi conseguir uma visão, embora sumária, dos temas já abordados, para uma melhor compreensão do problema, não esquecendo que este trabalho teve como principais objectos de estudo o cilindro, perfil alar e convecção natural.

2.1. Cilindro

Foram encontrados diversos estudos sobre o escoamento de fluidos em torno de um cilindro, que se dividem em estudos numéricos e estudos experimentais.

Chien-Cheng Chang e Ruey-ling Chern (1991) estudaram o escoamento em torno de um cilindro através do método de vórtice híbrido para vários números de Reynolds, comparando os resultados obtidos com os resultados experimentais, demonstrando assim a fiabilidade do método.

José Ignacio Hernández López, Julio R. Meneghini e J.A.P. Aranha (2004) efectuaram um estudo da estabilidade do escoamento simétrico em torno de um cilindro.

Um ano mais tarde, Xiaoqun Feng, Michael Köster e Li Zhang (2005) realizaram um estudo numérico do escoamento em torno de um cilindro utilizando três softwares comerciais diferentes, com o objectivo de determinar qual o mais preciso e o mais rápido.

No ano a seguir, Lorenzo Basso Benevenuti e Jorge H. Silvestrini (2006) efectuaram simulações numéricas para um cilindro, oscilando transversalmente a um escoamento bidimensional utilizando o método das fronteiras imersas.

Eric Didier e Antonio R. J. Borges (2007) estudaram o escoamento em torno de um cilindro oscilante e com um baixo número de Reynolds.

A Escola Politécnica da USP (2008) realizou um trabalho laboratorial que serviu como caso de teste ao código em estudo. O trabalho consistiu em analisar o escoamento de ar em torno de um cilindro liso num túnel de vento e obter o coeficiente de arrasto em função do número de Reynolds.

2.2. Perfil alar

O perfil alar é uma secção bidimensional, projectada para criar à sua volta uma distribuição de pressões quando se deslocar através do ar de forma a gerar sustentação. A reacção do fluido sobre o perfil alar devido à variação na quantidade de movimento é uma força, que será decomposta em ângulos normais à direcção do seu movimento.

As forças resultantes do perfil alar encontram-se representadas na figura 10.



Figura 10 - Perfil alar

(fonte: www.wikipedia.com)

O perfil alar é usado em diversas aplicações, podendo ser encontrado, por exemplo em aeronaves e em automóveis de corrida.

Em aeronaves, o uso do perfil alar encontra-se nas secções da asa que tem como principal objectivo criar a força de sustentação. A força de sustentação e arrasto são altamente dependentes do ângulo de ataque. Para grandes ângulos de ataque, o perfil alar começa a perder sustentação, ficando sujeito ao fenómeno de Stall (perda de sustentação).

Em automóveis de corrida, o perfil alar normalmente encontra-se em cima das rodas traseiras (“aileron”) e tem como principal objectivo criar uma força na direcção do solo, de forma a manter as rodas do carro em contacto com o solo em altas velocidades.

Os estudos dos escoamentos em torno do perfil alar, como os estudos dos escoamentos em torno do cilindro, dividem-se em dois: os estudos experimentais e numéricos.

Peter Fuglsang, Ioannis Antoniou, Christian Bak e Helge Aa. Madsen (1998) realizaram um estudo do escoamento sobre um perfil alar em túnel de vento aberto, obtendo os valores da pressão ao longo do perfil alar e a variação dos coeficientes de sustentação e de arrasto com o ângulo de ataque.

Anos mais tarde, Mehrdad Ghods (2001) efectuou um estudo semelhante ao anterior, isto porque realizou um estudo do escoamento sobre uma NACA 2415 em túnel de vento obtendo a variação do coeficiente de sustentação e de arrasto com o ângulo de ataque.

Mehrdad Ghods chegou à conclusão de que, para encontrar o máximo rendimento da asa, esta deve ser testada num túnel de vento com diferentes ângulos de ataque.

Marilyn J. Smith, Tin-Chee Wong, Mark Potsdam, James Baeder e Sujeet Phanse (2004) avaliaram o uso de CFD para determinar características do perfil alar aplicado nas hélices dos helicópteros, obtendo resultados numéricos muito próximos dos experimentais, demonstrando assim a fiabilidade do CFD.

À semelhança do estudo anterior, Kjetil Birkeland Moe (2008) realizou um estudo em que compara os dados obtidos do perfil alar no túnel de vento com os dados obtidos através das simulações usando CFD, obtendo uma boa correlação entre o túnel de vento e o CFD.

W. Medjroubi, J. Peinke e B. Stoevesandt (2009) realizaram um estudo numérico do escoamento instável sobre o perfil alar, observando os vórtices a diferentes ângulos de ataque e a diferentes números de Reynolds.

2.3. Convecção natural

A convecção natural é um tipo de transferência de calor onde apenas existem forças de impulsão e de origem térmica, ou seja, o movimento do fluido não é criado por um mecanismo externo (bombas, ventiladores, etc.); o movimento do fluido é apenas pelas diferenças de densidade devido as diferentes temperaturas a que se encontram os fluidos.

A convecção natural consiste na troca de calor entre um corpo quente e um corpo frio, transportando o calor do corpo quente para o corpo frio através da circulação de fluido criado pelas diferenças de densidade, formando desta forma as correntes de convecção, como pode ser verificado na figura 11.

Pode-se encontrar convecção natural na natureza e em aplicações de engenharia. Na natureza pode ser vista nas plumas de ar elevando-se, de ar quente de chamas, correntes oceânicas, e formação de ventos marítimos.

Em engenharia, a convecção natural é usada para o arrefecimento de materiais sem ajuda de qualquer dispositivo mecânico, por exemplo no arrefecimento de materiais fundidos e nas alhetas de dissipação de calor.



Figura 11 - Convecção natural

(fonte: www.wikipedia.com)

A análise de escoamentos em convecção natural é um problema que actualmente recebe considerável atenção de muitos pesquisadores em vários campos de aplicação. A construção de fornos, colectores solares, dispositivos de isolamento de reactores nucleares e a determinação das exigências para isolamento da cabine de uma aeronave são alguns exemplos de tais aplicações.

Devido à sua importância na engenharia, existe uma grande variedade de estudos envolvendo convecção natural.

Rogério Fernandes Brito, Aristeu Silveira Neto, Márcio de Oliveira e Genésio José Menon (2002) realizaram simulações numéricas de transferência de calor por convecção natural entre uma superfície rectangular e um cilindro interno considerando o regime turbulento.

Os mesmos investigadores, Rogério Fernandes Brito e Genésio José Menon, acompanhados de mais dois investigadores, Doacir Vilar de Assis Junior e Aristeu da Silveira Neto (2004), efectuaram simulações numéricas de transferência de calor por convecção natural, mas em vez de uma superfície rectangular e um cilindro interno, usaram uma superfície rectangular com um rectângulo interno. O objectivo deste estudo foi simular numericamente o escoamento no interior de um dispositivo de refrigeração.

Tobias Zitzmann, Malcolm Cook, Peter Pfrommer, Simon Rees e Ljiljana Marjanovic (2005) estudaram a transferência de calor por convecção natural entre uma placa vertical aquecida e as suas cavidades a diferentes temperaturas usando CFD.

Anos mais tarde, R.Y. Sakr, N.S. Berbish, A.A. Abd-Alziz e A.S. Hanafi (2008) realizaram um estudo numérico de transferência de calor por convecção natural entre um cilindro e uma elipse interna aquecida, obtendo diversos resultados e comparando com os resultados experimentais.

Phillip Gibson (2009) realizou um estudo numérico de transferência de calor entre o corpo e uma camada de roupa, usando como modelo o cilindro coberto. Estes tipos de modelos são os que são usados para estudar a transferência de calor entre o corpo e uma camada de roupa.

3. CASOS DE ESTUDO

Neste capítulo, apresenta-se a descrição dos procedimentos usados quando realizados os testes ao código. O capítulo encontra-se dividido em três subcapítulos, descrevendo-se, em cada um, o procedimento utilizado para cada problema específico.

3.1. Cilindro

Neste teste é apresentado o estudo da interação fluido – corpo, no qual um fluido em movimento percorre o contorno pela superfície externa de um corpo.

Nestes casos, é usual atribuir-se a denominação “escoamento externo” para situações em que o corpo está totalmente envolvido por fluido em movimento.

Exemplos diversos onde este fenómeno ocorre podem ser citados, como o dos automóveis, aviões, planadores, edifícios, pássaros, submarinos, pilares de pontes e peixes imersos em água.

O corpo em questão é um cilindro liso, de diâmetro igual a 1 m, totalmente imerso num escoamento de ar de velocidade variável e limitado por um domínio rectangular de 30 m².

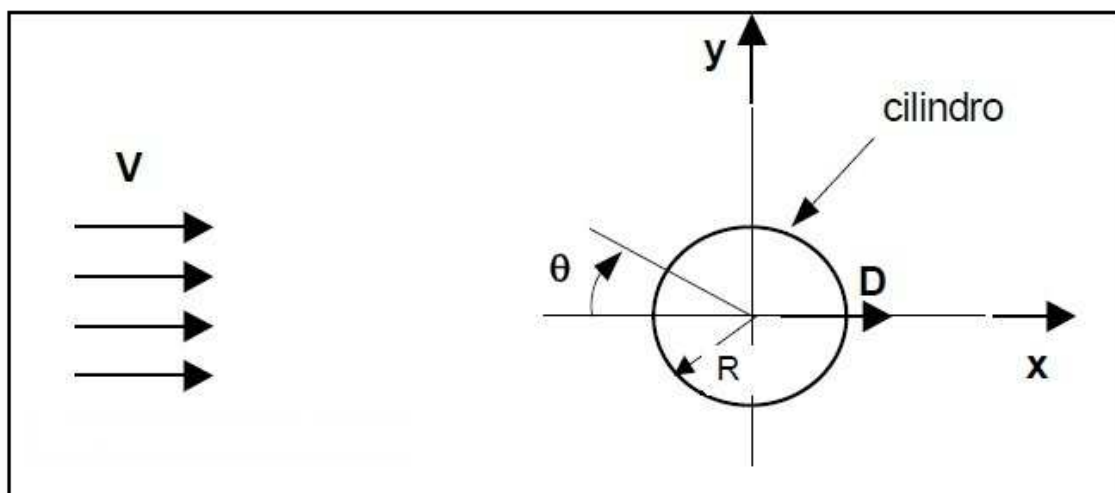


Figura 12 - Escoamento em torno de um cilindro

(fonte: Guia de laboratório (2008). ESCOAMENTO DE AR AO REDOR DE UM CILINDRO EM TUNEL DE VENTO. Laboratório do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de São Paulo)

O objectivo deste teste é obter a curva do coeficiente de arrasto (C_d) em função do número de Reynolds, como se pode verificar na figura 13.

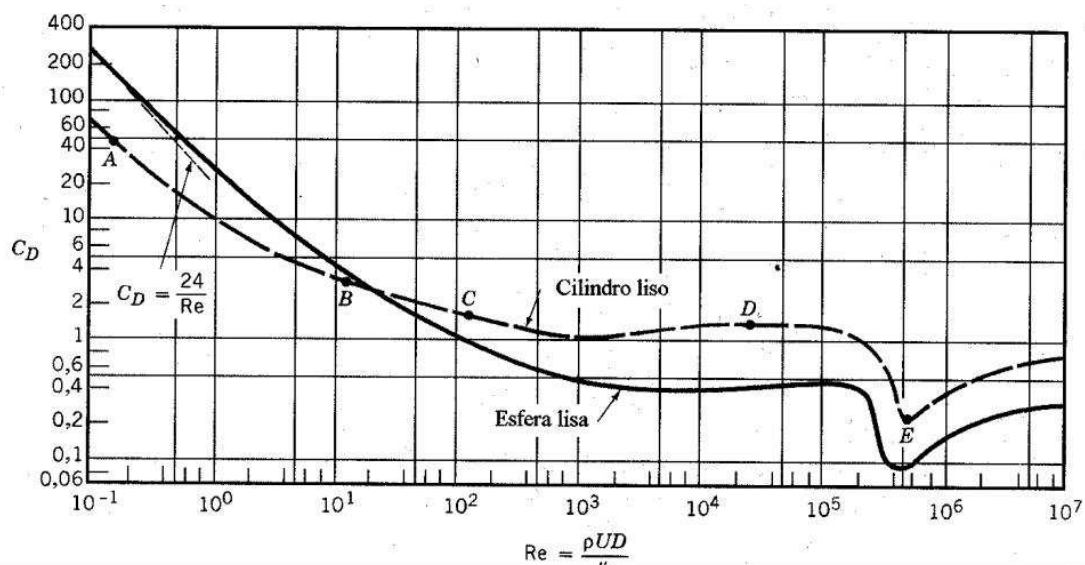


Figura 13 – Gráfico $C_d - Re_y$

(fonte: Guia de laboratório (2008). ESCOAMENTO DE AR AO REDOR DE UM CILINDRO EM TUNEL DE VENTO. Laboratório do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de São Paulo)

Pela análise do gráfico apresentado na figura 13, verifica-se que o coeficiente de arrasto diminui à medida que o número de Reynolds aumenta, diminuindo abruptamente quando toma o valor de 3×10^5 . Isto deve-se ao facto de, para este valor, ocorrer a transição do regime laminar para regime turbulento.

A velocidade do escoamento é calculada através da equação do número de Reynolds (1):

$$Re = \frac{V * L}{\nu}. \quad (1)$$

- V- Velocidade de escoamento do fluido;
- L - Comprimento característico da geometria do problema;
- ν - Viscosidade cinemática.

O coeficiente de arrasto depende da força exercida sobre o cilindro, ou seja, é a força total devido à componente viscosa e componente pressão. A força exercida sobre o cilindro é fornecida pelo código após o cálculo. O coeficiente de arrasto é calculado pela equação (2):

$$C_d = \frac{F}{\frac{1}{2} * \rho * V_{\infty}^2 * A_p}. \quad (2)$$

- F - Força total que actua sobre o cilindro;
- ρ - Massa volúmica do fluido em escoamento;
- V_{∞} - Velocidade de escoamento do fluido;
- A_p - Área projectada: $A_p = D \times l$.

3.2. Perfil alar

O teste realizado tem como objectivo a análise do escoamento aerodinâmico sobre um perfil alar. O perfil alar é definido através da sua equação e introduzido no código através do qual se vai proceder aos testes.

O objectivo principal proposto foi analisar a influência da variação do ângulo de ataque sobre o coeficiente de arrasto (C_d) e sobre o coeficiente de sustentação (C_L), para um escoamento de ar com um número de Reynolds igual a 3×10^6 . O comprimento do perfil alar é igual a 1 m e o domínio está delimitado por um rectângulo de $3 \times 4 \text{ m}^2$.

A influência do ângulo de ataque (α) sobre as forças de arrasto (C_d) pode ser observada na figura 14, e sobre as forças de sustentação (C_L) pode ser observado na figura 15. O perfil usado em ambos os casos é o NACA 1412.

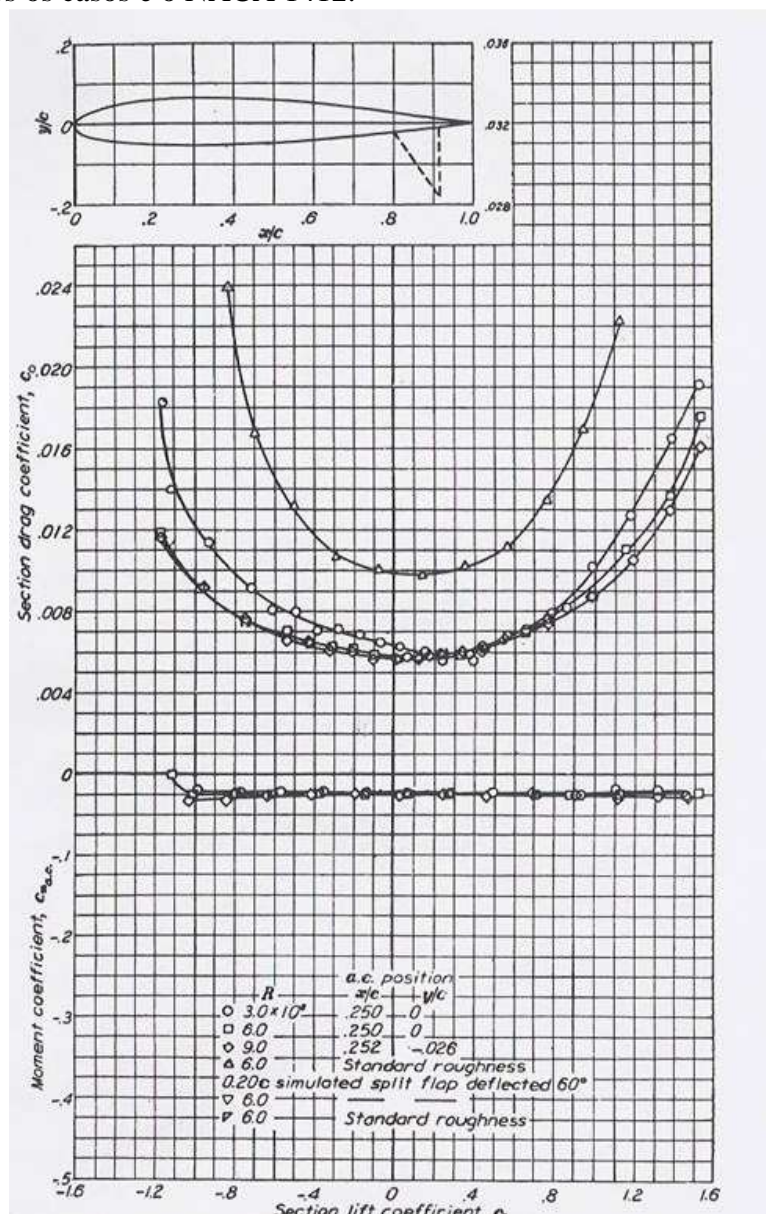


Figura 14 - Gráfico $\alpha - C_d$

(fonte: JOHN D. ANDERSON, JR.(1989))

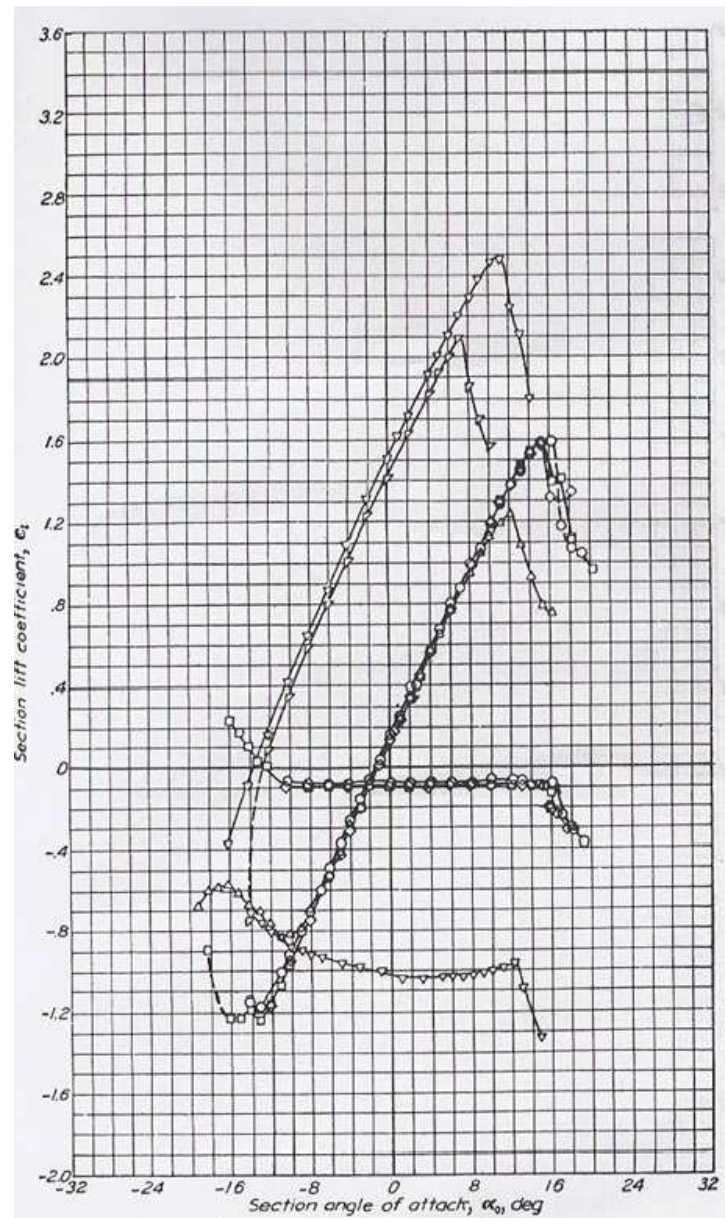


Figura 15 - Gráfico α - C_L

(fonte: JOHN D. ANDERSON, JR.(1989))

Após uma breve análise destes dois gráficos, consegue-se perceber o comportamento tanto do coeficiente de arrasto como do coeficiente de sustentação. Verifica-se que o coeficiente de arrasto diminui até o ângulo de ataque ser igual a zero, crescendo a partir deste valor, tendo o comportamento de uma função quadrática (parábola).

O coeficiente de sustentação vai aumentado à medida que o ângulo de ataque aumenta, até o ângulo de ataque ser igual a 10, diminuindo a partir deste valor. Isto porque começa a haver separação do escoamento na zona superior do perfil alar, o que leva à perda de sustentação.

O coeficiente de sustentação depende da força exercida segundo a direcção do eixo “zz”, e o coeficiente de arrasto depende da força exercida segundo a direcção do eixo “xx”, ambas fornecidas pelo código após os cálculos.

As equações do coeficiente de sustentação (C_L) e do coeficiente arrasto (C_d) são as seguintes:

- Coeficiente de arrasto (3):

$$C_d = \frac{F_x}{\frac{1}{2} * \rho * V_\infty^2 * A_p}. \quad (3)$$

- F_x - Força que actua sobre o cilindro segundo a direcção “xx”;
- ρ - Massa volúmica do fluido em escoamento;
- V_∞ - Velocidade de escoamento do fluido;
- A_p - Área projectada.

- Coeficiente de sustentação (4):

$$C_L = \frac{F_z}{\frac{1}{2} * \rho * V_\infty^2 * A_p}. \quad (4)$$

- F_z - Força que actua sobre o cilindro segundo a direcção “zz”;
- ρ - Massa volúmica do fluido em escoamento;
- V_∞ - Velocidade do escoamento do fluido;
- A_p - Área projectada.

3.3. Convecção natural

Para testar o código envolvendo transferência de calor, foi resolvido um problema de convecção natural entre uma cavidade elíptica concêntrica com uma circunferência. O estudo em questão foi o seguinte:

- R.Y. Sakr, N.S. Berbish, A.A. Abd-Alziz and A.S. Hanafi (2008).

O processo de transferência de calor em convecção natural foi tema de muitos estudos experimentais devido à sua grande importância em muitas aplicações de Engenharia.

Este processo é de extrema importância tecnológica na concepção de dispositivos de troca de calor, arrefecimento de componentes eléctricos e electrónicos, eléctrica subterrânea de cabos de transmissão usando gás pressurizado e outros.

O problema em questão consiste numa elipse no interior de uma circunferência, ambas centradas na origem. A elipse é o corpo quente e a circunferência o corpo frio. O objectivo consiste em variar o ângulo de orientação da elipse e analisar a influência no número de Nusselt.

O número de Nusselt médio é calculado através coeficiente de transmissão de calor por convecção. Este, por sua vez, é calculado por intermédio do fluxo de calor que sai da elipse, fornecido pelo código após os cálculos.

O problema é governado pelo número de Nusselt e pelo número de Rayleigh.

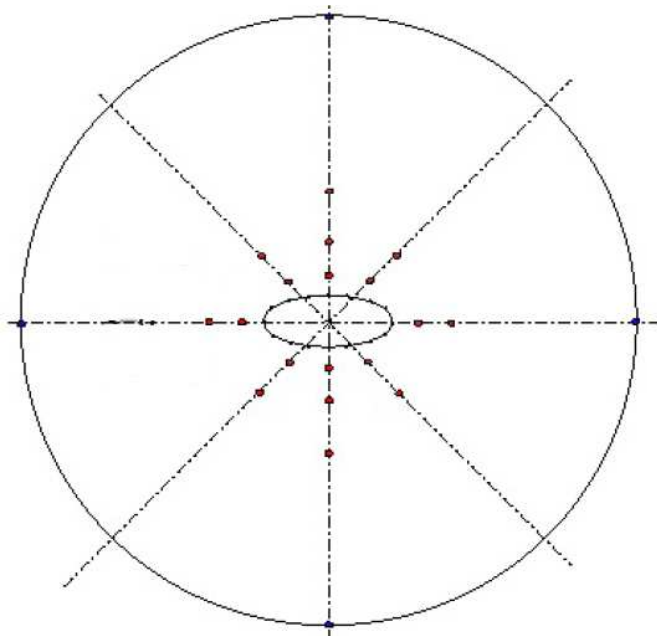


Figura 16 - Elipse inserida na circunferência

(fonte: R.Y. Sakr & N.S. Berbish & A.A. Abd-Alziz & A.S. Hanafi (2008))

- Coeficiente de transmissão de calor por convecção (5):

$$h = \frac{Q}{\Delta T * A}.$$

(5)

- Q - Fluxo de calor;
- ΔT - Variação de temperatura;
- A - Área.

- Número de Nusselt (6):

$$N_U = \frac{h * L}{K_f}.$$

(6)

- h - Coeficiente de transmissão de calor por convecção;
- K_f - Condutividade térmica;
- L - Comprimento característico.

- Número de Prandtl (7):

$$P_r = \frac{\nu}{\alpha} = \frac{\mu * C_p}{K_f}.$$

(7)

- μ - Viscosidade dinâmica;
- C_p - Calor específico;
- K_f - Condutividade térmica do fluido.

- Número de Grashof (8):

$$G_r = \frac{g * \beta * (T_s - T_\infty) * L^3}{\nu^2}. \quad (8)$$

- g - Aceleração da gravidade;
- β - Coeficiente de expansão térmica;
- ν - Viscosidade cinemática;
- T_s - Temperatura de superfície;
- T_∞ - Temperatura do fluido;
- L - Comprimento.

- Número de Rayleigh (9):

$$R_a = G_r * P_r = \frac{g * \beta}{\nu * \alpha} * (T_s - T_\infty) * L^3. \quad (9)$$

- g - Aceleração da gravidade;
- β - Coeficiente de expansão térmica;
- ν - Viscosidade cinemática;
- α - Difusividade térmica;
- T_s - Temperatura de superfície;
- T_∞ - Temperatura do fluido;
- L - Comprimento.

4. ANÁLISE E DISCUSSÃO DE RESULTADOS

Expõem-se, no presente capítulo, os resultados obtidos nos diferentes testes realizados. À semelhança do capítulo anterior, este capítulo divide-se em três subcapítulos, apresentando-se em cada um deles os resultados obtidos para os testes realizados com o cilindro, perfil alar e convecção natural.

4.1. Cilindro

Como já foi referido no capítulo anterior, o objectivo do teste é obter a curva do coeficiente de arrasto em função do número Reynolds e realizar estudos de dependência de malha, alterando a resolução da mesma e o seu grau de enviesamento.

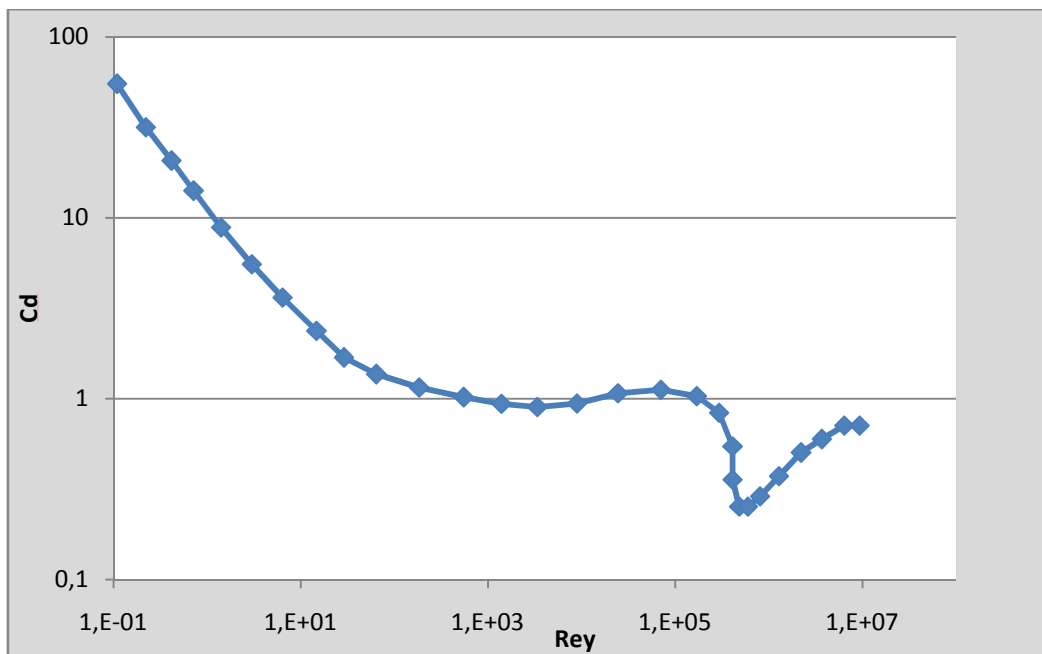


Figura 17 - Gráfico coeficiente de arrasto experimental

Os diferentes testes realizados consistiram em alterar a resolução da malha e observar a sua influência nos resultados.

Malha 1

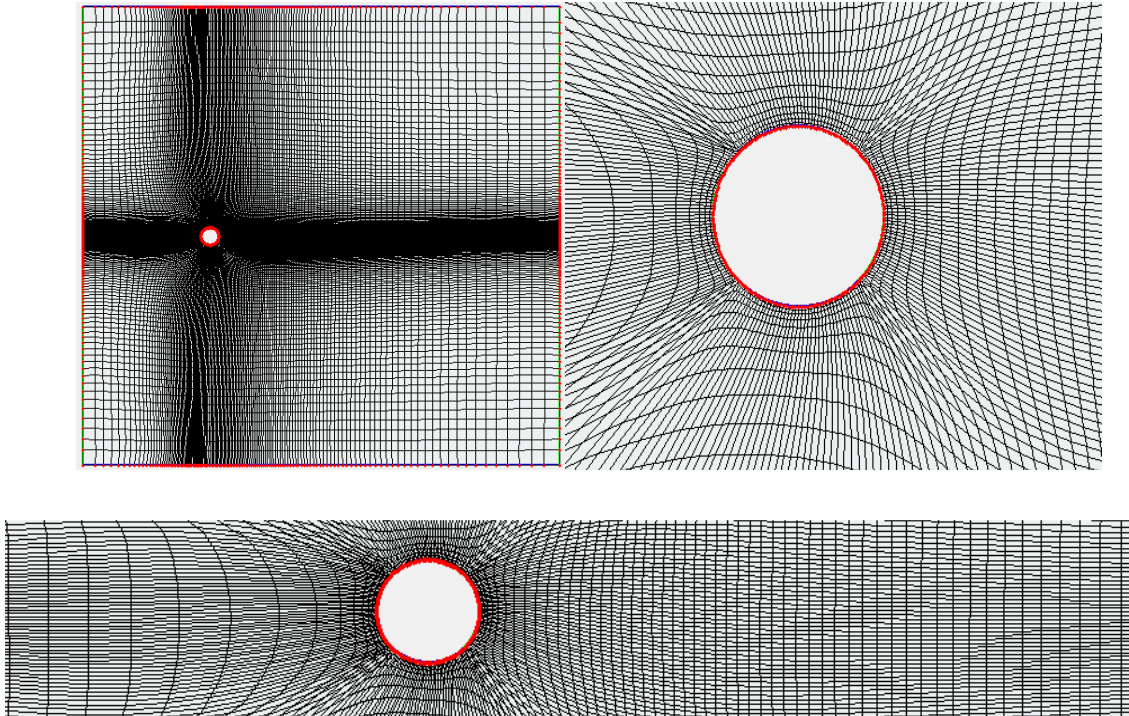


Figura 18 - Malha 1 do cilindro

Malha 2

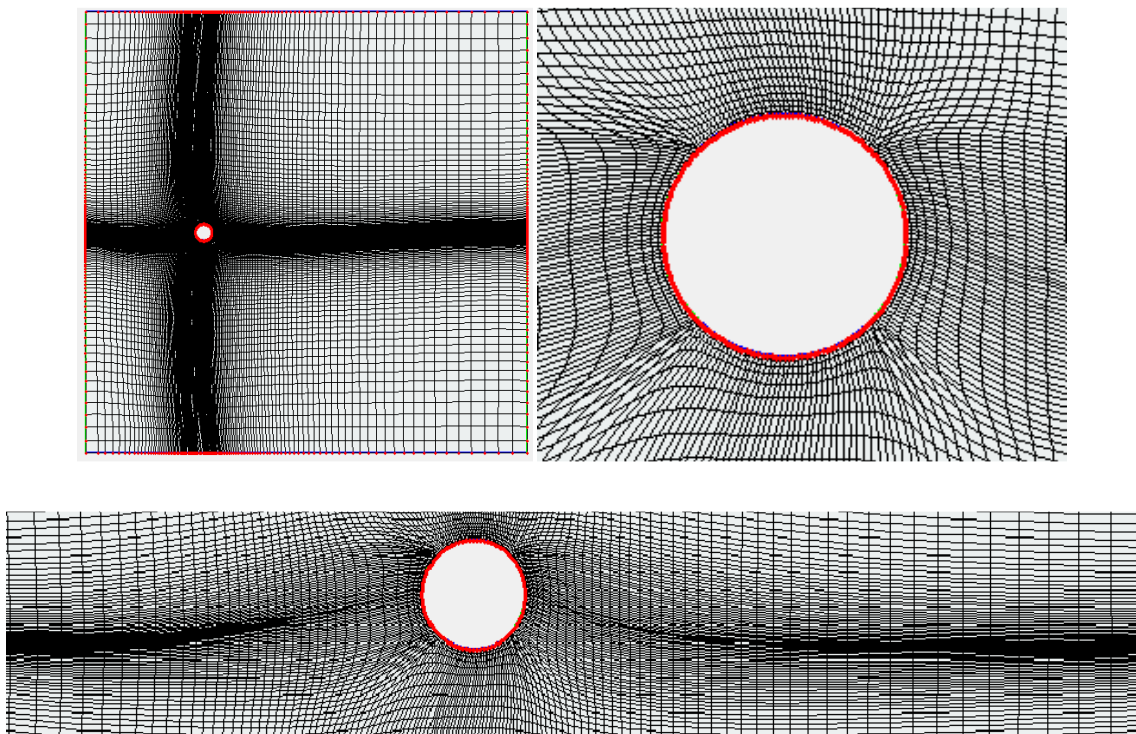


Figura 19 - Malha 2 do cilindro

Malha 3

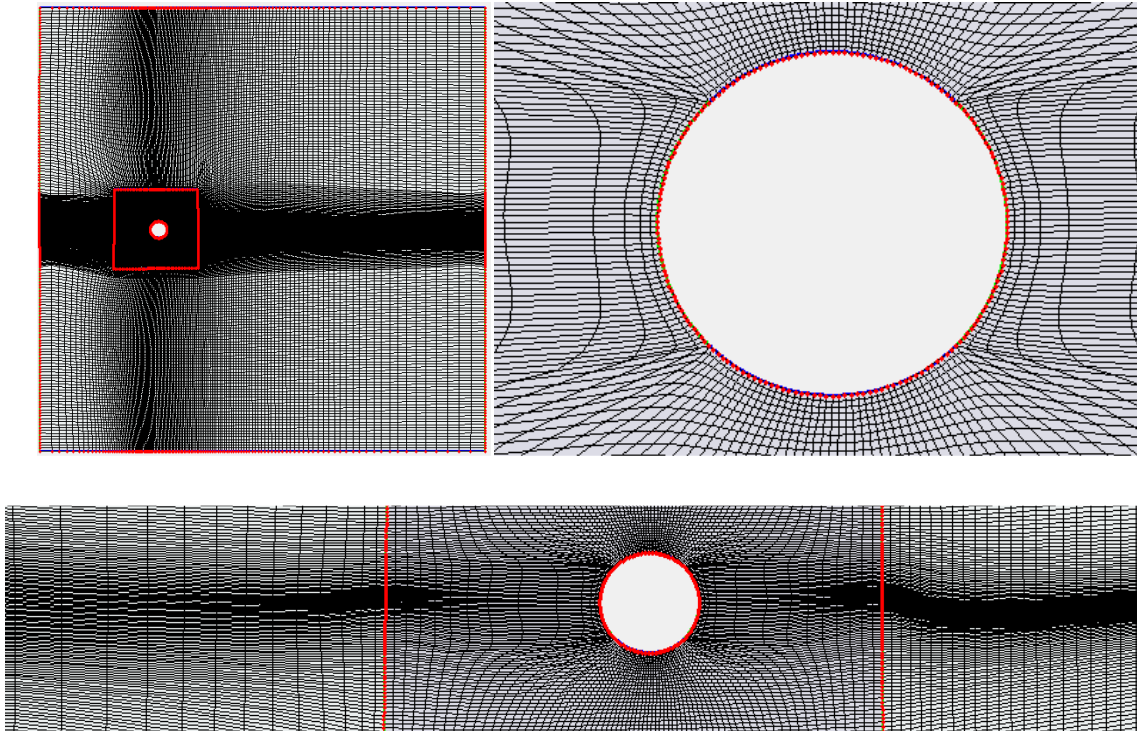


Figura 20 - Malha 3 do cilindro

O número de nodos da malha 1 é de 19506, sendo igual ao da malha 2. A única diferença da malha 1 para malha 2 é que o grau de enviesamento das linhas se reduziu. A malha número 3 já possui um número elevado de nodos em relação às duas anteriores, tendo 37439 nodos e um grau de enviesamento menor. Tal foi conseguido envolvendo o cilindro num quadrado permeável que serviu apenas para as linhas da malha ficarem mais rectas .

Os resultados obtidos foram os seguintes:

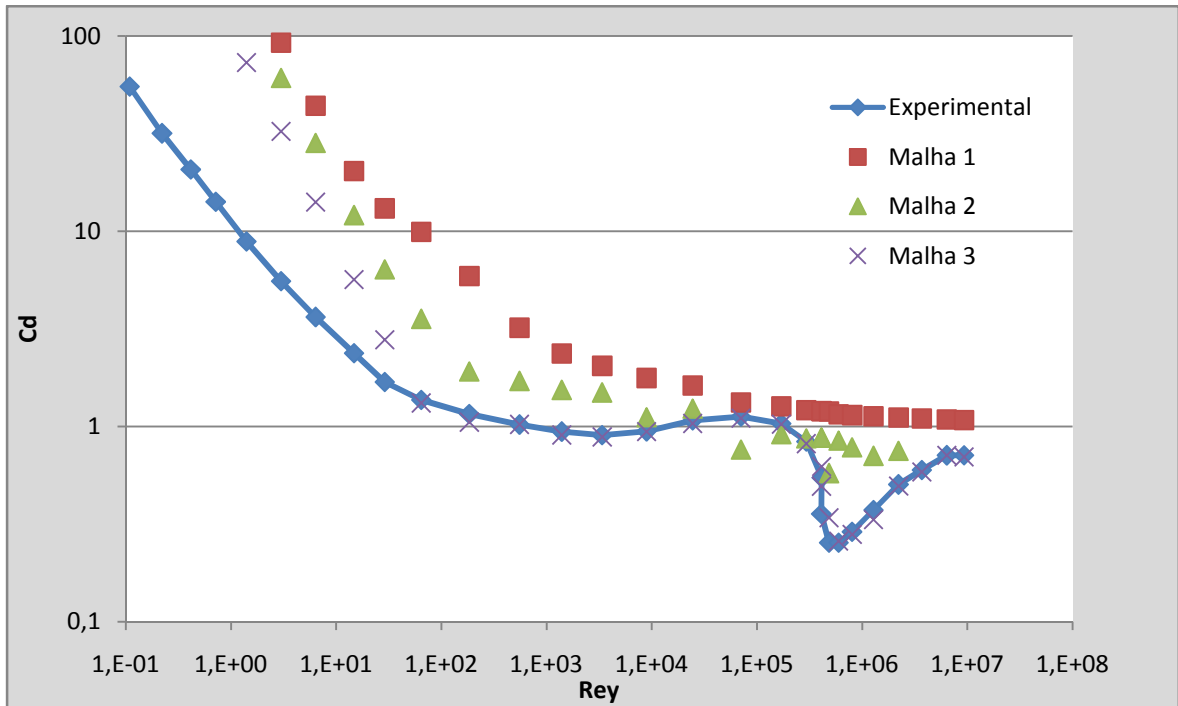


Figura 21 - Resultados obtidos da malha 1,2 e 3

Verifica-se, na figura 21, que à medida que vamos refinando a malha (aumentando o número de pontos), e reduzindo o grau de enviesamento, obtêm-se resultados mais exactos. No entanto, os resultados ainda se encontram muito elevados para números de Reynolds inferiores a $1E02$.

De seguida, realizou-se a construção de mais 3 malhas de forma a obter resultados mais precisos.

Malha 4

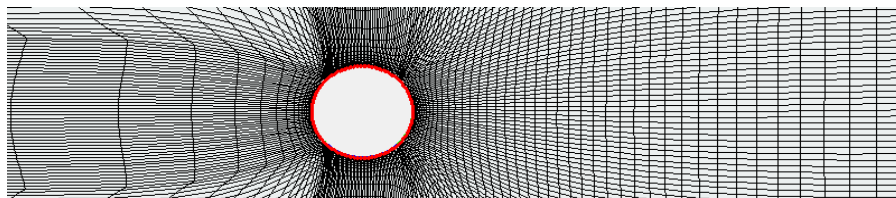
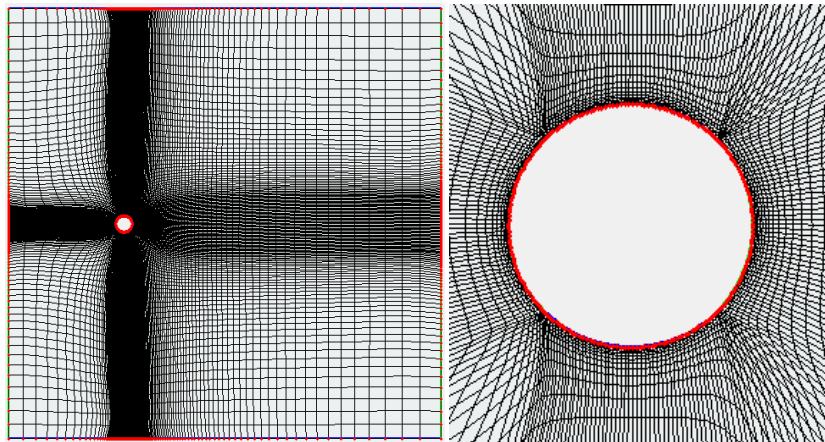


Figura 22 - Malha 4 do cilindro

Malha 5

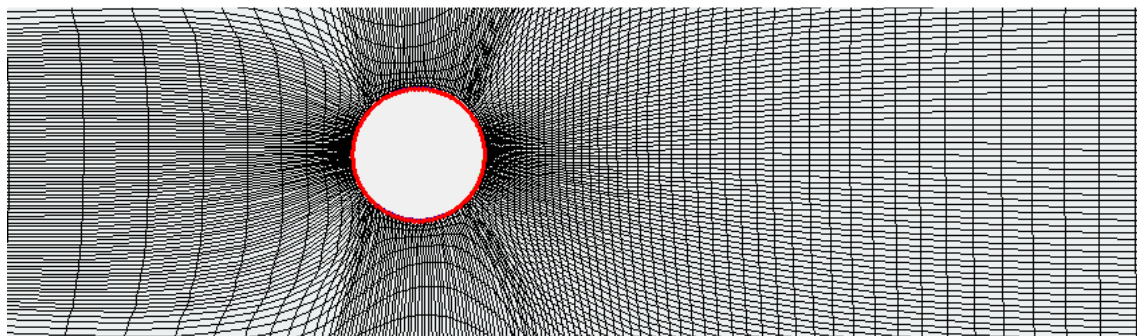
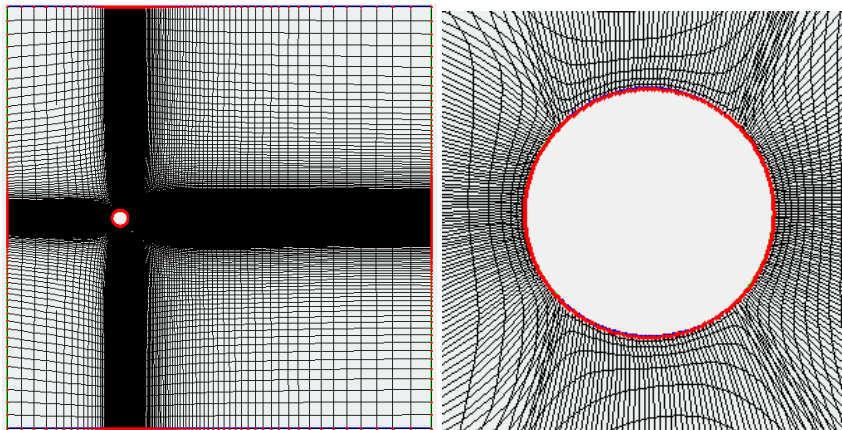


Figura 23 - Malha 5 do cilindro

Malha 6

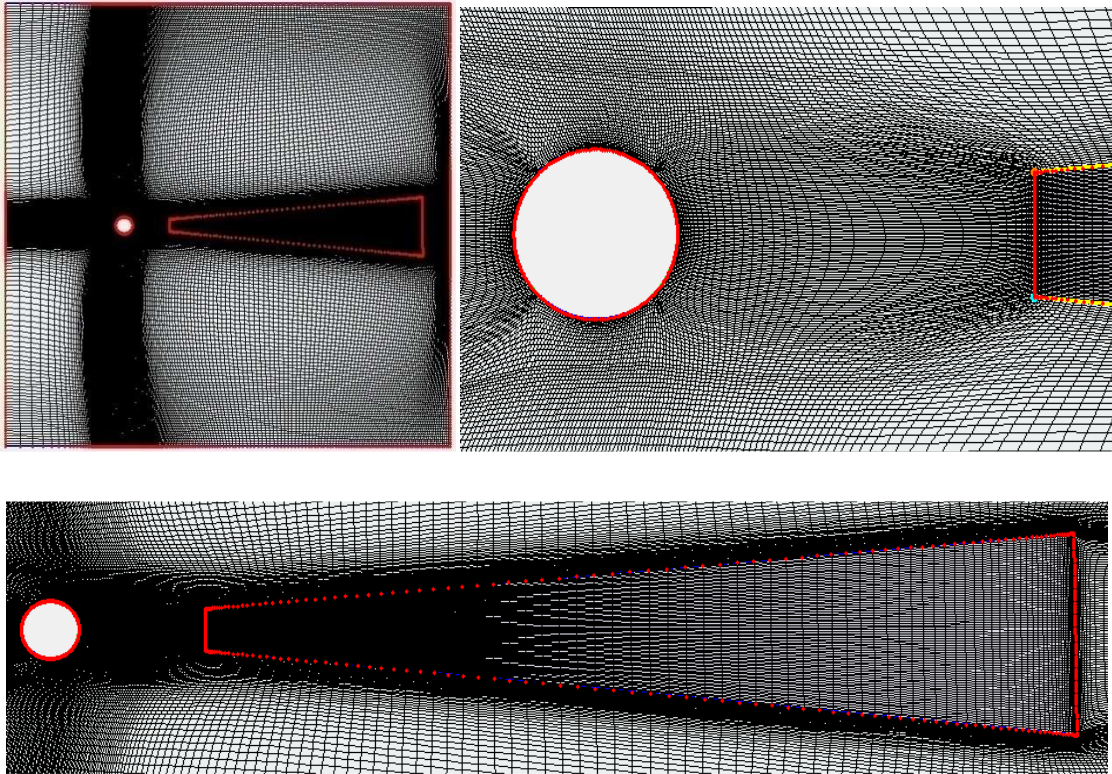


Figura 24 - Malha 6 do cilindro

O número de nodos da malha 4 é de 19506, sendo 17216 o correspondente valor para a malha 5. O número de nodos da malha 6 é de 65262, onde se aumentou significativamente o número de nodos da malha e reduziu o grau de enviesamento da malha pela introdução do trapézio, como pode ser verificado na figura 24. As linhas de malha ficaram, assim, mais alinhadas com o escoamento.

Os resultados obtidos foram os seguintes:

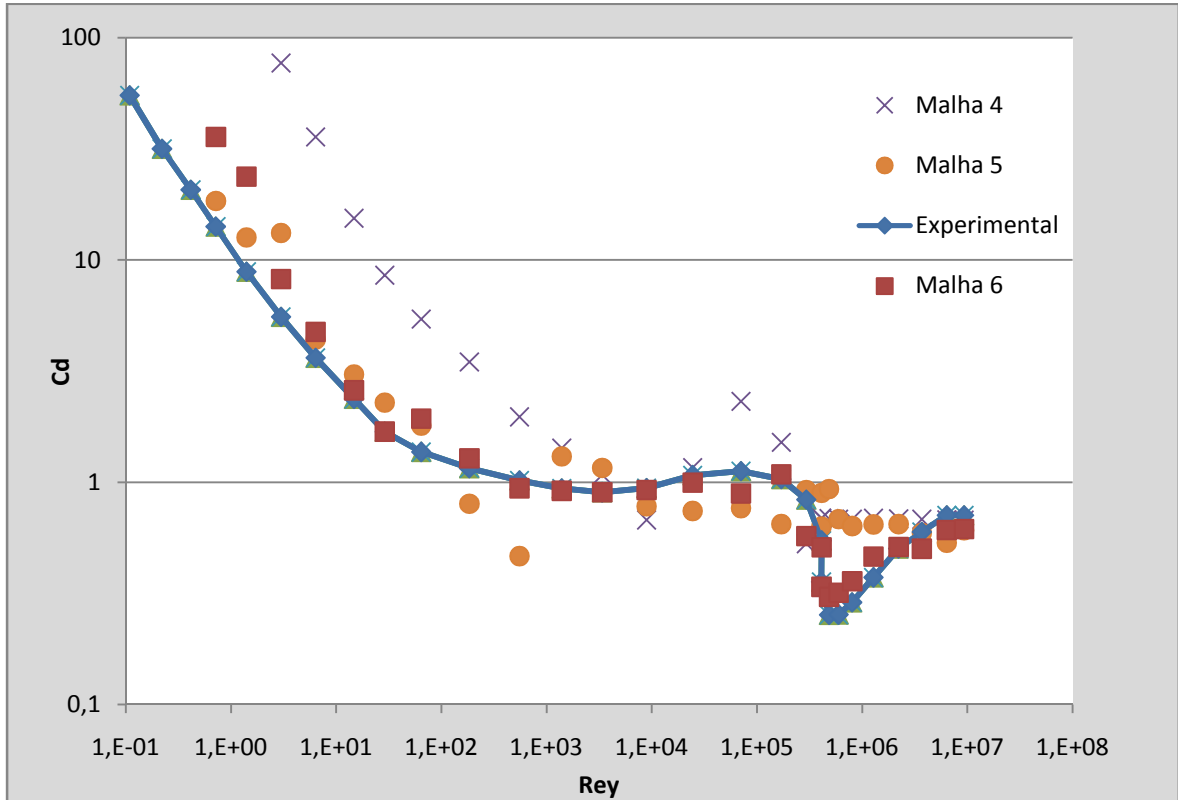


Figura 25 - Resultados obtidos da malha 4,5 e 6

Observa-se, na figura 25, que tanto a malha 4 como a malha 5 apresentam grande dispersão de resultados, não se obtendo grandes melhorias em relação às malhas anteriores. Já a malha 6 já exhibe os resultados esperados, tendo apenas pequenos desvios na ordem das milésimas.

4.2. Perfil alar

Os testes realizados com o perfil alar são semelhantes aos realizados com o cilindro, consistindo em fazer variar a resolução da malha e verificar a sua influência nos resultados obtidos.

O objectivo principal é obter as curvas do coeficiente de arrasto e do coeficiente de sustentação em função do ângulo de ataque, como representado na figura 26 e na figura 27.

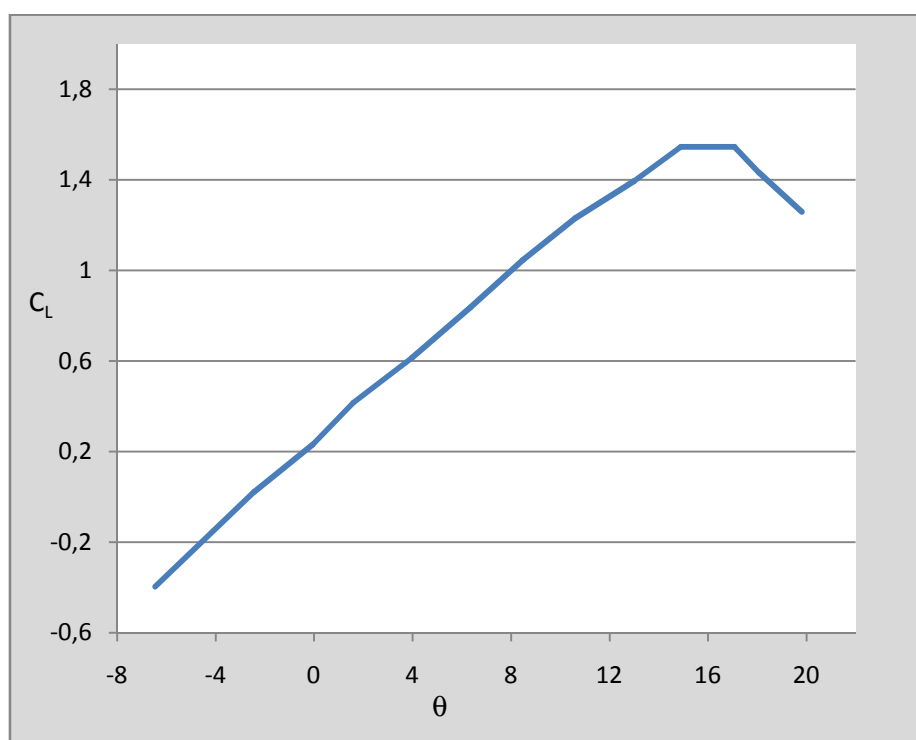


Figura 26 - Gráfico dos valores experimentais de C_L

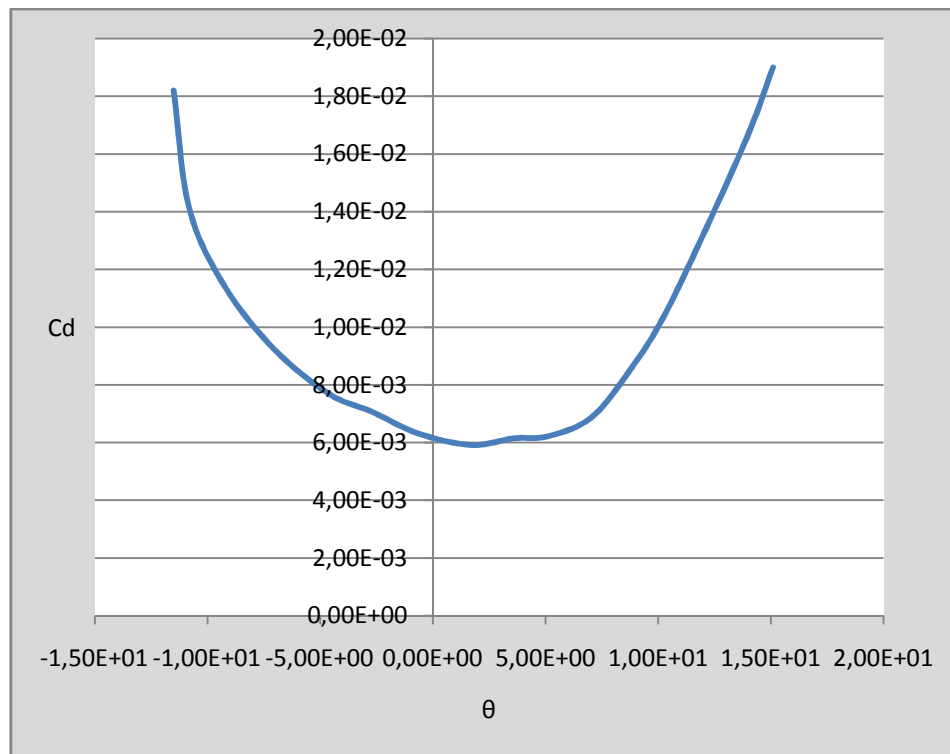


Figura 27 – Gráfico dos valores experimentais de C_d

De todos as malhas realizadas, as 3 que se seguem foram as que apresentam resultados mais interessantes e diferentes, uma vez que nos outros testes existem poucas ou nenhuma diferenças nos resultados obtidos.

Malha 1

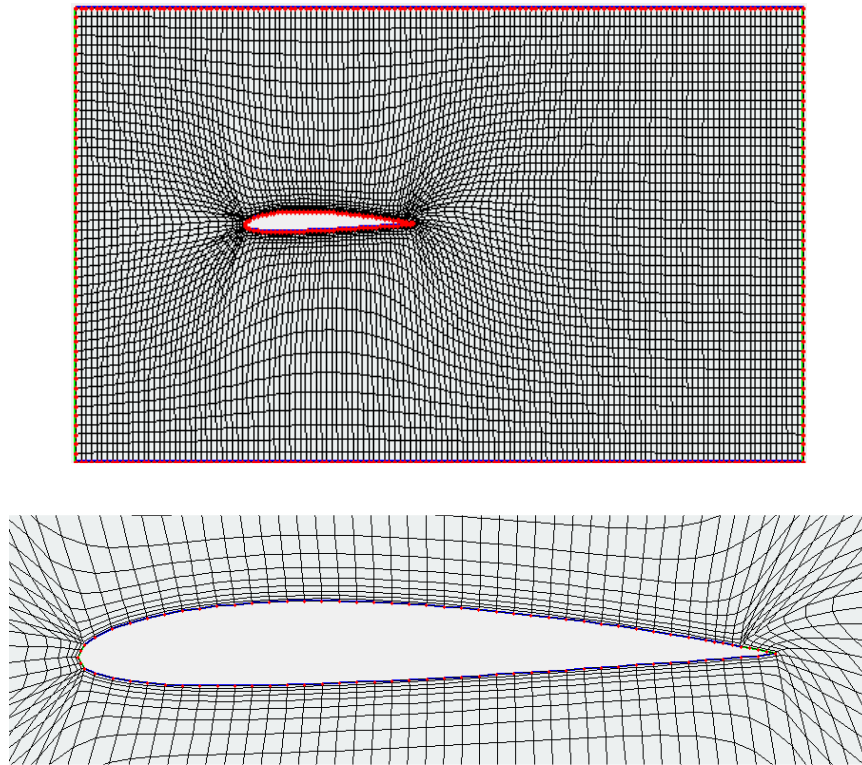


Figura 28 - Malha 1 do perfil alar

Para a malha 1, com 6419 nodos, foram obtidos os seguintes resultados:

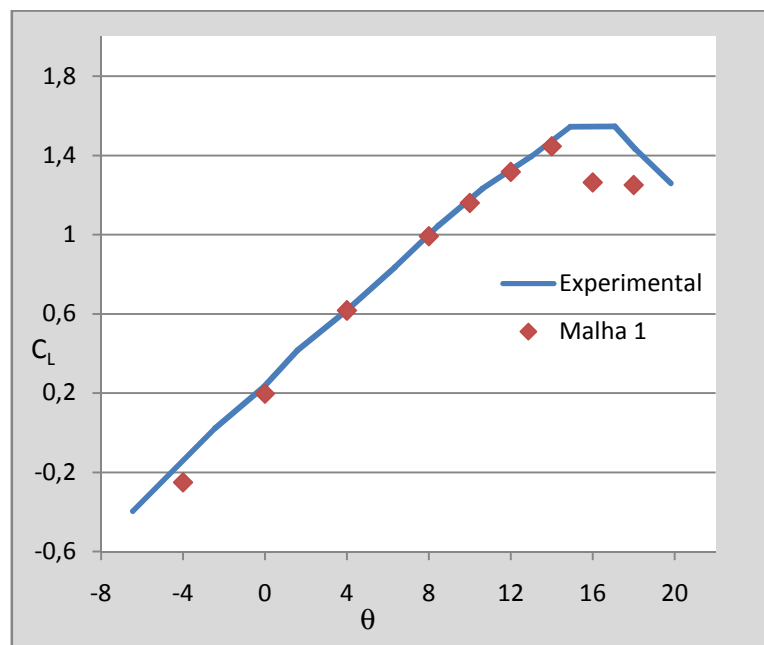


Figura 29 - Valores de C_L da malha 1

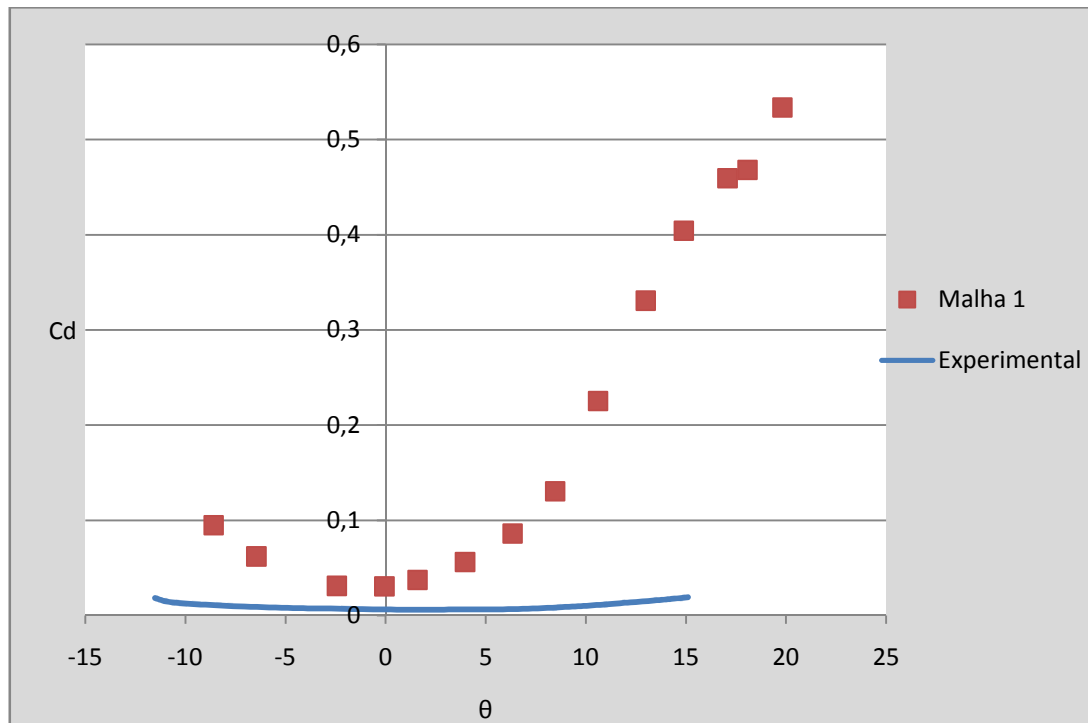


Figura 30 – Valores de C_d da malha 1

Observa-se, na figura 29, que os valores do coeficiente de sustentação se encontram bastante próximos, havendo apenas pequenos desvios. Os valores do coeficiente de arrasto, por sua vez, encontram-se muito elevados, como se pode observar na figura 30. As próximas duas malhas construídas têm como objectivo obter os valores do coeficiente de arrasto, uma vez que já se conseguiu obter os valores do coeficiente de sustentação.

Malha 2

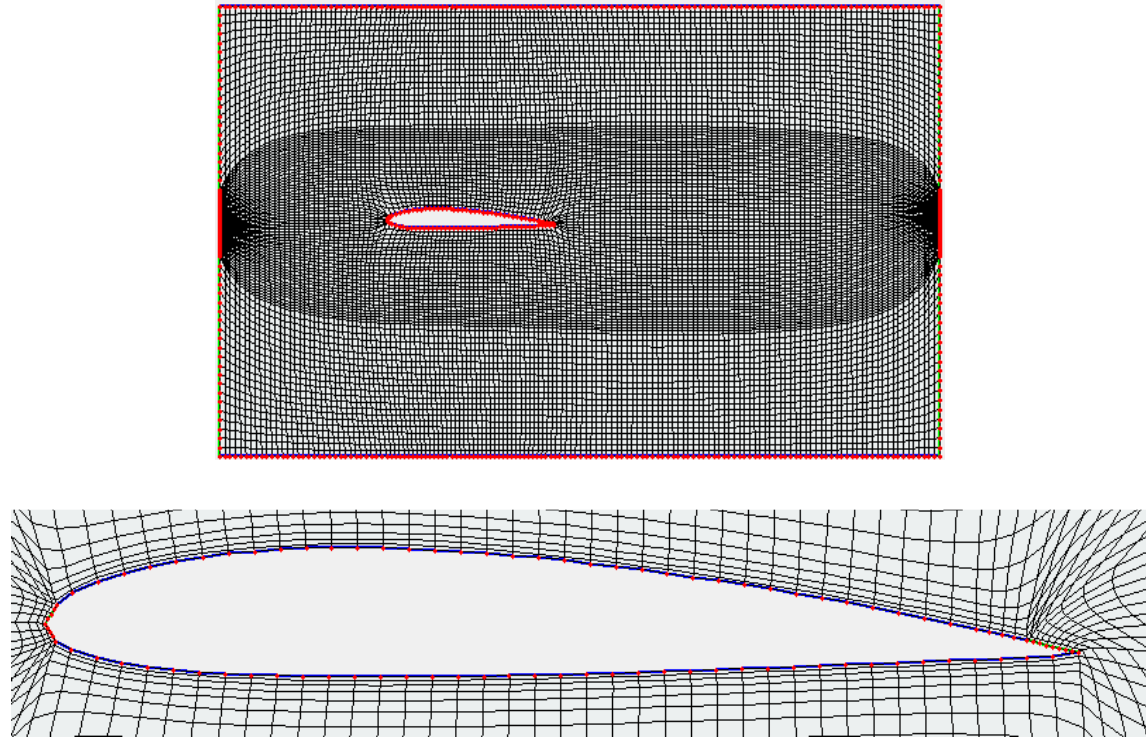


Figura 31 - Malha 2 do perfil alar

Malha 3

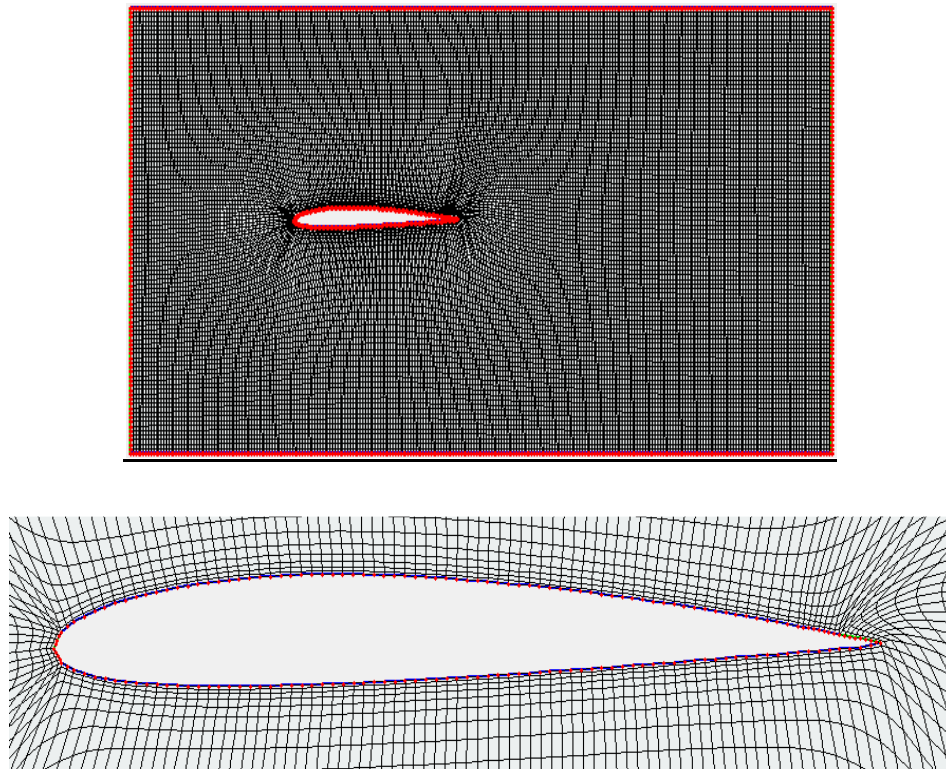


Figura 32 - Malha 3 do perfil alar

A malha 2 possui 14137 nodos. A malha 3, que é uma malha muito refinada, possui o dobro dos nodos relativamente à malha 1, mais propriamente 26140.

Os resultados obtidos relativamente ao coeficiente de arrasto foram os seguintes:

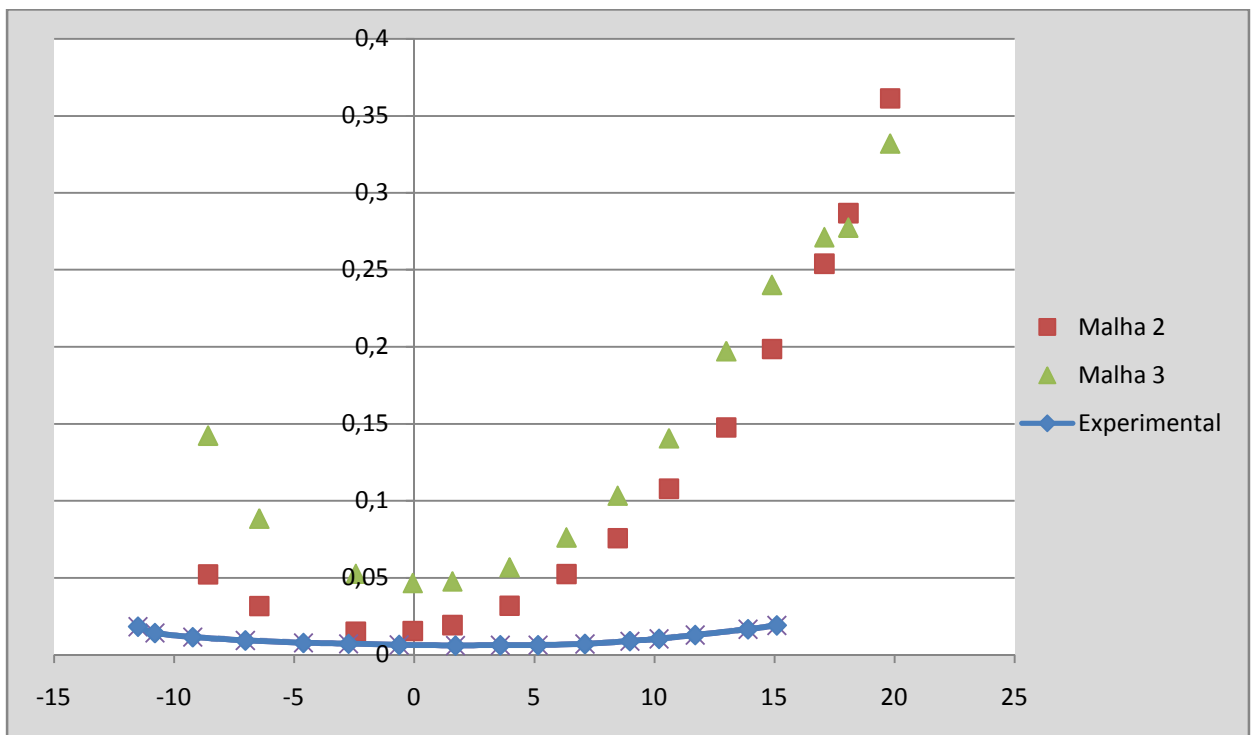


Figura 33 - Resultados da malha 1 e malha 2

Verifica-se, após análise do gráfico representado na figura 33, que os valores do coeficiente de arrasto continuam muito elevados, mesmo utilizando uma malha com elevado grau de refinamento. Esta situação acontece porque as forças no escoamento são essencialmente forças viscosas, e as componentes viscosas são sempre mais difíceis de obter.

4.3. Convecção natural

Como já foi referido no capítulo três, o teste utilizando convecção natural consiste em analisar a transferência de calor entre uma elipse inserida numa circunferência, obter a variação do número de Nusselt com o ângulo de orientação da elipse, e comparar os resultados obtidos com os resultados experimentais e os obtidos no estudo.

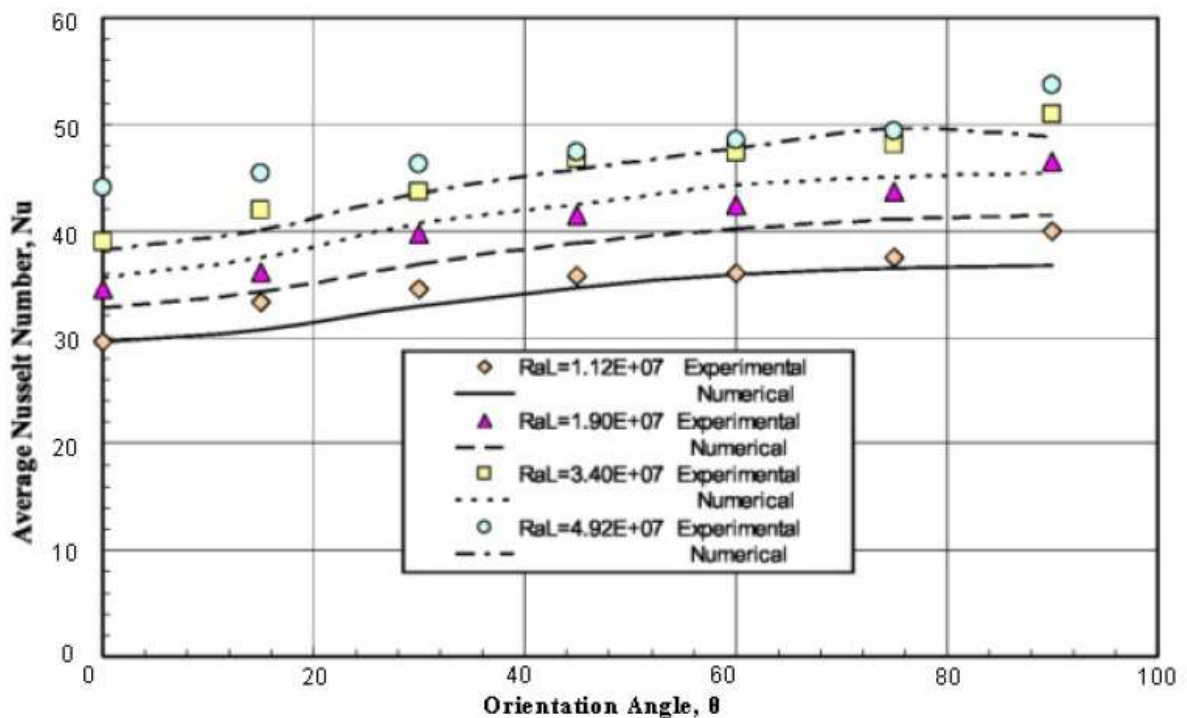


Figura 34 - Gráfico Nu – α

(fonte: R.Y. Sakr & N.S. Berbish & A.A. Abd-Alziz & A.S. Hanafi (2008))

Os testes a que se refere a figura 34 foram realizados para 4 números de Rayleigh diferentes, utilizando a mesma malha.

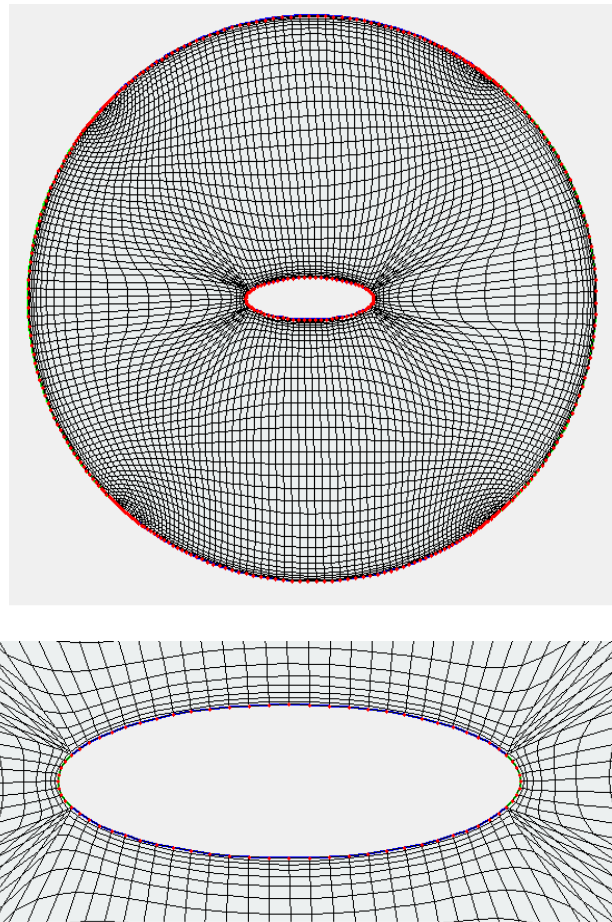


Figura 35 - Malha do cilindro – elipse

A malha representada na figura 35 possui 5068 nodos e os resultados obtidos foram os que se apresentam nas figuras seguintes. Em cada figura são apresentados os resultados numéricos bem como os resultados do estudo usado como referência, e os resultados obtidos com o código.

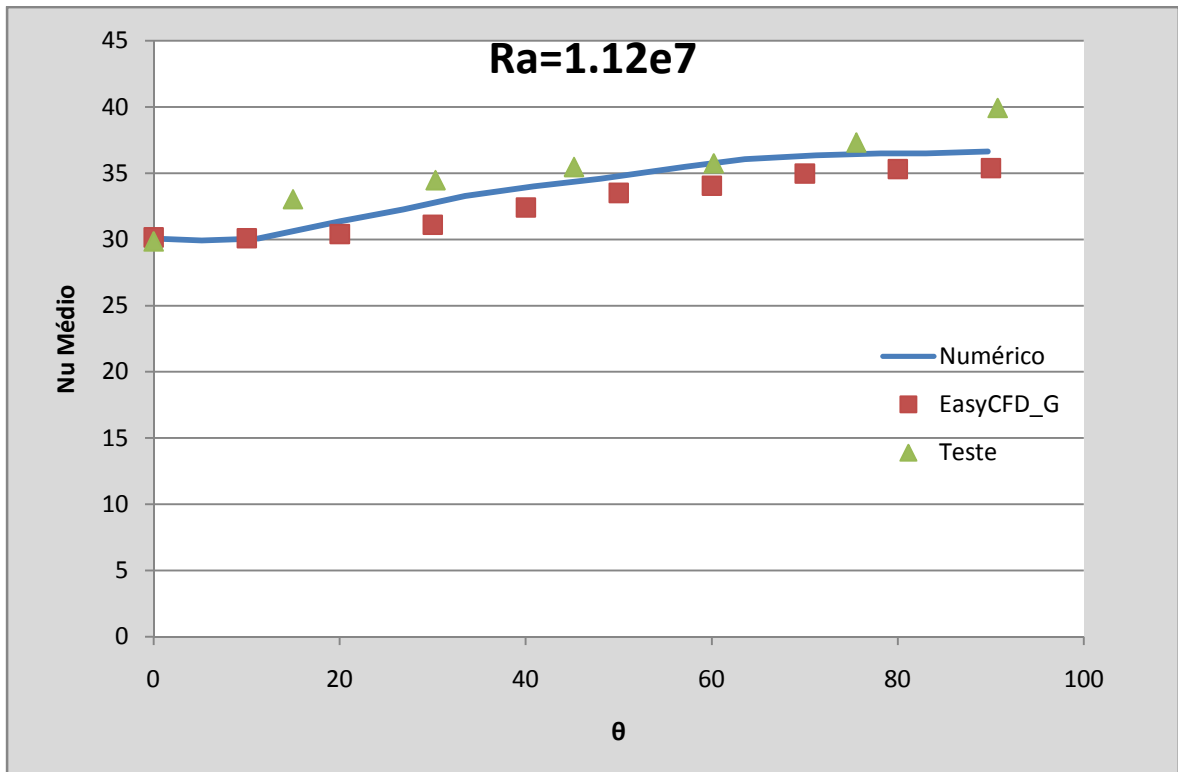


Figura 36 - Resultados obtidos para $Ra = 1.12e7$

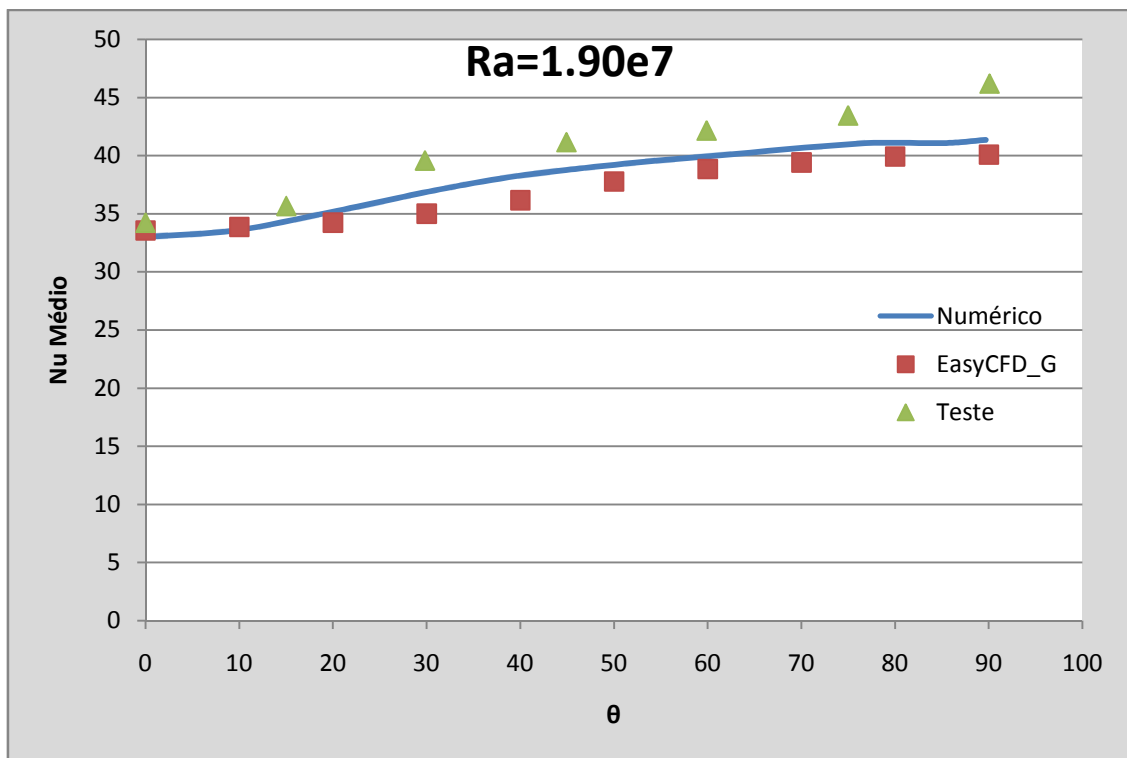


Figura 37 - Resultados obtidos para $Ra = 1.90e7$

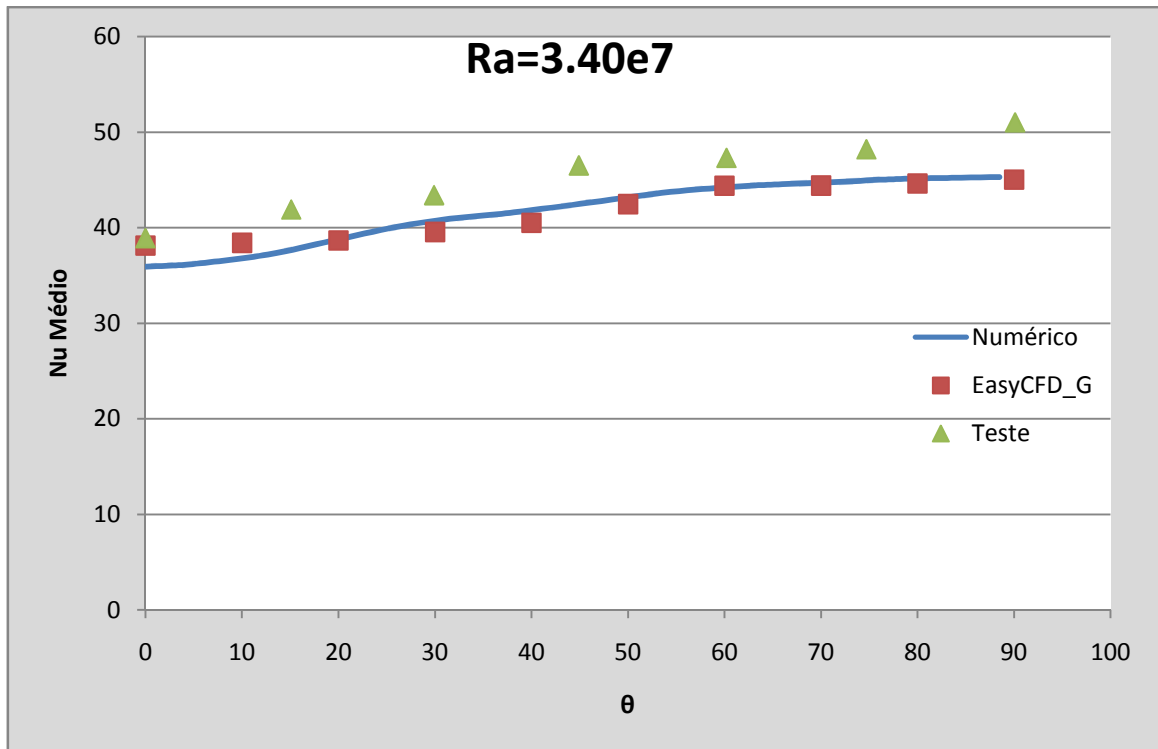


Figura 38 - Resultados obtidos para $Ra = 3.40e7$

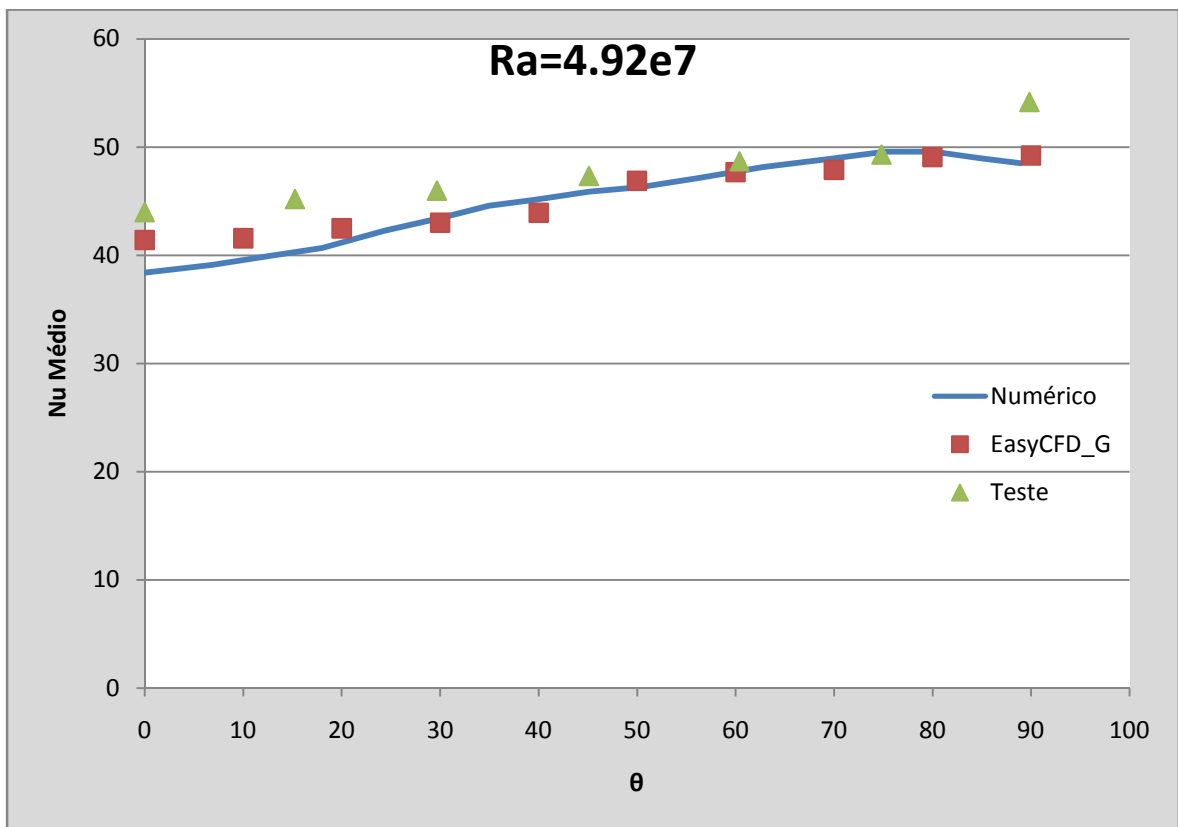


Figura 39 - Resultados obtidos para $Ra = 4.92e7$

Encontram-se representados nas figuras anteriores os resultados obtidos para os diferentes números de Rayleigh. Observa-se que, com a malha apresentada na figura 37, se obtêm os resultados desejados, verificando-se apenas pequenos desvios. Observa-se, também, que se obtêm resultados melhores que os apresentados no estudo.

O problema que surgiu ao realizar este teste foi o processo não convergir quando se começou a variar o ângulo de orientação da elipse, facto que se explica pela não-estacionaridade do escoamento.

O que foi feito de seguida foi analisar a variação do número de Nusselt ao longo do tempo. E essa variação pode ser observada na figura 40.

Esta análise foi feita para $Ra = 4.92e7$ e $\theta=30$, $\theta=50$ e $\theta=70$.

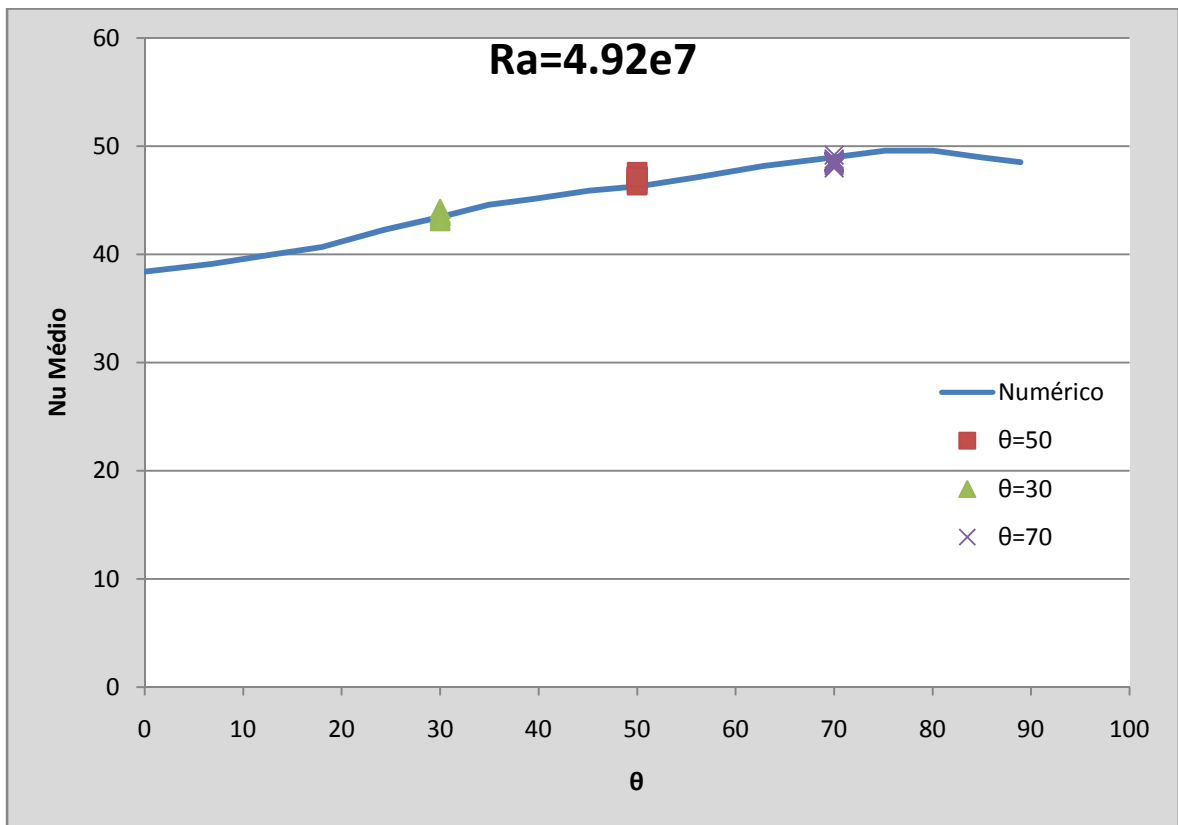


Figura 40 – Variação do número de Nusselt

Observa-se, na figura anterior, que a variação do número de Nusselt ao longo do tempo é mínima, o que valida os resultados obtidos anteriormente.

5. CONCLUSÕES

Após terem sido apresentados e discutidos os resultados obtidos, importa agora realçar as principais conclusões do trabalho efectuado.

Ao fazer a pesquisa bibliográfica, dei conta que havia um número elevado de estudos de escoamentos diversos, pelo que não tive dificuldade em escolher estudos para servirem de teste ao código.

O código EasyCFD_G apresenta facilidade de utilização mesmo para pessoas que nunca utilizaram nenhum programa de simulação numérica, permitindo realizar simulações de escoamentos e de problemas envolvendo transferência de calor num computador doméstico.

Observou-se que a precisão dos resultados depende essencialmente do grau de refinamento da malha utilizada, sendo mais precisos os resultados quanto maior for o grau de refinamento da malha. Esta situação pode ser observada no teste realizado com o cilindro, no qual, ao aumentar o número de nodos da malha 1 para a malha 6, se registou uma melhoria nos resultados, como pode ser observado na figura 19.

A contrapartida de um grau de refinamento muito alto é um tempo de cálculo mais elevado.

Também se observou que a precisão dos resultados depende do grau de enviesamento das linhas da malha, ou seja, quanto maior a ortogonalidade entre as linhas da malha, melhor vão ser os resultados obtidos, como verificado na malha 6 do cilindro (figura 18) em que se introduziu um trapézio permeável para que as linhas da malha ficassem mais rectas.

O código é capaz de reproduzir resultados iguais aos obtidos nos estudos que serviram de teste, com a excepção do coeficiente de arrasto no perfil alar. Como já foi referido, isto acontece porque as forças são essencialmente forças viscosas e as componentes viscosas são mais difíceis de obter.

Resumindo, o código EasyCFD_G é um código bem construído, capaz de reproduzir resultados exactos e apresenta simplicidade e facilidade de utilização.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

CHIEN-CHENG CHANG & RUEY-LING CHERN (1991). A numerical study of flow around an impulsively started circular cylinder by a deterministic vortex method. *J. Fluid Mech.*, vol. 233, pp. 243-263.

Eric Didier & Antonio R. J. Borges (2007). NUMERICAL PREDICTIONS OF LOW REYNOLDS NUMBER FLOW OVER AN OSCILLATING CIRCULAR CYLINDER. *Journal of Computational and Applied Mechanics*, Vol. 8., No. 1, pp. 39 – 55.

Guia de laboratório (2008). ESCOAMENTO DE AR AO REDOR DE UM CILINDRO EM TUNEL DE VENTO. Laboratório do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de São Paulo.

H. K. VERSTEEG & W. MALALASEKERA (2007), *An introduction to Computational Fluid Dynamics the Finite Volume Method*, Pearson Prentice Hall.

JOHN D. ANDERSON, JR. (1989), *INTRODUCTION TO FLIGHT*, MCGRAW-HILL, 3ª Edição.

José Ignacio Hernández López & Julio R. Meneghini & J.A.P. Aranha (2004). Estudo de Estabilidade no Escoamento ao Redor de um cilindro. Departamento de Engenharia Mecânica da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

Kjetil Birkeland Moe (2008). Simulation of flow over airfoil, *COMPARING EXPERIMENT AND SIMULATION OF JOUKOWSKI AIRFOIL*.

Lorenzo Basso Benevenuti & Jorge H. Silvestrini (2006). ESTUDO NUMÉRICO DO ESCOAMENTO ATRAVÉS DE UM CILINDRO OSCILANTE UTILIZANDO O MÉTODO DE FRONTEIRAS IMERSAS. *Mecânica Computacional Vol XXV*, pp. 207-216.

Luis Adriano Oliveira & António Gameiro Lopes (2010), *MECÂNICA DOS FLUIDOS, EDIÇÕES TÉCNICAS E PROFISSIONAIS (ETEP)*, 3ª Edição.

Marilyn J. Smith & Tin-Chee Wong & Mark Potsdam & James Baeder & Sujeet Phanse (2004). Evaluation of CFD to Determine Two-Dimensional Airfoil Characteristics for Rotorcraft Applications. American Helicopter Society International.

Mehrdad Ghods (2001). *THEORY OF WINGS AND WIND TUNNEL TESTING OF A NACA 2415 AIRFOIL*. University of British Columbia.

Peter Fuglsang & Ioannis Antoniou & Christian Bak & Helge Aa. Madsen (1998). Wind Tunnel Test of the RISO-1 Airfoil. Riso National Laboratory, Roskilde.

Prof. José J. Costa, TRANSMISSÃO DE CALOR II (2004), Departamento de Engenharia Mecânica da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra

Suhas V. Patankar, Numerical Heat Transfer and Fluid Flow, Taylor&Francis.

W. Medjroubi & J. Peinke & B. Stoevesandt (2009). Visualization of the unsteady flow around an airfoil using spectral/hp elements approach. University of Oldenburg, Institute of Physics, Germany.

Xiaoqun Feng & Michael Köster & Li Zhang (2005). Cylinder Flow Benchmark A Comparative Study. University of Dortmund, Germany.

Rogério Fernandes Brito & Aristeu Silveira Neto & Márcio de Oliveira & Genésio José Menon (2002). CONVECÇÃO NATURAL TURBULENTA EM CAVIDADE RETANGULAR COM UM CILINDRO INTERNO. Mecânica Computacional Vol. XXI, pp. 620-633, Santa Fe-Paraná, Argentina.

R.Y. Sakr & N.S. Berbish & A.A. Abd-Alziz & A.S. Hanafi (2008). Experimental and Numerical Investigation of Natural Convection Heat Transfer in horizontal Elliptic Annuli. Journal of Applied Sciences Research, INSInet Publication.

Phillip Gibson (2009). Modeling Heat and Mass Transfer from Fabric-Covered Cylinders. Journal of Engineered Fibers and Fabrics 1 Volume 4.

Tobias Zitzmann & Malcolm Cook & Peter Pfrommer & Simon Rees & Ljiljana Marjanovic (2005). SIMULATION OF STEADY-STATE NATURAL CONVECTION USING CFD. Building Simulation, pp 1449-1456.

Rogério Fernandes Brito & Doacir Vilar de Assis Junior & Aristeu da Silveira Neto & Genésio José Menon (2004). CONVECÇÃO NATURAL TURBULENTA EM CAVIDADES COM SUPERFÍCIES RESFRIADAS COM UM CORPO QUENTE INTERNO. Braz. Soc. of Mechanical Sciences and Engineering.