



• U • C •

FCTUC FACULDADE DE CIÊNCIAS
E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE COIMBRA

DEPARTAMENTO DE
ENGENHARIA MECÂNICA

Desempenho das ferramentas cfMesh e snappyHexMesh para geração da malha em torno de perfis alares.

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

Autor

Diogo Almeida Ramalho

Orientador

Almerindo Domingues Ferreira

Júri

Presidente Professor Doutor **Pedro de Figueiredo Vieira Carvalheira**
Professor Auxiliar da Universidade de Coimbra

Vogais Professor Doutor **António Manuel Gameiro Lopes**
Professor Auxiliar da Universidade de Coimbra

Orientador Professor Doutor **Almerindo Domingues Ferreira**
Professor Auxiliar da Universidade de Coimbra

Coimbra, Setembro, 2015

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.

Em primeiro lugar quero agradecer ao meu professor e orientador Dr. Almerindo Ferreira pela sua disponibilidade, profissionalismo, simpatia e confiança que em mim depositou. Esteve sempre pronto a esclarecer as dúvidas que lhe eram colocadas, com clareza e qualidade científica, nunca faltando palavras de incentivo. Embora se espere de um professor universitário estas qualidades, nem sempre isso se verifica pelo que é de louvar quem as demonstra.

Aos meus pais pelo permanente incentivo à procura de novos desafios e à incansável paciência que tiveram com os meus erros.

À minha namorada que foi sempre compreensiva em momentos mais difíceis e que me soube dar a devida motivação e conselhos para ultrapassar os problemas que me desmotivavam.

Aos meus amigos pela boa disposição partilhada durante este período.

A todos os colegas que me acompanharam durante a execução desta tese pelos conhecimentos partilhados.

Resumo

O objetivo do trabalho apresentado é o estudo da eficiência do gerador de malha cfMesh na criação da malha em torno de um perfil alar, NACA 0018. Os geradores de malha são, tal como o nome indica, responsáveis pela geração da malha usada nos estudos de dinâmica dos fluidos computacional (CFD). Este gerador, ou algoritmo, é relativamente recente mas que segundo alguns estudos, este apresenta resultados interessantes na forma como gera a malha em torno de um perfil alar. Para comprovar a eficiência deste algoritmo foram efetuados cálculos das características aerodinâmicas no software livre OpenFOAM e comparadas com as características já conhecidas deste perfil (obtidos experimentalmente). Para além da comparação dos valores experimentais, foram ainda calculados e comparados com os valores obtidos com um gerador de malha diferente, o snappyHexMesh, com o objetivo de verificar as diferenças obtidas nos cálculos efetuados com diferentes malhas.

Palavras-chave: cfMesh, snappyHexMesh, gerador de malha, OpenFOAM, CFD, NACA 0018.

Abstract

The objective of this work is to study the efficiency of a mesh generator named cfMesh, which in this case will be responsible to create a mesh around an airfoil, the NACA 0018. The mesh generator is, as the name implies, responsible for generating the mesh used in studies of computational fluid dynamics (CFD). This generator, or algorithm, is relatively recent but according to some studies, the way it generates the mesh around an airfoil is very interesting. To prove the efficiency of this algorithm were made calculations of the aerodynamic characteristics in the open source software OpenFOAM and comparing the results with the already known characteristics of this profile (obtained experimentally). In addition to comparing the experimental values it was also calculated and compared the values obtained with a different mesh generator, the snappyHexMesh, in order to verify the differences obtained in the calculation performed with different meshes.

Keywords cfMesh, snappyHexMesh, mesh generator, OpenFOAM, CFD, NACA 0018.

ÍNDICE

| | |
|--|------|
| Índice de Figuras | xi |
| Índice de Tabelas | xiii |
| Simbologia e Siglas | xv |
| Simbologia..... | xv |
| Siglas | xvi |
| 1. INTRODUÇÃO..... | 1 |
| 1.1. Objetivos..... | 2 |
| 2. Revisão Bibliográfica | 5 |
| 2.1. Mecânica dos Fluidos | 5 |
| 2.1.1. Perfis Alares | 9 |
| 2.2. NACA 0018 | 12 |
| 2.3. Simulação Numérica..... | 14 |
| 2.3.1. Modelo de Turbulência..... | 16 |
| 2.3.2. Domínio de Cálculo e Malhas | 17 |
| 2.3.3. OpenFOAM..... | 18 |
| 3. Metodologia..... | 21 |
| 3.1. Geometria CAD | 21 |
| 3.2. OpenFOAM | 22 |
| 3.2.1. Geradores de Malha..... | 22 |
| 3.2.2. Condições de Fronteira..... | 24 |
| 3.2.3. Método de Cálculo | 24 |
| 3.2.4. Pós-Processamento | 25 |
| 3.3. cfMesh | 25 |
| 4. Resultados..... | 29 |
| 4.1. Geometria..... | 29 |
| 4.2. Malhas Geradas..... | 30 |
| 4.2.1. snappyHexMesh | 30 |
| 4.2.2. CfMesh | 32 |
| 4.3. Condições de Fronteira | 36 |
| 4.4. Aproximações Obtidas..... | 40 |
| 5. Discussão e Conclusões..... | 43 |
| REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 45 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Fig. 2.1 Perfil de velocidades no exterior e interior da camada limite. Efeito da tensão tangencial provocada pelo atrito entre o fluido e uma superfície sólida. [3] | 6 |
| Fig. 2.2 Desenvolvimento da velocidade do escoamento no interior da camada limite sobre uma placa plana. [4] | 8 |
| Fig. 2.3 Comportamento da velocidade nas regiões da camada limite em regime turbulento [1]. | 8 |
| Fig. 2.4 Terminologia de perfis alares. | 9 |
| Fig. 2.5 Forças geradas pela passagem do escoamento num perfil alar. | 10 |
| Fig. 2.6 Esquema da evolução do movimento do fluido na passagem de um perfil. | 10 |
| Fig. 2.7 Esquema das linhas de escoamento em torno de um simples perfil alar (uma placa curva) [5]. | 11 |
| Fig. 2.8 Comportamento típico dos coeficientes de sustentação (linha azul) e de arrasto (linha vermelha) de um perfil alar assimétrico (o valor de C_L , para $\alpha = 0$, é diferente de 0). | 12 |
| Fig. 2.9 Características do perfil NACA 0018 determinadas pela NASA ($Re = 3,4 \times 10^6$) [7]. | 13 |
| Fig. 3.1 Três primeiras etapas num estudo CFD. | 21 |
| Fig. 3.2 Criação do perfil em Solidworks usando pontos obtidos pela equação 2.7. | 22 |
| Fig. 3.3 Representação dos domínios de malha gerados usando o cfMesh. | 27 |
| Fig. 4.1 Geometria do perfil usada para o gerador de malha snappyHexMesh. | 29 |
| Fig. 4.2 Geometria do perfil usada para o gerador de malha cfMesh. | 30 |
| Fig. 4.3 Parâmetros (Helyx-OS) das fronteiras do domínio da malha snappyHexMesh. | 30 |
| Fig. 4.4 Parâmetros (Helyx-OS) da malha snappyHexMesh do tamanho das células em função da distância ao perfil e do refinamento das células próximas do perfil, respetivamente. | 31 |
| Fig. 4.5 Malha gerada pelo snappyHexMesh em torno do perfil NACA 0018 com ângulo de ataque de 12° | 31 |
| Fig. 4.6 Detalhe da malha snappyHexMesh no bordo de ataque e no bordo de fuga, respetivamente. | 32 |
| Fig. 4.7 Valores de pressão, ao longo da superfície do perfil, obtidos nos testes de independência de malha ao longo da superfície do perfil. | 34 |
| Fig. 4.8 Malha gerada pelo cfMesh (teste 4) com os parâmetros finais em torno do perfil NACA 0018 com ângulo de ataque de 12° | 35 |

| | |
|--|----|
| Fig. 4.9 Detalhe da malha cfmesh (teste 4) no bordo de ataque e no bordo de fuga do perfil, respectivamente. | 35 |
| Fig. 4.10 Tipo de escoamento e modelo de turbulência definidos em regime permanente e transiente, respectivamente (Helyx-OS). | 36 |
| Fig. 4.11 Propriedades do ar consideradas nos testes efetuados com ambas as malhas (Helyx-OS). | 37 |
| Fig. 4.12 Nomes das superfícies consideradas e respectivos tipos associados. | 38 |
| Fig. 4.13 Condições de fronteira na entrada e na saída de escoamento, respectivamente (Helyx-OS). | 38 |
| Fig. 4.14 Parâmetros considerados para os valores residuais em regime permanente e transiente, respectivamente (Helyx-OS). | 39 |
| Fig. 4.15 Parâmetros do processo iterativo em regime permanente e transiente, respectivamente (Helyx-OS). | 40 |
| Fig. 4.16 Comparação dos coeficientes de sustentação obtidos por simulação computacional com os valores experimentais. | 41 |
| Fig. 4.17 Comparação dos coeficientes de arrasto obtidos por simulação computacional com os valores experimentais. | 41 |

ÍNDICE DE TABELAS

| | |
|---|----|
| Tab. 3.1 Código adicional acrescentado ao ficheiro <i>controldict</i> | 25 |
| Tab. 3.2 Estrutura do código do ficheiro STL (em código ASCII) a usar pelo cfMesh..... | 26 |
| Tab. 3.3 Variáveis do gerador de malha cfMesh..... | 27 |
| Tab. 4.1 Parâmetros do domínio 3 fixados para testes de independência de malha no gerador de malha cfMesh (valores em metros) | 33 |
| Tab. 4.2 Parâmetros variados nos testes efetuados à malha cfMesh..... | 33 |
| Tab. 4.3 Valores médios de $Y +$ das malhas usadas nos testes de independência de malha. | 34 |
| Tab. 4.4 Código do ficheiro <i>meshdict</i> da malha cfmesh (teste 4) | 36 |
| Tab. 4.5 Ângulos de ataque considerados no estudo efetuado..... | 40 |
| Tab. 4.6 Número de células e de pontos das malhas geradas e os respetivos tempos de geração..... | 40 |

SIMBOLOGIA E SIGLAS

Simbologia

ρ – Densidade

ε – Compressibilidade do fluido

M – Número de Mach

u – Velocidade do escoamento

a – Celeridade local do som

ν – Viscosidade cinemática

μ – Viscosidade dinâmica

τ – Tensão tangencial

V_∞ – Velocidade do escoamento não perturbado

Re – Número de Reynolds

L – Comprimento característico

h – Flecha de um perfil alar

α – Ângulo de ataque

C_L – Coeficiente de sustentação

C_D – Coeficiente de arrasto

A_p – Área de projeção

C_M – Coeficiente de momento

c – Comprimento da corda de um perfil

t' – Máxima espessura de uma fração da corda de um perfil NACA

ϕ – Variável arbitrária da equação de transporte

Γ_ϕ – Coeficiente de difusão

S_ϕ – Fontes ou poços de quantidade de movimento

τ_{ij} – Tensor das tensões

κ – Energia cinética turbulenta

ω – Frequência de turbulência

- ε – Taxa de dissipação
 μ_t – Viscosidade dinâmica turbulenta
 S – Módulo da taxa de deformação média
 Y^+ – Distância adimensional à superfície
 u_T – Velocidade de atrito ($u_T = \sqrt{\tau_0/\rho}$)

Siglas

- MIT – Massachusetts Institute of Technology
CFD – Computational Fluid Dynamics
NACA – National Advisory Committee for Aeronautics
NASA – National Aeronautics and Space Administration
ADA – Ângulo De Ataque
SST – Shear Stress Transport
FORTRAN – IBM Mathematical FORMula TRANslation System
SIMPLE – Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations
PISO – Pressure-Implicit with Splitting of Operators
STL – STereoLithography
GUI – Graphical User Interface
CAD – Computer-Aided Design
ASCII – American Standard Code for Information Interchange

1. INTRODUÇÃO

No desenvolvimento de um qualquer projeto de engenharia, é necessário prever o sucesso desse mesmo projeto. Para prever o seu sucesso é comum realizar-se testes laboratoriais com um modelo à escala submetendo este às condições previstas do seu funcionamento e adequadas à escala do modelo. Esta metodologia é normalmente eficaz, no entanto, o tempo, os recursos humanos, financeiros e materiais podem ser muito elevados e condicionar a exequibilidade do projeto. Nesse sentido foi necessário encontrar alternativas.

Uma das áreas mais afetadas por este fator é o estudo do escoamento de um fluido em torno de uma qualquer superfície ou objeto. Por este motivo, em 1947, Zdeněk Kopal compilou enormes tabelas do escoamento supersónico em torno de cones alongados (cuja geometria era aplicada nas cápsulas usadas para fazer a reentrada na atmosfera dos astronautas) [1], resolvendo numericamente as equações diferenciais de Taylor-Maccoll e utilizando-as num computador digital, ainda muito primitivo, localizado no *Massachusetts Institute of Technology* (MIT). Esta iniciativa foi uma tentativa de encurtar o tempo de estudo do escoamento em torno destas geometrias e poder-se-á considerar o primeiro exemplo de *Computational Fluid Dynamics* (CFD), que do inglês se pode traduzir como “dinâmica dos fluidos computacional”.

A dinâmica dos fluidos computacional é a simulação numérica, com o auxílio dos computadores, dos processos físicos e/ou físico-químicos presentes no escoamento, baseada na resolução das equações de conservação de massa, energia, quantidade de movimento e espécies químicas.

A primeira geração da dinâmica dos fluidos computacionais surgiu durante os anos 50 e 60 do século XX, impulsionado simultaneamente pelos primeiros computadores de alta performance e eficiência e pela necessidade de encontrar uma solução para o problema da alta velocidade e alta temperatura de um corpo na reentrada na atmosfera terrestre, como referido acima. As altas temperaturas obrigavam à inclusão das energias de vibração e reações químicas na resolução das equações de estudo do escoamento, que tornavam a sua resolução analítica impossível. Os pioneiros nestes estudos foram Fay, J.A.

e Riddell, F.R. (1958) e Blottner, F.G. (1964), no estudo de camadas limite, e Hall, H.G., Eschenroeder, A.Q. e Marrone, P.V. (1962), nos estudos de escoamentos invíscidos [1].

A segunda geração de estudos da dinâmica dos fluidos computacional, presente até a data, envolve a aplicação das equações que regulam o escoamento de fluidos, e cuja complexidade é tão grande que o uso de computadores se torna indispensável. O recurso aos estudos da dinâmica dos fluidos computacional é hoje em dia tão importante na sua precisão que se pode considerar uma “terceira forma de abordagem” na dinâmica de fluidos, sendo as outras duas, o estudo laboratorial e o estudo puramente teórico.

A importância da dinâmica dos fluidos computacional originou o surgimento de vários softwares para facilitar a elaboração dos algoritmos de cálculos nas várias situações. A aplicação destes softwares tem uma área muito vasta, no entanto este trabalho irá incidir sobre o estudo do escoamento em torno de um perfil alar, nomeadamente o perfil NACA 0018.

A nomenclatura definida para o perfil em estudo foi atribuída pela NACA (National Advisory Committee for Aeronautics), antiga NASA (National Aeronautics and Space Administration), em 1930. A escolha deste perfil, para o estudo aqui apresentado, deveu-se à existência de outros estudos já realizados e bem fundamentados das suas características.

1.1. Objetivos

O estudo de um qualquer caso recorrendo a software CFD depende da localização e do número de pontos onde se irá obter a solução das diversas variáveis. A este conjunto de pontos é comum atribuir-se o nome de malha. A definição da malha é conseguida através de algoritmos que determinam a localização desses pontos (gerador de malha). É portanto de grande importância num estudo de CFD a escolha adequada do algoritmo que define a malha.

O estudo aqui apresentado tem por base a utilização do software livre de CFD OpenFOAM e incide sobre o gerador de malha cfMesh. Para isso são comparados os valores obtidos usando um gerador de malha já conhecido, o snappyHexMesh. O snappyHexMesh é o gerador de malha nativo do OpenFOAM, capaz de gerar uma malha em torno de uma geometria previamente definida. O OpenFOAM, ao contrário da maioria dos softwares nesta área é gratuito, o que o torna muito interessante quando se pretende

reduzir os custos neste tipo de estudos, pois os custos de utilização de softwares comerciais mais conhecidos são bastante elevados.

Depois de geradas as malhas com ambos os geradores de malha, estas foram comparadas usando os valores obtidos por simulação numérica utilizando o OpenFOAM com os valores experimentais existentes. De referir que os estudos foram realizados para valores de Reynolds de 7×10^5 (ver subcapítulo 4.3), comparando valores de coeficientes de sustentação, de arrasto e valores de pressão.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O objetivo deste capítulo é introduzir os conceitos teóricos associados ao estudo efetuado. Serão apresentados os principais fundamentos teóricos de mecânica dos fluidos associados ao presente estudo, com as respectivas formulações compiladas por Oliveira e Lopes (2006) [2]. Será também apresentada uma breve introdução ao software utilizado, bem como a descrição das características e propriedades do perfil em estudo.

2.1. Mecânica dos Fluidos

O estudo do escoamento de um fluido baseia-se na resolução das equações de conservação de massa e de quantidade de movimento. Para além destas equações, nos escoamentos que envolvam fenómenos de transferência de calor ou efeitos de compressibilidade, a equação de conservação de energia também deve ser considerada. Estas equações são suficientes no caso de o escoamento ser laminar, no entanto quando o escoamento apresenta um comportamento turbulento, para além destas equações é necessário considerar equações de transporte adicionais, associadas ao modelo de turbulência considerado.

Para introduzir as equações referidas deve-se perceber algumas propriedades dos fluidos, nomeadamente a compressibilidade, a densidade e a viscosidade do fluido.

Sendo a densidade de um fluido (ρ) definida como a massa por unidade de volume, esta propriedade pode ser alterada em função da variação da pressão ou temperatura a que está sujeito. A variação de densidade está associada à compressibilidade do fluido (ϵ), pelo que existem fluidos cuja compressibilidade é bastante significativa, especialmente os gases. No entanto em determinadas situações a variação da densidade é pequena, pelo que se pode considerar esse fluido como incompressível (densidade constante).

O parâmetro físico que define a forma como deve ser tratado o fluido em estudo é o número de Mach:

$$M = \frac{u}{a}, \quad (2.1)$$

onde u , representa a velocidade do escoamento e a , a celeridade local do som (aqui assumida como um valor aproximado de 340 m/s para condições padrão). Considera-se que um fluido pode ser tratado como incompressível, desprezando assim os efeitos de compressibilidade, se o valor de Mach for inferior a $0,3$, ou seja, se a velocidade do escoamento for inferior a 120 m/s . O escoamento nesta situação é designado subsônico. À medida que o número de Mach se aproxima da unidade (escoamento transônico) ou a ultrapassa (escoamento supersônico), os efeitos de compressibilidade tornam-se particularmente importantes, resultando no aparecimento de ondas de choque (compressão) e de ondas de expansão.

Uma das propriedades mais importantes a compreender na análise do escoamento de um fluido em torno de uma qualquer superfície é a sua viscosidade, que é responsável pelo atrito gerado entre o fluido e a superfície. A viscosidade é uma característica que pode ser quantificada de uma forma cinemática (ν) ou dinâmica (μ), sendo a relação entre ambas dada pela seguinte equação:

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (2.2)$$

O atrito gerado entre o fluido e a superfície é o resultado da interação molecular entre as partículas do fluido e tem origem na condição de aderência parietal, onde o fluido assume uma velocidade nula, igual à velocidade da superfície (Fig. 2.1).

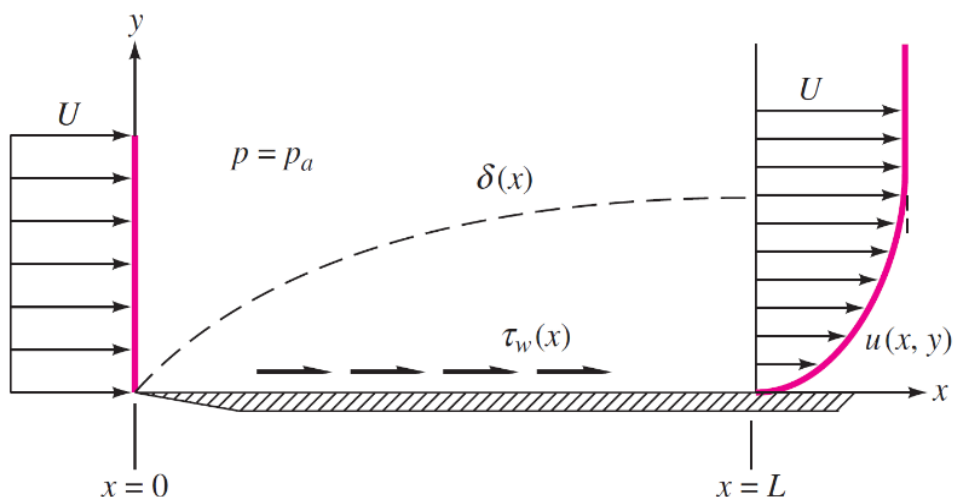


Fig. 2.1 Perfil de velocidades no exterior e interior da camada limite. Efeito da tensão tangencial provocada pelo atrito entre o fluido e uma superfície sólida. [3]

Deste modo, conclui-se que o próprio fluido devido à sua viscosidade, apresenta uma determinada resistência ao seu deslocamento. Esta resistência pode ser

quantificada sobre a forma de uma tensão tangencial (τ) que, segundo a lei de Newton, depende da viscosidade dinâmica do fluido (μ) e do gradiente de velocidades, ou seja, a variação da velocidade do fluido (u) em função da distância à superfície com a qual está em contacto (y):

$$\tau(x) = \mu \cdot \frac{du}{dy} \quad (2.3)$$

No entanto, a partir de uma determinada distância o efeito do atrito, provocado pela viscosidade do fluido, é desprezável e a velocidade do fluido assume um valor constante e igual ao valor do escoamento não perturbado (V_∞), ou seja, o fluido comporta-se como um fluido invíscido. A este escoamento, onde a viscosidade é desprezada, atribui-se o nome de escoamento potencial.

A distância até onde se verifica, de uma forma significativa, a variação da velocidade do fluido provocada pelo efeito da viscosidade, define o limite da designada camada limite. Em termos dimensionais esta camada é muito reduzida, mas tem um papel fundamental no estudo do escoamento de um fluido sobre uma superfície. As equações deduzidas pela teoria da camada limite só são válidas quando a grandeza adimensional que relaciona as forças de inércia e as forças viscosas, denominada número de Reynolds (Re), assume valores elevados (ordem de grandeza superior a 10^4). Esta grandeza é função da velocidade do escoamento (V_∞), do comprimento característico (L) e da viscosidade cinemática (ν), e é dado pela seguinte expressão:

$$Re = \frac{V_\infty \cdot L}{\nu} \quad (2.4)$$

Na camada limite podem ocorrer dois tipos de escoamento, que dependem da organização do mesmo. Se o fluido dentro da camada limite apresentar um comportamento ordenado e suave, com linhas de corrente praticamente paralelas à superfície, então o escoamento assume-se como laminar. Se o escoamento apresentar recetividade a pequenas perturbações (dependendo das características do escoamento e da perturbação), estas poderão ser de tal modo amplificadas que, através de um processo não-linear, dão origem a um escoamento caótico e desordenado, ou seja, um regime turbulento (Fig. 2.2).

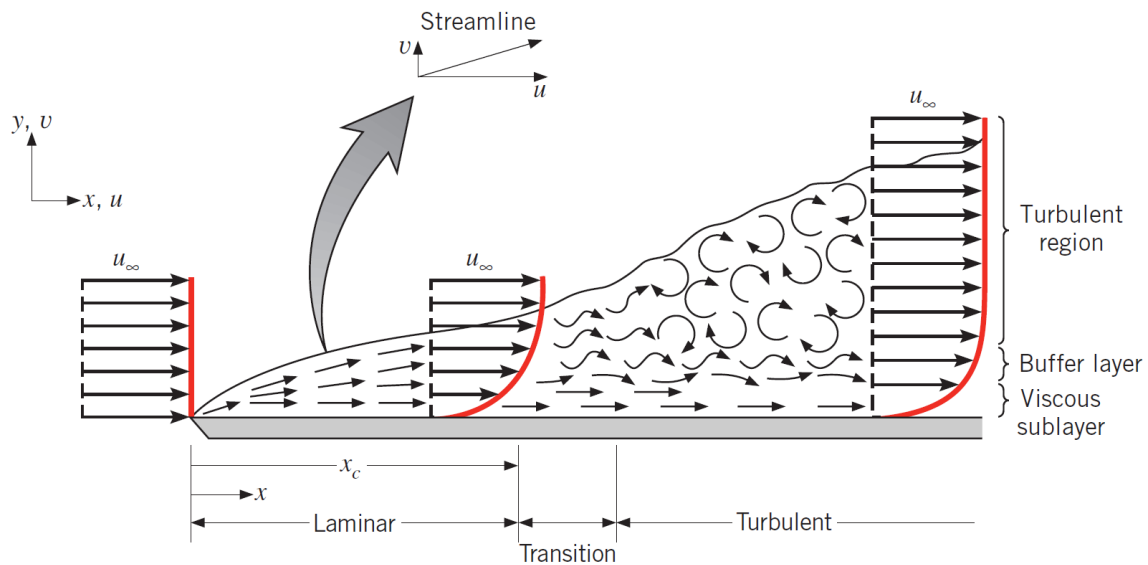


Fig. 2.2 Desenvolvimento da velocidade do escoamento no interior da camada limite sobre uma placa plana. [4]

O escoamento junto de uma superfície apresenta-se inicialmente em regime laminar, transformando-se em regime turbulento a partir de uma determinada distância. Entre estas duas existe uma outra designada habitualmente por região de transição, que define a passagem de regime laminar a turbulento. Junto da superfície existe ainda uma fina camada, designada subcamada viscosa (também pode ser designada como região linear), onde os efeitos da viscosidade são predominantes e o escoamento é praticamente laminar (Fig. 2.3).

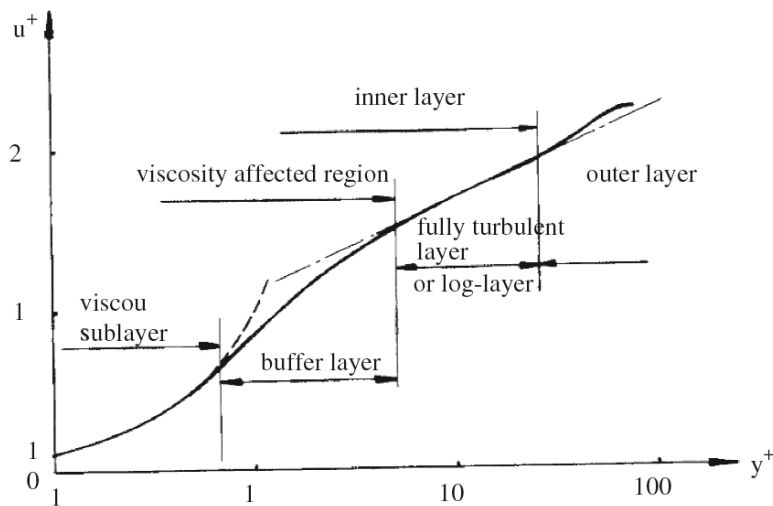


Fig. 2.3 Comportamento da velocidade nas regiões da camada limite em regime turbulento [1].

2.1.1. Perfis Alares

Um perfil alar é constituído por uma superfície sustentadora quase plana ou ligeiramente encurvada, na qual se pretende, através do escoamento do fluido ao longo da mesma, gerar uma força sustentadora o maior possível e minimizar a força de resistência criada à passagem do fluido.

A principal característica que distingue os vários tipos de perfis alares é a sua geometria, podendo esta variar ao longo da sua envergadura (maior dimensão perpendicular à direção do escoamento do fluido).

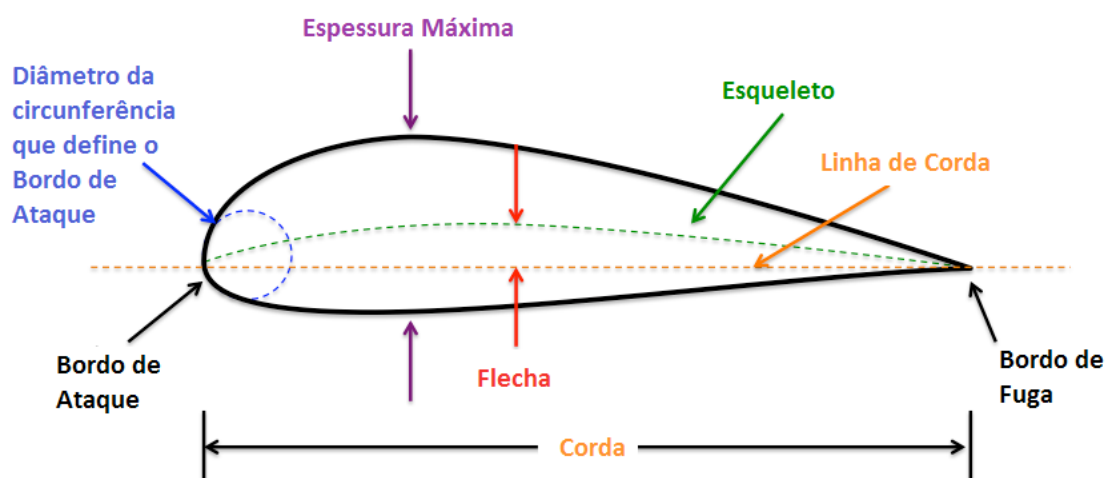


Fig. 2.4 Terminologia de perfis alares.

Na terminologia dos perfis (Fig. 2.4) alares atribui-se o nome de linha de corda à linha reta que liga o ponto inicial do perfil, bordo de ataque, e o ponto final, bordo de fuga. A localização onde o escoamento se divide entre a parte superior e inferior do perfil, é designada ponto de estagnação. Uma outra definição bastante comum nos perfis alares é o seu esqueleto, que ao contrário da linha de corda, esta é uma linha não reta que se estende entre o bordo de ataque e o bordo de fuga e é coincidente com os centros dos círculos inscritos no perfil e que definem a geometria do mesmo. A distância entre a linha de corda e a linha do esqueleto é designada por flecha, h [3].

O ângulo formado entre a direção do escoamento e a linha de corda chama-se ângulo de ataque (ADA, α), que influencia a força de sustentação e a força de resistência, ou arrasto, gerada pelo perfil alar (Fig. 2.5).

Para baixos ângulos de ataque a força de arrasto é baixa e o escoamento em torno do perfil é suave. Com o aumento do ângulo de ataque ocorre inicialmente o aumento da força sustentadora e da força de arrasto (maior área frontal). A partir de um dado valor

do ângulo de ataque forma-se uma “bolha” de separação da camada limite, que se inicia na cauda do perfil e se propaga na direção do bordo de ataque com o respetivo aumento do ângulo de ataque.

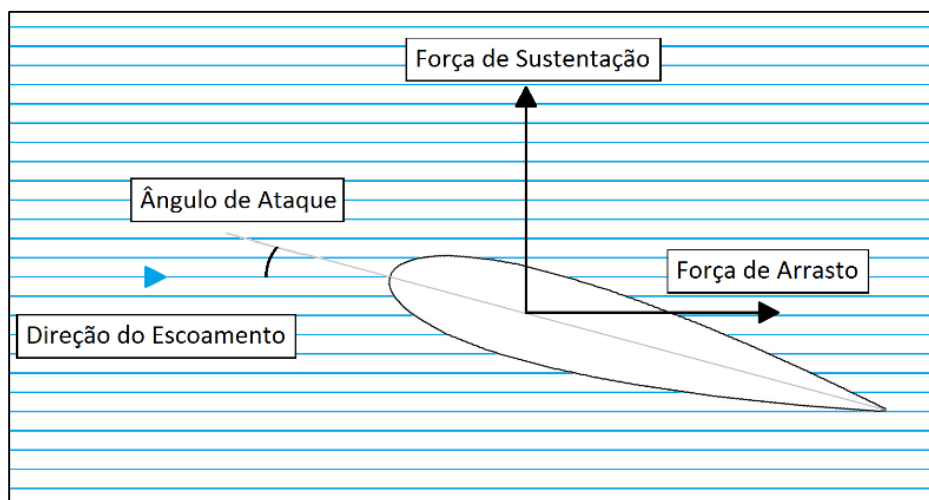


Fig. 2.5 Forças geradas pela passagem do escoamento num perfil alar.

A propagação da “bolha” de separação, para o bordo de ataque origina uma diminuição brusca da força de sustentação a partir de um determinado ângulo de ataque. O ângulo no qual ocorre o início do decréscimo da força de sustentação chama-se ângulo crítico e a partir deste instante diz-se que o perfil “entra em perda”, ou seja este perde sustentação (o termo mais comum utilizar-se é “stall”, do inglês)

A geração da força de sustentação de um perfil alar depende da sua capacidade em criar uma determinada circulação no escoamento, de forma a direcionar o escoamento no sentido inverso à força de sustentação (Fig. 2.6). Esta explicação tem por base a 3ª lei de Newton, cuja definição diz que toda ação tem sempre uma reação oposta e de igual intensidade, ou seja, a aceleração induzida no escoamento gera uma força no perfil designada força de sustentação.

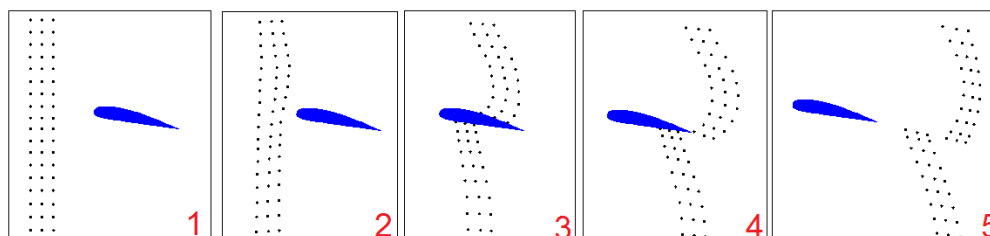


Fig. 2.6 Esquema da evolução do movimento do fluido na passagem de um perfil.

De referir que a circulação do escoamento em torno do perfil origina uma distribuição não uniforme de pressões na superfície sustentadora, e a força de sustentação

gerada é o resultado do somatório das forças da distribuição de pressão na parte superior e inferior do perfil alar.

Para explicar melhor este fenómeno tome-se em consideração o esquema da Fig. 2.7. A uma distância grande do perfil o escoamento não é perturbado, a pressão é a da região não perturbada e as linhas do escoamento são retas horizontais.

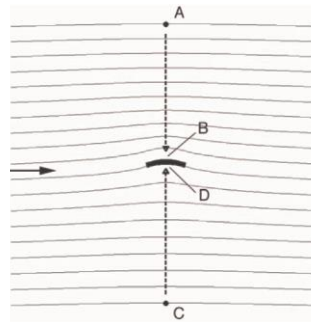


Fig. 2.7 Esquema das linhas de escoamento em torno de um simples perfil alar (uma placa curva) [5].

Considere-se uma linha reta entre o ponto A e a superfície do perfil, ponto B, permanecendo sempre numa trajetória perpendicular às linhas do escoamento. Iniciando-se no ponto A observa-se que as linhas do escoamento são linhas retas e paralelas entre si, o que demonstra a ausência de um gradiente de pressão na direção que se está a percorrer. No entanto, na aproximação ao perfil, as linhas do escoamento tomam uma forma curva, o que indica a presença de um gradiente de pressão entre estas linhas de escoamento. A forma das linhas indica também que a pressão é menor na direção do perfil. Ao atingir-se o ponto B da figura, a pressão neste ponto é claramente menor que a pressão no ponto A (pressão atmosférica).

Da mesma forma, mas agora em uma linha entre o ponto C e D, ao se afastar do ponto C as linhas de escoamento apresentam uma curvatura com a forma inversa. Esta forma indica agora um gradiente de pressão negativo no sentido oposto ao perfil, ou seja na parte inferior do perfil a pressão aumenta na aproximação do perfil. Esta diferença de pressões entre a parte superior e inferior do perfil origina uma força de pressão aplicada no perfil que o “empurra para cima”, designada força de sustentação. Desta forma, pode-se concluir que qualquer objeto cuja forma crie uma curvatura nas linhas do escoamento é capaz de gerar força de sustentação. Esta curvatura gerada nas linhas do escoamento deve-se também às forças de fricção, resultantes da viscosidade do fluido [5].

Os coeficientes adimensionais que contabilizam a força de sustentação (C_L) e de arrasto (C_D) gerado pelo perfil dependem da densidade (ρ) e da velocidade (no infinito,

V_{∞}) do fluido, bem como da área de projeção (A_p) da superfície sustentadora (perpendicular ao deslocamento do fluido). Estes coeficientes são dados pelas seguintes expressões, respetivamente:

$$C_L = \frac{L}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V_{\infty}^2 \cdot A_p} \quad (2.5)$$

$$C_D = \frac{D}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V_{\infty}^2 \cdot A_p} \quad (2.6)$$

Nas equações acima apresentadas a força de sustentação é representada por L e a força de arrasto ou resistência por D . O comportamento destes coeficientes, em asas com um perfil simétrico, apresenta a evolução típica mostrada na Fig. 2.8, em função do ângulo de ataque.

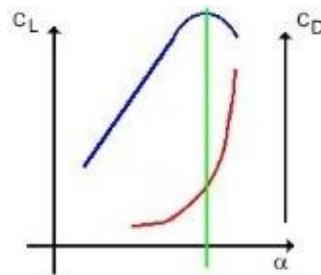


Fig. 2.8 Comportamento típico dos coeficientes de sustentação (linha azul) e de arrasto (linha vermelha) de um perfil alar assimétrico (o valor de C_L , para $\alpha = 0$, é diferente de 0).

Na Fig. 2.8, pode-se observar o decréscimo brusco que o coeficiente de sustentação sofre no instante em que o perfil entra em perda (linha verde), e de forma inversa, o coeficiente de arrasto aumenta significativamente a partir deste instante.

Uma outra característica que é comum definir-se na caracterização de um perfil alar é o coeficiente de momento, C_M , sendo este o binário produzido pelas forças aerodinâmicas aplicadas no centro de pressão (CP) do perfil. Por este motivo a estabilidade do perfil é afetada por este coeficiente. Tendo em conta o objetivo deste trabalho, não foi considerado o cálculo deste coeficiente.

2.2. NACA 0018

Entre 1931 e 1932, o Comitê Nacional de Conselhos para a Aeronáutica (National Advisory Committee for Aeronautics - NACA) realizou uma série de testes a diversos perfis alares, com o objetivo de providenciar dados que permitissem a escolha

adequada de um destes perfis para uma determinada função [6]. A variação das características aerodinâmicas em função das diversas espessuras e linha média dos perfis foi devidamente estudada. Estes estudos deram origem à criação de diversas séries de perfis alares. O perfil alar que é objeto de estudo neste trabalho integra a série de 4 dígitos. Os quatro algarismos que definem esta série indicam a percentagem de arco relativamente à corda (primeiro dígito), a posição do arco máximo na corda (segundo dígito) e a percentagem de espessura relativamente ao comprimento da corda ou espessura relativa (dois últimos dígitos).

Para uma definição exata da geometria dos perfis alares, foi concebida uma equação que determina a posição exata dos diversos pontos que compõem a linha exterior destes perfis. A geometria dos perfis NACA de 4 dígitos é descrita pela seguinte equação [6]:

$$y = \frac{t}{0,2} \cdot c \cdot \left[0,2969 \cdot \sqrt{\frac{x}{c}} - 0,1260 \cdot \left(\frac{x}{c}\right) - 0,3516 \cdot \left(\frac{x}{c}\right)^2 + 0,2843 \cdot \left(\frac{x}{c}\right)^3 - 0,1015 \cdot \left(\frac{x}{c}\right)^4 \right], \quad (2.7)$$

onde c representa o comprimento da corda, x a posição ao longo da corda, y metade da espessura na posição x ao longo da corda e t a máxima espessura de uma fração da corda (os últimos dois dígitos do perfil NACA são dados por $100 \cdot t$).

Os valores dos coeficientes de sustentação e arrasto do perfil NACA 0018 evoluem, em função do ângulo de ataque, de acordo com o apresentado na Fig. 2.9:

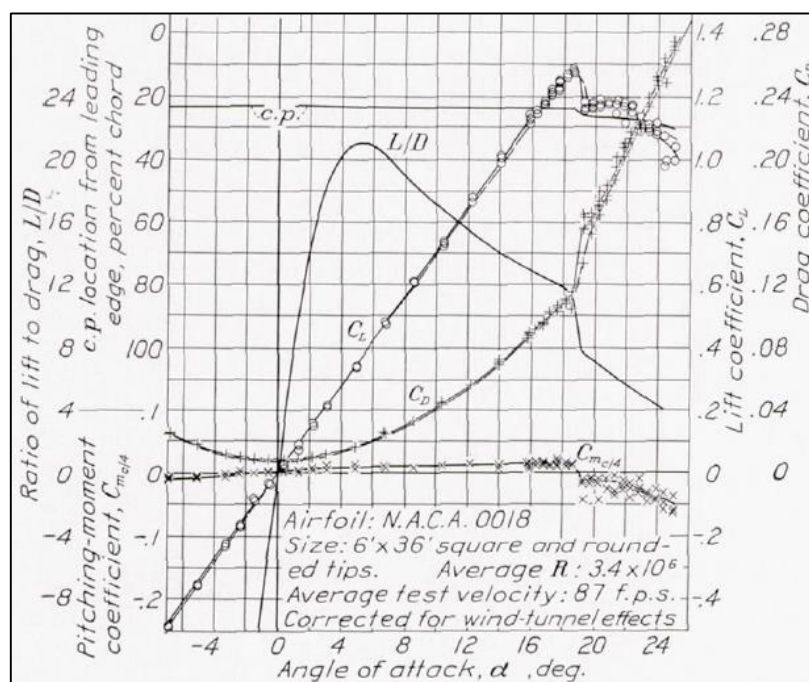


Fig. 2.9 Características do perfil NACA 0018 determinadas pela NASA ($Re = 3,4 \times 10^6$) [7].

2.3. Simulação Numérica

A simulação numérica é atualmente a principal ferramenta utilizada para prever o comportamento do escoamento dos fluidos incompressíveis ou compressíveis, em regime laminar ou turbulento, isotérmico ou não-isotérmico, com ou sem reação química.

A resolução de um problema de simulação numérica é constituída por 6 fases distintas [8]. A primeira é a definição do problema físico, na qual se identifica as grandezas relevantes, o domínio físico, as condições-de-fronteira e o sistema de coordenadas. A segunda é a representação do modelo físico, procurando as possíveis hipóteses de simplificação do mesmo e definir o domínio em estudo.

A terceira fase é a construção do modelo matemático, que consiste na tradução do modelo físico por expressões matemáticas que descrevem/quantificam os fenómenos em jogo. Seguidamente é necessário estabelecer relações entre as várias grandezas (equações de conservação). A resolução das equações só é possível após a definição das condições iniciais, de fronteira e finais. Na presença de fenómenos mais complexos é ainda necessário definir modelos simplificados, como é o caso neste trabalho dos modelos de turbulência.

A quarta fase consiste na resolução do modelo matemático, resolvendo as equações, efetuando testes de influência da malha e da discretização temporal e analisar a evolução das variáveis dependentes (pressão, velocidade, etc.) em função das variáveis independentes (tempo e coordenadas espaciais) e de outros parâmetros do problema (físicos, geométricos, etc.).

A quinta fase passa pela validação do modelo, comparando os valores obtidos com os valores experimentais (e outros valores numéricos já comprovados) e avaliando a precisão, o grau de confiança, a gama de aplicabilidade e as limitações do método. A última fase será a realização de cálculos sistemáticos, efetuando o tratamento e análise gráfica dos resultados obtidos, compreender a influência da variação dos parâmetros de entrada e retirar as devidas conclusões.

Num problema de simulação numérica de escoamento de um fluido, seja ele incompressível ou compressível, considera-se sempre as equações de quantidade do movimento e de continuidade. A equação de quantidade de energia é somente utilizada para escoamentos envolvendo transferência de calor ou compressibilidade, enquanto a

equação de transporte das espécies é resolvida para escoamentos que envolvam mistura de espécies ou reações químicas.

As equações acima referidas, são obtidas através da equação geral que governa a conservação de uma dada propriedade, ϕ , denominada equação de transporte. Num sistema de coordenadas cartesianas esta expressão com notação indicial é dada por:

$$\frac{\partial(\rho \cdot \phi)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \cdot u_j \cdot \phi)}{\partial x_j} - \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_\phi \cdot \frac{\partial \phi}{\partial x_j} \right) - S_\phi = 0 \quad (2.8)$$

O primeiro termo representa a taxa de variação local da propriedade ϕ , o segundo termo representa o fluxo advectivo da propriedade ϕ , o terceiro o fluxo difusivo da propriedade ϕ e o quarto termo a fonte. Em função da variável atribuída a ϕ , esta equação dá origem às restantes equações consideradas no estudo do escoamento de um fluido. A variável Γ_ϕ representa o coeficiente de difusão.

A equação de conservação de quantidade do movimento, é obtida quando a variável ϕ , representa a velocidade.

$$\frac{\partial(\rho \cdot u_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \cdot u_j \cdot u_i)}{\partial x_j} - \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + \frac{\partial p}{\partial x_j} - S_{u_i} = 0 \quad (2.9)$$

A variável τ_{ij} , é o tensor das tensões e é dado pela seguinte expressão (para fluidos newtonianos):

$$\tau_{ij} = \mu \cdot \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \cdot \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \cdot \delta_{ij} \right) \quad (2.10)$$

Na equação 2.10 μ representa a viscosidade dinâmica do fluido e os termos entre parêntesis a taxa de deformação.

A equação da conservação de massa, também conhecida como equação da continuidade é obtida quando a variável ϕ assume o valor de 1:

$$\frac{\partial(\rho)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \cdot u_i)}{\partial x_j} = 0 \quad (2.11)$$

O primeiro termo representa a taxa de variação local, que toma um valor nulo em regime permanente ou se o fluido se considerar incompressível.

As restantes equações, de quantidade de energia e de transporte de espécies, não serão utilizadas no presente trabalho, pelo que não serão aqui abordadas.

2.3.1. Modelo de Turbulência

Os modelos de turbulência são simplificações adotadas para modelar o cálculo numérico tentando prever o comportamento do escoamento em regime turbulento. Os modelos de turbulência são um aspeto muito importante em estudos CFD, pois praticamente todas as situações de engenharia apresentam um caracter turbulento. Neste trabalho, foi escolhido o modelo de turbulência $\kappa - \omega$ SST (*Shear Stress Transport*) [9], que resulta da combinação entre o modelo $\kappa - \varepsilon$ e do modelo $\kappa - \omega$ [10], com o objetivo de tirar proveito das vantagens de cada um e diminuir o efeito das suas desvantagens.

Antes de explicar estes modelos é necessário referir que em regime turbulento, existe a presença de uma subcamada viscosa, como se pode verificar na Fig. 2.2 e em detalhe na Fig. 2.3. A diferença entre os dois modelos é o comportamento que estes modelos apresentam fora e dentro desta subcamada viscosa. O modelo $\kappa - \varepsilon$ apresenta muito bons resultados para a zona de escoamento potencial, no entanto os seus resultados na subcamada viscosa são pouco precisos. O inverso acontece para o modelo $\kappa - \omega$, que prevê com alguma precisão as propriedades do fluido dentro da subcamada viscosa, passando-se o inverso nas zonas de escoamento potencial. Na zona de transição aplica-se uma conjugação dos dois modelos, variando o seu peso em uma função de uma determinada variável (F_1).

As equações de transporte do modelo $\kappa - \omega$ SST são [11]:

$$\frac{\partial(\rho \cdot k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \cdot u_i \cdot k)}{\partial x_i} - \frac{\partial}{\partial x_i} \left((\mu + \sigma_k \cdot \mu_t) \cdot \frac{\partial k}{\partial x_i} \right) + \beta^* \cdot \rho \cdot \omega \cdot k - \tilde{P}_k = 0 \quad (2.12)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho \cdot \omega)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \cdot u_i \cdot \omega)}{\partial x_i} - \frac{\partial}{\partial x_i} \left((\mu + \sigma_\omega \cdot \mu_t) \cdot \frac{\partial \omega}{\partial x_i} \right) + \beta \cdot \rho \cdot \omega^2 - \alpha \cdot \rho \cdot S^2 \\ - 2 \cdot (1 - F_1) \cdot \frac{\rho \cdot \sigma_{\omega 2}}{\omega} \cdot \frac{\partial k}{\partial x_i} \cdot \frac{\partial \omega}{\partial x_i} = 0 \end{aligned} \quad (2.13)$$

Nestas equações, a variável que define o peso atribuído aos modelos combinados é a variável F_1 , que assume um valor nulo longe da superfície (modelo $\kappa - \varepsilon$) e o valor unitário próximo da superfície, ou seja dentro da subcamada viscosa (modelo $\kappa - \omega$), e é dada por:

$$F_1 = \tanh \left\{ \left\{ \min \left[\max \left[\frac{\sqrt{k}}{\beta^* \cdot \omega \cdot y}, \frac{500 \cdot \nu}{y^2 \cdot \omega} \right], \frac{4 \cdot \rho \cdot \sigma_{\omega 2} \cdot k}{CD_{k\omega} y^2} \right] \right\}^4 \right\}, \quad (2.14)$$

onde y é a distância à superfície e $CD_{k\omega}$ é o último termo da equação 2.13 quando se pretende calcular os valores dentro da subcamada viscosa ($F_1 = 0$), ou seja, $CD_{k\omega}$ é dado por:

$$CD_{k\omega} = \max\left(2 \cdot \rho \cdot \sigma_{\omega 2} \cdot \frac{1}{\omega} \cdot \frac{\partial k}{\partial x_j} \cdot \frac{\partial \omega}{\partial x_j}, 10^{-20}\right) \quad (2.15)$$

A viscosidade turbulenta, μ_t , é dada por:

$$\mu_t = \frac{a_1 \cdot k \cdot \rho}{\max(a_1 \cdot \omega; S \cdot F_2)}, \quad (2.16)$$

onde S é o módulo da taxa de deformação média, S_{ij} :

$$S = \sqrt{2 \cdot S_{ij} \cdot S_{ij}} \quad (2.17) \quad S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \tilde{u}_j}{\partial x_i} \right) \quad (2.18)$$

A variável F_2 é dada por:

$$F_2 = \tanh\left(\left(\max\left[\frac{\sqrt{k}}{\beta^* \cdot \omega \cdot y}; \frac{500 \cdot \nu}{y^2 \cdot \omega}\right]\right)^2\right) \quad (2.19)$$

A variável \tilde{P}_k é dada por:

$$P_k = \mu_t \cdot \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \cdot \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \rightarrow \tilde{P}_k = \min(P_k, 10 \cdot \beta^* \cdot \rho \cdot \omega \cdot k)$$

As constantes do modelo são determinadas pela ponderação entre as constantes de ambos os modelos usando a seguinte equação:

$$\alpha = F_1 \cdot \alpha_1 + (1 - F_1) \cdot \alpha_2 \quad (2.20)$$

As constantes deste modelo para as expressões expostas são:

$$\alpha_1 = 5/9 ; \beta_1 = 3/40 ; \sigma_{k1} = 0.85 ; \sigma_{\omega 1} = 0.5$$

$$\alpha_2 = 0.44 ; \beta_2 = 0.0828 ; \sigma_{k2} = 1 ; \sigma_{\omega 2} = 0.856$$

$$\beta^* = 0.09$$

2.3.2. Domínio de Cálculo e Malhas

O domínio de cálculo é o espaço dimensional no qual se efetuam todos os cálculos, pelo que a sua definição é de extrema importância para a obtenção da solução. A qualidade, os recursos e o tempo para obtenção da solução são afetadas pela dimensão do domínio.

Neste domínio o espaço por onde o fluido escoar é discretizado em diversos volumes interligados que, em conjunto, dão origem a um domínio contínuo (malha computacional). Esta divisão permite a transformação das equações diferenciais parciais

em equações algébricas, cuja integração utilizando os métodos numéricos, permite relacionar as propriedades de uma unidade individual com as unidades que lhe são circundantes. As unidades individuais do domínio temporal denominam-se instantes e as do domínio espacial de volumes de controlo [8].

Existem 3 tipos de malhas distintas, as malhas estruturadas, as não estruturadas e as híbridas. Neste trabalho serão só consideradas malhas estruturadas. Estas apresentam-se com bons níveis de precisão, de cálculo e rapidez mas podem ser de difícil geração dependendo do tipo de geometria que contornam. As malhas estruturadas são também mais eficientes no interior da camada limite, local onde as variáveis de escoamento se alteram muito rapidamente na direção normal à superfície, e estas malhas permitem uma resolução mais refinada do que as malhas não estruturadas para o mesmo número de células. No caso de um perfil alar, o bordo de fuga é quase um vértice, pelo que este tipo de malhas apresenta alguma dificuldade na sua geração nesta zona. Para além disso o bordo de ataque como é arredondado, torna difícil a seleção das geometrias dos volumes de controlo.

Os pontos de intersecção das linhas denominam-se por nós de malha. É nestes pontos que as aproximações de uma propriedade ϕ são calculadas. A malha junto das superfícies deve ser mais refinada, de modo a existir uma maior densidade de pontos de cálculo na zona onde estará a camada limite e sujeita a maiores gradientes.

A criação destas malhas é conseguida utilizando um gerador de malha, ou seja, um algoritmo destinado a gerar uma malha caracterizada por um conjunto de parâmetros definidos pelo utilizador, os parâmetros de malha. O gerador de malha utilizado neste trabalho foi o cfMesh, que é um gerador gratuito e que, apesar de muito recente, tem sido referido em alguns estudos como muito eficiente para malhas em torno de perfis alares. Este gerador de malha será discutido em mais detalhe no subcapítulo 0. Foi ainda considerado o gerador de malha próprio do OpenFOAM capaz de gerar uma malha em torno de uma superfície tridimensional, o snappyHexMesh.

2.3.3. OpenFOAM

O OpenFOAM é uma ferramenta, escrita em linguagem de programação C++, usada para o desenvolvimento de métodos personalizados de cálculo numérico e de ferramentas de pré-/pós-processamento de soluções de problemas tridimensionais de mecânica de meios contínuos, incluindo a dinâmica dos fluidos computacional (CFD). O

nome do software, FOAM, é o acrónimo de Field Operation And Manipulation (Campo de Operação e Manipulação) [12].

Trata-se de um software em código aberto e gratuito sobre a Licença Pública Geral (GNU General Public License), originalmente criado no final da década de 80 no Imperial College London. Na altura, a sua criação deveu-se à necessidade de encontrar uma alternativa à plataforma mais comumente usada na altura, o FORTRAN, que tivesse mais capacidade de cálculo e fosse mais flexível. Este software só foi disponibilizado publicamente em 2004, quando Henry Weller, Chris Greenshields e Mattijs Janssens fundaram a OpenCFD Ltd. Atualmente este é gerido, mantido e distribuído pela OpenFOAM Foundation, cujo desenvolvimento é conseguido através da contribuição de voluntários. Este software está disponível gratuitamente para sistemas operativos derivados do Linux e para sistemas Windows através de uma versão não oficial.

As principais ferramentas deste software são a geração de malhas, a capacidade de conversão de malhas, a manipulação de malhas, o processamento paralelo dos casos em estudo, ferramentas para a preparação dos casos, ferramentas para processar os resultados obtidos nas simulações, e simulação da física do escoamento de fluidos.

Este software inicialmente não possuía nenhum interface gráfico pelo que era necessário recorrer-se à edição dos ficheiros para a definição dos parâmetros de entrada de malha, de condições de fronteira e de cálculo. No entanto, em 2012 a empresa Engys disponibilizou o software gratuito Helyx-OS, que é um interface gráfico para o OpenFOAM capaz de criar e resolver os casos, com a integração de alguns dos geradores de malha base do OpenFOAM, como o snappyHexMesh.

O pós-processamento pode ser feito utilizando a linha de comandos do terminal, ou em ambiente gráfico, utilizando o software livre ParaView, ou até mesmo durante a simulação (recorrendo a código especial no pré-processamento). O software ParaView permite a visualização da solução da simulação e a exportação dos resultados. Neste trabalho recorreu-se ao ParaView somente para retirar imagens da malha e dos resultados finais. Os coeficientes de sustentação, de arrasto e distribuição de pressões em torno do perfil foram obtidos pela edição de ficheiros e posterior uso do terminal para a introdução dos comandos.

Neste trabalho foi inicialmente utilizada uma máquina virtual instalada no sistema operativo Windows para se utilizar o software. No entanto, depois de alguns testes

iniciais chegou-se à conclusão que nem todos os recursos estavam disponíveis através desta virtualização, pelo que se resolveu instalar de base um sistema operativo Linux. A versão Linux usada neste trabalho foi o Ubuntu 14.04 LTS.

O OpenFOAM permite a utilização de vários algoritmos para resolução das equações de Navier-Stokes, no entanto foram somente considerados dois algoritmos neste trabalho, o SIMPLE e o PIMPLE. O algoritmo SIMPLE, que é o acrónimo de *Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations*, resolve as equações de Navier-Stokes com o termo da densidade e da viscosidade constantes, e faz o acoplamento da velocidade com a pressão. Este método permite resolver escoamentos incompressíveis, isotérmicos, laminares ou turbulentos utilizando o método dos volumes finitos, mas somente em regime permanente.

O método PIMPLE é uma combinação entre o método SIMPLE e o método PISO (*Pressure-Implicit with Splitting of Operators*), e é utilizado para casos em regime transiente.

3. METODOLOGIA

Neste capítulo serão descritos e explicados os procedimentos adotados na utilização do software utilizado no estudo apresentado. Um estudo de escoamento de fluidos usando um software CFD é constituído pelas seguintes etapas: desenho da geometria a estudar; criação da malha (pontos em que se irão obter os resultados); definição das condições de fronteira; cálculo numérico; análise dos valores obtidos (Fig. 3.1).

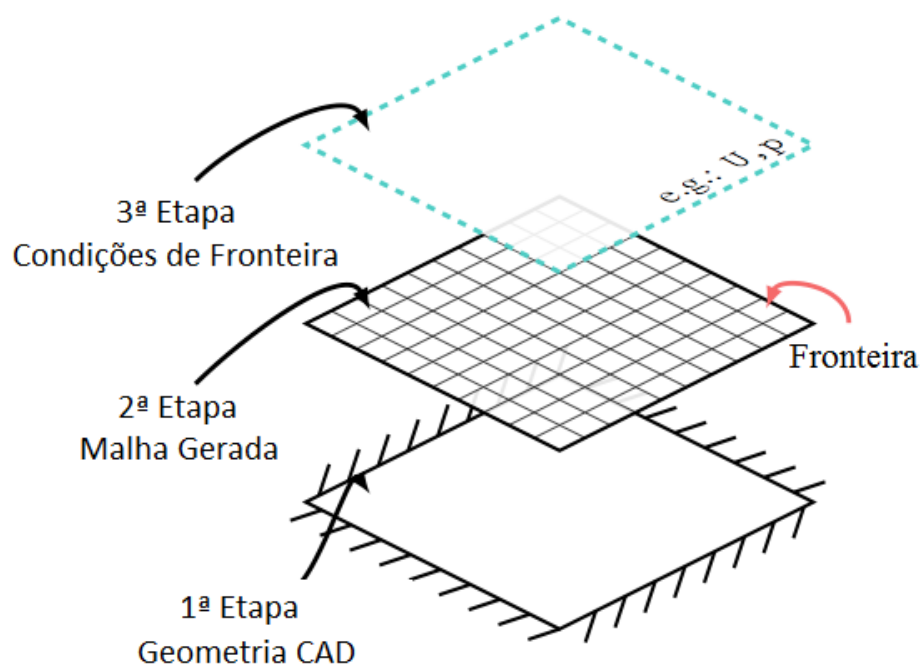


Fig. 3.1 Três primeiras etapas num estudo CFD.

O presente estudo irá focar-se essencialmente na segunda etapa, a da geração da malha, comparando diferentes tipos de malhas.

3.1. Geometria CAD

O perfil alar foi modelado usando o software CAD SolidWorks (Fig. 3.2), através da definição da curva do perfil NACA 0018. Para esse efeito é necessário usar a opção “Curve through XYZ points” utilizando as coordenadas obtidas pela equação 2.7.

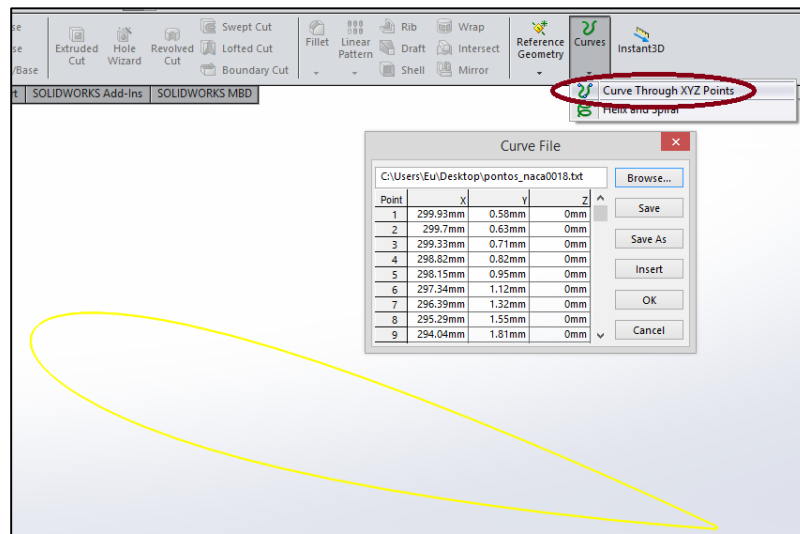


Fig. 3.2 Criação do perfil em Solidworks usando pontos obtidos pela equação 2.7.

Depois de definida a curva do perfil, com o respectivo comprimento de corda, é só necessário atribuir uma determinada espessura e gravar o ficheiro no formato STL (“*.stl”).

3.2. OpenFOAM

Tratando-se de um software CFD, o processo de elaboração do caso a estudar é composto por três fases distintas: a criação de uma malha de pontos, a definição das condições de fronteira e a seleção adequada do método de cálculo a efetuar pelo software.

O interface gráfico (GUI) usado na utilização do OpenFOAM foi o Helyx-OS. Este interface permite especificar os parâmetros necessários à criação da malha usando os geradores de malha próprios do OpenFOAM, a definição das condições de fronteira e a definição dos parâmetros de cálculo

3.2.1. Geradores de Malha

A malha criada em torno da geometria que se pretende estudar é fundamental para uma correta aproximação dos valores a estudar em perfis alares (C_L , e C_D , ver equação 2.5 e 2.6). Estas malhas determinam a localização dos vários pontos em que se obtêm as aproximações dos valores a estudar. Os algoritmos que determinam a posição dos pontos a estudar são inicialmente compilados com vários parâmetros iniciais, os parâmetros de

malha. Existem vários geradores de malha, dos quais, para um estudo em 2D foram selecionados dois tipos: o snappyHexMesh e o cfMesh.

Os parâmetros mais críticos que afetam a qualidade da malha gerada são os seguintes:

- Ortogonalidade da malha;
- Uniformidade das células, fator de crescimento ou mudança de tamanho e forma das células;
- Formato;
- Assimetria.

Depois de geradas as malhas é necessário garantir a independência de malha, que pode ser verificada utilizando várias malhas com parâmetros de malha diferentes e comparando os valores de pressão obtidos em pontos comuns a todas as malhas geradas. Se os valores obtidos forem semelhantes é garantida a independência de malha.

3.2.1.1. snappyHexMesh

O snappyHexMesh é o gerador de malha próprio do OpenFOAM capaz de ler uma geometria e gerar uma malha em torno desta. A utilização deste gerador de malha pode ser feita utilizando o interface gráfico Helyx-OS.

Não sendo este o gerador de malha o principal objeto de estudo deste trabalho, não serão aqui descritos os pormenores da seleção dos parâmetros de entrada, que tiveram por base grande parte dos valores assumidos no artigo Lopes et al.[13].

3.2.1.2. cfMesh

Este gerador de malha é muito recente e tem despertado algum interesse na aplicação do estudo de perfis alares. A geometria da malha gerada no bordo de ataque e saída do perfil é muito importante num estudo deste género, pois estas são as zonas mais difíceis de obter uma malha adequada. O uso do cfMesh permite a criação de níveis de malha muito próximas das superfícies e de forma uniforme, pelo que se torna um gerador de malha de interesse para o estudo de perfis alares, pois através da determinação do valor de Y^+ , apresentado no subcapítulo 3.2.3, facilmente se ajusta a malha ao modelo de turbulência que se pretende usar.

3.2.2. Condições de Fronteira

O estudo do escoamento do ar em torno de um perfil alar requer a definição das condições iniciais, sendo estas: propriedades físicas do fluido (densidade, viscosidades, temperatura, etc.), definição da entrada e saída do escoamento, velocidade e direção do escoamento, pressões na entrada e saída do domínio e indicação das propriedades do modelo de turbulência a utilizar.

3.2.3. Método de Cálculo

A seleção do método de cálculo requer uma prévia análise ao caso que se pretende estudar. No caso de um perfil alar, a possibilidade da formação de turbilhões depois do bordo de fuga requer uma análise transiente para ângulos de ataque elevados. Para além do regime de escoamento, os modelos de turbulência devem ser adequados ao tipo de malha que se consegue gerar (e vice-versa). Devido à subcamada viscosa no regime turbulento recorre-se a fórmulas empíricas chamadas “leis de parede”, utilizadas para relacionar a região viscosa com a região turbulenta para modelos de turbulência de alto Reynolds. Estas são importantes para avaliar a malha a usar, pois os modelos de turbulência usados requerem a ponderação da equação da distância adimensional à parede:

$$Y^+ = \frac{y \cdot u_T}{\nu} \quad (3.1)$$

O valor da variável Y^+ , é uma variável adimensional da distância à parede, e é utilizada para definir o tipo de escoamento na primeira célula da malha que está em contacto com a superfície. Na equação 3.1 a variável y representa a distância à parede, u_T a velocidade de atrito e ν a viscosidade cinemática.

O modelo de turbulência considerado neste trabalho foi o $\kappa - \omega SST$, pelo que a malha terá que ser adequada, determinando o valor de Y^+ em cada uma das malhas geradas até se obter um valor adequado ao modelo pretendido:

$$\kappa - \omega \rightarrow Y^+ < 5$$

$$\kappa - \varepsilon \rightarrow Y^+ > 30$$

Sendo o modelo $\kappa - \omega SST$ um modelo de baixo Reynolds, o valor de Y^+ a usar deve ser inferior a 5.

3.2.4. Pós-Processamento

O pós-processamento baseia-se na análise e compilação dos resultados obtidos, sendo que o OpenFOAM requer uma preparação prévia de alguns ficheiros.

Os valores de pressão em torno do perfil podem ser extraídos através do ficheiro *sampldict*, no qual é possível determinar o tipo de valores a obter e a forma como os obter. Neste caso, foi definida a obtenção da pressão através de uma nuvem de pontos.

A forma mais comum para avaliar os resultados provenientes de um caso resolvido no OpenFOAM é através do software ParaView, ao qual se recorreu para avaliar as diferentes malhas geradas e para retirar algumas imagens do escoamento em alguns instantes para uma interpretação visual da evolução do escoamento.

A obtenção dos coeficientes de sustentação e arrasto foi conseguida através da edição do ficheiro *controldict* depois de definidos e compilados todos os parâmetros no Helyx-OS. O código acrescentado a este ficheiro inclui a definição da densidade do fluido, da velocidade do escoamento, do comprimento da corda, da área de projeção do perfil e da direção de ambas as forças, de acordo com a Tab. 3.1.

| | |
|---|--|
| <pre> functions (forces { type forces; functionObjectLibs ("libforces.so"); outputControl timeStep; outputInterval 1; patches (naca); pName p; UName U; rhoName rhoInf; log true; CofR (0.25 0 0); rhoInf 1.225; } </pre> | <pre> forceCoeffs { type forceCoeffs; functionObjectLibs ("libforces.so"); outputControl timeStep; outputInterval 1; patches (naca); pName p; UName U; rhoName rhoInf; log true; liftDir (0 1 0); dragDir (1 0 0); CofR (0.25 0 0); pitchAxis (0 1 0); magUInf 37.056; rhoInf 1.225; lRef 0.3; Aref 0.00003; } </pre> |
|---|--|

Tab. 3.1 Código adicional acrescentado ao ficheiro *controldict*.

3.3. cfMesh

Este gerador de malha tem três “módulos” distintos para gerar a malha: Cartesian, usado para gerar malhas 3D compostas por células hexaédricas e células

poliédricas nas zonas de transição entre células de diferentes tamanhos; 2D Cartesian, usado para gerar malhas 2D; Tetrahedral, usada também para gerar malhas 3D mas usando células tetraédricas [14]. Ao contrário do gerador de malha snappyHexMesh, este não tem nenhum interface gráfico, pelo que é a sua utilização baseia-se na edição de ficheiros, e cuja utilização base será explicada neste subcapítulo.

O estudo de um perfil alar pode ser realizado utilizando aproximações obtidas em duas dimensões, pelo que abaixo serão somente descritos os passos a tomar para gerar e otimizar uma malha usando o “módulo” 2D Cartesian.

Tal como foi indicado no capítulo 3.1, a geometria deve ser gravada no formato STL, isto porque o cfMesh só permite a utilização de ficheiros CAD do tipo FMS, FTR e STL. Ao ficheiro STL obtido no Solidworks (“naca.stl”) deve ser adicionada outra superfície, a superfície “Domínio Total”, utilizada para definir os limites do domínio de cálculo. Esta superfície, neste trabalho, considerou-se um retângulo, deve ser modelada da mesma forma que a superfície do perfil NACA 0018 e gravada também como um ficheiro STL (“dominioreq.stl”).

O passo seguinte será juntar as duas superfícies num ficheiro STL. Para isso, basta abrir os ficheiros STL de ambas as superfícies com um editor de texto e copiar o texto de um dos ficheiros e adicionar ao outro (a ordem não interessa). De referir que num ficheiro do tipo STL, cada superfície está descrita no código entre “solid (nome da superfície) ” e “endsolid (nome da superfície) ”, pelo que é necessário editar no código adicionando o nome das superfícies (Tab. 3.2).

```
solid naca_0
(...)
endsolid naca_0
solid dominioreq_1
(..)
endsolid dominioreq_1
solid dominioreq_2
(...)
endsolid dominioreq_2
solid dominioreq_3
(...)
endsolid dominioreq_3
solid dominioreq_4
(...)
endsolid dominioreq_4
```

Tab. 3.2 Estrutura do código do ficheiro STL (em código ASCII) a usar pelo cfMesh.

Depois de ter o ficheiro STL com as superfícies necessárias, é ainda necessário ajustar este ficheiro para o correto funcionamento do “módulo” 2D Cartesian do cfMesh.

Este ajuste é obtido correndo o comando *surfaceFeatureEdges* no terminal. O ficheiro STL obtido está agora em condições para ser utilizado pelo cfMesh. O passo seguinte é a construção da malha, utilizando o comando *cartesian2Dmesh*. Este comando utiliza o ficheiro *meshdict* que contem todos os parâmetros de malha.



Fig. 3.3 Representação dos domínios de malha gerados usando o cfMesh.

Os parâmetros de malha (Fig. 3.3) do comando *cartesian2Dmesh*, permitem a definição de 5 domínios de malha: D1 – Domínio global; D2 – Domínio global próximo das superfícies; D3 – Domínio geométrico ($V \rightarrow (x, y, z)$); D4 – Domínio localizado (até uma determinada distância, d , de uma superfície); D5 – Domínio de camadas (células coincidentes com uma determinada superfície divididas em n níveis e espaçadas entre si por um fator, f). A definição destes domínios é conseguida através dos seguintes parâmetros a alterar no ficheiro *meshdict*, expostos na Tab. 3.3:

| Domínio | Função <i>meshDict</i> | Variáveis |
|---------|--------------------------|--|
| 1 | <i>maxCellSize</i> | 1 - Tamanho das células; |
| 2 | <i>BoundaryCellSize</i> | 1 - Tamanho das células junto das superfícies; |
| 3 | <i>ObjectRefinements</i> | 5 - Definição de um volume (altura, comprimento, profundidade e centro de um retângulo) e tamanho das células dentro desse volume; |
| 4 | <i>localRefinement</i> | 3 - Definição da superfície, distância até à qual se pretende que a malha se estenda e tamanho das células; |
| 5 | <i>boundaryLayers</i> | 3 - Definição da superfície, do número de camadas e o fator de expansão destas camadas. |

Tab. 3.3 Variáveis do gerador de malha cfMesh.

Depois de devidamente definidos os vários parâmetros da malha no ficheiro *meshdict* e executado o comando *cartesian2Dmesh* é necessário verificar se existem falhas na malha gerada. Para esse efeito deve ser corrido o comando *checkMesh*. Se a malha não for válida, os parâmetros de malha devem ser ajustados de forma a que os fatores de forma entre os diversos domínios sejam semelhantes. Caso a malha seja válida o processo de geração de malha do cfMesh está concluído.

Para os passos seguintes, nomeadamente a definição das condições de fronteira e cálculo numérico, estes podem ser efetuados usando o interface gráfico Helyx-OS.

4. RESULTADOS

Neste capítulo será apresentada a geometria usada, a malha gerada e respetivos testes, as condições de fronteira consideradas e os resultados obtidos nestas condições.

4.1. Geometria

Tal como foi referido no capítulo 3, foram utilizados os valores das coordenadas obtidas pela equação 2.7 para definir a geometria do perfil. A geometria do perfil foi definida com uma corda de $300mm$.

Tendo em conta o interface gráfico usado para gerar a malha com snappyHexMesh (Helyx-OS), no qual é necessário definir a profundidade da malha, a envergadura definida na geometria nada influencia no processo de elaboração da malha ($600mm$). O aspeto final da geometria usada no snappyHexMesh é exposto na Fig. 4.1.

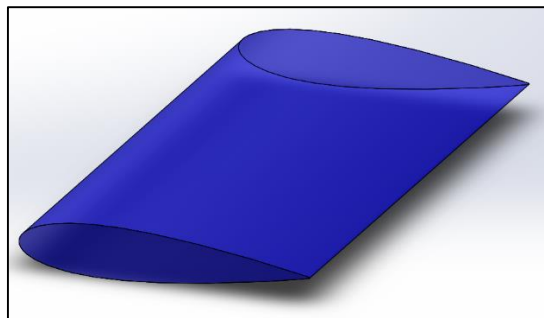


Fig. 4.1 Geometria do perfil usada para o gerador de malha snappyHexMesh.

A geometria usada no gerador de malha cfMesh (Fig. 4.2) foi exatamente a mesma, no entanto a envergadura do perfil foi muito reduzida ($0,1mm$), pois apesar de se tratar de uma malha bidimensional o processo de geração de malha é afetado pela profundidade da geometria.

Quando se inicia a gravação do ficheiro *.STL é necessário selecionar somente a superfície sustentadora, não selecionando as áreas da frente e de trás do perfil (a geometria terá que ser semelhante a um cilindro sem topo e fundo).

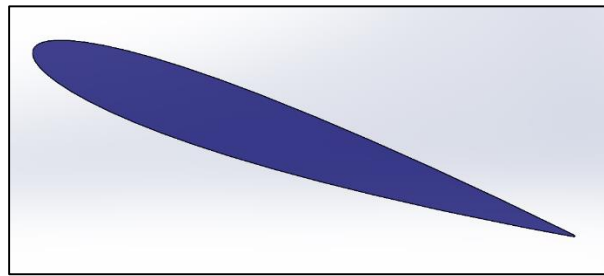


Fig. 4.2 Geometria do perfil usada para o gerador de malha cfMesh.

Tal como foi referido no capítulo 3.3, é necessário acrescentar ao ficheiro *.STL uma geometria que defina os limites do domínio da malha, cujas dimensões foram as mesmas utilizadas na malha snappyHexMesh (Fig. 4.3).

4.2. Malhas Geradas

Tratando-se de dois geradores de malha distintos os parâmetros introduzidos em ambos os geradores são diferentes. O gerador de malha snappyHexMesh foi utilizado como referência para comparação de valores obtidos pelo que neste subcapítulo será dada mais atenção ao gerador cfMesh.

4.2.1. snappyHexMesh

Para o gerador snappyHexMesh os parâmetros aqui expostos não foram alvo de grande estudo, e foram tomados alguns dos valores adotados em [12]. Os parâmetros deste gerador de malha aqui expostos, tem por base a utilização do interface gráfico Helyx-OS.

O primeiro passo é a definição das fronteiras do domínio da malha, tendo por base a definição das dimensões de um paralelepípedo, e o tamanho genérico das células em cada uma das direções (Fig. 4.3):

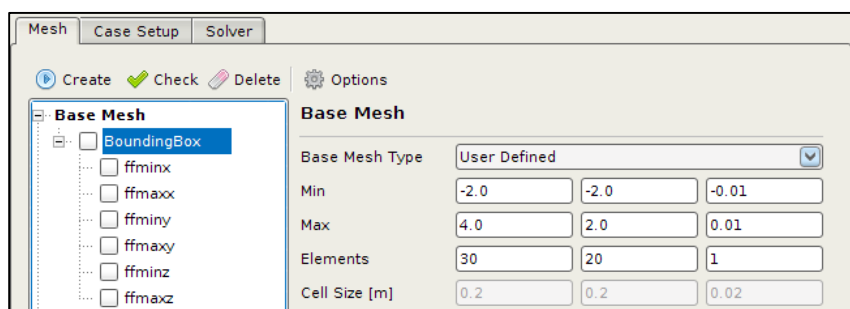


Fig. 4.3 Parâmetros (Helyx-OS) das fronteiras do domínio da malha snappyHexMesh.

O passo seguinte é o refinamento da malha, através da atribuição do tamanho das células em função da distância a que estas se encontram do objeto em estudo. Por último, é definido o refinamento das células próximas de um determinado objeto, que corresponde ao domínio 5 da malha cfMesh, o domínio de camadas junto de uma superfície (Fig. 4.4).

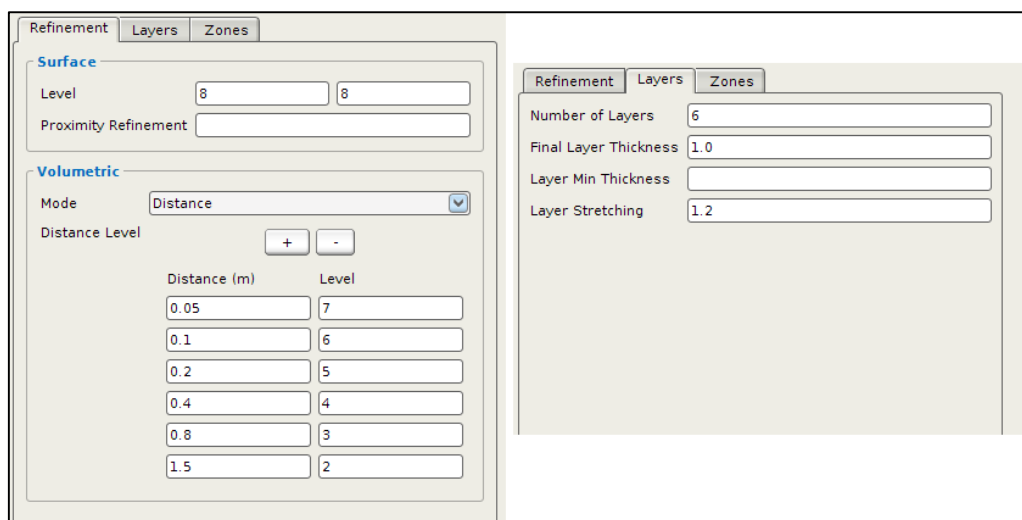


Fig. 4.4 Parâmetros (Helyx-OS) da malha snappyHexMesh do tamanho das células em função da distância ao perfil e do refinamento das células próximas do perfil, respetivamente.

O resultado final, usando os parâmetros acima indicados, está apresentado na Fig. 4.5 e em detalhe na Fig. 4.6:

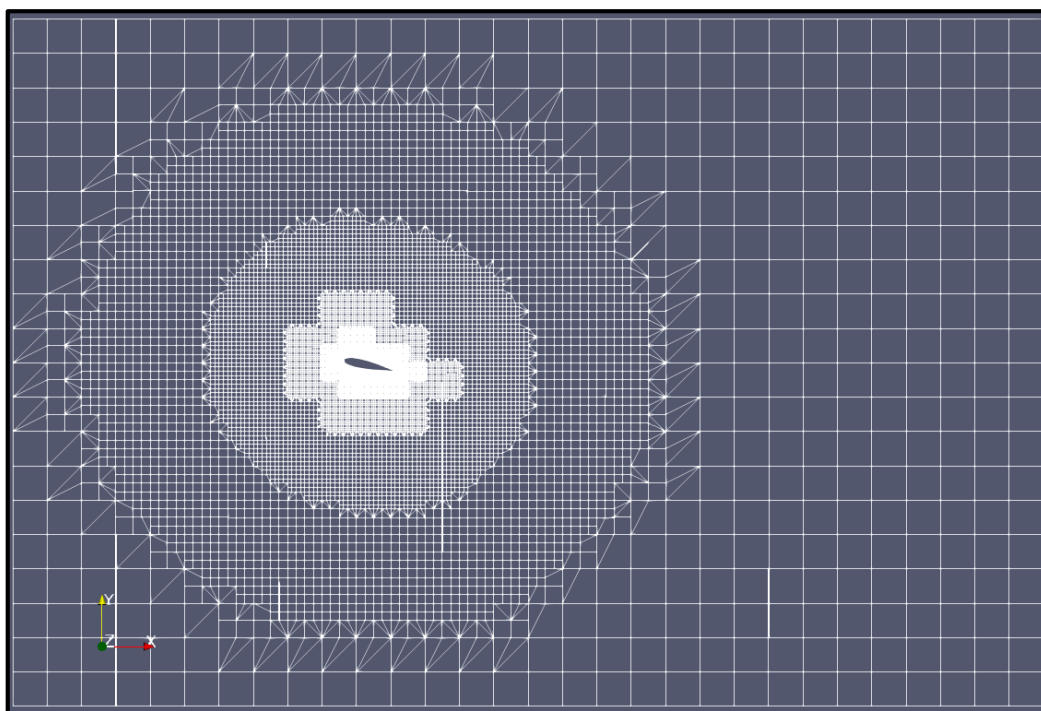


Fig. 4.5 Malha gerada pelo snappyHexMesh em torno do perfil NACA 0018 com ângulo de ataque de 12°.

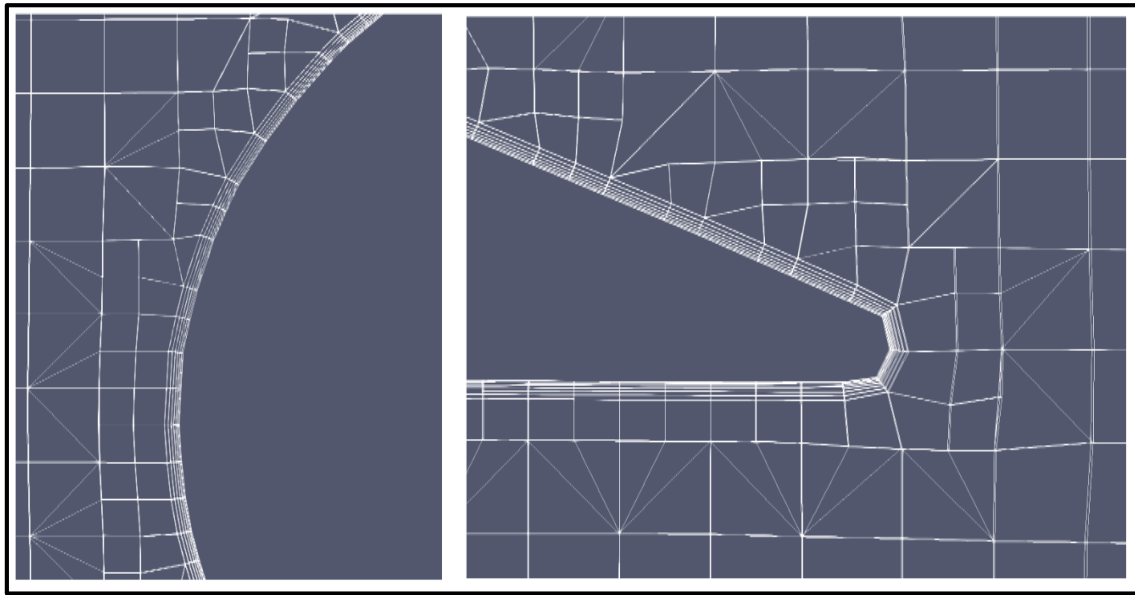


Fig. 4.6 Detalhe da malha snappyHexMesh no bordo de ataque e no bordo de fuga, respectivamente.

Como já referido, para o caso da malha snappyHexMesh, não foram efetuados testes de independência de malha, pois de acordo com estudos anteriormente efetuados, usando estes parâmetros, os resultados obtidos apresenta independência de malha. Os valores médios de Y^+ ao longo do perfil, obtidos com estes parâmetros, foram os seguintes:

$$Y^+ \cong 1,5$$

4.2.2. CfMesh

O gerador de malha cfMesh permite uma melhor discretização da malha, pelo que inicialmente foi necessário perceber o efeito de cada um dos parâmetros da malha, expostos no capítulo 3.3. Depois de compreendida a influência dos vários parâmetros de malha, foram efetuados vários testes de maneira a garantir a independência de malha.

Antes de iniciar os referidos testes, foi necessário definir os limites da malha, cujas dimensões foram exatamente as mesmas que as utilizadas na malha snappyHexMesh, de acordo com a Fig. 4.3, e cuja metodologia é explicada no terceiro parágrafo do capítulo 0.

Os parâmetros dos domínios 1 (domínio global), 2 (domínio global próximo das superfícies) e 5 (domínio das primeiras células junto de uma determinada superfície) foram fixados nos testes, variando somente alguns dos parâmetros dos domínios 3 (domínio geométrico) e 4 (domínio localizado). Os domínios 1 e 2 foram definidos com o

mesmo valor de $0,2m$, que corresponde ao mesmo valor do parâmetro utilizado no gerador snappyHexMesh, ou seja, o tamanho genérico das células em toda a malha quando não existe discretização. Para o domínio 5 os parâmetros usados foram 6 níveis com um factor de expansão de 1,2.

Relativamente ao domínio geométrico, o centro e a dimensão do paralelepípedo foram obtidos através dos seguintes parâmetros indicados na Tab. 4.1:

| Comprimento (DeltaX) | Altura (DeltaY) | Profundidade (DeltaZ) | Centro (X ; Y ; Z) |
|----------------------|-----------------|-----------------------|--------------------|
| 2,4 | 1,254 | 0,0001 | (0,525 ; 0 ; 0) |

Tab. 4.1 Parâmetros do domínio 3 fixados para testes de independência de malha no gerador de malha cfMesh (valores em metros).

O centro do paralelepípedo foi desviado da origem de maneira a garantir uma distância menor ao bordo de ataque (aproximadamente 2 vezes a corda do perfil, $0,6m$) do que a distância ao bordo de fuga (aproximadamente 5 vezes a corda do perfil, $1,5m$), isto porque é de maior interesse ter uma malha mais refinada no local previsto onde o escoamento estará mais perturbado. Foi ainda considerada uma distância superior e inferior, até à qual o domínio 3 se estende, aproximadamente 2 vezes a corda do perfil, $0,6m$.

Para o domínio localizado, a superfície usada foi a do perfil, designada por *naca_0*, e definida uma distância, até à qual este domínio se estende, de $0,15m$.

Depois de atribuídos os parâmetros de malha que menos poderiam afetar os resultados e que mais se assemelhavam aos parâmetros já devidamente definidos da malha snappyHexMesh, foram geradas 5 malhas distintas. Os parâmetros variados dos domínios 3 e 4 foram só os valores do tamanho das células nestes domínios, de acordo com a Tab. 4.2:

| Testes | D3 | D4 |
|--------|--------------------------|--------------------------|
| | Tamanho das Células [mm] | Tamanho das Células [mm] |
| 1 | 0,01 | 0,005 |
| 2 | 0,005 | 0,001 |
| 3 | 0,01 | 0,001 |
| 4 | 0,01 | 0,002 |
| 5 | 0,02 | 0,001 |

Tab. 4.2 Parâmetros variados nos testes efetuados à malha cfMesh.

As malhas geradas para os testes de independência de malha foram efetuados com o perfil num ângulo de ataque de 12° . Depois de geradas todas as malhas, foram

aplicadas as condições de fronteira (as mesmas expostas no próximo subcapítulo 0) e efetuados os cálculos em regime permanente para 3500 iterações. Para este ângulo de ataque constatou-se que os valores das variáveis monitorizadas estabilizavam para um número de iterações inferior a 3500. A verificação da independência de malha foi conseguida através da comparação dos valores de pressão nos pontos coincidentes com o perfil.

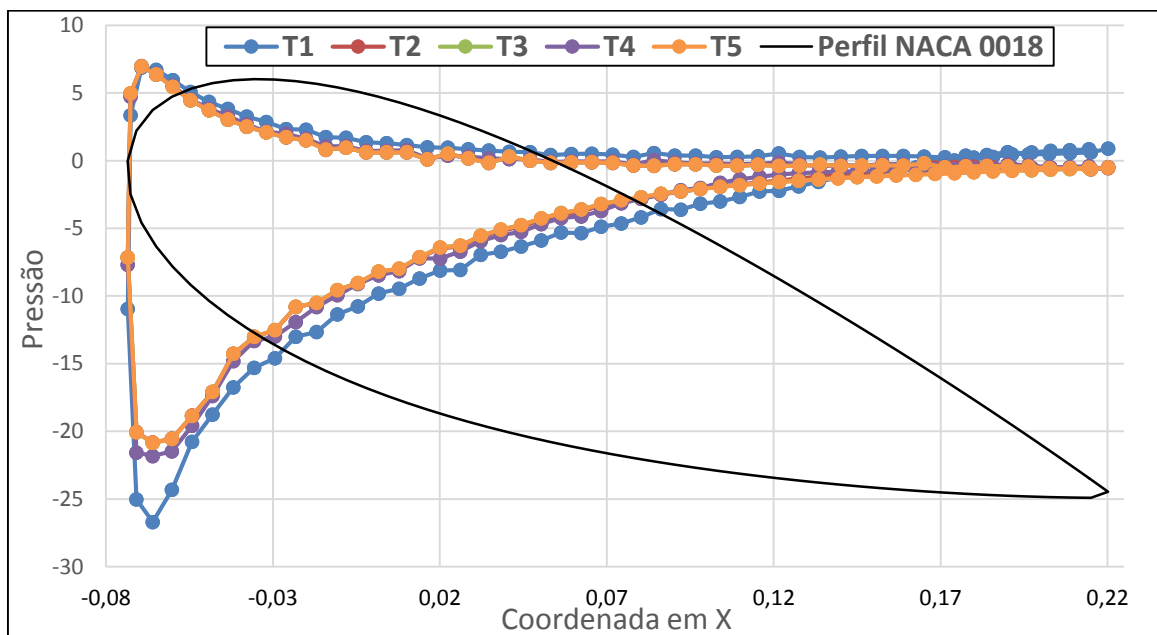


Fig. 4.7 Valores de pressão, ao longo da superfície do perfil, obtidos nos testes de independência de malha ao longo da superfície do perfil.

Analisando o gráfico da Fig. 4.7, percebe-se que os valores de pressão são muito semelhantes para as diversas malhas testadas, exceto para o teste 1. Dado que as distribuições das malhas T2 a T5 são semelhantes apenas estas foram consideradas para a análise de Y^+ .

Para determinar os parâmetros finais da malha cfMesh usada para as comparações com a malha snappyHexMesh, foram calculados os valores de Y^+ de cada uma das malhas:

| Testes | Y^+ |
|--------|-------|
| 1 | 12,8 |
| 2 | 2,8 |
| 3 | 2,8 |
| 4 | 6,7 |
| 5 | 2,8 |

Tab. 4.3 Valores médios de Y^+ das malhas usadas nos testes de independência de malha.

Depois de analisada a Tab. 4.3, a malha escolhida foi a do teste 4, que apesar de mais grosseira que as outras malhas, apresenta valores de Y^+ dentro do pretendido.

O aspecto final da malha cfMesh usando os referidos parâmetros está apresentada na Fig. 4.8 e em detalhe na Fig. 4.9.

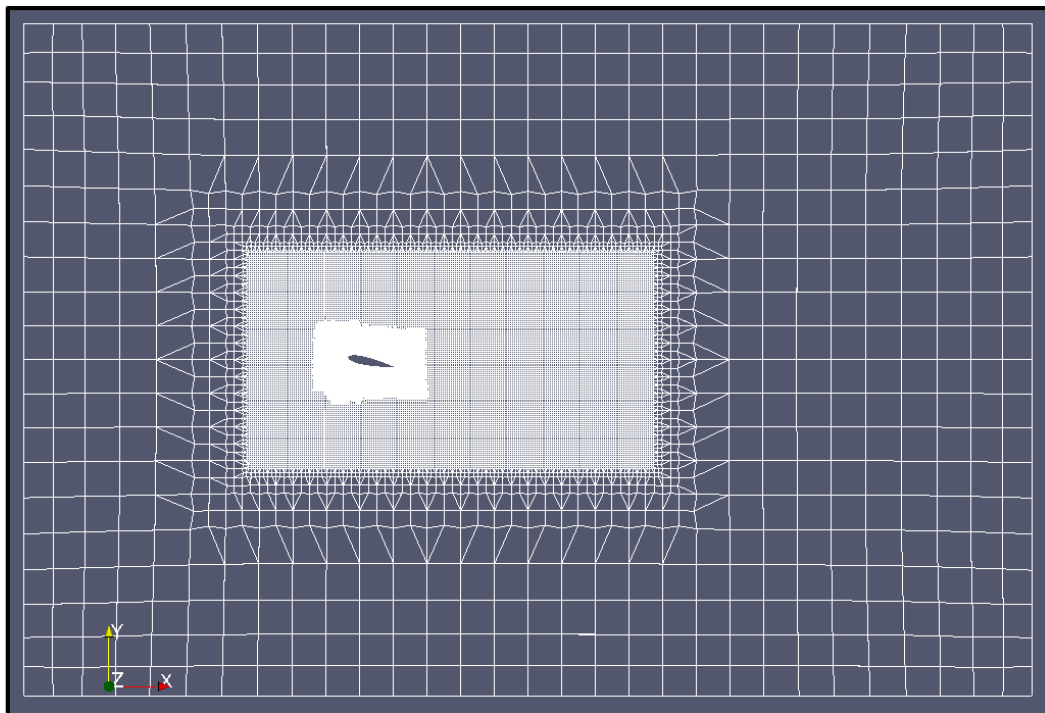


Fig. 4.8 Malha gerada pelo cfMesh (teste 4) com os parâmetros finais em torno do perfil NACA 0018 com ângulo de ataque de 12° .

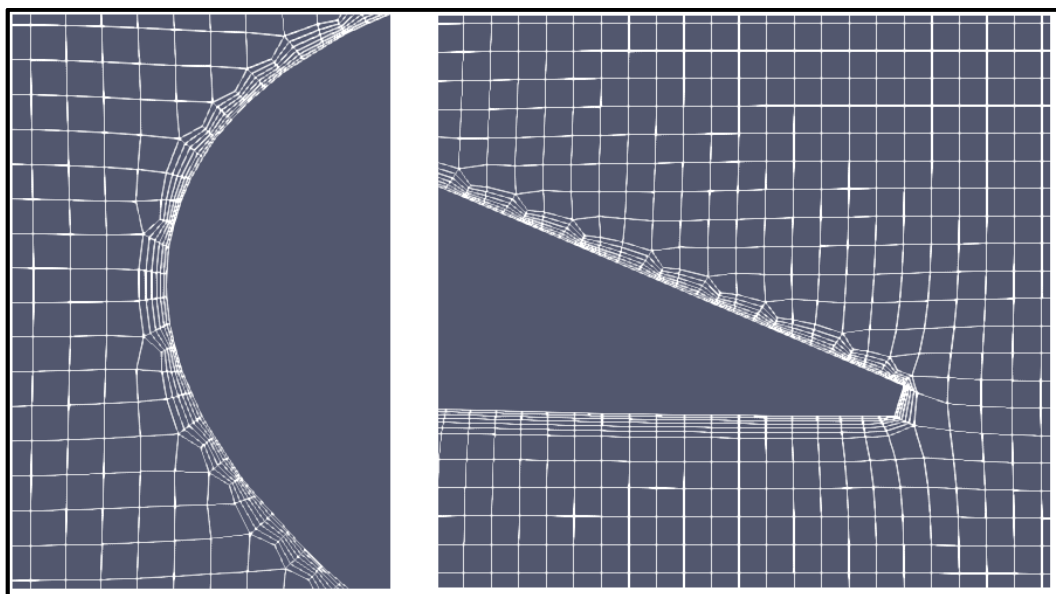


Fig. 4.9 Detalhe da malha cfmesh (teste 4) no bordo de ataque e no bordo de fuga do perfil, respetivamente.

O ficheiro *meshdict*, onde são introduzidos os parâmetros de malha, depois de definidos os parâmetros finais (teste 4), ficou conforme o texto da Tab. 4.4.

| | |
|--|--|
| <pre>//D1 maxCellSize 0.2; //D2 boundaryCellSize 0.2; surfaceFile "naca0.stl"; //D3 objectRefinements { naca_0 { type box; cellSize 0.02; centre (0.525 0 0); lengthX 2.4; lengthY 1.254; lengthZ 0.0001; } } }</pre> | <pre>//D4 localRefinement { naca_0 { cellSize 0.002; refinementThickness 0.15; } } //D5 boundaryLayers { patchBoundaryLayers { naca_0 { nLayers 6; thicknessRatio 1.2; } } } }</pre> |
|--|--|

Tab. 4.4 Código do ficheiro *meshdict* da malha cfmesh (teste 4).

4.3. Condições de Fronteira

As condições de fronteira foram definidas de igual forma para ambas as malhas (snappyHexMesh e cfMesh). Foi definido um escoamento incompressível, em regime permanente, variando o ângulo de ataque até 14°; para ângulos superiores foi definido que este já se encontrava em regime transiente (Fig. 4.10).

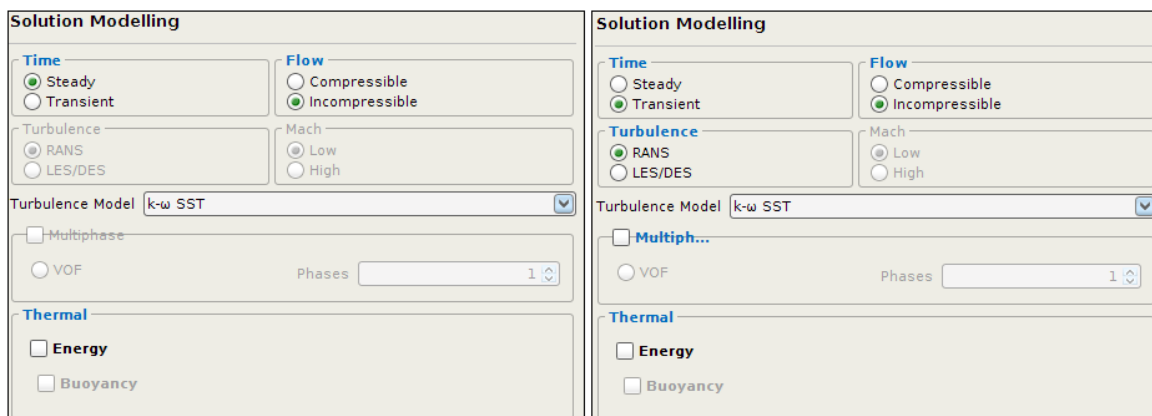
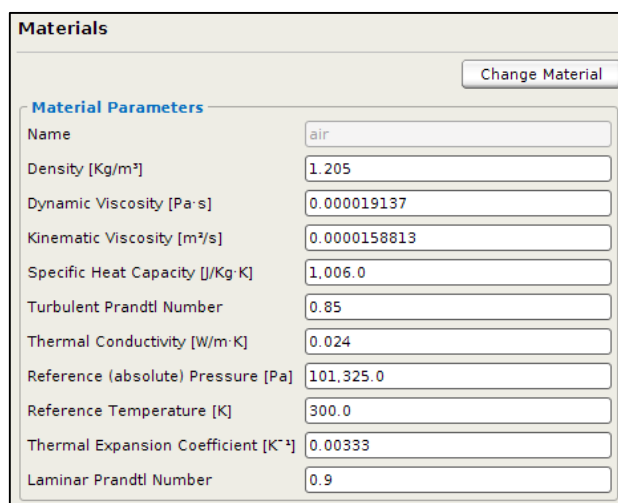


Fig. 4.10 Tipo de escoamento e modelo de turbulência definidos em regime permanente e transiente, respetivamente (Helyx-OS).

Chegou-se a esta conclusão depois de analisar a evolução dos valores dos coeficientes de sustentação e arrasto, onde para ângulos superiores a 14° estes valores não estabilizavam, mesmo com um grande número de iterações (testes realizados até 5000 iterações). Tal como referido no subcapítulo 3.2.2, o modelo de turbulência usado foi o modelo $\kappa - \omega$ SST.

O fluido definido foi o ar, cujas propriedades consideradas foram de acordo com a Fig. 4.11:



| Materials | |
|--|--------------|
| <input type="button" value="Change Material"/> | |
| Material Parameters | |
| Name | air |
| Density [Kg/m ³] | 1.205 |
| Dynamic Viscosity [Pa·s] | 0.000019137 |
| Kinematic Viscosity [m ² /s] | 0.0000158813 |
| Specific Heat Capacity [J/Kg·K] | 1.006.0 |
| Turbulent Prandtl Number | 0.85 |
| Thermal Conductivity [W/m·K] | 0.024 |
| Reference (absolute) Pressure [Pa] | 101.325.0 |
| Reference Temperature [K] | 300.0 |
| Thermal Expansion Coefficient [K ⁻¹] | 0.00333 |
| Laminar Prandtl Number | 0.9 |

Fig. 4.11 Propriedades do ar consideradas nos testes efetuados com ambas as malhas (Helyx-OS).

A estrutura dos ficheiros *.STL é composta por várias superfícies que definem a geometria do objeto. O nome atribuído a cada uma das superfícies é agora usado para definir o tipo de superfície que o OpenFOAM irá considerar, podendo estas, por exemplo, ser entradas ou saídas de escoamento, paredes com ou sem escorregamento e superfícies ditas “vazias”, nas quais o software não efetua cálculos na direção perpendicular às mesmas. Depois de identificadas as superfícies (no software são referidas como “patches”), é lhes atribuída um dos tipos e os correspondentes parâmetros que lhes corresponde.

No caso em estudo, estas superfícies são sete, seis do paralelepípedo (domínio de cálculo) e uma do perfil em estudo. Para a entrada e saída do escoamento foram consideradas as superfícies esquerda e direita da Fig. 4.8. A superfície do perfil e as superfícies superior e inferior do paralelepípedo foram consideradas paredes sem escorregamento. Relativamente às superfícies posterior e anterior do paralelepípedo estas foram consideradas superfícies “empty”, de maneira a evitar cálculos nesta direção, ou seja ao longo do eixo dos Z. Os nomes atribuídos a cada uma destas superfícies, para cada uma das malhas (snappyHexMesh e cfMesh), foi de acordo com a Fig. 4.12.

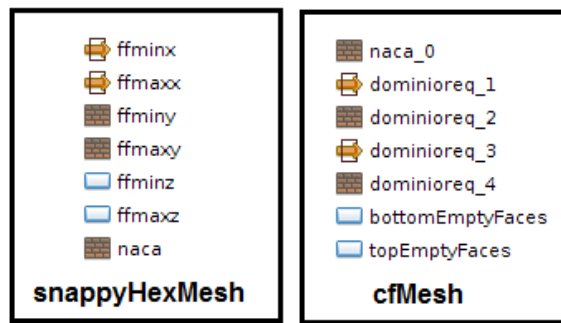


Fig. 4.12 Nomes das superfícies consideradas e respectivos tipos associados.

Na superfície que corresponde à entrada de escoamento (na malha snappyHexMesh, ffminx, e na malha cfMesh, dominioreq_1), foi definida uma velocidade de escoamento de $37,056 \text{ m/s}$, que corresponde a um número de Reynolds de 7×10^5 . A pressão de entrada, de modo a não influenciar o escoamento, foi considerada com um gradiente nulo. Relativamente aos valores de κ e ω do modelo de turbulência, estes foram determinados usando a ferramenta de cálculo disponível no website *cf-d-online.com*, cujos valores obtidos foram (para $l = 0,3\text{m}$; $I_u = 1\%$ (Índice de Turbulência); $\nu = 1,5 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$):

$$\kappa = 0,20601654000000003 \text{ m}^2/\text{s}^2$$

$$\omega = 1,512804865142891 \text{ s}^{-1}$$

Estes valores foram introduzidos no Helyx-OS conforme a Fig. 4.13.

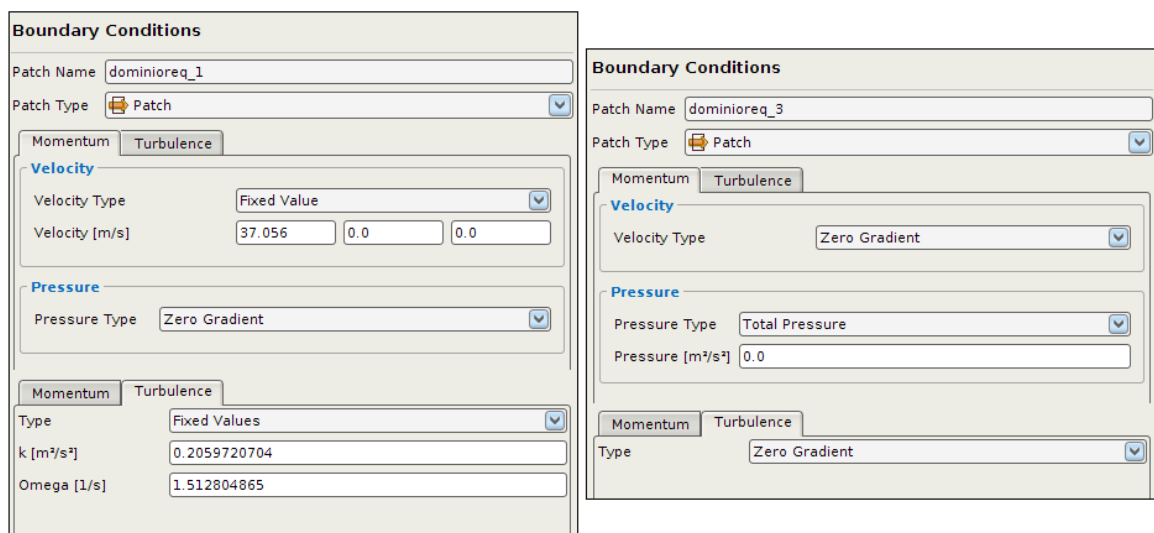


Fig. 4.13 Condições de fronteira na entrada e na saída de escoamento, respetivamente (Helyx-OS).

Para a saída do escoamento (na malha snappyHexMesh, ffmaxx, e na malha cfMesh, dominioreq_3) definiu-se uma pressão nula e gradiente nulo os restantes

parâmetros consideraram-se com gradiente nulo. A velocidade e os valores dos parâmetros de turbulência foram em ambas as situações consideradas com gradiente nulo.

As superfícies nas quais se consideraram paredes sem escorregamento e superfícies “vazias”, não foi necessário introduzir nenhum parâmetro.

Considerou-se um critério de convergência um resíduo máximo de 1×10^{-6} em regime permanente e de 1×10^{-5} para regime transiente (Fig. 4.14).

The figure displays two screenshots of the 'Solver Settings' dialog box. The left screenshot shows the 'SIMPLE' algorithm selected. Under 'Residual Control', the values for U, p, k, and omega are all set to 0.000001. Under 'Relaxation Factors', the values for U, p, k, and omega are all set to 0.7. The right screenshot shows the 'PIMPLE' algorithm selected. It has 1 'Outer Correctors' and 2 'Correctors'. Under 'Residual Control', the values for U, p, k, and omega are all set to 0.0. Under 'Relaxation Factors', the values for U, p, k, and omega are all set to 1.0, with corresponding 'Final' values also set to 1.0.

Fig. 4.14 Parâmetros considerados para os valores residuais em regime permanente e transiente, respetivamente (Helyx-OS).

Adicionalmente, para regime permanente, considerou-se um máximo de 5000 iterações, atendendo a que se tinha verificado que os valores de κ , ω , pressão, e velocidade estabilizavam a partir de sensivelmente 2500 iterações. Foram registados os valores em intervalos de 50 iterações.

Para regime transiente constatou-se que os valores se repetem depois de 1s, pelo que foi considerado uma simulação de 2s. Neste regime considerou-se um passo de 0,0001s para o tempo e registados os valores da solução em intervalos de 0,05s. Estes parâmetros foram introduzidos de acordo com a Fig. 4.15.

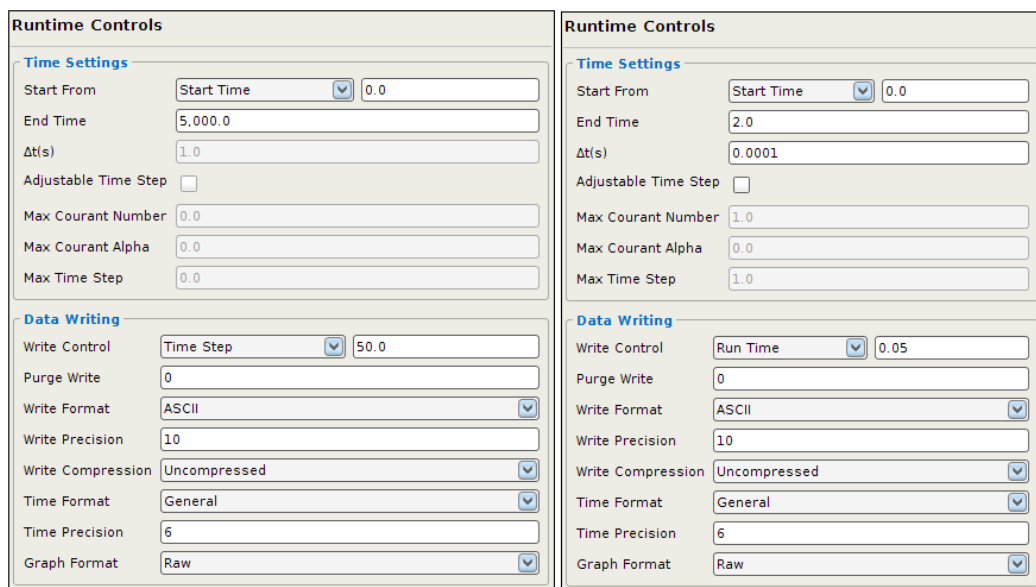


Fig. 4.15 Parâmetros do processo iterativo em regime permanente e transiente, respetivamente (Helyx-OS).

4.4. Aproximações Obtidas

Foram geradas malhas para os seguintes ângulos de ataque:

| | | | | | | | | | | |
|-------------------------|----|----|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| Ângulo de Ataque | 0° | 4° | 8° | 10° | 12° | 14° | 15° | 16° | 18° | 20° |
|-------------------------|----|----|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|

Tab. 4.5 Ângulos de ataque considerados no estudo efetuado.

Foram efetuados cálculos para o ângulo de ataque de 0° somente para verificar os valores de C_L , que teoricamente é nulo. Até aos 8° considerou-se um intervalo de 4°, e este intervalo só foi reduzido a partir deste ângulo, para garantir a correta determinação do ângulo a partir do qual se inicia a formação de turbilhões depois do bordo de fuga, ou seja, o ângulo no qual é necessária uma análise em regime transiente.

O número de células, o número de pontos e o tempo registado na geração das malhas foi o seguinte (Tab. 4.6):

| | snappyHexMesh | cfMesh |
|--|----------------------|----------------|
| Domínio ($\Delta x; \Delta y; \Delta z$) [m] | (6; 4; 0,0001) | (6; 4; 0,0001) |
| Num. Células | ~43788 | ~135294 |
| Num. Pontos | ~67651 | ~246541 |
| Tempo Cálculo Malha | ~15 min. | ~1 min. |

Tab. 4.6 Número de células e de pontos das malhas geradas e os respetivos tempos de geração.

Nas Fig. 4.16 e Fig. 4.17 apresentam-se os valores de C_L e C_D , respetivamente, para as malhas snappyHexMesh e cfMesh, e ainda os valores experimentais medidos por

Timmer [15], todos para Reynolds de 7×10^5 . As duas linhas na Fig. 4.16 e Fig. 4.17 referem-se ao fenômeno de histerese observado por Timmer.

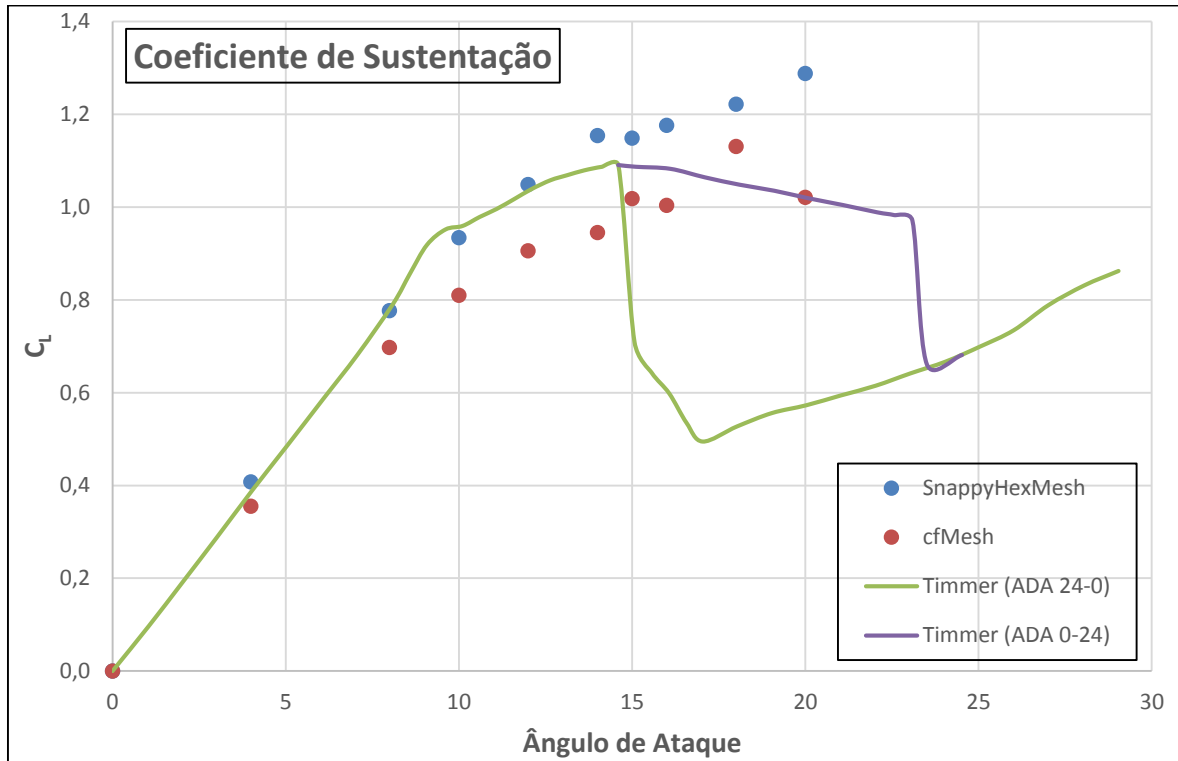


Fig. 4.16 Comparação dos coeficientes de sustentação obtidos por simulação computacional com os valores experimentais.

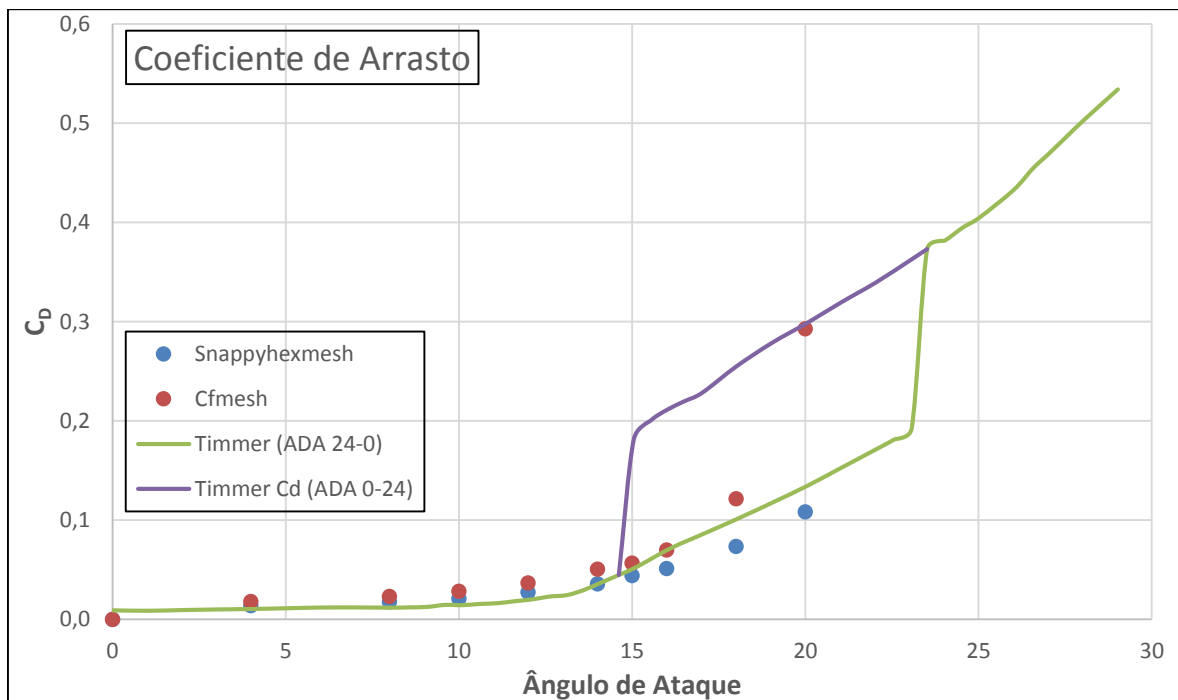


Fig. 4.17 Comparação dos coeficientes de arrasto obtidos por simulação computacional com os valores experimentais.

Os valores de C_L e C_D obtidos com a malha snappyHexMesh apresentam uma melhor aproximação em regime permanente do que os da malha cfMesh, podendo esta discrepância ser justificada pela diferença no valor de Y^+ , eventualmente.

No regime transiente os valores computacionais divergem significativamente dos experimentais, sobretudo no que se refere ao C_L .

5. DISCUSSÃO E CONCLUSÕES

Com este trabalho pretendia-se avaliar o desempenho de dois geradores de malha, o snappyHexMesh e o cfMesh. As simulações CFD foram executadas com o software OpenFOAM utilizando o interface gráfico Helyx-OS. As simulações referem-se ao escoamento em torno do perfil NACA 0018. Relativamente ao cfMesh utilizou-se apenas o modulo 2D

A primeira conclusão que se poderá tirar relativamente ao gerador de malha cfMesh, está relacionada com a quantidade de tempo necessário à geração da malha. O tempo necessário para gerar uma malha com o cfMesh é muito menor relativamente ao tempo que o gerador de malha snappyHexMesh necessita, e este aspeto, associado à forma simples com que se consegue discretizar a malha, permite chegar a rápidas conclusões relativamente a alguns parâmetros de malha a usar num determinado caso. A malha snappyHexMesh gerada no estudo apresentado apesar de ter um número de pontos muito inferior, cerca de 72% menos que a malha cfMesh, demora cerca de dez vezes mais tempo a ser gerada. A utilização do processamento em paralelo para a geração da malha cfMesh, é possível, no entanto este recurso não foi explorado, pelo que o tempo de cálculo da malha poderia ainda ser mais reduzido.

Apesar do tempo de geração de malha ser muito diferente, o tempo de cálculo das aproximações foi conforme o esperado, ou seja, o tempo da solução obtida com a malha com mais pontos e células (cfMesh) foi superior, pois o software nesta fase era exatamente o mesmo e para as mesmas condições. Nesta fase o processamento em paralelo já foi utilizado, e tendo inicialmente utilizado uma virtualização do sistema Linux e depois utilizando o mesmo sistema mas sem virtualização, apesar dos recursos físicos disponíveis serem os mesmos, a forma como eram utilizados eram muito mais eficientes e permitiram a obtenção de resultados num menor tempo de cálculo.

Relativamente aos valores computacionais obtidos para os coeficientes de sustentação e arrasto, estes apresentam alguma divergência relativamente aos experimentais. Os valores obtidos em regime permanente para a malha snappyHexMesh são mais próximos dos valores experimentais do que os valores obtidos com a malha

cfMesh. A partir do ângulo em que o perfil entra em perda, ângulo de ataque na gama na qual se consideraram condições de regime transiente, o desvio dos resultados numéricos relativamente aos experimentais do coeficiente de sustentação e arrasto é significativo para ambas as malhas. O erro observado nos resultados em ambas as malhas poderá eventualmente, estar relacionado com a histerese da análise experimental.

Para futuros estudos, recomenda-se um estudo mais aprofundado dos parâmetros de malha a usar, de modo a perceber, principalmente, a influência do domínio 3 e 4 nas soluções obtidas.

O gerador cfMesh mostra grande potencial e merece uma maior atenção em estudos de simulação numérica para perfis alares, pela sua facilidade em se obter malhas distintas num curto espaço de tempo.

Nota final: De referir que houve ainda um contacto permanente com o colega Fábio Miguel Mendes, que realizava uma tese que incluía o estudo de três tipos diferentes de esquemas de advecção, usando o software Easy CFD para o estudo do mesmo perfil e em condições de simulação semelhantes. Este contacto permitiu um melhor progresso no estudo realizado através da troca de experiências em condições semelhantes.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Anderson, J.; Degrez, G.; Degroote, J.; Dick, E.; Grundman, R.; Vierendeels, J. (2009); “Computational Fluid Dynamics An Introduction”, Third Edition, Von Karman Institute Book, ISBN 9783540850557
2. Oliveira, Luis A.; Lopes, Antonio M. G. (2006); “Mecânica dos Fluidos”, LIDEL – edições técnicas, lda.
3. White, Frank M. (2009); “Fluid Mechanics”, University of Rhode Island, Seventh Edition, McGraw-Hill, ISBN 9780073529349
4. Bergman, T.L.; Lavine, A.S.; Incropera, F.P.; Dewitt, D.P. (2011); “Fundamentals of Heat and Mass Transfer”, Seventh Edition, John Wiley & Sons, Inc., ISBN 9780470501979
5. Babinsky, H. (2003); “How do wings work?”, Physics Education, vol. 38, n. 6
6. E. N. Jacobs, K. E. Ward and R. M. Pinkerton (1933); “The Characteristics of 78 Related Airfoil Sections from Tests in the Variable-Density Wind Tunnel“, NACA Rept. No. 460, Washington, DC.
7. Goett, H.J.; Bullivant, W.K. (1938); “Tests of N.A.C.A. 0009, 0012, and 0018 Airfoils in the Full-Scale Tunnel“, NACA Rept. No. 947, Washington, DC.
8. Costa, J.J. (2011); “Modelação Numérica de Fenómenos de Transferência (Computational Fluid Dynamics)”, Departamento de Engenharia Mecânica FCTUC
9. Menter, F. R. (1994); ”Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications”, AIAA Journal, Vol. 32, No. 8, pp. 1598-1605
10. Wilcox, D. C. (2008); "Formulation of the k-omega Turbulence Model Revisited," AIAA Journal, Vol. 46, No. 11, pp. 2823-2838
11. Menter, F.R.; Kuntz, M.; Langtry, R. (2003); “Ten Years of Industrial Experience with the SST Turbulence Model”, Turbulence, Heat and Mass

Transfer, 4

12. Greenshields, C. J. (2015); “OpenFOAM – User Guide”, OpenFOAM Foundation Ltd.
13. Antonio G. Lopes; Jorge A. V. Alé; Almerindo D. Ferreira; Gabriel da S. Simioni; Vinicius K. Calgaro (2015); “Stall and Pos-Stall of airfoils for small wind turbines: Numerical and Experimental Analysis”, Proceedings Of The 14th ICWE, Porto Alegre, Brasil
14. Juretić, F. (2014), “cfMesh – User Guide”, Creative Fields, Ltd.
15. Timmer, W. A. (2009), “Two-dimensional low-Reynolds number wind tunnel results for airfoil NACA 0018.” Wind Engineering, Vol. 32, No. 6, pp. 525–537