



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CAMPUS TECNOLÓGICO DE JOINVILLE
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA E CIÊNCIAS MECÂNICAS

Eduardo Micael Bastezini

**Uma análise de perfis traseiros de pranchas de surf pelo método da fluidodinâmica
computacional**

Joinville
2021

Eduardo Micael Bastezini

**Uma análise de perfis traseiros de pranchas de surf pelo método da fluidodinâmica
computacional**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação
em Engenharia e Ciências Mecânicas da Universidade
Federal de Santa Catarina para a obtenção do título de
Mestre em Engenharia e Ciências Mecânicas
Orientador: Prof. Dr. André Luís Condino Fugarra.

Joinville

2021

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Bastezini, Eduardo Micael

UMA ANÁLISE DE PERFIS TRASEIROS DE PRANCHAS DE SURF
PELO MÉTODO DA FLUIDODINÂMICA COMPUTACIONAL / Eduardo
Micael Bastezini ; orientador, André Luís Condino Fugarra,
2021.

81 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa
Catarina, Campus Joinville, Programa de Pós-Graduação em
Engenharia e Ciências Mecânicas, Joinville, 2021.

Inclui referências.

1. Engenharia e Ciências Mecânicas. 2. Simulação Numérica
em CFD. 3. Validação utilizando perfis NACA. 4. Análise do
coeficiente de arrasto para diferentes perfis de pranchas.
5. Comparação entre perfis. I. Fugarra, André Luís Condino .
II. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós
Graduação em Engenharia e Ciências Mecânicas. III. Título.

Eduardo Micael Bastezini

**Uma Análise de Perfis Traseiros de Pranchas de Surf Pelo Método da
Fluidodinâmica Computacional**

O presente trabalho em nível de mestrado foi avaliado e aprovado por banca
examinadora composta pelos seguintes membros:

Prof.^a. Talita Sauter Possamai, Dra.
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Lucas Weihmann, Dr.
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof.(a) Guilherme Rosa Franzini, Dr.
Universidade de São Paulo

Certificamos que esta é a **versão original e final** do trabalho de conclusão que foi
julgado adequado para obtenção do título de mestrado em Engenharia e Ciências Mecânicas

Prof. Rafael de Camargo Catapan, Dr.
Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciências Mecânicas

Prof. André Luís Condino Fugarra, Dr.
Orientador

Joinville, 2021.

AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), Campus Joinville, por me conceder a oportunidade de continuar meus estudos e de ter desenvolvido este trabalho.

Ao meu Orientador Prof. Dr. André Luís Condino Fugarra, por me guiar com sábios conselhos e ensinamentos. Obrigado por toda calma e compreensão e por ter acreditado desde o começo no potencial deste trabalho.

Ao Prof. Lucas Weihmann e ao Prof. Thiago Pontin Tancredi, por me concederem acesso a toda a estrutura do Laboratório de Simulação Naval (LaSiN), sem a qual o desenvolvimento deste trabalho não teria sido realizado.

A minha colega de laboratório Giovanna Ambrósio de Souza, que sempre esteve de prontidão para me ajudar em todos os assuntos relacionados ao laboratório no período de pandemia, e também a Cristiane da Silva Barbado, que sempre me atendeu nos assuntos relacionados ao suporte de tecnologia.

A todos os professores e colegas das disciplinas que cursei neste programa de mestrado.

Aos meus pais, Leucir Bastezini e Ires Genoefa Piovezana, por sempre acreditarem e confiarem em mim e por me mostrarem que estudar foi sempre o melhor caminho.

As minhas irmãs, Lucélia Bastezini Nunes e Daiana Andréia Bastezini, que sempre me inspiraram a estudar.

A todos meus familiares, amigos e colegas que sempre torceram por mim.

E por último, mas não menos importante, a minha namorada, Vanessa Patrícia Pereira Perin, por compreender as inúmeras noites que precisei passar estudando e por me dar apoio nos momentos mais difíceis.

“Se você vai tentar, vá até o fim, caso o contrário, nem comece”.

(CHARLES BUKOWSKI)

RESUMO

À medida que a indústria do surf cresce e os surfistas cada vez mais atingem os seus limites, aumenta a necessidade de se descobrir novas tecnologias e estudos mais aprofundados em hidrodinâmica para a evolução deste esporte. Neste sentido, percebe-se uma crescente substituição do empirismo – entenda-se tentativa e erro – pelos métodos científicos. Esta dissertação de mestrado, portanto, traz contribuição neste cenário a partir da apresentação de um estudo sobre o escoamento em diferentes perfis traseiros de pranchas de surf (rabeta), utilizando análise de fluidodinâmica computacional (CFD) bidimensional (2D) com o programa STAR CCM+. O número de Reynolds é semelhante à condição real, mantido segundo modificação das dimensões das geometrias traseiras dos perfis considerados, e suas respectivas áreas. O método CFD utilizado resolve as equações de Navier-Stokes com média de Reynolds (RANS), em regime permanente. O modelo de turbulência SST $k-\omega$ foi utilizado, pois apresentou os melhores resultados e se mostrou o mais indicado em termos das convergências. Na primeira etapa deste estudo, para efeito de verificação da convergência, foram testados diferentes tipos de malhas, com diferentes refinamentos, sendo a malha triangular apresentando os melhores resultados de convergência e de tempo computacional. Em seguida, para efeito de validação, foram então realizadas comparações com os resultados do perfil NACA16-021, cuja geometria é muito semelhante à área molhada projetada das atuais pranchas de surf. Na etapa seguinte, o perfil NACA foi simulado com o escoamento 2D vindo em sentido oposto ao usualmente considerado, desta forma se assemelhando a uma prancha de surf com perfil traseiro do tipo *round squash*. Em uma terceira etapa, então, foram simulados três perfis com variações em suas geometrias traseiras, sendo esses o *squash*, o *swallow* e *round pin*, para os quais também foram consideradas variações no ângulo de ataque do escoamento. Finalmente, na quarta e última etapa, fez-se a comparação e discussão dos resultados provenientes dos perfis estudados, tomando como base o coeficiente de arrasto (C_D), o coeficiente de sustentação (C_L), o tamanho da camada limite e a vorticidade na esteira formada. Como conclusão geral, o leitor verificará a interessante relação entre os resultados cientificamente obtidos e o empirismo de longa data aplicado pelos surfistas e designers de pranchas.

Palavras-chave: Pranchas de Surf. Diferentes perfis traseiros. CFD. Simulações 2D. STAR CCM+.

ABSTRACT

As the surfing industry grows and surfers increasingly reach their limits, there is an increasing need to discover new technologies and more in-depth studies in hydrodynamics for the evolution of this sport. In this sense, there is a growing replacement of empiricism – meaning trial and error – by scientific methods. This master's thesis, therefore, contributes to this scenario by presenting a study on the flow in different back profiles of surfboards (ship), using two-dimensional (2D) computational fluid dynamics (CFD) analysis with the STAR CCM+ program. The Reynolds number is similar to the real condition, maintained by modifying the dimensions of the back geometries of the profiles considered, and their respective areas. The CFD method used solves the Navier-Stokes equations with Reynolds mean (RANS), in steady state. The SST $k-\omega$ turbulence model was used, as it presented the best results and proved to be the most suitable in terms of convergences. In the first stage of this study, to verify convergence, different types of meshes were tested, with different refinements, with the triangular mesh showing the best convergence and computational time results. Then, for validation purposes, comparisons were made with the results of the NACA16-021 profile, whose geometry is very similar to the projected wet area of current surfboards. In the next step, the NACA profile was simulated with the 2D flow coming in the opposite direction to that usually considered, thus resembling a surfboard with a round squash rear profile. In a third step, then, three profiles with variations in their rear geometries were simulated, these being the squash, the swallow and the round pin, for which variations in the angle of attack of the flow were also considered. Finally, in the fourth and last step, the results from the studied profiles were compared and discussed, based on the drag coefficient (C_D), the lift coefficient (C_L), the size of the boundary layer and the vorticity in the mat formed. As a general conclusion, the reader will verify the interesting relationship between the scientifically obtained results and the longstanding empiricism applied by surfers and surfboard shapers.

Keywords: Surfboards. Different rear profiles. CFD. 2D simulations. STAR CCM+.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Vista superior de uma prancha de surf e seus principais elementos.	17
Figura 2 – Diferentes tipos de pranchas de surf.	23
Figura 3 – Diferentes rabetas de pranchas. Destaque para os perfis traseiros (rabetas) de interesse neste trabalho.	24
Figura 4 – <i>Drive</i> de uma prancha.	25
Figura 5 – Diferenças de comportamento entre escoamento laminar e turbulento.	27
Figura 6 – Transição entre o escoamento laminar e turbulento na camada limite.	32
Figura 7 – Subcamada viscosa da camada limite turbulenta.	33
Figura 8 – Subcamadas laminar, turbulenta e zona de ajuste entre os perfis de velocidades...34	
Figura 9 – Perfil de velocidade junto a uma superfície sólida.....	36
Figura 10 – Complexidade x Demanda computacional dos modelos de turbulência.....	38
Figura 11 – Exemplo de evolução da velocidade no tempo calculada com DNS, LES e RANS.	38
Figura 12 – Solução das equações de RANS para a velocidade na região turbulenta.....	40
Figura 13 – Modelagem do perfil NACA 16-021 em 2D.....	48
Figura 14 – Geometria e dimensões do volume de controle.	49
Figura 15 – Condições de contorno do volume de controle.	50
Figura 16 – Teste de refinamento para três diferentes geometrias de malha.	52
Figura 17 – Estudo de convergência da malha.	52
Figura 18 – Geração da malha para um escoamento com ângulo de ataque 6°.	53
Figura 19 – Camada prismática na traseira do perfil NACA 16-021.....	54
Figura 20 – Valor residual do erro em função do número de iterações.....	55
Figura 21 – Escoamento perfil NACA 16-021 invertido.....	57
Figura 22 – Curvas de comparação dos coeficientes de arrasto (C_D).....	59
Figura 23 – Comparação dos resultados dos coeficientes de sustentação (C_L).....	60
Figura 24 – Coeficiente de arrasto NACA 16-021 invertido.....	61
Figura 25 – Coeficiente de sustentação NACA 16-021 invertido.....	62
Figura 26 – As regiões numeradas de 1 a 7 se referem as bolhas de recirculação em um modelo <i>PIN</i> a 12°.	63
Figura 27 – Comparação dos coeficientes de arrasto para os diferentes tipos de rabetas.	63

Figura 28 – Camada limite da rabeta <i>Round Pin</i> para escoamento com 0°,6° e 10° de ângulo de ataque.....	64
Figura 29 – Camada limite da rabeta <i>Pin</i> para escoamento com 0°,4° e 6° de ângulo de ataque.	65
Figura 30 – Camada limite da rabeta <i>Squash</i> para o escoamento com 0° e 6° de ângulo de ataque.	66
Figura 31 – Oscilação na esteira da camada limite, rabeta <i>Squash</i> para 8° e 10° de ângulo de ataque.....	67
Figura 32 – Escoamento rabeta <i>Squash</i> para 0° e 2°	68
Figura 33 – Escoamento escalar (Imagem A) e vetorial (Imagem B) em função da velocidade para 10°.	69
Figura 34 – Comparação dos coeficientes de sustentação para os diferentes tipos de rabetas.	70
Figura 35 – Comparação de esteiras entre os perfis de pranchas para 10°.	71
Figura 36 – Comparação dos modelos de Rabeta.....	73

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Condições de contorno.....	49
Tabela 2 - Dados dos refinamentos de malha.....	56

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AIAA	American Institute of Aeronautics and Astronautics
ASME	American Society of Mechanical Engineers
CAD	Desenho Auxiliados por Computador
CEF	Curvas de Esforço Hidrodinâmicos
CFD	Computational Fluid Dynamics
DAE	Department of Aerospace Engineering
DNS	Simulação Numérica Direta
ENS	Equação de Navier-Stokes
FVM	Métodos dos Volumes Finitos
IBRASURF	Instituto Brasileiro de Surf
LaSIN	Laboratório de Simulações Naval
LES	Simulação por Grandes Vorticidades
NACA	National Advisory Committee for Aeronautics
RANS	Equações de Navier-Stokes com Média de Reynolds
RMS	Raiz Quadrada do Valor Quadrático Médio
SI	Sistema Internacional de Unidades
SST $k - \omega$	Modelo de Turbulência <i>Shear Stress Transport k - omega</i>
UFSC	Universidade Federal de Santa Catarina
V&V	Verificação e Validação
VIV	Vibrações Induzidas por Vórtices

LISTA DE SÍMBOLOS

A	Área da secção transversal à direção de incidência do escoamento
B	Borda máxima do perfil
C	Constante de integração do perfil de velocidade da subcamada turbulenta
C_D	Coefficiente de arrasto
C_{Df}	Coefficiente de arrastos de forma
C_{Dr}	Coefficiente de arrasto friccional
C_L	Coefficiente de sustentação
F_D	Força de arrasto
F_I	Forças inercias
F_L	Força de sustentação
F_μ	Forças viscosas
K	Constante de von Karman
k	Energia cinética turbulenta
L	Comprimento total do perfil
L_{max}	Largura máxima
l_m	Comprimento de mistura
ln	Logaritmo neperiano
ω	Taxa de dissipação turbulenta especifica
P	Pressão termodinâmica local
Re	Número de Reynolds
r_i	Fator de refinamento de malha
t	Variável temporal (tempo)
U	Velocidade adimensional na subcamada viscosa
u	Velocidade do escoamento – componente i
$u(y)$	Função do perfil de velocidade do escoamento
U_∞	Distribuição de velocidade do escoamento livre
u_*	Velocidade de atrito
V	Velocidade do escoamento
v	Velocidade do escoamento – componente j
ν_t	Viscosidade dinâmica

\vec{V}	Vetor de velocidade do escoamento nos eixos x, y e z
w	Velocidade do escoamento – componente k
x	Eixo cartesiano na direção longitudinal do corpo
y	Eixo cartesiano na direção lateral do corpo
y^+	Distância adimensional da primeira célula em relação a superfície
τ_{xy}	Tensão de cisalhamento no plano xy
τ_0	Tensão de cisalhamento na superfície
∂	Operador de derivada parcial
\emptyset	Variável de velocidade, pressão e energia das equações de Navier-Stokes
$\overline{\emptyset}$	Valor médio da componente de velocidade, pressão e energia
\emptyset'	Componente flutuante de velocidade, pressão e energia
μ	Coefficiente de viscosidade dinâmica
μ_t	Coefficiente de viscosidade turbulento
ρ	Massa específica do fluido
∇	Operador diferencial
Σ	Somatório
α	Ângulo incidente do escoamento no plano longitudinal - ângulo de ataque
δ	Espessura da camada limite

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	16
1.1	OBJETIVOS DO TRABALHO	19
1.1.1	Objetivo Geral.....	19
1.1.2	Objetivos Específicos	19
1.2	DELINEAMENTO JUSTIFICADO PARA O PROBLEMA EM FOCO	20
1.3	ESTRUTURA DO TEXTO	22
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	23
2.1	PRANCHAS DE SURF.....	23
2.2	ESCOAMENTO EXTERNO	26
2.3	COEFICIENTES HIDRODINÂMICOS	28
2.3.1	Coefficiente de arrasto	28
2.3.2	Coefficiente de sustentação	29
2.4	EQUAÇÕES DE GOVERNO DO ESCOAMENTO	29
2.4.1	Conservação da massa – Equação da continuidade	29
2.4.2	Equação da quantidade de movimento	30
2.5	DESCRIÇÃO DA CAMADA LIMITE.....	31
2.5.1	Lei de parede	33
2.6	MODELAGEM MATEMÁTICA DA TURBULÊNCIA	37
2.7	MODELAGEM MATEMÁTICA DAS EQUAÇÕES DE NAVIER–STOKES COM MÉDIA DE REYNOLDS (RANS).....	39
2.7.1	Modelos de turbulência RANS	41
2.8	MODELO DE TURBULÊNCIA <i>SHEAR STRES TRANSPORT K - OMEGA</i> (<i>SST k – ω</i>).....	42
2.9	ANÁLISE E CONVERGÊNCIA DE MALHA	43
2.9.1	Comparação de resultados no âmbito deste trabalho	43

3	METODOLOGIA.....	45
3.1	DESCRIÇÃO GERAL	45
3.2	DETALHES DA MODELAGEM NUMÉRICA.....	47
3.2.1	Modelagem dos perfis	47
3.3	MODELAGEM DO VOLUME DE CONTROLE.....	48
3.4	DETALHES QUANTO ÀS CONDIÇÕES DE CONTORNO	49
3.5	DETALHES QUANTO ÀS MALHAS.....	50
3.5.1	Detalhes quanto às malhas com elementos triangulares	52
3.5.2	Detalhes quanto às camadas prismáticas	53
3.6	DETALHES QUANTO AOS ÂNGULOS DE INCIDÊNCIA	54
3.7	CRITÉRIO DE CONVERGÊNCIA DAS SIMULAÇÕES	55
4	RESULTADOS	56
4.1	DESCRIÇÃO GERAL DOS RESULTADOS	56
4.2	COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS PERFIL NACA 16-021.....	57
4.3	ANÁLISE DOS RESULTADOS DO PERFIL NACA 16-021 COM ESCOAMENTO INVERTIDO	60
4.4	ANÁLISE E COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS DOS PERFIS TRASEIROS: SWALLOW, PIN, SQUASH E ROUND PIN (NACA 16-021).....	62
4.5	ANÁLISE DO COEFICIENTE DE ARRASTO (CD)	63
4.6	ANÁLISE DO COEFICIENTE DE SUSTENTAÇÃO (CL).....	69
5	CONCLUSÃO E PERSPECTIVAS.....	72
	REFERÊNCIAS.....	77

1 INTRODUÇÃO

A indústria do surf vem crescendo de forma exponencial nas últimas décadas. Segundo o Instituto Brasileiro de Surf (IBRASURF), existem por volta de três milhões de praticantes no Brasil, e o mercado consumidor de *surfwear* registra por volta de 70% de consumidores não praticantes, o que resulta em uma estimativa de sete bilhões de reais ao ano em roupas, pranchas e acessórios. Além disso, com a entrada do surf nas olimpíadas e a grande expansão das piscinas artificiais de ondas surfáveis, este esporte tende a crescer ainda mais, o que deve exigir mais soluções tecnológicas em pranchas e equipamentos.

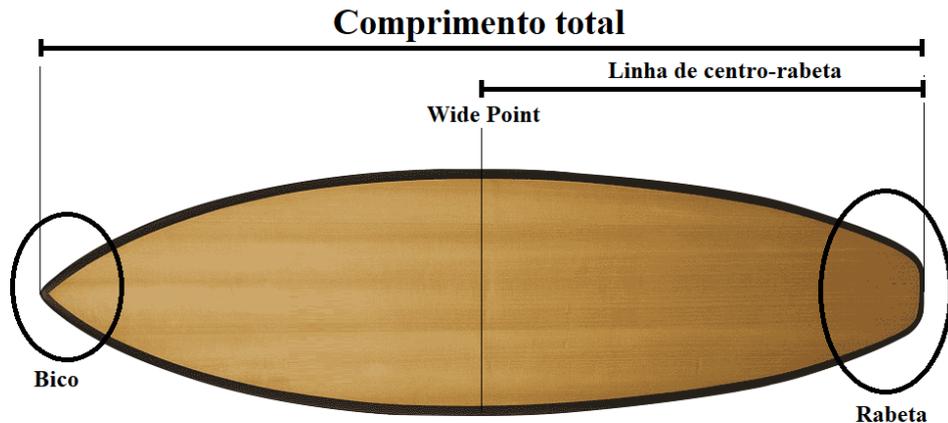
Outro fator importante no cenário atual deste esporte é o crescimento do chamado *big surf*, onde os surfistas se arriscam em ondas gigantes, sendo rebocados por *jet-skis* ou mesmo na remada – termo utilizado para designar a forma como os surfistas se locomovem com as pranchas a partir de braçadas. Importante destacar que, no *big surf*, os atletas vêm se desafiando continuamente em ondas cada vez maiores e em lugares cada vez mais perigosos, elevando o esporte a um patamar nunca visto antes.

Por outro lado, apesar da explosão na prática do surf, os estudos científicos na área de hidrodinâmica do surf ainda são muitos escassos e muito do conhecimento em construção e uso das pranchas são baseados no empirismo, ou seja, baseados na tentativa e erro.

Antes de serem introduzidas mais informações quando à realidade desta área, agora de cunho técnico-científico, cumpre descrever melhor alguns elementos do sistema de interesse para este texto.

A Figura 1 apresenta a vista superior de uma prancha de surf com seus principais elementos. A parte frontal é conhecida como a região do bico da prancha, podendo ter sua geometria mais afilada ou mais arredondada, de acordo com a performance desejada. A parte traseira, por sua vez, é conhecida com a região da rabeta, contando com diferentes tipos de geometria possíveis. As linhas de borda representam o *outline*, ou as linhas de curvatura que definem o contorno da prancha em uma vista de topo. O comprimento total da prancha é definido como sendo a distância do bico até o último ponto da rabeta, sendo importante o ponto da borda onde acontece a máxima largura, o *wide point*. E, finalmente, tem-se a linha do *outline* que vai do *wide point* até a sua rabeta, ou linha de centro-rabeta, que normalmente se adéqua em função do tipo de rabeta adotado.

Figura 1 – Vista superior de uma prancha de surf e seus principais elementos.



Fonte: Autor (2021).

A título de exemplo quanto à escassez de trabalhos científicos sobre a hidrodinâmica das pranchas de surf, o que, de fato, também serve como motivação para este trabalho, fez-se uma pequena busca por trabalhos científicos disponíveis na literatura aberta sobre o assunto.

De uma maneira geral, os métodos experimentais em tanques de prova se mostram financeiramente inviáveis para estudos desta natureza, pois os recursos disponíveis são normalmente limitados nesse segmento.

Como alternativa, os métodos de análise por Fluidodinâmica Computacional (CFD, do acrônimo em língua inglesa *Computational Fluid Dynamics*) se tornam uma abordagem investigativa interessante e mais barata para o levantamento das informações hidrodinâmicas destinadas à avaliação das pranchas. De uma maneira geral, esses métodos resolvem de forma discretizada as equações de Navier-Stokes, que são derivadas das equações da conservação da quantidade de movimento, e que, associadas à equação da conservação de massa, podem ser transformadas em sistemas de equações lineares via discretização do domínio de interesse, e resolvidas de maneira iterativa.

Em Carswell e Lavery (2006), por exemplo, são analisados os esforços hidrodinâmicos de arrasto e sustentação em modelos de quilhas desenvolvidas a partir de Desenho Auxiliado por Computador (CAD), comparados aos desenvolvidos em áreas seccionais de perfis NACA¹.

¹ Para o leitor menos familiarizado com o assunto, esses são perfis com formas geométricas padronizadas e bem definidas, intensamente investigados pela agência federal norte-americana denominada *National Advisory Committee for Aeronautics* (NACA) e que servem como base de comparação para muitas investigações teóricas e até mesmo experimentais.

Na mesma linha investigativa, em Falk et al., (2019) e (2020) também é feito o levantamento dos esforços hidrodinâmicos de quilhas em diferentes posições na prancha, contemplando arranjos com três ou quatro unidades, e variando os ângulos de ataque para uma velocidade do escoamento constante.

Importante destacar que nesses dois trabalhos os autores isolam e estudam apenas uma variável do problema, obtendo assim os comportamentos hidrodinâmicos das quilhas independente dos demais componentes presentes no escoamento junto à prancha de surf.

Outro exemplo de investigação com cunho científico é o trabalho de Oggiano e Pierella (2018), onde são determinados os esforços hidrodinâmicos em manobra para três geometrias de prancha. São simuladas duas pranchas com a mesma curvatura de fundo (*rocker*), uma com geometria traseira (rabeta) do tipo *Squash* e outra do tipo *Round*, e uma terceira prancha com fundo reto e rabeta do tipo *Squash*. Em seus resultados, esses autores mostraram que o *rocker* afeta bastante o desempenho, aumentando a sustentação da prancha e também o arrasto. Apesar disso, no entanto, não foi possível concluir se a geometria da rabeta afetou, ou não, os coeficientes de força de arrasto e sustentação.

Nos estudos Lahlou (2019), por sua vez, foram levantadas as curvas de coeficiente de arrasto (C_D) em programa de CFD, apenas com o intuito de comparar com os resultados experimentais que simulavam a prancha de surf em um movimento vertical de mergulho e retorno à superfície. Tal movimento lembra a manobra do surfista para passar através de uma onda de maneira a minimizar seus efeitos, ou seja, a operação de “furar a onda” no jargão do esporte.

Mediante esta pequena mostra de trabalhos, já é possível perceber que talvez a própria complexidade do problema completo seja uma das justificativas para a escassez de investigações científicas sobre a hidrodinâmica da prancha de surf. Além disso, percebe-se também que, ao menos por enquanto, a estratégia adotada pelos grupos de pesquisa é investigar a hidrodinâmica das pranchas por partes – o que, de fato, é usual na abordagem científica de problemas com alto grau de complexidade.

Com isso, percebe-se um vasto campo para estudos científicos que tragam não só melhoria no rendimento dos atletas e praticantes, mas também uma maior segurança na prática das várias modalidades deste esporte.

Neste sentido, e mediante este cenário, um possível foco de investigação científica é analisar de maneira isolada os efeitos causados pelos diferentes perfis de rabeta nas pranchas

de surf, a partir de análises numéricas bidimensionais (2D), analisando não apenas os coeficientes de força (sustentação e arrasto), como também os efeitos do escoamento para cada diferente geometria e ângulo de ataque (α) em graus ($^\circ$). Qualitativamente, sabe-se de antemão que os diferentes tipos de rabeta podem influenciar de maneira direta, ou não, a velocidade, a manobrabilidade e/ou a estabilidade direcional das pranchas, podendo representar um fator muito importante quando se deseja desempenho associado a cada especificidade de onda.

Em realidade, este é o foco deste trabalho, que pode ser melhor estabelecido de acordo com os objetivos e detalhes apresentados nas próximas duas subseções.

1.1 OBJETIVOS DO TRABALHO

1.1.1 Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho é determinar as curvas de esforços hidrodinâmicos mediante simulações numéricas que modelem o escoamento ao redor de corpos bidimensionais hidrodinâmicos, ou fólios, considerando diferentes geometrias em seu bordo de fuga.

Embora os fólios não reproduzam fielmente a intersecção da linha d'água com a prancha de surf em sua condição de afundamento em operação, a opção por este tipo de geometria caminha no sentido de simplificar o problema sabidamente mais complexo, mantendo foco nos efeitos das rabetas, sem, contudo, perder os contrapontos físicos que a analogia teórica permite.

Tal abordagem pretende encontrar respostas e padrões fluidos que as justifiquem e que descrevam cientificamente os procedimentos hoje adotados de maneira puramente prática na indústria do surf.

1.1.2 Objetivos Específicos

Buscando o objetivo geral deste trabalho, e também como consequência dele, são definidos os seguintes objetivos específicos:

- Determinar numericamente as curvas de esforços hidrodinâmicas mediante CFD de um perfil bidimensional conhecido que se assemelhe ao *outline* de uma prancha de surf típica, no caso, o perfil NACA 16-021;

- Verificar a convergência das simulações numéricas a partir de uma discretização progressiva da malha que caracteriza o domínio fluido de interesse;
- Validar as simulações numéricas, comparando os resultados do perfil NACA 16-021 com aqueles já conhecidos da literatura;
- Determinar as curvas de esforços hidrodinâmicas do perfil NACA 16-021 com o escoamento invertido, ou seja, em sentido semelhante ao que acontece em uma prancha real;
- Determinar as curvas de esforços hidrodinâmicas do perfil NACA 16-021 invertido e com diferentes geometrias de rabetas;
- Realizar uma síntese e discussão mediante comparação geral dos resultados, dando justificativa científica a comportamentos qualitativa e empiricamente descritos no segmento do surf;
- Na medida do possível, servir como ponto de partida e referência para investigações numéricas de CFD no segmento do surf.

1.2 DELINEAMENTO JUSTIFICADO PARA O PROBLEMA EM FOCO

Conforme mencionado, este trabalho investiga numericamente algumas geometrias de fólio que são modificações do perfil NACA 16-021, obtidas pela simples inversão no sentido de sua operação, ou obtidas pela consideração de diferentes geometrias do bordo de fuga deste mesmo perfil invertido.

A seleção do perfil simétrico NACA 16-021, se justifica pelo fato dele ser muito parecido com a área projetada das pranchas modernas sobre a superfície livre. A esse respeito, o leitor deve estar se perguntando se essa projeção realmente corresponde à geometria da intersecção da linha d'água com a prancha típica na condição de operação. De fato, é natural

que não, pela própria construção curvada da prancha em seu sentido longitudinal, o que também se altera dinamicamente e que dificulta sobremaneira qualquer investigação.

Desta forma, a opção pelo perfil NACA mencionado atua no sentido de simplificar o problema, mantendo uma condição fluida mais controlada junto à porção anterior do perfil, permitindo foco nos efeitos advindos das modificações promovidas do *wide point* à rabeta.

Além disso, ao contrário da geometria dinamicamente modificada durante a operação, a opção pelo NACA 16-021 permite contrapontos com resultados disponíveis na literatura, particularmente os encontrados nos trabalhos experimentais em túnel de vento do *Department of Aerospace Engineering* (1921), descritos por Drela (1989).

Ainda com relação à geometria simulada numericamente, e em complemento ao caráter simplificador, há que se destacar que a opção pela análise bidimensional também tem justificativa na menor demanda computacional, visto que esta infelizmente é limitada pela infraestrutura modesta em termos de capacidade computacional até então disponível para a realização desta pesquisa.

Como característica facilitadora das comparações, o comprimento de todos os perfis simulados foi fixado em 1,72 m, e largura máxima de 0,36 m, variando apenas a geometria da rabeta, que, devido a sua curvatura geométrica, acaba alterando também a área na porção centro-rabeta da prancha; ver Figura 1. Desta forma, devido ao comprimento constante dos perfis, o número de Reynolds (R_E) fica em função apenas da velocidade do escoamento incidente. Por efeito de comparações o número de Reynolds máximo encontrado na literatura para comparação com o perfil NACA 16-021 não representa a velocidade de uma onda real sendo surfada, e sim uma onda menor também conhecida no esporte pelo termo “marola”.

Apesar destas simplificações, conforme se comprovará, as simulações mais adiante apresentadas permitem a obtenção de resultados importantes na comparação entre os perfis traseiros de pranchas, entre os quais: campos de pressões; campos de velocidades; tamanho da camada limite, coeficiente de arrasto (C_D), coeficiente de sustentação (C_L) – neste trabalho sendo utilizado como uma força lateral –, e ponto de descolamento da camada limite. Importante destacar que todas essas informações influenciam diretamente no comportamento da prancha e a comparação entre elas pode ser fundamental na hora de decidir qual perfil trará um melhor desempenho para uma dada condição de operação.

Por uma questão de disponibilidade de licença e familiaridade de uso, o programa de mais afundo no delineamento das simulações numéricas, escolhido foi o STAR CCM+, com

modelo de turbulência SST $k-\omega$ e com geometrias de malha com elementos triangulares por apresentarem melhor desempenho mediante as análises de verificação.

O computador utilizado para as simulações foi o modelo Workstation DEEL Precision T7810, com processadores de 2.4 GHz e 6 núcleos, 16 GB de memória RAM, e placa de vídeo de 2 GB dedicada. O computador foi concedido pelo Laboratório de Simulações Navais (LaSIN) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) – campus Joinville.

1.3 ESTRUTURA DO TEXTO

Este texto é composto por 5 seções principais.

A primeira, que se encerra com a presente subseção, trouxe uma introdução sobre o tema de interesse, destacando a necessidade e motivação para sua investigação mediante a definição de objetivos que são justificados e se coadunam com as possibilidades atuais do laboratório onde as simulações numéricas foram realizadas.

A segunda seção, por sua vez, estabelece a base teórica para os trabalhos numéricos realizados. Na revisão bibliográfica realizada são trazidos mais detalhes quanto ao sistema de interesse – a prancha de surf –, bem como sobre os esforços hidrodinâmicos de interesse. Esta seção também apresenta todo o equacionamento que serve de base para as simulações numéricas, com foco no método RANS e no modelo de turbulência SST $k-\omega$. Além disso, finaliza com a análise de convergência de malha e busca de comparação dos resultados.

Por sua vez, a terceira seção apresenta detalhes do trabalho numérico realizado, descrevendo com muito mais detalhes o problema considerado, os métodos adotados, bem como os casos que compuseram a base de resultados disponíveis para discussão.

Como sequência natural, a quarta seção deste texto reúne de maneira organizada e padronizada os resultados e discussões estabelecidas.

E, finalmente, na quinta e última seção são apresentadas as conclusões do trabalho, bem com as perspectivas de desdobramento para trabalhos futuros.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

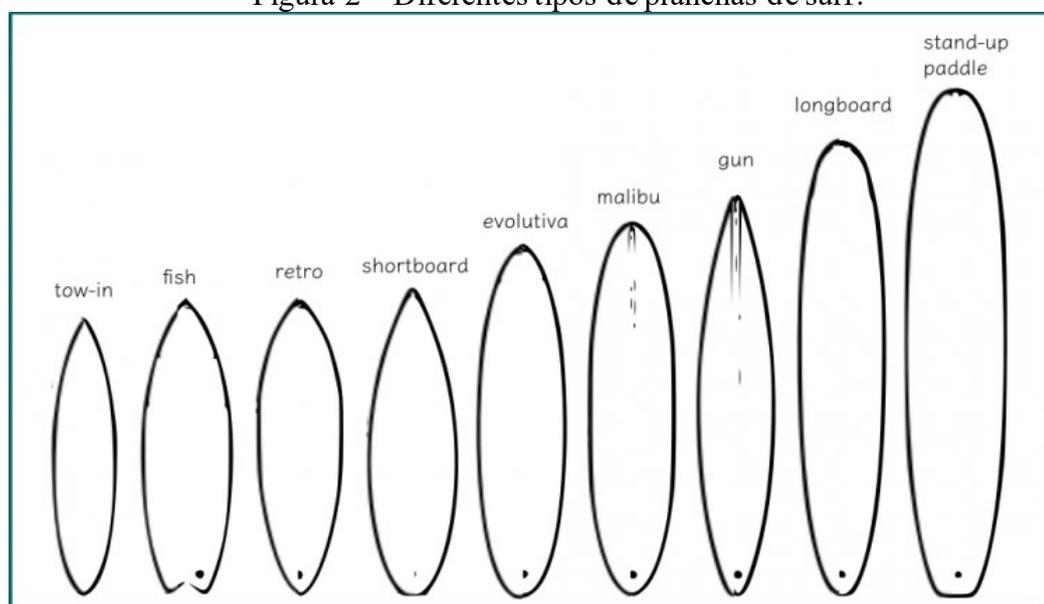
Esse capítulo apresenta os fundamentos para o desenvolvimento da pesquisa apresentada nesta dissertação de mestrado. Nele são descritas todas as informações que descrevem uma prancha de surf como também todos os modelos matemáticos utilizados para as simulações numéricas, bem como para as análises de verificação e validação/comparação.

2.1 PRANCHAS DE SURF

Pranchas de surf são embarcações alongadas com “formato de tábua”, com as quais os praticantes do surf deslizam sobre as ondas em posição de pé. Seu comprimento pode variar conforme a altura, peso e idade do praticante, sendo que, para uma pessoa adulta, pode variar de 1,5 m até 4,0 m, como se pode observar na Figura 2.

Importante destacar que as variações ilustradas na Figura 2 dependem do objetivo de surf de cada praticante, e do seu nível de domínio do esporte.

Figura 2 – Diferentes tipos de pranchas de surf.



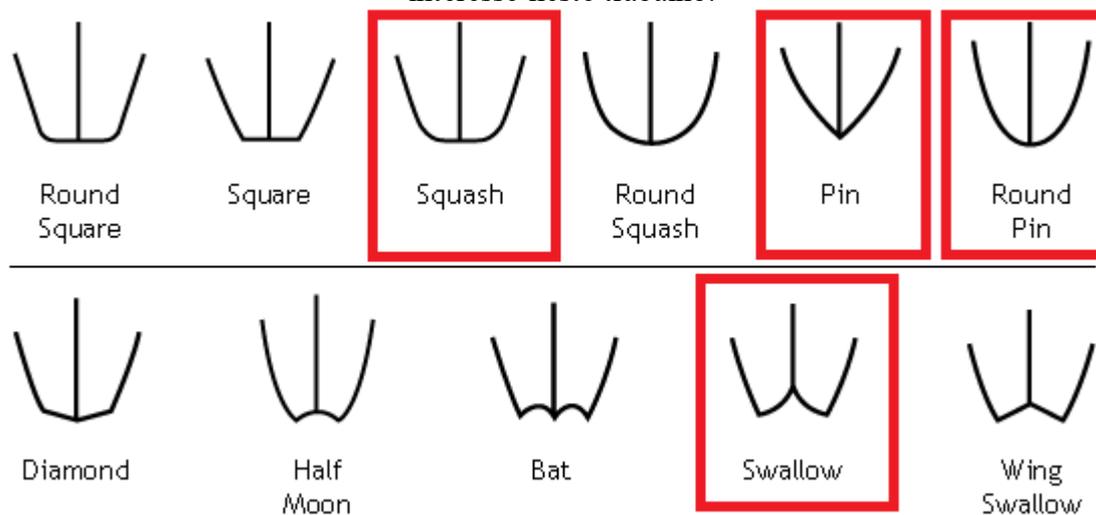
Fonte: Morais (2018).

As pranchas podem ter inúmeras variações em suas dimensões e geometrias, particularmente em relação a elementos como bico, largura, volume, peso, entre outros. Cada

combinação de parâmetros pode contribuir positiva ou negativamente para o comportamento hidrodinâmico dentro d'água.

As rabetas, como são chamadas as porções traseiras das pranchas, são um dos elementos geométricos que mais influenciam na manobrabilidade e estabilidade direcional de uma prancha de surf. A Figura 3 apresenta os diferentes tipos de rabetas simétricas mais conhecidas, no caso, apenas aquelas que apresentam geometria semelhante entre os dois bordos em relação à linha de centro.

Figura 3 – Diferentes rabetas de pranchas. Destaque para os perfis traseiros (rabetas) de interesse neste trabalho.



Fonte: Adaptada de Lou (2016).

As rabetas, que como dito são os elementos geométricos em foco neste trabalho, são responsáveis pelo raio de giro em manobras, possibilitando que o praticante execute curvas mais ou menos fechadas de acordo com a sua geometria, como se pode ver na Figura 4. Esta característica da manobrabilidade também é conhecida como *Drive* (PRANCHARIA, 2020).

Outra função importante das rabetas é a de dar uma maior estabilidade direcional, ou seja, a condição de se manter mais, ou menos, alinhado com a onda, a depender da modalidade de surf que se está praticando. Modalidades que preveem a execução de muitas manobras na medida em que o surfista evolui ao longo da onda são aquelas onde se deseja menos estabilidade direcional da prancha. Por outro lado, em modalidades como o *big surf* ou em ondas tubulares, a estabilidade direcional deve ser bem maior, associada a uma grande velocidade de descida da onda, como forma de salvaguarda do próprio surfista.

Neste trabalho serão estudadas as rabetas do tipo *Squash*, *Pin*, *Swallow* e *Round Pin* que é o perfil NACA 16-021 invertido, que servirá de referência e base de comparação. Destacados na Figura 3, estes são os modelos de rabeta mais utilizados para alta performance, sendo que de acordo com os conhecimentos empíricos de anos, essas rabetas também têm sua utilização para diferentes tipos de ondas (LUÍS CORUJA, 2018).

Figura 4 – *Drive* de uma prancha.



Fonte: Prancharia (2020).

A rabeta do tipo *Pin* é muito utilizada para ondas grandes, pois segundo a maioria dos surfistas, ela traz a mencionada estabilidade direcional maior, permitindo que o surfista não perca facilmente sua direção de fuga da onda que está por quebrar. O modelo *Swallow*, por sua vez, é muito utilizado para ondas menores e apresenta um melhor Drive (ver Figura 4), menor raio de giro nas manobras, permitindo mudança de direção com grande facilidade. O modelo de rabeta *Round Pin* é um modelo muito utilizado em ondas tubulares, onde é possível manobrar a prancha mesmo após o surfista sair do tubo. Por fim, a opção por estudar a rabeta *Squash* deve-se ao fato dela ser um modelo mais comum e versátil, apresentando seus cantos arredondados e servindo para as amplas condições de mar. Segundo o empirismo do surf, seus cantos arredondados a deixam “mais rápida e solta” – entenda-se mais veloz e menos estável direcionalmente –, ou seja, uma mescla do desempenho exibido pelas rabetas *Pin* e *Swallow*.

Esta subseção inicial trouxe mais alguns aspectos essenciais para a caracterização do problema bidimensional de interesse. Nas próximas seções, então, são trazidos os aspectos mais importantes para uma interpretação científica desse problema de interesse.

2.2 ESCOAMENTO EXTERNO

Escoamento é o processo de movimentação das moléculas de um fluido entre superfícies, e que, dependente do número de coordenadas espaciais requeridas, pode ser uni, bi ou tridimensional.

O escoamento pode ser causado de forma natural, por diferenças de pressões ou trocas de calor, como também de maneira forçada, por forças motrizes – as ondas, por exemplo.

Em suas características de fluxo, o escoamento pode ser classificado como uniforme, quando suas partículas apresentam a mesma velocidade de incidência na superfície do corpo; ou variado, quando os diversos pontos de uma mesma trajetória não apresentam constância da velocidade num intervalo de tempo considerado (FOX, 2010).

Além disso, o escoamento é classificado como interno, quando acontecem no interior de dutos, por exemplo; e externo, quando escoam sobre superfícies mergulhadas em fluido, como nas asas de um avião, no entorno das embarcações convencionais e submarinos, bem como no entorno das pranchas de surf.

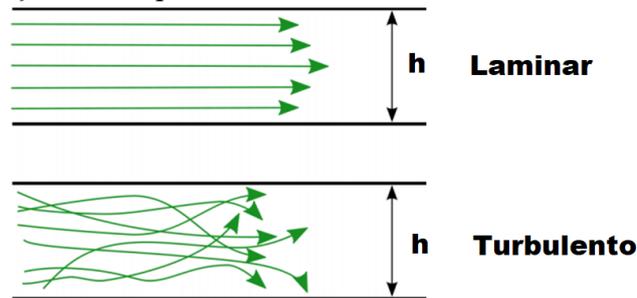
O escoamento também pode variar quanto à sua dependência no tempo, assim sendo classificado como em regime permanente ou em regime transiente. Em regime permanente, sua velocidade e pressão não variam com o tempo e apenas com função da posição no domínio fluido considerado. Já no regime transiente as variações de pressão e velocidade são dependentes tanto da posição como também do tempo.

Quanto à organização e a direção da trajetória das partículas que o compõe, os escoamentos são classificados em laminar e turbulento. O regime laminar é definido como aquele no qual o fluido se move em camadas, ou lâminas, escorregando umas sobre as outras, e havendo somente troca de quantidade de movimento molecular. No regime laminar, qualquer tendência para instabilidade e turbulência é amortecida por forças viscosas de cisalhamento que dificultam o movimento relativo entre as camadas adjacentes do fluido. Já o regime turbulento é aquele no qual as partículas apresentam movimento caótico macroscópico, isto é, a velocidade apresenta componentes transversais ao movimento geral do conjunto fluido. O escoamento

turbulento também pode apresentar as seguintes características importantes: irregularidade; difusividade; altos números de Reynolds; vorticidade; e dissipação de energia (FOX, 2010).

A Figura 5 apresenta a diferença entre escoamento laminar e turbulento. Importante destacar que este tópico é complementado com mais detalhes na seção que descreve a camada limite; mais adiante.

Figura 5 – Diferenças de comportamento entre escoamento laminar e turbulento.



Fonte: Autor (2020).

A partir do número de Reynolds (R_e), é possível identificar a natureza do escoamento entre laminar e turbulento. Segundo FOX (2010), para escoamentos externos sob condições típicas, a transição entre laminar/turbulento ocorre para R_e maiores que 500.000. Lembrar que o número de Reynolds é a relação entre as forças inerciais F_I e as forças viscosas F_μ como podemos ver na Equação (1).

$$R_e = \frac{\sum F_I}{\sum F_\mu} \quad (1)$$

O número de Reynolds para escoamentos externos é descrito pela Equação (2), onde ρ é a densidade do fluido, V a velocidade do escoamento, L o comprimento característico envolvido – no caso deste trabalho, a corda do perfil –, e μ a viscosidade dinâmica do fluido.

$$R_e = \frac{\rho V L}{\mu} \quad (2)$$

2.3 COEFICIENTES HIDRODINÂMICOS

Os coeficientes hidrodinâmicos de um corpo são parâmetros muito importantes quando se deseja mensurar e comparar suas características de desempenho hidrodinâmico. O coeficiente de arrasto e o coeficiente de sustentação são os parâmetros adimensionais relacionados as forças exercidas paralela e perpendicularmente ao corpo submetido a um escoamento fluido.

2.3.1 Coeficiente de arrasto

Segundo FOX (2010), por exemplo, o arrasto é a componente resultante das forças que atuam sobre um corpo paralelamente à direção do seu movimento relativo ao escoamento, e o coeficiente de arrasto (C_D) é número adimensional utilizado para quantificar o arrasto. As características de arrasto de um corpo são representadas pela Equação (3):

$$C_D = \frac{F_D}{\frac{1}{2} A \cdot \rho \cdot V^2}, \quad (3)$$

onde: F_D é a força de arrasto.

A é a área da secção transversal à direção de incidência do escoamento.

ρ é a densidade do fluido.

V é a velocidade relativa do fluido em relação ao objeto.

O coeficiente de arrasto também pode ser representado pelas parcelas de forma e friccional de acordo com a Equação (4):

$$C_D = C_{D_{Press\tilde{a}o}} + C_{D_{Viscoso}} \quad (4)$$

O coeficiente de arrasto de pressão (C_{D_p}) decorre da diferença de pressão entre as diferentes partes de um corpo que se desloca através de um fluido. Já o coeficiente de arrasto

viscoso ($C_{D_{viscoso}}$) é causado pela interação das forças viscosas que surgem entre o fluido e o corpo.

2.3.2 Coeficiente de sustentação

Ainda segundo FOX (2010), entre outras referências no assunto, a sustentação é definida como a componente da força que atua sobre o corpo de maneira perpendicular ao seu movimento relativo ao escoamento, e que para este trabalho refere-se à força lateral. O coeficiente de sustentação (C_L) é o número adimensional usado para quantificar essa componente de força. As características de sustentação de um corpo são representadas pela Equação (5) :

$$C_L = \frac{F_L}{\frac{1}{2} A \cdot \rho \cdot V^2}, \quad (5)$$

onde: F_L é a força de sustentação.

A é a área da secção transversal à direção de incidência do escoamento.

ρ é a densidade do fluido.

V é a velocidade relativa do fluido em relação ao objeto.

2.4 EQUAÇÕES DE GOVERNO DO ESCOAMENTO

2.4.1 Conservação da massa – Equação da continuidade

O princípio de conservação da massa estabelece que a massa de um sistema permanece constante, para mais detalhes ver por exemplo, FOX, 2010. A Equação (6) expressa de forma matemática a equação da conservação da massa, sendo válida em qualquer ponto do domínio do escoamento, onde ρ é a densidade do fluido.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot \rho \vec{V} = 0 \quad (6)$$

Neste trabalho algumas hipóteses foram tomadas e que, assim, simplificam as equações:

- 1) Escoamento incompressível: ou seja, o fluido não tem alteração do seu volume em função do tempo, então $\frac{\partial \rho}{\partial t} = 0$.
- 2) Escoamento em Regime Permanente: tudo que entra de massa no volume de controle é o mesmo que sai, ou seja $\frac{\partial}{\partial t} = 0$.

$$\nabla \cdot \vec{V} = 0 \quad (7)$$

Desta forma, expandindo e usando coordenadas cartesianas, obtém-se a Equação (8), onde u , v e w são as funções de velocidade nas coordenadas x , y e z respectivamente:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (8)$$

Então, para um escoamento bidimensional $\frac{\partial w}{\partial z} = 0$, a equação final da conservação da massa é dada por (Equação (9)):

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (9)$$

2.4.2 Equação da quantidade de movimento

Aplicando a Segunda Lei de Newton para um volume de controle, obtém-se as seguintes equações da quantidade de movimento para o caso bidimensional:

Quantidade de Movimento no Eixo X:

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v u)}{\partial y} = \frac{-\partial P}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial u}{\partial y} \right) \quad (10)$$

Quantidade de Movimento no eixo Y:

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u v)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v v)}{\partial y} = \frac{-\partial P}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial v}{\partial y} \right) \quad (11)$$

2.5 DESCRIÇÃO DA CAMADA LIMITE

O conceito de camada limite introduzido por Prandtl (FOX, 2010), subdivide o escoamento em duas áreas: uma interna à camada limite, a qual é determinada pela ação difusiva da viscosidade molecular em contato com o corpo no limite das fronteiras; e outra externa à camada limite, onde a viscosidade pode ser desprezível sem efeitos significativos na sua resolução.

Em escoamentos viscosos, pela condição de “não deslizamento”, quando as partículas de fluido entram em contato com a superfície do corpo, essas têm suas velocidades iguais às do corpo no ponto de contato. Elas atuam no retardamento do movimento das partículas da camada de fluido adjacente, que por sua vez atuam na seguinte, e assim até uma distância da superfície $y = l$, onde o efeito do retardamento é desprezível.

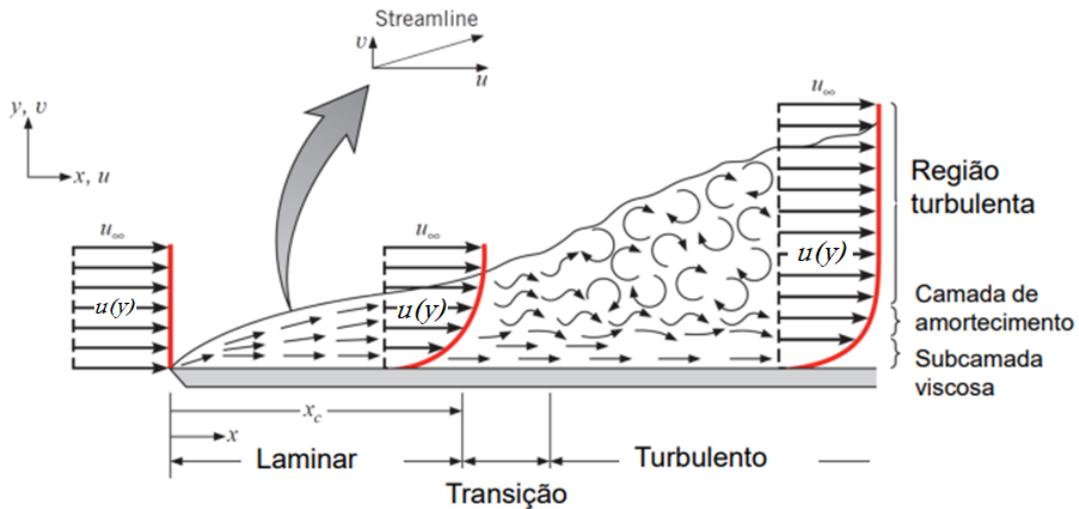
Esta desaceleração do movimento está associada às tensões de cisalhamento τ que atuam em planos paralelos à velocidade do fluido. Com o aumento da distância na direção “y” a partir da superfície, a componente u da velocidade do fluido na direção x deve aumentar até atingir o valor da velocidade do escoamento livre U_{∞} , como se pode visualizar na Figura 6.

No caso de um escoamento unidirecional, a tensão de cisalhamento τ_{xy} é dada pela Equação (12):

$$\tau_{xy} = \mu \frac{du}{dy} , \quad (12)$$

onde: μ é o coeficiente de viscosidade dinâmica molecular do fluido e $u(y)$ é a função que define o perfil de velocidade do escoamento.

Figura 6 – Transição entre o escoamento laminar e turbulento na camada limite.

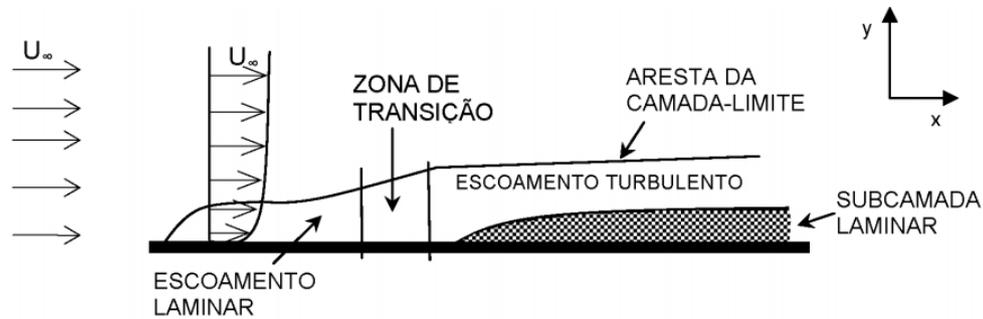


Fonte: Shames (1973).

A Figura 6 exibe um quadro qualitativo do crescimento da camada limite turbulenta sobre uma placa plana. A camada limite é laminar por uma curta distância a jusante da borda de ataque, ocorrendo a transição sobre uma região da placa, em vez de ser sobre uma linha transversal à placa. A região de transição estende-se para jusante até ao local onde o escoamento na camada limite se torna inteiramente turbulento. Assim, o escoamento na camada limite pode ser tanto laminar como turbulento. De fato, esta camada se desenvolve inicialmente laminar e as instabilidades fazem com que ela se torne turbulenta à medida que se dirige para jusante.

A Figura 7, por sua vez, mostra que uma região laminar se forma na borda esquerda da placa (“bordo de ataque”), a qual cresce em espessura à medida que vai avançando na direção x , até atingir uma região de transição onde o escoamento muda de laminar para turbulento. Devido as perturbações de velocidade na direção y , o perfil de velocidade do escoamento dentro da camada limite turbulenta se torna mais “achatado” que o correspondente perfil para a camada limite laminar. Na região turbulenta da camada limite, a turbulência diminui em direção a parede em tal extensão que começam a predominar os efeitos laminares (viscosos). Isto sugere que mesmo na camada limite turbulenta se desenvolve uma fina subcamada laminar, onde os efeitos viscosos (moleculares) predominam sobre os efeitos de inercia, conforme mostra a Figura 7.

Figura 7 – Subcamada viscosa da camada limite turbulenta.



Fonte: Shames(1973).

2.5.1 Lei de parede

Observando a Figura 8, observa-se o interior de uma camada limite desenvolvida. Nota-se que, próximo à parede, ocorre um decréscimo na quantidade de movimento entre as camadas do escoamento, pois a turbulência é suprimida devido a diminuição dos vórtices.

Isso ocorre devido as forças viscosas do escoamento serem predominantes sobre as forças cinéticas próximas a parede e as velocidades das partículas tenderem a zero devido a condição de parede. Em outras palavras, isto significa que o comprimento de mistura diminui à medida que o contorno sólido está mais próximo. Segundo deduções de Prandtl (1925), vale a hipótese de que o comprimento de mistura (l_m) nesta região é proporcional à distância normal à parede, conforme mostra a Equação (13):

$$l_m = k \cdot y, \quad (13)$$

onde y é a distância perpendicular e $k = 0.4$ é a constante de von Kármán.

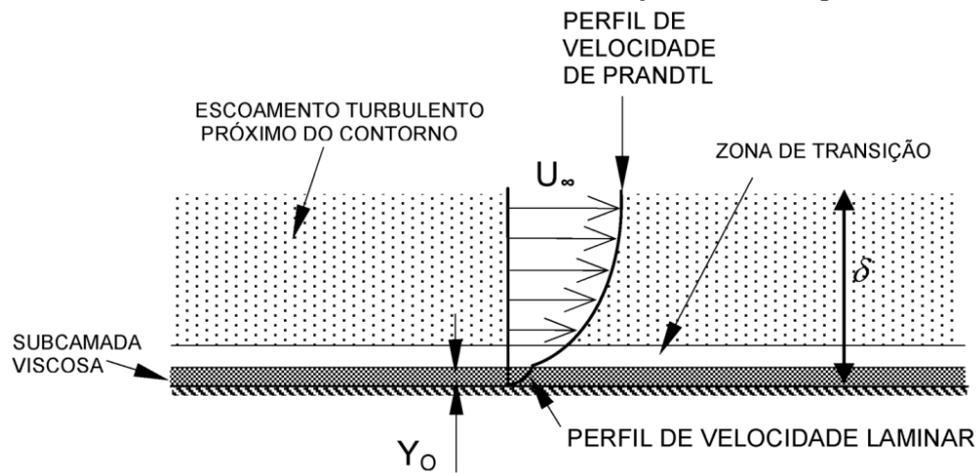
A Equação (13) relaciona o crescimento do tamanho característico dos vórtices à medida que se afastam da parede, tendendo para uma dimensão característica do escoamento fora daquela região, onde a parede deixa de exercer qualquer influência sobre a turbulência local.

A Figura 8, portanto, apresenta a camada limite turbulenta sobre uma placa plana, sendo U_∞ distribuição de velocidade do escoamento livre e δ a espessura da camada limite.

Segundo SHAMES (1973), a camada limite é dividida em três regiões. A primeira é a subcamada laminar aderida a parede, onde predominam os efeitos viscosos. A segunda região

é denominada a subcamada turbulenta que se estende até a fronteira da camada limite onde predominam os fechos turbulentos. Entre essas duas regiões há também camada intermediária chamada de zona de transição, onde estão presentes escoamentos laminares e turbulentos.

Figura 8 – Subcamadas laminar, turbulenta e zona de ajuste entre os perfis de velocidades.



Fonte: Shames (1973).

2.5.1.1 Subcamada viscosa

Com a condição de não deslizamento, o fluido é estacionário junto à parede sólida. Seguindo a Lei da Viscosidade de Newton, a tensão de cisalhamento na superfície τ_0 é expressa pela Equação (14):

$$\tau_0 = \mu \frac{du}{dy} \quad (14)$$

Uma vez que esta camada é muito fina, supõe-se que a tensão de cisalhamento permanece constante ao longo de toda a sua espessura. Assim, integrando-se a Equação (14) ao longo da espessura, resulta numa equação que governa o perfil da velocidade $u(y)$ na subcamada viscosa, dada por:

$$u(y) = \frac{\tau_0}{\rho \nu_t} y \quad (15)$$

Na obtenção desta equação linear foi considerado que a velocidade $u(y)$ é nula em $y = 0$ (condição de não deslizamento). Por isso, algumas vezes, esta região é também chamada subcamada linear.

A velocidade de atrito é importante relação no estudo da camada limite, que é expressa por $u_* = \sqrt{\tau_0/\rho}$. Dividindo a Equação (15) por u_* obtém-se uma relação adimensional para a velocidade e para a distância normal à parede, que resulta em:

$$\frac{u(y)}{u_*} = \frac{\sqrt{\tau_0}}{v_t} y, \quad (16)$$

onde $u(y)/u_* \equiv u^+$, e $y^+ \equiv \left(\frac{\sqrt{\tau_0/\rho}}{v_t} y\right)$ definem, respectivamente, a velocidade e a distância em termos adimensionais. A subcamada viscosa é muito fina e se estende da superfície até valores de $y^+ = 5$ como mostra (KUNDU et al., 2012). Da Equação (16) conclui-se que na sub-camada viscosa $u^+ = y^+$, mostrando a relação linear que existe entre os adimensionais. Para problemas que exijam estudos mais aprofundados do escoamento é aconselhável valores de $y^+ = 1$, resolvendo assim a camada limite em seu macro para obter resultados mais próximo de um escoamento real. Por conta disso, é necessário um maior refinamento de malha por se resolver a subcamada laminar da camada limite. Esse refinamento acaba por aumentar o tempo computacional das simulações

2.5.1.2 Camada de transição

Como se pode observar na Figura 9, a camada de transição encontra-se entre a subcamada viscosa e a subcamada turbulenta no intervalo $5 < y^+ < 30$. Esta camada de transição apresenta instabilidade para o escoamento por apresentar tanto escoamento laminar como turbulento, o que dificulta a modelagem de equações com precisão naquela região.

Por isso, é aconselhado que, na hora da criação da malha, se utilize valores de $y^+ = 1$ ou $y^+ = 30$.

2.5.1.3 Subcamada turbulenta

Já para $y^+ < 30$, a malha do problema começará resolver a subcamada turbulenta, esses valores são mais utilizados para simulações comerciais que necessitam de agilidade e não necessitam de uma solução para a subcamada viscosa.

Nesta região os efeitos de inércia dominam e o escoamento é turbulento (KUNDU et al., 2012). Com isso, a tensão de cisalhamento τ varia suavemente com a distância à parede, fazendo com que a forma do perfil de velocidade mude em relação àquele da subcamada viscosa.

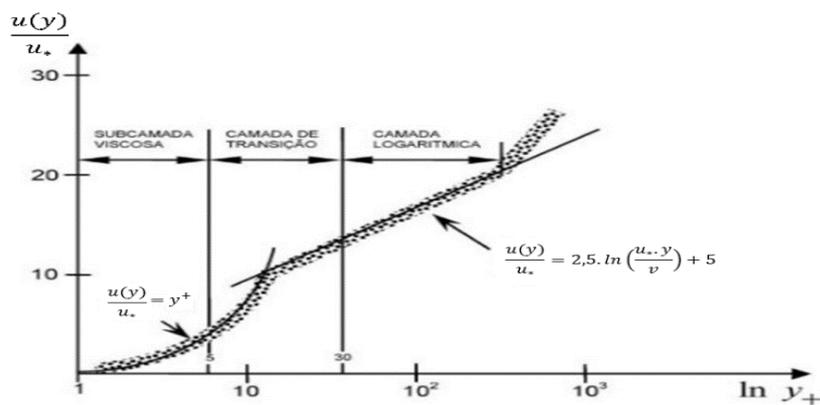
Após alguma manipulação algébrica obtém-se o perfil de velocidade para a subcamada turbulenta, dado pela Equação (17):

$$\frac{u(y)}{u_*} = \frac{1}{k} \ln(y) + C \quad (17)$$

onde $k = 0.4$ e $C = 5$ é uma constante de integração cujo valor é obtido experimentalmente (Kundu & Cohen, 2002). Com esses valores, a Equação (17) se transforma em:

$$\frac{u(y)}{u_*} = 2,5 \cdot \ln\left(\frac{u_* \cdot y}{\nu}\right) + 5 \quad (18)$$

Figura 9 – Perfil de velocidade junto a uma superfície sólida.



Fonte: Kundu et al. (2012).

As Equações (17) e (18), que descrevem os dois perfis de velocidade nas regiões viscosa e turbulenta, respectivamente, são representadas na Figura 9.

2.6 MODELAGEM MATEMÁTICA DA TURBULÊNCIA

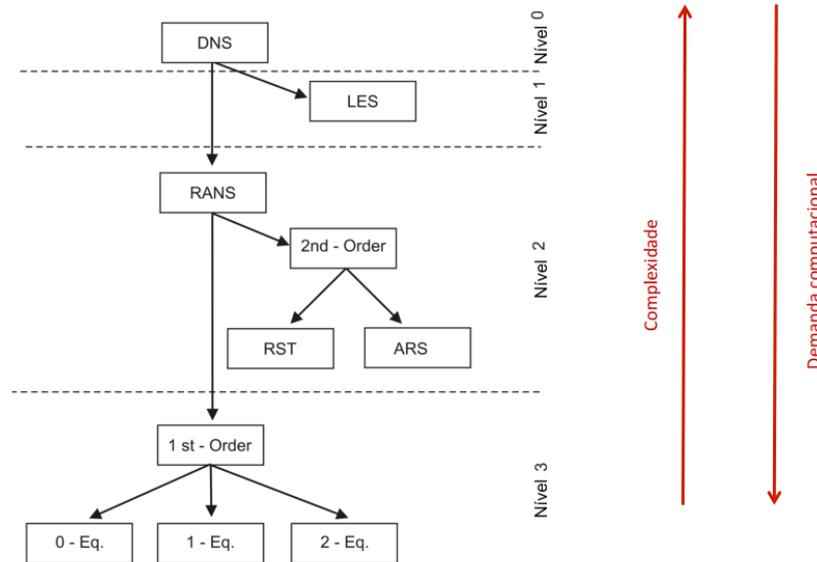
Existem três diferentes modelos de simulações computacionais mais usados para resolver o escoamento turbulento na camada limite, sendo eles: o modelo de Simulação Numérica Direta (DNS); o modelo de Simulação de Larga Turbulência (LES); e o modelo de Navier-Stokes com Média de Reynolds (RANS).

A Figura 10, apresenta a complexidade em função da demanda computacional das três diferentes simulações. Como podemos observar os modelos RANS possuem uma ampla gama de outros modelos de acordo com o tipo de escoamento a ser estudado acrescentando ordem das equações diferenciais ou acrescentando novas equações aos problemas.

No modelo DNS não há modificações nas equações originais de Navier-Stokes, e elas são resolvidas numericamente sem qualquer modelo de turbulência, desde as menores escalas dissipativas de energia até as maiores. Apresentam de forma muito real a turbulência. Por resolver toda a equação de Navier-Stokes, esse tipo de simulação requer um custo computacional muito grande e para a maioria dos casos reais se torna inviável. No entanto, é uma ferramenta muito útil na pesquisa fundamental da turbulência ajudando a desenvolver modelos de turbulência LES e RANS.

No modelo LES a ideia principal é reduzir o custo computacional, modelada de forma simplificada as menores escalas de comprimento que são as mais caras do ponto de vista computacional, isto sendo feito por meio da filtragem passa-baixa das equações de Navier-Stokes. Essa filtragem passa-baixa, que pode ser vista como uma média de tempo e espaço, que remove efetivamente informações de pequena escala da solução numérica. Essa informação não é irrelevante, entretanto, e seu efeito no campo de fluxo deve ser modelado. Uma área ativa de pesquisa para problemas em que pequenas escalas podem desempenhar um papel importante são os fluxos próximos à parede, fluxos reativos e fluxos multifásicos.

Figura 10 – Complexidade x Demanda computacional dos modelos de turbulência.

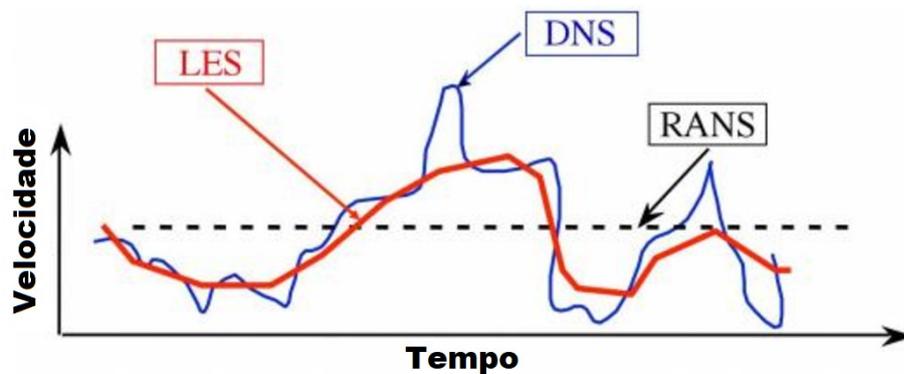


Fonte: Modificada de Hami (2021).

Os modelos RANS são equações de movimento com média de tempo para as equações de Navier-Stokes. A ideia, neste caso, é a decomposição de Reynolds, por meio da qual uma quantidade instantânea é decomposta em suas quantidades média e flutuante. Essas equações podem ser usadas com aproximações baseadas no conhecimento das propriedades da turbulência do fluxo.

A Figura 11, apresenta um exemplo das curvas resultantes entre os três modelos de simulação DNS, LES e RANS para um mesmo problema.

Figura 11 – Exemplo de evolução da velocidade no tempo calculada com DNS, LES e RANS.



Fonte: Modificada de Abad (2015).

Para este trabalho foram testados/utilizados modelos de turbulência RANS, por conta do seu custo computacional mais adequado à realidade do laboratório onde as simulações foram realizadas.

2.7 MODELAGEM MATEMÁTICA DAS EQUAÇÕES DE NAVIER–STOKES COM MÉDIA DE REYNOLDS (RANS)

Nesta seção aborda-se a modelagem matemática das equações RANS. Essas equações são obtidas a partir das equações de Navier-Stokes para fluidos incompressíveis (FOX, 2010). As equações RANS são utilizadas para número de Reynolds altos segundo Andrada (2015).

Segundo Fox (2010), valores acima de $Re = 5 \cdot 10^5$ para escoamentos externos podem ser considerados turbulentos e, desta forma, pode-se utilizar as equações de RANS como nos casos deste trabalho.

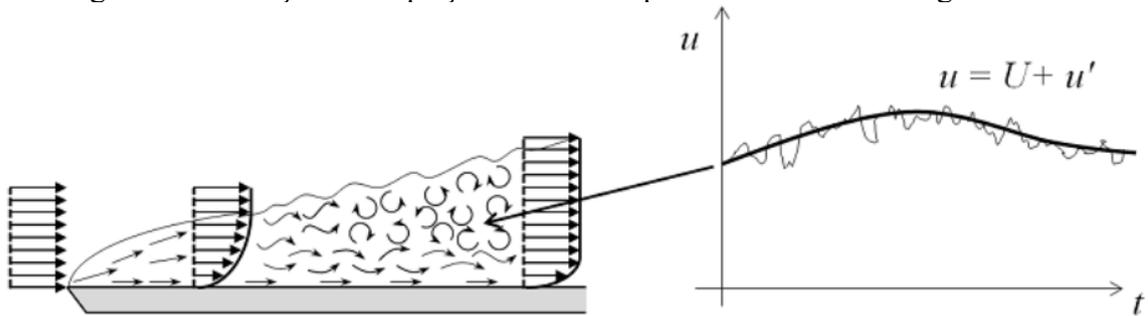
Valores instantâneos das variáveis do movimento turbulento, como uma variação randômica em torno dos valores médios para variável ϕ de solução das equações de Navier-Stokes instantâneas, é decomposta em um valor médio $\bar{\phi}$ e uma componente flutuante ϕ' , ver Equação (19):

$$\phi = \bar{\phi} + \phi', \quad (19)$$

onde ϕ representa componentes de velocidades, pressão e energia;

O processo de média pode ser pensado como o tempo médio para situações de estado estacionário e média de conjunto para situações transitórias repetíveis. Assim, inserir as variáveis de solução decompostas nas equações de Navier-Stokes, resulta em equações para as quantidades médias. A Figura 12, apresenta de maneira ilustrativa como as equações de RANS resolvem a velocidade na região da camada limite turbulenta, onde as velocidades reais das partículas encontram-se em movimentos caóticos.

Figura 12 – Solução das equações de RANS para a velocidade na região turbulenta.



Fonte: Frei (2017).

Para um escoamento incompressível a equação de conservação de massa e a equação de conservação de momento utilizando a hipótese de Boussinesq (Launder & Sandham, 2002), podem ser reescritas pela Equação (20) e Equação (21) respectivamente:

$$\frac{\partial p}{\partial t} + \Delta \cdot p \vec{V} = 0 \quad (20)$$

$$-\rho \overline{u'_i u'_j} = \gamma_t \frac{\partial \overline{\phi'_i}}{\partial x_j} = \mu_t \left(\frac{\partial \overline{u'_i}}{\partial x_j} + \frac{\partial \overline{u'_j}}{\partial x_i} \right) = -\frac{2}{3} \rho \delta_{ij} k \quad (21)$$

onde;

ρ é a densidade;

$\overline{u'_i}$ e $\overline{u'_j}$ são os tensores de Reynolds e representam as flutuações turbulentas médias;

k é a energia cinética turbulenta;

γ_t é a difusividade turbulenta;

μ_t viscosidade dinâmica turbulenta;

δ_{ij} delta de Kronecker.

2.7.1 Modelos de turbulência RANS

2.7.1.1 Modelos de ordem zero (0 Equações)

Mais conhecido como modelo de comprimento de mistura de Prandtl, considera que só há mistura turbulenta na direção transversal do escoamento. Suas vantagens são: fácil implementação, baixa demanda computacional, boa estimativa para escoamentos simples onde existem correlação para comprimento de mistura, e pode ser implementado dentro de modelos de maior ordem. Por outro lado, suas desvantagens são: não prevê escoamento com separação ou circulação e só calcula médias de turbulência.

Sua principal aplicação é em escoamentos simples de aerodinâmica.

2.7.1.2 Modelos de primeira ordem (1 Equação)

Nos modelos de uma equação é adicionada uma variável para a turbulência, a energia cinética turbulenta k . Então, a viscosidade turbulenta é dada por:

$$\mu_t = \rho L \sqrt{k}, \quad (22)$$

onde L é o comprimento característico do escoamento experimental, análogo ao comprimento de mistura.

Nestes modelos o sistema de equações escrito para as variáveis médias \bar{u} , \bar{v} , $\bar{\omega}$ é resolvido e as tensões de Reynolds e os fluxos são parametrizados por intermédio de uma equação algébrica, por exemplo, em função da velocidade média.

Sua vantagem principal é resolver o escoamento de parede com separação média e recirculação baixa, o que é muito bom para perfis de asas. Em contrapartida, suas desvantagens são: erros em escoamento com muita separação na camada limite; erro com decaimentos de turbulência; e não consegue representar de maneira correta os escoamentos internos com geometrias complexas.

Também são conhecidos como modelos de Baixo Reynolds por resolver a subcamada laminar da camada limite. O modelo de turbulência Spalart-Allmaras é um dos modelos de primeira ordem com uma equação.

2.7.1.3 Modelo de segunda ordem (2 Equações)

O comprimento característico experimental é uma dificuldade para usar os modelos anteriores em escoamentos mais complexos. A família dos modelos de duas equações resolve este problema ao empregar uma segunda equação. Nestes modelos a segunda equação pode variar em relação a diferentes variáveis usadas como ε , que é a taxa de dissipação viscosa, ou ω , a variável de turbulência por tempo.

Alguns dos modelos mais conhecidos são o modelo *k-epsilon* ($k - \varepsilon$), *k-omega* ($k - \omega$) e *Shear Stress Transport (SST)*, sendo que cada um desses modelos contém suas próprias variações de acordo com suas aplicações.

O modelo de duas equações tem como vantagens: a simples e fácil aplicação, boa precisão industrial, e muitos trabalhos de validação na literatura. Porém, necessita de um maior custo computacional, acaba não sendo preciso em escoamentos rotacionais, como o caso de $k - \varepsilon$ com curvas bruscas com separação, e para alguns tipos de escoamentos externos. Porém modelos híbridos como *SST k - ω* conseguem resolver essas imprecisões.

2.8 MODELO DE TURBULÊNCIA *SHEAR STRESS TRANSPORT K - OMEGA (SST k - ω)*

O modelo de turbulência *Shear Stress Transport k - omega (SST k - ω)* proposto por Wilcox (2008), foi desenvolvido para indústria aeronáutica visando solucionar escoamento com fortes gradientes de pressão adversos e extensas regiões de separação e recirculação. Neste modelo, k é a energia cinética turbulenta e ω a taxa de dissipação específica do modelo SST (MENTER, 2003).

É um modelo que combina as vantagens dos modelos $k - \varepsilon$ e $k - \omega$ padrão, sendo que o primeiro é aplicado a áreas próximas a parede e o segundo para áreas afastadas da parede. Por conta desta combinação, o modelo de turbulência *SST k - ω* foi o modelo adotado para dar procedência as simulações deste trabalho.

2.9 ANÁLISE E CONVERGÊNCIA DE MALHA

Análise e convergência de malha consistem em criar malhas menores com menor número razoável de elementos e analisar seus resultados. Então, recria uma nova malha com uma distribuição de elementos ainda mais densa, reanalisa-se e compara os resultados com os da malha anterior. Este processo de aumentar a densidade de elementos da malha e reanálise dos resultados são feitos até que os resultados venham a convergir para um resultado satisfatório. Assim, escolhe-se a malha com menor custo computacional e com menor incertezas nos resultados.

O fator de refinamento (r_i) é a razão entre diferentes espessuras de malhas de um mesmo estudo, e é definida pela razão entre a malha com mais elementos dividida pela malha anterior com menos elementos, ver Equação (23). Onde h é o número de elementos da malha. Os valores recomendados de fator de refinamento de malha são superiores a 1.3 segundo ASME (2005), sendo valores entre 1.4 e $\sqrt{2}$ indicados pela literatura (Eça et. al, 2010).

$$r_i = \frac{h_{fina}}{h_{grossa}} \quad (23)$$

2.9.1 Comparação de resultados no âmbito deste trabalho

Conforme mencionado, para a comparação e validação deste trabalho foi escolhido o perfil NACA 16-021, por se tratar de um perfil simétrico e muito similar a área molhada das pranchas de surf modernas.

A comparação dos resultados, neste caso, consiste em comparar os resultados simulados deste perfil no software STAR CCM+, aos dados presentes na literatura.

No entanto, é importante destacar que, por se tratar de um perfil com aplicações quase que exclusivas em hélices, poucos trabalhos são encontrados na literatura, principalmente no que se refere aos resultados dos coeficientes de arrasto e coeficiente de sustentação. Assim, os únicos dados completos encontrados na literatura para efeito de comparação com aqueles deste trabalho, foram os dados fornecidos pelo software XFOIL.

2.9.1.1 Método XFOIL

O XFOIL (MARK Drela, 1989) é um software interativo para o projeto e análise de aerofólios subsônicos a baixo números de Reynolds, consiste apenas de dados numéricos não experimentais. Com uma coleção de rotinas orientadas por menu que executam várias funções úteis, tais como: projetar e analisar aerofólios subsônicos podendo variar funções dos aerofólios como R_e , comprimento da corda, ângulo de curvatura, espessura entre outros. Também permite ao usuário criar, testar e modificar a geometria dos aerofólios.

Uma interface totalmente interativa foi empregada desde o início para torná-lo muito mais fácil de ser usado com relação aos códigos CFD tradicionais presentes na época. O software vem sendo atualizados com frequência.

O código XFOIL foi escrito por Mark Drela (1989), e utiliza das teorias do escoamento potencial bidimensional através do método dos painéis e uma formulação de camada limite integral para a análise do fluxo ao redor dos aerofólios. O código foi desenvolvido para prever rapidamente o desempenho do aerofólio em números de Reynolds baixos e sua convergência é obtida através da iteração entre as soluções de fluxo externo e interno na espessura de deslocamento da camada limite. Assim, o código do software XFOIL calcula a distribuição de pressão viscosa e captura a influência da separação limitada da borda de fuga e das bolhas de separação laminar. O XFOIL usa um método de envelope e^N aproximado para calcular a transição. Com esse método, o código rastreia apenas a frequência mais amplificada em um determinado ponto do aerofólio a jusante do ponto de instabilidade para obter a amplitude dessa perturbação. A transição é assumida quando esta amplitude integrada atinge um valor determinado empiricamente.

A teoria do escoamento potencial não leva e consideração os efeitos viscosos do escoamento. Assim, correlações (DRELA, 1989) são utilizados para suavizar os erros pela ausência dos efeitos viscosos quando é aplicado um ângulo de ataque dos perfis em relação a incidência do escoamento.

3 METODOLOGIA

Neste capítulo abordada a metodologia que dá seguimento ao trabalho, estabelecendo mais detalhes com relação às considerações/hipóteses, etapas e ferramentas/métodos utilizados.

3.1 DESCRIÇÃO GERAL

Este trabalho segue uma metodologia eminentemente numérica baseada em simulações de CFD bidimensional do escoamento ao redor de corpos cujas geometrias são muito parecidas às projeções horizontais das pranchas de surf modernas. Também vale destacar essas simulações foram realizadas segundo propostas encontradas em Tang (2019).

Como geometria de referência adotou-se o perfil NACA 16-021 que, se submetido a um escoamento invertido, é bastante semelhante às pranchas e, ademais, estabelece uma base de comparação/validação inicial para os trabalhos.

O maior número de Reynolds encontrado para comparação/validação dos resultados com o perfil NACA 16-021 foi de $R_e = 1.10^6$, com ângulo de estol em 11° . Com isso, foi utilizada uma velocidade de $V = 0,52 \text{ m/s}$ da água com densidade $\rho = 997,561 \text{ kg/m}^3$ e viscosidade dinâmica $\mu = 8,9.10^{-4} \text{ Pa/s}$ à temperatura ambiente de 23°C . Além disso, todas as geometrias simuladas consideraram uma largura máxima $L_{max} = 0,36 \text{ m}$, com comprimento total $L = 1,72 \text{ m}$, dimensão característica para a obtenção deste único número de Reynolds considerado em todas as simulações deste trabalho.

Vale ressaltar que para a velocidade utilizada de $V = 0,52 \text{ m/s}$ está abaixo do valor da velocidade de uma onda real que possa ser surfada e lembra mais uma onda do tipo “marola”. A velocidade média das ondas surfáveis por uma pessoa adulta varia entre 4,2 a 12,5 m/s.

Sendo assim, a primeira etapa das simulações de CFD consistiu na obtenção das curvas dos coeficientes hidrodinâmicos de arrasto (C_D) e sustentação (C_L) para o perfil NACA 16-021, posteriormente comparadas com aquelas advindas da aplicação do método presente no programa XFOIL (DRELA, 1989). Por se tratar de um perfil 2D não foram considerados os efeitos do fundo da prancha, quilhas e outros elementos a contido em uma prancha. Neste trabalho não foram realizadas análises dos coeficientes de momento (C_M) dos perfis ficando como possíveis trabalhos futuros.

Importante destacar que, para efeito de comparação, todas as curvas de esforços hidrodinâmicos foram sempre obtidas para ângulos de ataque até o estol, próximo dos 11° mencionados para o NACA 16-021 segundo Drela (1989), situação a partir da qual as simulações dificilmente apresentam convergência numérica aceitável.

Ainda na primeira etapa, também foi feito um estudo de convergência de malhas, segundo o qual a discretização triangular do domínio fluido foi aquela que permitiu a obtenção dos melhores resultados em questão de convergência e tempo computacional. Sendo assim, a partir deste estudo malhas triangulares foram assumidas para os demais casos simulados.

Na segunda etapa, foram então realizadas simulações de CFD com o perfil NACA 16-021 em escoamento fluido de sentido invertido, assemelhando-se a uma prancha com perfil traseiro do tipo *Round Pin*. A partir dessas simulações, também foram obtidos os esforços hidrodinâmicos para diferentes ângulos de ataque, e feito um estudo de convergência por intermédio do refinamento de malha também para essas simulações com o perfil invertido.

A terceira etapa consistiu na criação de três diferentes perfis de pranchas de mesmo comprimento total $L = 1,72m$ e mesma geometria avante do *wide point*, porém com suas geometrias traseiras modificadas para caracterizar os tipos *Squash*, *Pin*, *Swallow*. Para essas simulações foi adotada a malha triangular com refinamento de melhor desempenho levando em consideração a convergência e tempo computacional das etapas anteriores. Novamente foram obtidos os esforços hidrodinâmicos para diferentes ângulos de ataque até o estol de cada geometria.

Por fim, na quarta etapa deste trabalho foi feita a comparação e análise das curvas de esforços hidrodinâmicos entre os perfis testados na terceira etapa, assim permitindo conclusões sobre o comportamento de cada geometria e suas relações com as condições físicas e as práticas descritas por atletas, praticantes e designers de pranchas.

No tocante à criação dos perfis, esclarece-se que foram construídos a partir das coordenadas dos pontos que os descrevem. Essas coordenadas foram então conectadas por intermédio do método das *splines*, o qual aproxima a geometria por curvas que criam as superfícies bidimensionais dos perfis a serem testados.

Os perfis, então, foram fixados no centro referencial e ao redor deles criado um volume de controle onde o escoamento acontece. O volume de controle tem geometria circular em sua porção anterior e retangular na porção posterior. As alterações do ângulo de ataque foram feitas diretamente nos perfis através de seu centro de referencial, não sendo assim necessário que

fossem feitas alterações nas direções do fluido. Com isso a direção de incidência do fluido é somente na direção x .

Para os desenhos dos perfis e do volume de controle foi utilizado o programa Rhinoceros, de modelagem tridimensional baseado na tecnologia NURBS. As geometrias e os volumes de controle foram, então, criados juntos e exportados para o programa de CFD.

Em se tratando dos cálculos numéricos de CFD, utilizou-se o programa comercial STAR CCM+, da empresa Siemens. Este programa utiliza o Métodos dos Volumes Finitos (FVM) para solução de problemas, resolvendo de forma discretizada as equações de Navier-Stokes com Média de Reynolds. O modelo de turbulência escolhido foi o $SSTk - \omega$, por apresentar melhores resultados para escoamento com gradientes de pressão adversos.

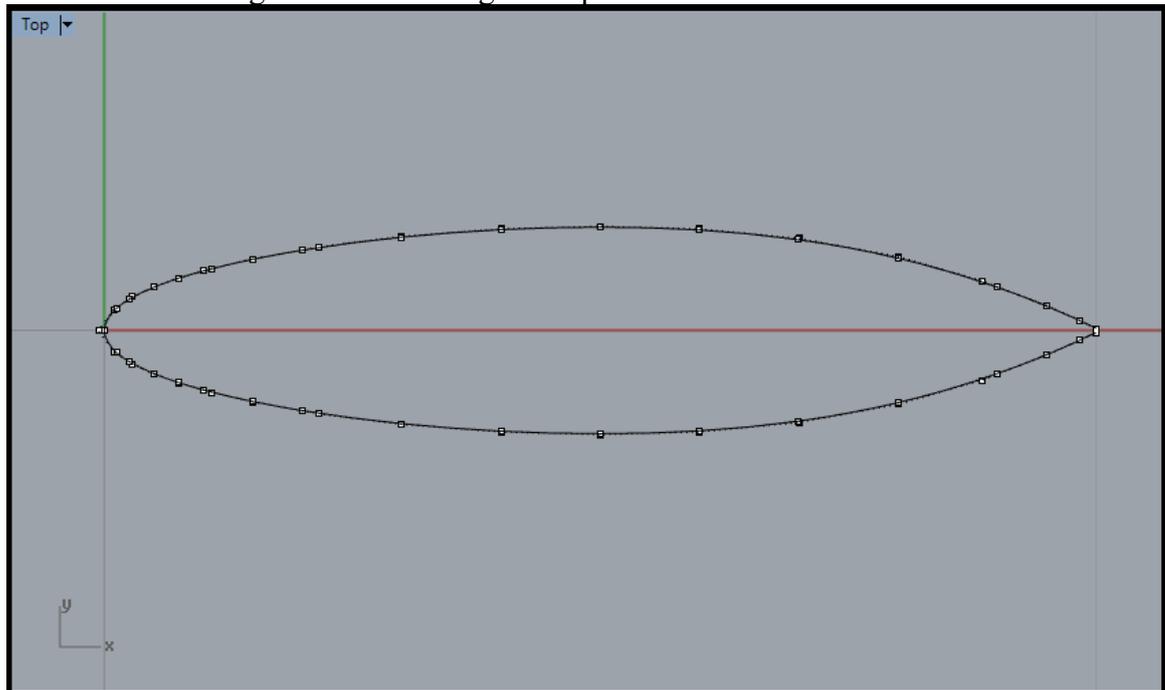
3.2 DETALHES DA MODELAGEM NUMÉRICA

Nesta seção são apresentados mais detalhes da modelagem dos perfis no programa Rhinoceros 3D e das simulações dos perfis de pranchas de surf utilizando o programa STAR CCM+ para simulação de CFD.

3.2.1 Modelagem dos perfis

Por intermédio das coordenadas dos pontos que descrevem o perfil NACA 16-021, fornecidas por DAE (1921), foi gerada uma *spline*, ou seja, a curva que mais se aproxima dos pontos em suas coordenadas, gerando a superfície bidimensional de interesse. A Figura 13 ilustra o resultado da modelagem bidimensional do perfil NACA 16-021.

Figura 13 – Modelagem do perfil NACA 16-021 em 2D.



Fonte: Autor (2021).

Para a geração dos perfis das pranchas de surf com as diferentes rabetas consideradas também seguiu o mesmo método de modelagem.

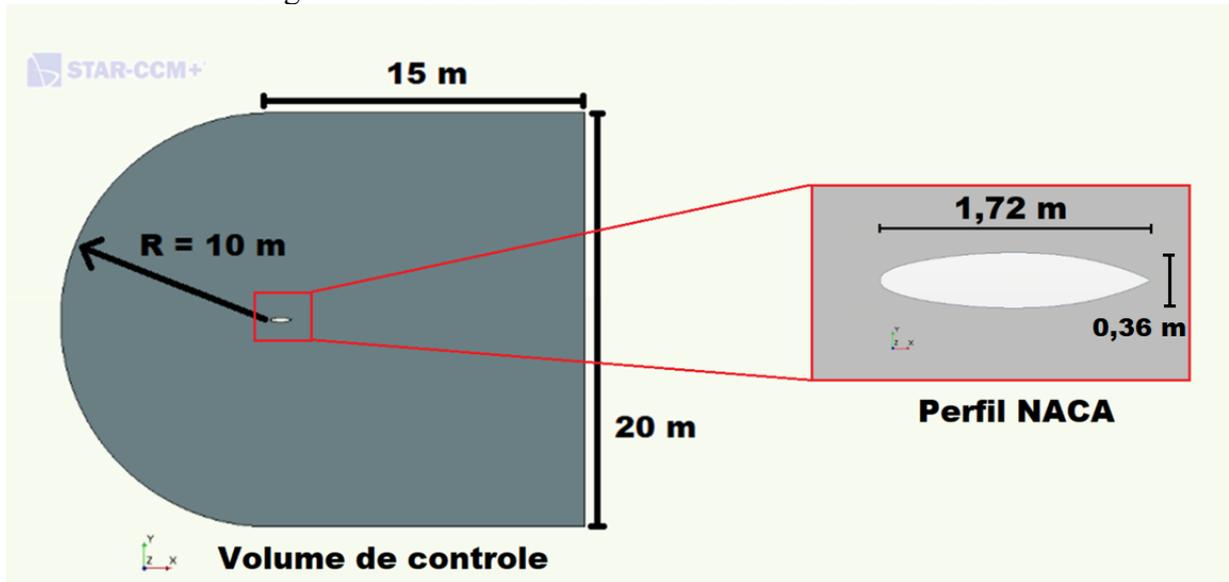
3.3 MODELAGEM DO VOLUME DE CONTROLE

Conforme mencionado, a definição das dimensões do volume de controle, de fato uma superfície de controle, seguiu a metodologia proposta por Tang (2019), o que resulta o domínio fluido ilustrado na Figura 14.

Note que o perfil NACA é fixado com sua extremidade dianteira nas coordenadas $(0,0,0)$ e em sentido positivo da esquerda para a direita no volume de controle (VL).

O raio frontal do VL apresenta do valor $R = 10\text{m}$, o que resultou em uma altura total do domínio $H = 20\text{ m}$ e extensão longitudinal $P = 15\text{ m}$. Desta forma, garante-se que o valor da extensão a jusante é quase quinze vezes o valor da corda dos perfis ($L = 1,72\text{m}$).

Figura 14 – Geometria e dimensões do volume de controle.



Fonte: Autor (2021).

3.4 DETALHES QUANTO ÀS CONDIÇÕES DE CONTORNO

A Tabela 1 apresenta as condições de contorno consideradas nas fronteiras e na superfície dos perfis.

De acordo com a Figura 15, a linha em amarelo representa a região de incidência do escoamento (*Inlet*) no sentido positivo da direção X, ou seja, da esquerda para a direita na direção longitudinal do volume de controle Figura 15. Para as simulações com ângulo de ataque, o perfil é inclinado de acordo com o valor do ângulo desejado, sem qualquer alteração no sentido do escoamento.

Tabela 1 – Condições de contorno.

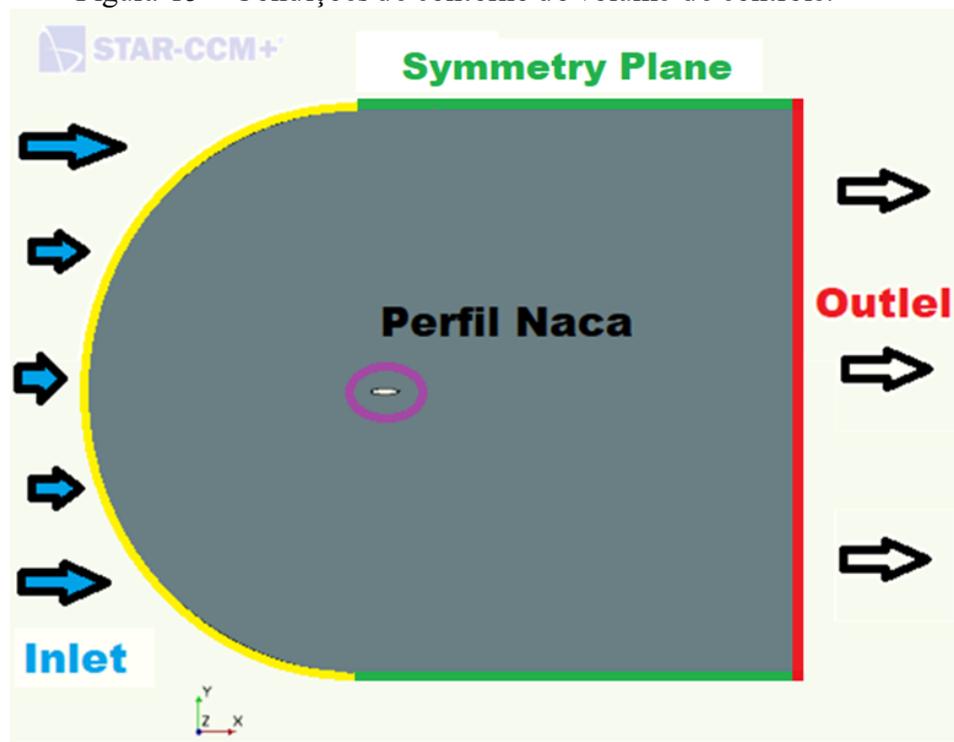
Fronteira	Condição
<i>Inlet</i>	Velocidade de entrada
<i>Outlet</i>	Saída de Pressão
Na Superfície dos Perfis	Parede (condição de não escorregamento)
<i>Symmetry Plane</i>	Plano de simetria

Fonte: Autor (2021).

O fluido adentra o volume de controle à pressão atmosférica e com a velocidade uniforme do escoamento definido.

Para o perfil central no volume de controle (perfil NACA), a condição de contorno de parede define como uma superfície do corpo interage com o fluido, no caso deste trabalho, sem deslizamento (*no slip*).

Figura 15 – Condições de contorno do volume de controle.



Fonte: Autor (2020).

Já para saída do escoamento (*Outlet*), marcada com a linha vermelha na Figura 15, a pressão de saída é sob as condições do Sistema Internacional de Unidades (SI) a pressão atmosférica ($P_{atm} = 101,325 \text{ KPa}$).

Por fim, no plano de simetria, caracterizado pelas linhas verdes, onde a velocidade do fluido na parede tem seu gradiente de velocidade nulo. Ou seja, a tensão de cisalhamento tangencial nos limites de simetria é zero.

3.5 DETALHES QUANTO ÀS MALHAS

A definição da malha em um problema de CFD é fundamental para se obter bons resultados. Neste sentido, uma escolha de malha adequada vai trazer bons resultados com um menor custo computacional e uma melhor convergência das simulações.

Existem uma variedade grande de geometrias para os elementos da malha, sendo que combinações também podem ser admitidas para as simulações em CFD. Miltre (2018) sugere algumas delas para problemas envolvendo escoamento sobre perfis como os estudados neste trabalho, quais sejam: a poligonal, a quadrilátera, a quadrilátera multibloco e a triangular.

De fato, um bom período de tempo foi dedicado a vários testes com os diferentes tipos de malha mencionados. Estes testes foram realizados segundo uma busca pela geometria de malha que traria uma melhor convergência com base nos resultados dos coeficientes de arrasto (C_D) e sustentação (C_L) para o perfil NACA 16-021, concomitante a um menor custo computacional.

Foram testadas três diferentes geometrias de malha bidimensionais disponíveis no STAR CCM+, a triangular, a poligonal e a quadrilátera.

Também no estudo de convergência das malhas foi utilizado o critério de aumento da densidade do número de células, conhecido como refinamento de malha.

Primeiramente, para cada tipo de malha foi criada a malha da simulação com um menor número de elementos e, assim, analisados seus resultados simulados. Então, foi recriada a malha com distribuição de elementos mais denso, seguindo os valores recomendados de fator de refinamento de malha entre 1.3 e $\sqrt{2}$ indicados na literatura Eça et al. (2010) e ASME (2005), reanalisando os resultados com a da malha anterior e assim sucessivamente.

Este procedimento de aumento da densidade da malha se deu até o ponto em que os resultados vieram a convergir para um resultado satisfatório e com pouca modificação em relação ao passo de refinamento anterior.

Todas as geometrias de malha foram testadas em quatro diferentes refinamentos. Do menor para o maior refinamento, portanto, o número de células variou entre 70 mil e 600 mil elementos.

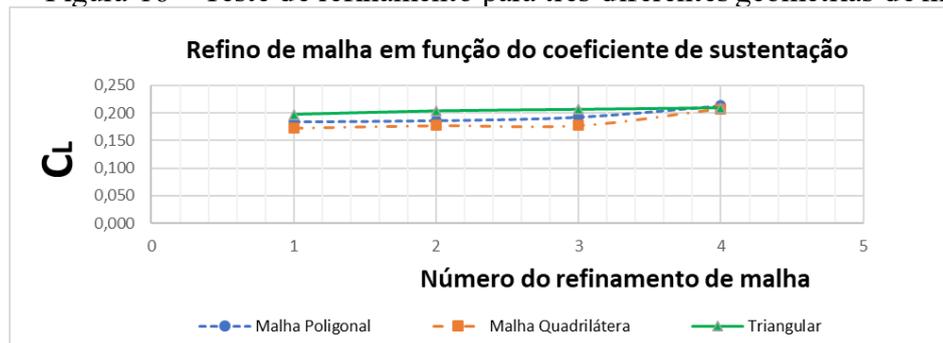
Após a campanha de testes, sintetizados na Figura 16, a malha que mais se adequou ao problema proposto neste trabalho foi a malha com geometria triangular, por apresentar exatidão e um custo computacional muito mais baixo com relação às outras geometrias de malhas.

De acordo com a Figura 16, a malha triangular, em cor verde, apresentou uma rápida convergência de resultados logo nos primeiros refinamentos testados e manteve o resultado com um erro muito baixo para os refinamentos mais finos.

Após definição da malha com elementos triangulares como sendo a mais adequado para o problema em foco, foi feito um estudo complementar de convergência.

Sucessivas simulações com refinamentos ainda mais densos foram realizadas até o ponto em que os resultados do coeficiente de arrasto nitidamente convergissem para um valor, o que é perfeitamente observado no gráfico da Figura 17.

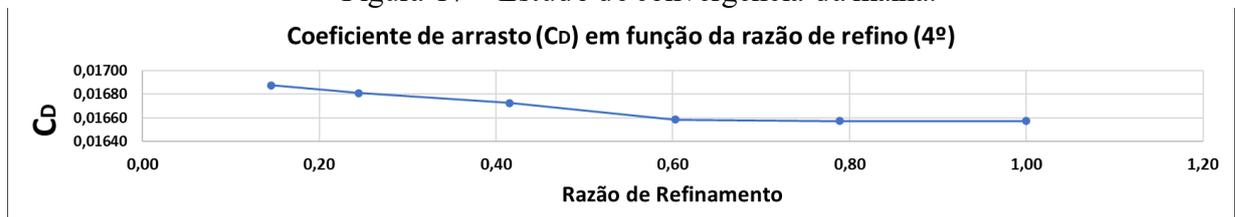
Figura 16 – Teste de refinamento para três diferentes geometrias de malha.



Fonte: Autor (2021).

A Figura 17, apresenta a análise de convergência de malha.

Figura 17 – Estudo de convergência da malha.



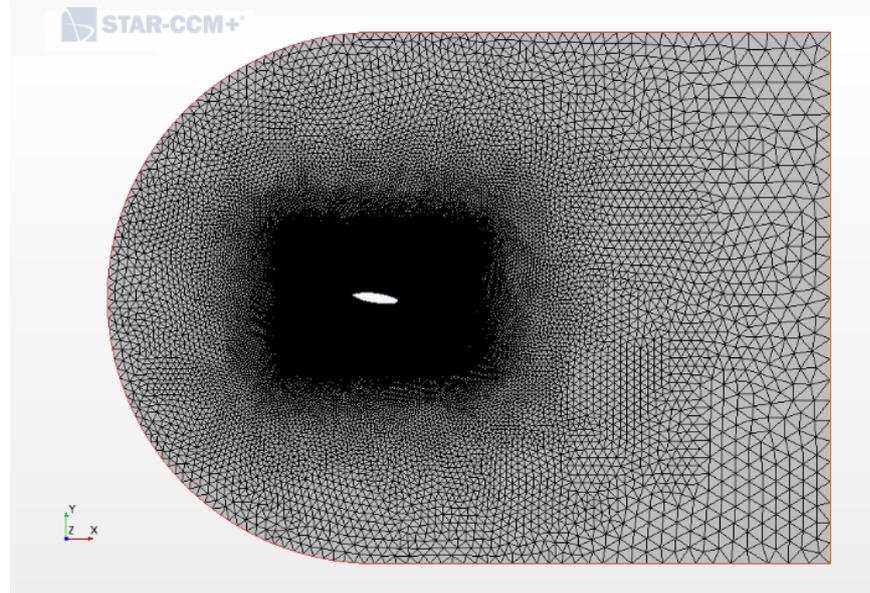
Fonte: Autor (2021).

3.5.1 Detalhes quanto às malhas com elementos triangulares

As malhas com elementos triangulares fornecem uma solução simples e eficiente para o processo de discretização do volume de controle em problemas complexos. Em comparação com outros modelos essas malhas são as que têm geração mais rápida e que utilizam uma quantidade menor de memória para um determinado número de células.

Para este trabalho foi criado um refinamento de malha mais denso próximo a superfície do perfil, utilizando também camadas prismáticas para solução da camada limite.

Figura 18 – Geração da malha para um escoamento com ângulo de ataque 6°.



Fonte: Autor (2021).

Um sub volume de controle foi criado com o objetivo de refinar ainda mais a malha na região próxima ao perfil. Este segundo refinamento foi gerado no formato retangular, envolvendo todo o perfil, como se pode observar na Figura 18. Em alguns casos foi necessário aumentar o comprimento e largura deste sub volume de controle com o objetivo de melhorar a convergência da simulação.

Ainda de acordo com a Figura 18, fora do sub volume de controle há um decrescimento do refinamento da malha, com os elementos crescentes do sub volume de controle retangular até as fronteiras mais externas. A aplicação deste decrescimento de malha trouxe um ganho em termos do tempo computacional e também da memória utilizada, não influenciando nos resultados das simulações.

3.5.2 Detalhes quanto às camadas prismáticas

As camadas prismáticas são utilizadas para resolver a camada limite em CFD em regiões de paredes com alto gradiente. Assim são aplicadas sucessivas camadas prismáticas que resolvem os gradientes e também a turbulência na camada limite.

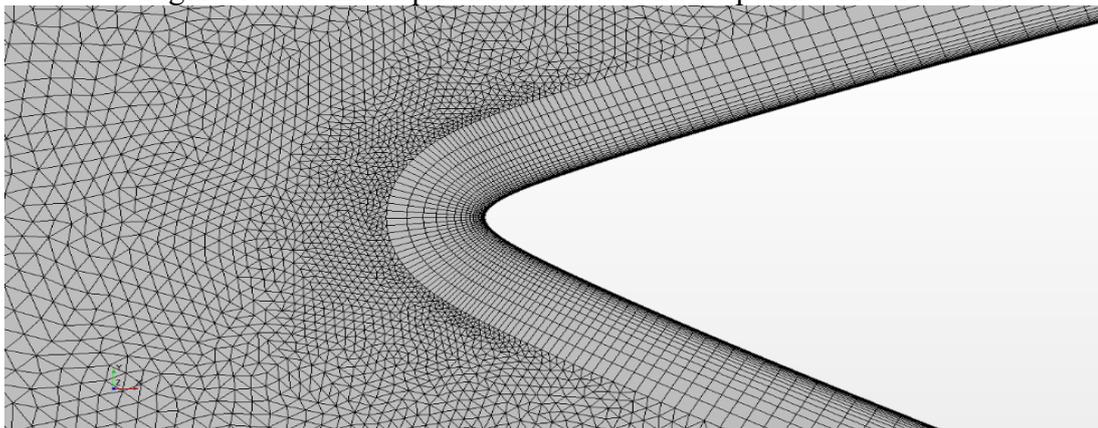
A distância da primeira camada prismática próxima a superfície, com condição de não escorregamento, é igual à distância adimensional y^+ .

Neste trabalho, para todas as simulações foi estipulado um valor de $y^+ < 1$, assim possibilitando a solução da subcamada viscosa para todos os casos.

Para tanto, o número de linhas das camadas prismáticas em todas as simulações foi fixado em 30 unidades após um estudo de convergência, conforme instruções também presentes no trabalho de Mendis (2019), que mostram que a partir de determinado número, a adição de novas linhas de camada prismática não altera significativamente os resultados das simulações.

A espessura total da camada prismática também passou por um estudo de convergência e foi fixada em 1,66% do tamanho da malha base no programa STAR CCM+. Já a distância entre as linhas da camada prismática cresceu em razão da distância da primeira linha da camada prismática próxima a superfície (y^+). A Figura 19, mostra a camada prismática na traseira do perfil NACA 16-021.

Figura 19 – Camada prismática na traseira do perfil NACA 16-021.



Fonte: Autor (2021).

3.6 DETALHES QUANTO AOS ÂNGULOS DE INCIDÊNCIA

No levantamento das curvas hidrodinâmicas do perfil NACA 16-021, foi percebida a presença de estol, para ângulos de ataque ligeiramente maiores que 10° . Estol é a perda de sustentação de um perfil aerodinâmica, para esse estudo a sustentação é uma força lateral agindo sobre o perfil. Então, para um melhor entendimento e organização, foram estipulados ângulos de ataque entre 0 a 10° , com intervalos de 2° entre simulações e os mesmos resultados rebatidos (copiados) para ângulos de ataque negativo devido a simetria dos perfis. A mesma discretização em ângulos de incidência também foi adotada para as simulações do perfil NACA em escoamento invertido, bem como para essa condição associada aos outros modelos de rabetas.

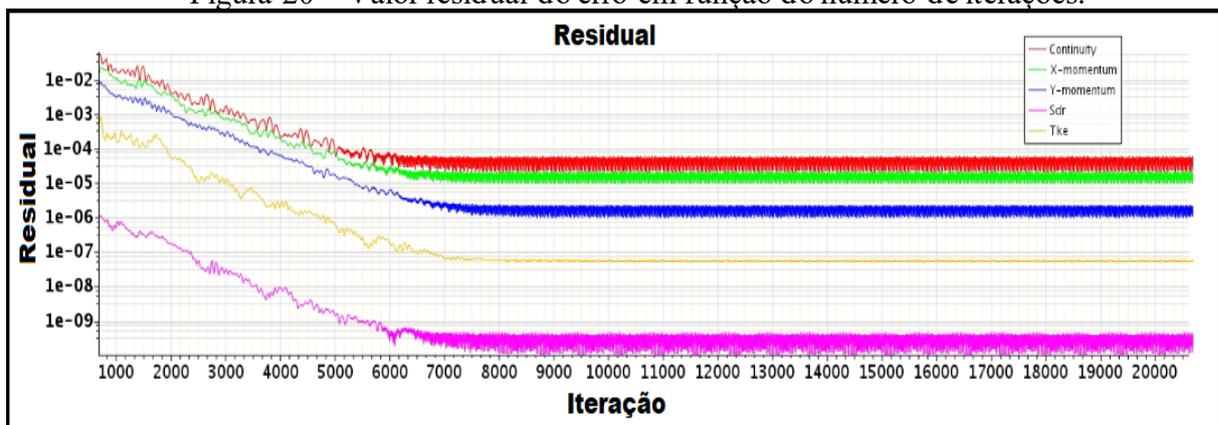
3.7 CRITÉRIO DE CONVERGÊNCIA DAS SIMULAÇÕES

O critério de convergência das simulações baseou-se nos erros residuais das equações da quantidade de movimento, equação da continuidade e da equação das variáveis da turbulência, todos medidos com base no valor da Raiz Quadrada do Valor Quadrático Médio (RMS), calculado pelo próprio programa STAR CCM+ de acordo com a Equação (24):

$$R_{rms} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_n r^2}, \quad (24)$$

sendo: r o erro absoluto da solução da variável e n o número de células da simulação.

Figura 20 – Valor residual do erro em função do número de iterações.



Fonte: Autor (2021)

Segundo Dantas (2014), para valores RMS abaixo de 1.10^{-4} caracteriza-se uma simulação convergente. A Figura 20, apresenta o valor do erro residual em função do número de iterações para uma simulação do perfil NACA que atende os critérios de convergência.

4 RESULTADOS

4.1 DESCRIÇÃO GERAL DOS RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos com as simulações deste trabalho.

Em um primeiro momento, são apresentados os resultados do estudo de convergência de malha, juntamente com a comparação dos valores dos coeficientes de arrasto (C_D) e sustentação (C_L) dos resultados obtidos pelo programa XFOIL. Para a simulação do perfil NACA 16-021 em condição usual de operação, foram selecionadas as três malhas (das 6 testadas) que apresentaram os melhores resultados de convergência nas simulações iniciais que foram nomeadas como Refinamento 4, Refinamento 5 e Refinamento 6, seguindo a ordem de maior densidade da malha. Todos os refinamentos de malha seguiram as indicações de ASME (2005) e da referência EÇA et. al. (2010), com fator de refinamento entre 1.3 a $\sqrt{2}$. As simulações com maior demanda computacional levaram em média 36 horas.

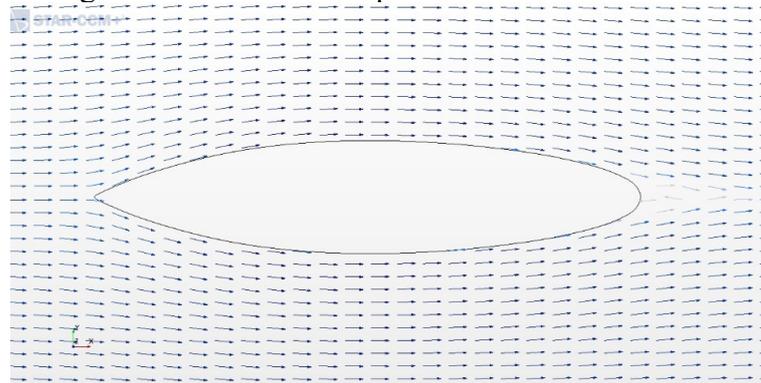
Tabela 2 – Dados dos refinamentos de malha.

Malha	Número de Células	Fator de refinamento (r)
Refinamento 4	502559	1
Refinamento 5	659154	1,34
Refinamento 6	886230	1,31

Fonte: Autor (2020).

Na segunda etapa de apresentação dos resultados, este texto traz os valores dos coeficientes de arrasto (C_D) e sustentação (C_L) para o perfil NACA 16-021 operando em escoamento com sentido invertido, condição geométrica semelhante ao perfil Round Pin, conforme ilustra a Figura 21. Para este caso também foi feito um estudo de convergência de resultados via refinamento de malha. Importante lembrar que nesta etapa também foram utilizadas as mesmas malhas da etapa anterior.

Figura 21 – Escoamento perfil NACA 16-021 invertido.



Fonte: Autor (2021).

A terceira etapa dos resultados consiste em comparar as curvas dos coeficientes de arrasto (C_D) e sustentação (C_L) do perfil NACA 16-021 invertido com aquelas obtidas para os modelos de rabetas *Squash*, *Pin* e *Swallow*. Nesta etapa as simulações são feitas com apenas um refinamento de malha de acordo com desempenho de convergência e menor custo de tempo computacional.

Como último aspecto em relação à apresentação dos resultados, salienta-se que, para os cálculos de incertezas entre as respostas, foi utilizada uma planilha eletrônica que calcula os desvios padrões, sendo os resultados válidos aqueles que se encontram dentro de um intervalo de confiança de 95%, segundo (EÇA et al., 2010).

Inicialmente foram testados a convergência dos modelos de turbulência Spalart-Allmaras, k- ϵ e SST k- ω para as simulações do perfil NACA 16-021. Porém, os modelos Spalart-Allmaras e k- ϵ não apresentaram convergência satisfatória para os ângulos de ataque de 10° ou superiores, em comparação ao modelo de turbulência SST k- ω que foi o escolhido para dar procedência a este trabalho.

4.2 COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS PERFIL NACA 16-021

O gráfico da Figura 22, apresenta os valores do coeficiente de arrasto (C_D) para o perfil NACA 16-021. As curvas e pontos em laranja, verde e azul representam a curva das simulações do perfil no software CFD. A cor azul representa os resultados das simulações com o Refinamento 4, em laranja aquela referente ao Refinamento 5 e em verde a do Refinamento 6. A curva em preto, por sua vez, representa os dados obtidos por a simulação via programa XFOIL. As curvas em vermelho e marrom são as médias dos valores dos Refinamentos 4, 5 e

6 e representam respectivamente as parcelas do coeficiente de arrasto de pressão e coeficiente de arrasto viscoso.

Como se pode observar, para os valores das curvas dos Refinamentos 4, 5 e 6, os resultados convergiram para um mesmo valor com desvio padrão praticamente nulo. Assim, é possível afirmar que a convergência de malha é bastante satisfatória.

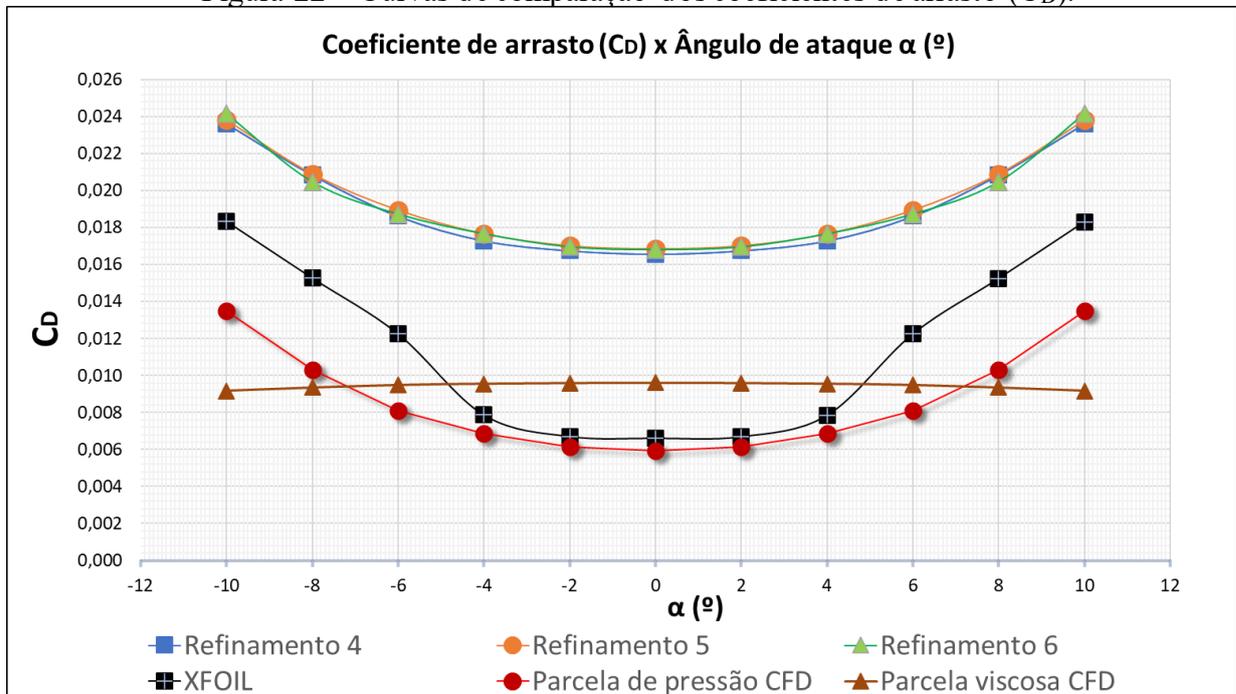
Já em relação à comparação com os resultados dos coeficientes de arrasto (C_D) obtidos pelo programa XFOIL, as curvas ficaram com um deslocamento significativo. Isso está ligado ao fato do código XFOIL trabalhar baseado na teoria potencial, que não desenvolve de forma complexa a camada limite, assim perdendo os macros efeitos que venham a aumentar o valor do coeficiente de arrasto (C_D), sendo que o surgimento de vórtices pode ser um desses efeitos. As principais diferenças nos resultados estão nos ângulos de ataque de $\mp 4^\circ$, que podem estar ligadas diretamente com as forças viscosas presentes na camada limite e que são resolvidas de maneira mais completa nos métodos de CFD com altas densidades de malha.

Já o método dos painéis utilizado pelo software XFOIL, na medida que o ângulo de ataque aumenta, ele utiliza de correlações para suavizar o erro real da parcela viscosa do coeficiente de arrasto (DRELA, 1989). Já para os ângulos maiores, pode-se observar uma aproximação das curvas do XFOIL com as curvas das simulações CFD. Essa aproximação também está relacionada pelo fato de a parcela de arrasto viscoso diminuir à medida que o ângulo de ataque aumenta, assim tornando a parcela de pressão predominante no resultado total do coeficiente de arrasto à medida que o ângulo de ataque aumenta, como podemos observar nos gráficos dos Refinamento 4, 5 e 6, e também no gráfico de coeficiente de arrasto do XFOIL da Figura 22.

A média da parcela do coeficiente de pressão em CFD (curva em vermelho) e a curva do coeficiente de arrasto total do software XFOIL, apresentam valores muito próximo para ângulos de $\mp 4^\circ$, o que deixa claro que o método dos painéis utilizado pelo XFOIL não leva em conta as parcelas de arrasto viscoso para ângulos menores de ataque. Já para ângulos de ataque maiores a curva do XFOIL apresenta um maior crescimento do seu valor em comparação a parcela de pressão em CFD. Esse crescimento a cima de $\mp 4^\circ$ está ligado as correlações utilizadas no software XFOIL também conhecida como método de interação viscosa-inviscida totalmente acoplada (DRELA, 1989) que utiliza de uma correlação de arrasto viscoso somada a parcela de pressão, amenizando assim os erros da parcela viscosa não presentes na teoria do escoamento potencial.

Como pode observar, a curva da parcela viscosa em CFD (curva em marrom) apresenta decréscimo à medida que o ângulo de ataque aumenta. Assim, é possível entender a aproximação da curva do XFOIL com as curvas dos Refinamentos 4, 5 e 6 para ângulos maiores que $\mp 4^\circ$, já que, o arrasto total é a soma da parcela de pressão mais a parcela viscosa. Assim, à medida que aumenta o ângulo de ataque também aumenta a parcela do arrasto por pressão e consequentemente diminuindo a parcela de arrasto viscosa por conta de o escoamento não estar mais tocando toda a superfície do perfil.

Figura 22 – Curvas de comparação dos coeficientes de arrasto (C_D).



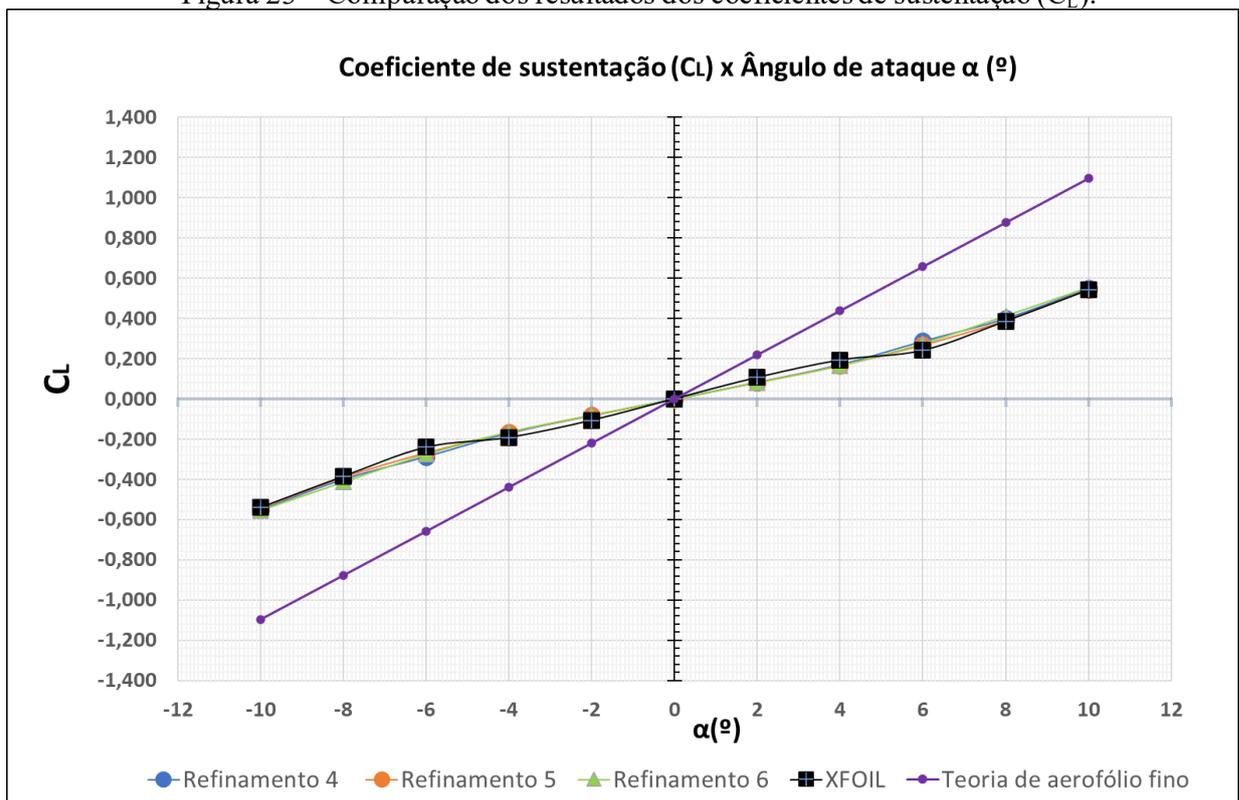
Fonte: Autor (2021).

A Figura 23, apresenta os resultados aos valores do coeficiente de sustentação (C_L), para os refinamentos 3,4 e 5 em estudos. As curvas de C_L para os refinamentos apresentaram em sua totalidade valores congruentes, validando assim o estudo de convergência das malhas para o coeficiente de sustentação. A curva do coeficiente de sustentação (C_L) do método XFOIL apresentou resultados muito similares aos resultados em CFD dos refinamentos, validando assim os cálculos dos coeficientes de sustentação para os dois métodos. Com os valores do coeficiente de sustentação (C_L) validados, reforça-se a tese de que a diferença entre os valores

do coeficiente de arrasto (C_D) entre os métodos CFD e o métodos XFOIL, podem estar realmente ligadas aos modelagem do cálculo das forças viscosas presentes nos códigos XFOIL.

Para efeito de comparação, no gráfico da Figura 23, é adicionado a curva em roxa que representa o coeficiente de sustentação ideal segundo a Teoria de Aerofólios Finos (ANDERSON, 2017), onde o coeficiente de sustentação é dado por $C_L = 2 \cdot \pi \cdot \alpha$, sendo α o valor do ângulo de ataque em radianos. Como podemos observar a curva do coeficiente de sustentação do perfil NACA 16-021 apresentaram uma menor inclinação em comparação a curva do coeficiente de sustentação ideal. Segundo Scott (2010) isso está ligado a um perfil com menor razão de aspecto, produzindo assim um maior arrasto induzido e uma menor inclinação da curva de sustentação que o modelo ideal.

Figura 23 – Comparação dos resultados dos coeficientes de sustentação (C_L).



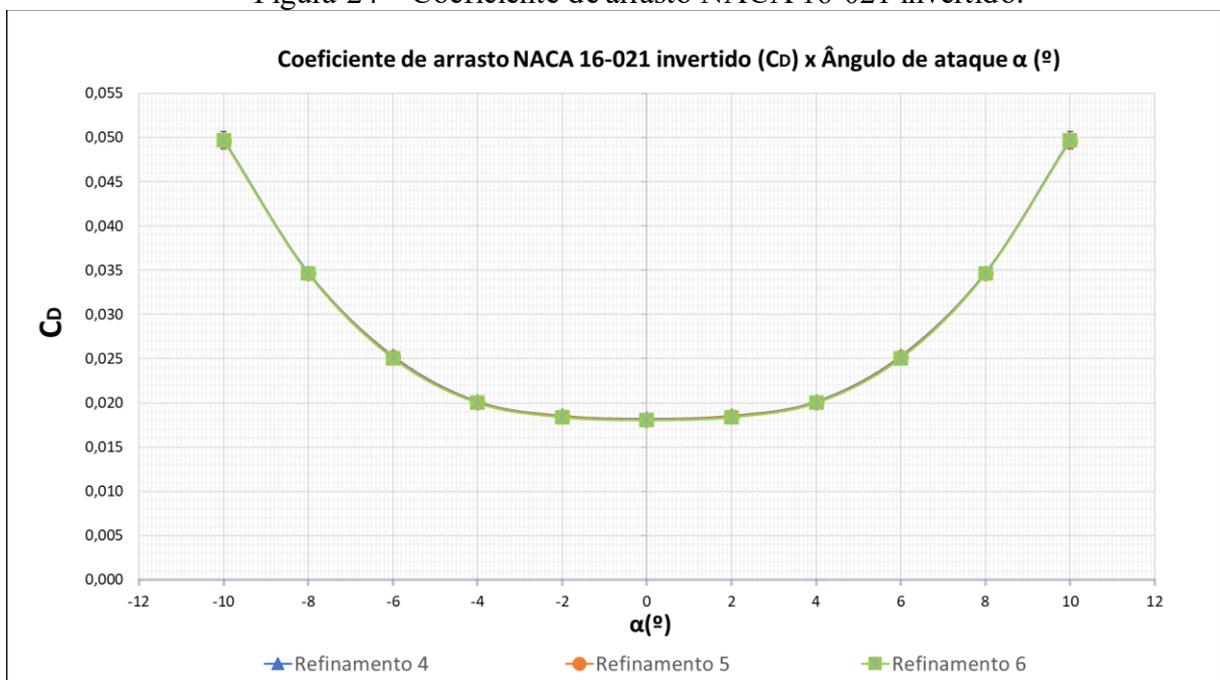
Fonte: Autor (2021).

4.3 ANÁLISE DOS RESULTADOS DO PERFIL NACA 16-021 COM ESCOAMENTO INVERTIDO

A Figura 24, apresenta as curvas do coeficiente de arrasto (C_D) para o perfil NACA 16-021 com o escoamento invertido, mais uma vez considerando três diferentes refinamentos de malha.

Como se pode analisar, os resultados apresentaram convergência para todos os ângulos simulados e dentro dos padrões de incertezas de erro menores que 1%, entrando nos critérios de EÇA et al. (2009), assim pode-se confirmar a convergência das malhas para os valores do coeficiente de arrasto do NACA 16-021 com o escoamento invertido.

Figura 24 – Coeficiente de arrasto NACA 16-021 invertido.



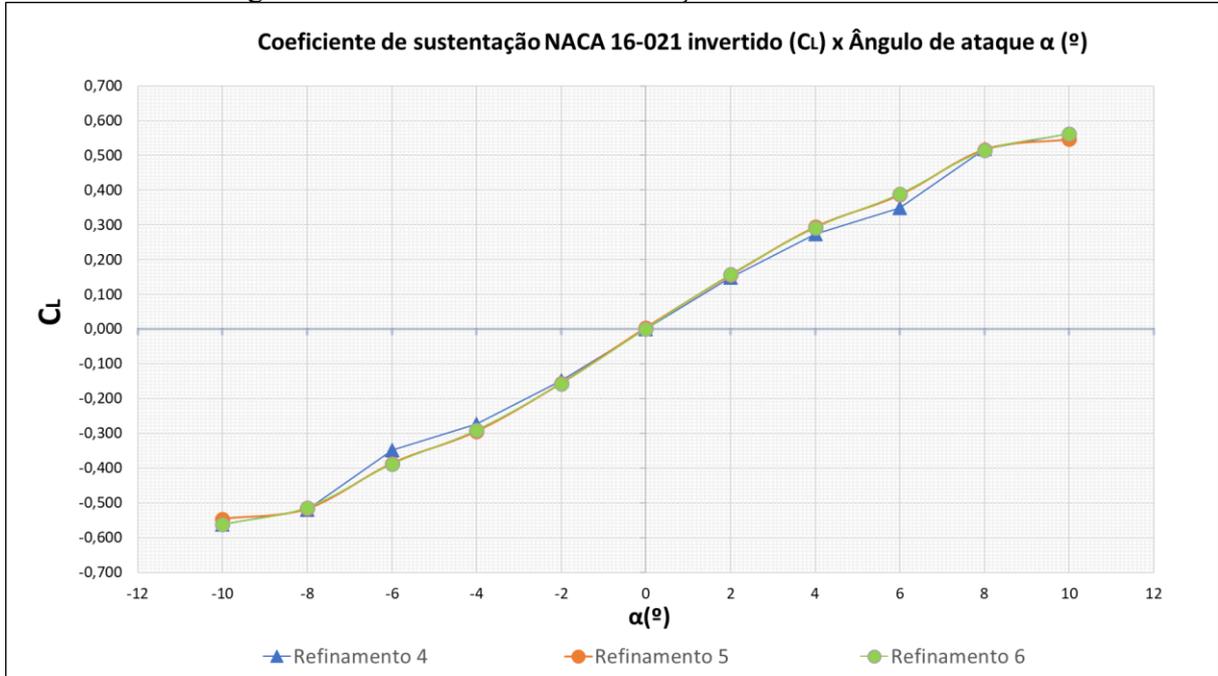
Fonte: Autor (2020).

Já para o coeficiente de sustentação (C_L), Figura 25, o Refinamento 4 apresentou uma pequena diferença de resultados para os ângulos de ataque de 6 e -6° em relação ao Refinamentos 4 e Refinamento 5. Um erro de aproximadamente 10% em relação ao Refinamento 5 e de 7% para o Refinamento 6. Para os ângulos de ataque de 10 e -10° a diferença cai para valores menores que 1%. Por conta dessas diferenças numéricas, o Refinamento 4 foi então descartado da próxima etapa.

Os Refinamentos 5 e 6 apresentaram bons resultados de convergência, porém o Refinamento 6 caracterizou-se por um número muito mais alto de células, o que acabou exigindo muito tempo.

Com isso, o Refinamento 5 foi escolhido para simular os modelos de rabetas *Pin*, *Squash* e *Swallow*.

Figura 25 – Coeficiente de sustentação NACA 16-021 invertido.

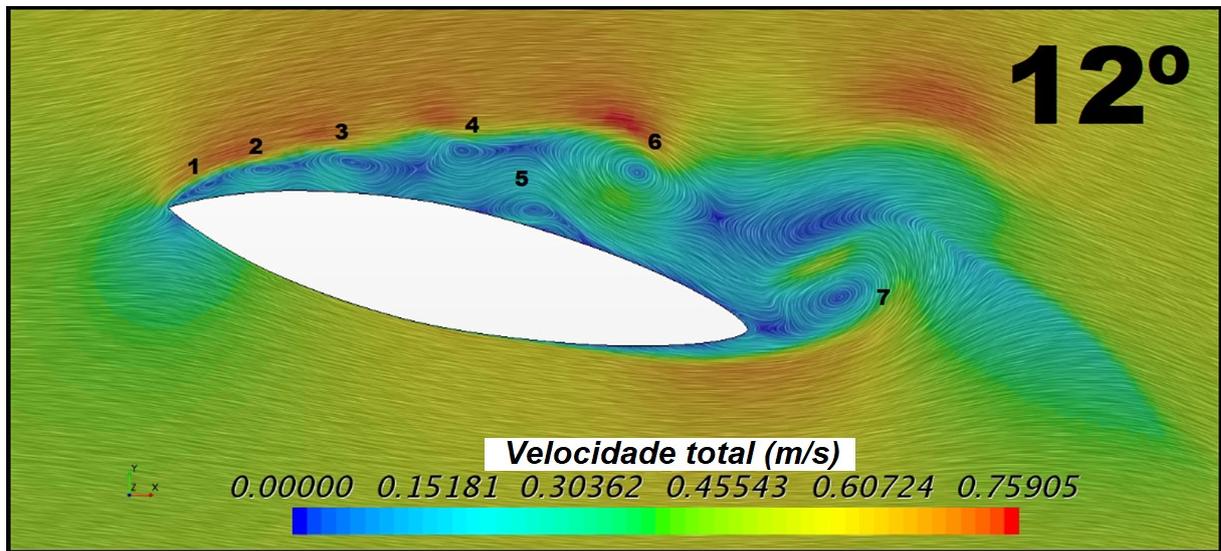


Fonte – Autor (2021).

4.4 ANÁLISE E COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS DOS PERFIS TRASEIROS: SWALLOW, PIN, SQUASH E ROUND PIN (NACA 16-021)

O ângulo de ataque das simulações foi variado entre -10 a 10° , devido a todos os perfis de rabetas apresentarem descolamentos da camada limite para ângulos fora deste intervalo, comportamento característico conhecido como estol. O fenômeno, na prática, gera a perda de sustentação lateral da prancha e uma instabilidade direcional, fazendo o surfista cair ou perder a onda, o que é algo nada desejado. A Figura 26 apresenta umas dessas simulações para o ângulo de 12° , onde é possível identificar visualmente o estol ao analisar o escoamento sobre o perfil de rabetas *Pin*. Como podemos observar são inúmeras regiões com bolhas de recirculação (numeradas) ao longo do escoamento, mais próximo a rabetas e percebe-se o descolamento dessas bolhas em relação a camada limite, o que caracteriza que o escoamento se encontra em estágio de estol.

Figura 26 – As regiões numeradas de 1 a 7 se referem as bolhas de recirculação em um modelo *PIN* a 12° .

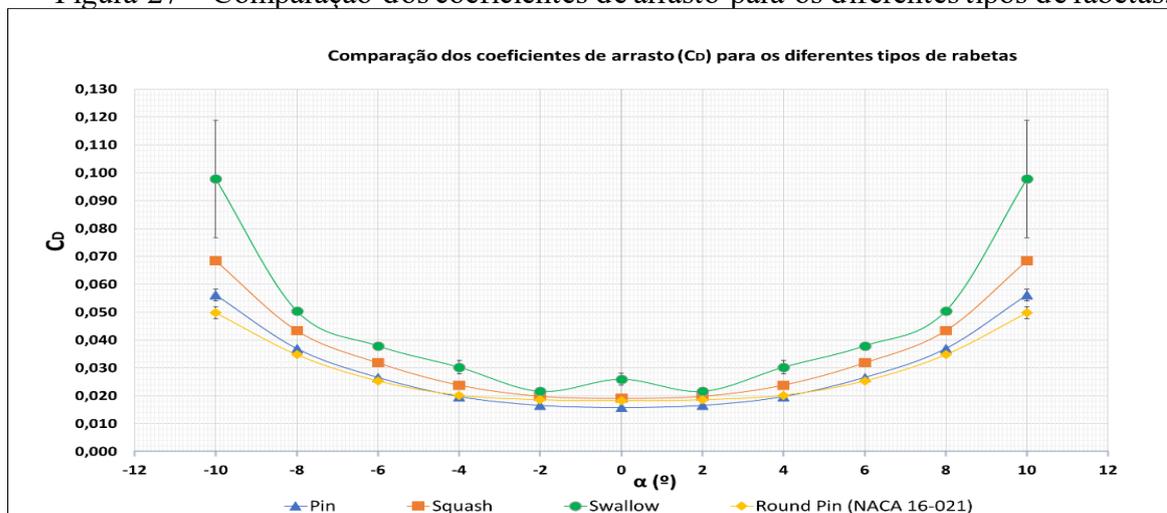


Fonte 1: Autor (2021).

4.5 ANÁLISE DO COEFICIENTE DE ARRASTO (C_D)

No gráfico da Figura 27, são comparados os resultados do coeficiente de arrasto dos modelos de rabetas simulados neste trabalho. As imagens das simulações foram analisadas entre 0 e 10° , devido as simulações para ângulos negativos serem resultados rebatidos dos valores de ângulos positivos por conta da simetria dos perfis analisados.

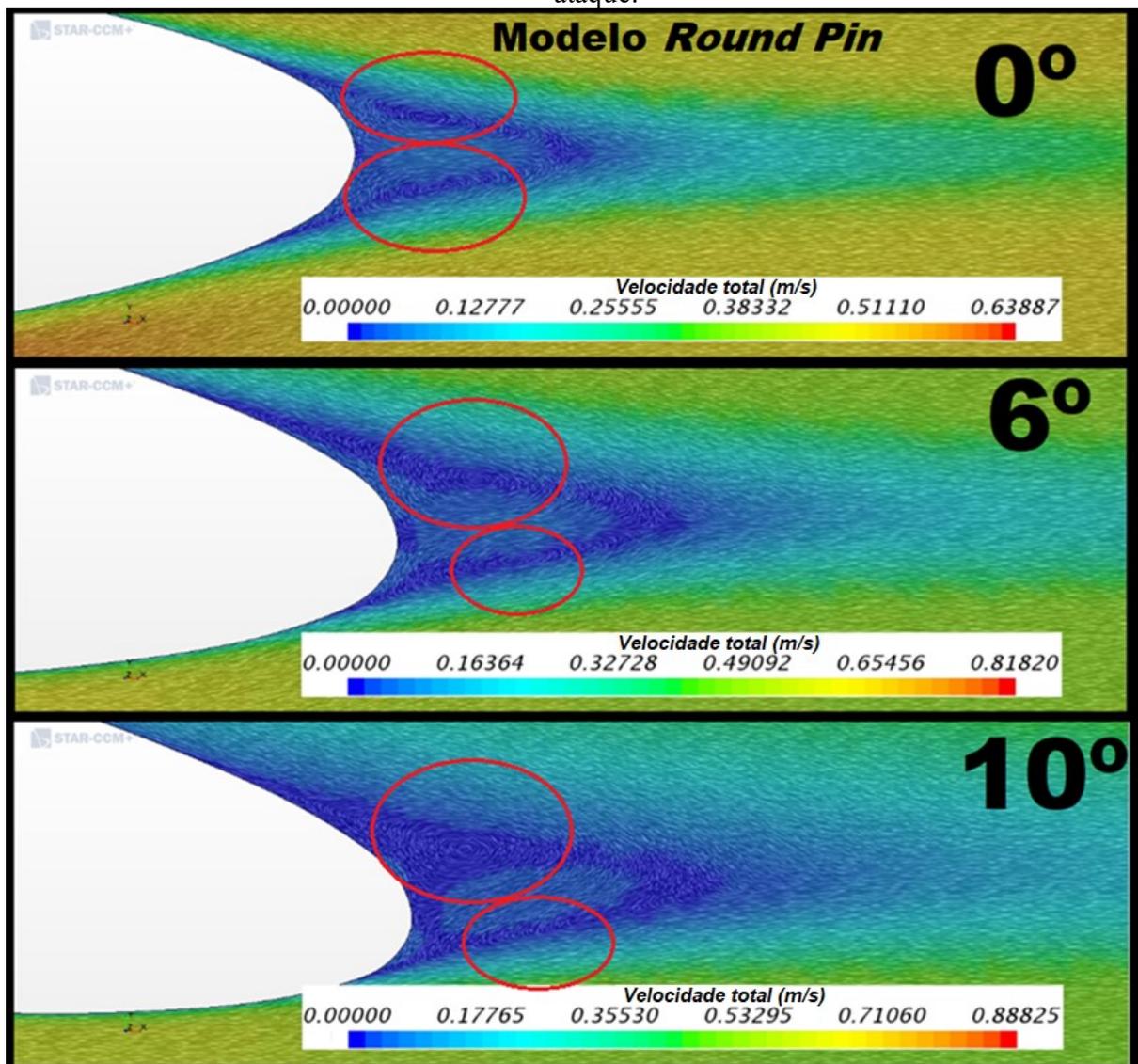
Figura 27 – Comparação dos coeficientes de arrasto para os diferentes tipos de rabetas.



Fonte: Autor (2021).

A curva em amarelo representa o modelo de rabeta *Round Pin*. Como podemos observar esse modelo apresentou um crescimento do valor de coeficiente de arrasto (C_D) ao longo da variação do ângulo de ataque, sendo o perfil com menor coeficiente de arrasto (C_D) para os ângulos acima de 8° . Analisando a camada limite, o aumento gradual de coeficiente de arrasto (C_D) pode estar ligado ao não descolamento das bolhas de recirculação da camada limite até 10° . Isso pode ser observado na Figura 28, onde essas bolhas de recirculação crescem de maneira ordenada não se desprenderem da camada limite ou causando instabilidade e aumento do C_D .

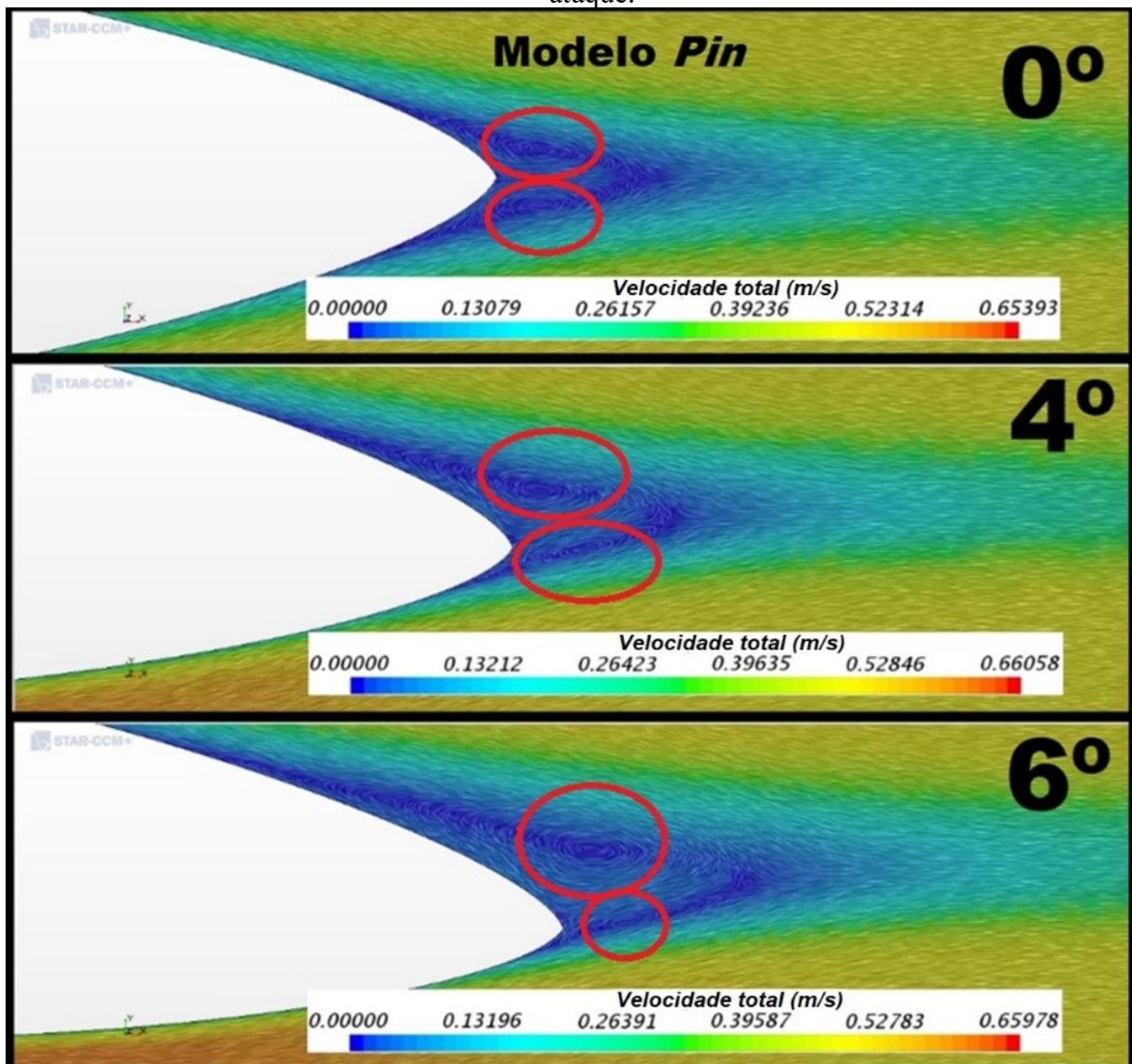
Figura 28 – Camada limite da rabeta *Round Pin* para escoamento com 0° , 6° e 10° de ângulo de ataque.



Fonte: Autor (2021).

A curva em azul, representa o modelo de rabeta *Pin*. Esse modelo apresentou os menores valores de coeficiente de arrasto (C_D) entre os modelos testados para os ângulos de ataque de até 4° . Analisando a camada limite da Figura 29 é possível observar um crescimento ordenado das bolhas de recirculação, destacadas com círculos em vermelho, sem haver indícios de descolamento da camada limite até 4° . A partir de 6° é possível observar um maior crescimento das bolhas de recirculação, o que pode explicar o aumento do valor do coeficiente de arrasto (C_D).

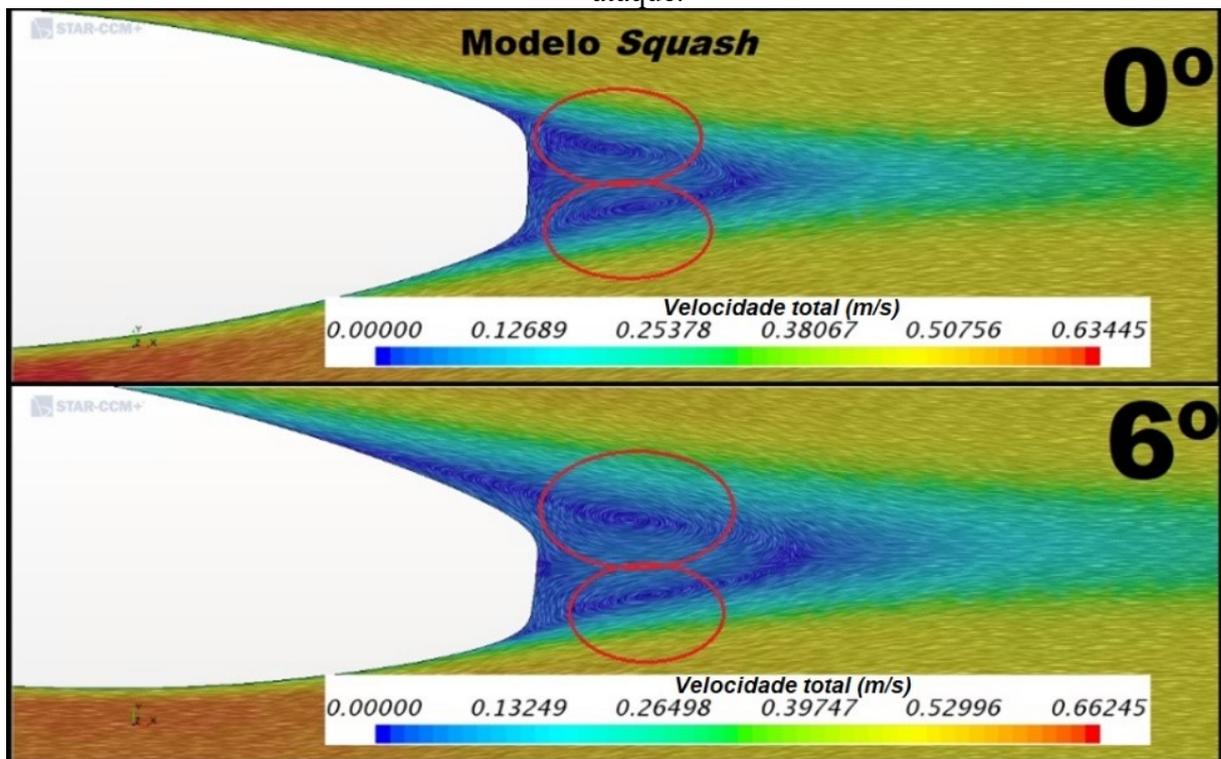
Figura 29 – Camada limite da rabeta *Pin* para escoamento com $0^\circ, 4^\circ$ e 6° de ângulo de ataque.



Fonte: Autor (2021).

A curva em laranja, representa o modelo de rabeta *Squash*. Este modelo de rabeta apresentou a curva do coeficiente de arrasto (C_D) abaixo apenas do perfil *Swallow* como podemos analisar no gráfico da Figura 27. A camada limite apresentou um crescimento das bolhas de recirculação até 6° de ângulo de ataque, sem descolamento como mostrado na Figura 30.

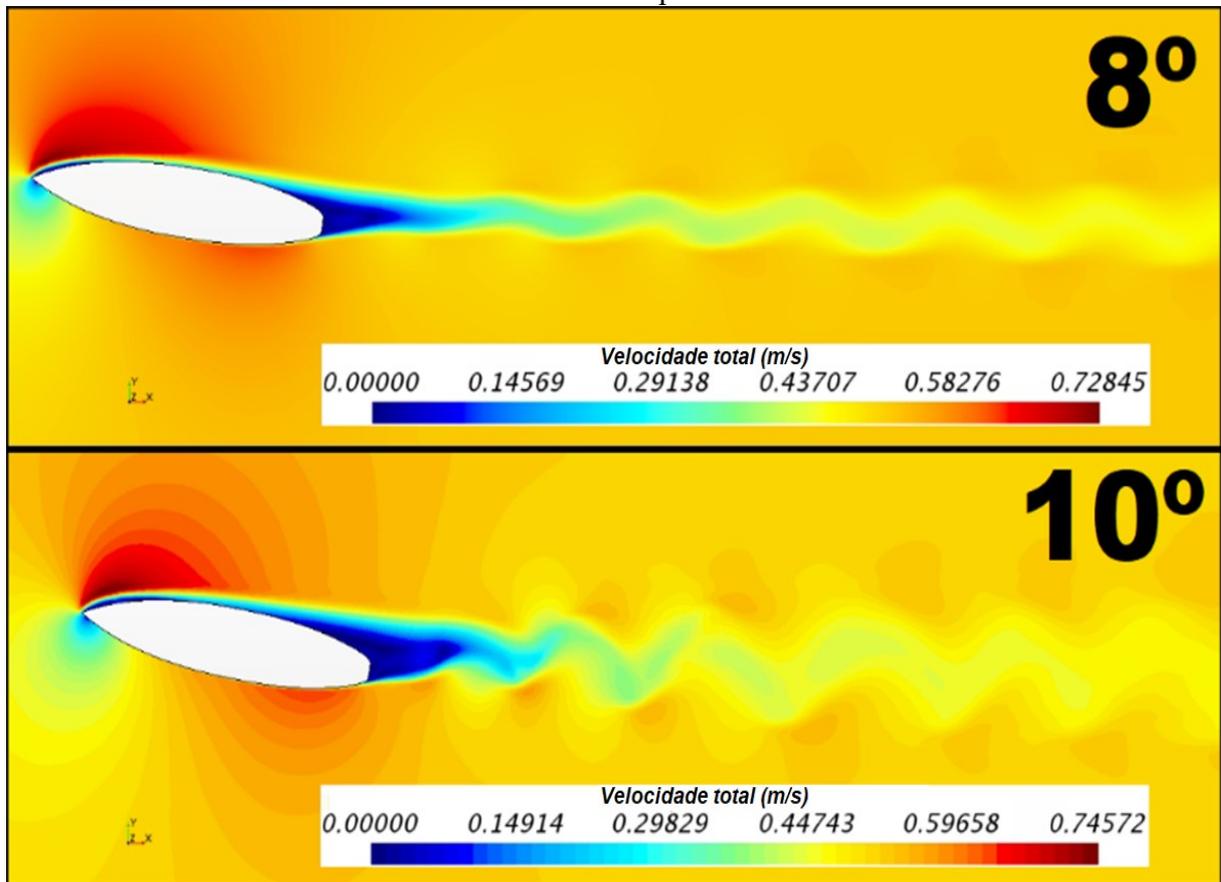
Figura 30 – Camada limite da rabeta *Squash* para o escoamento com 0° e 6° de ângulo de ataque.



Fonte: Autor (2021).

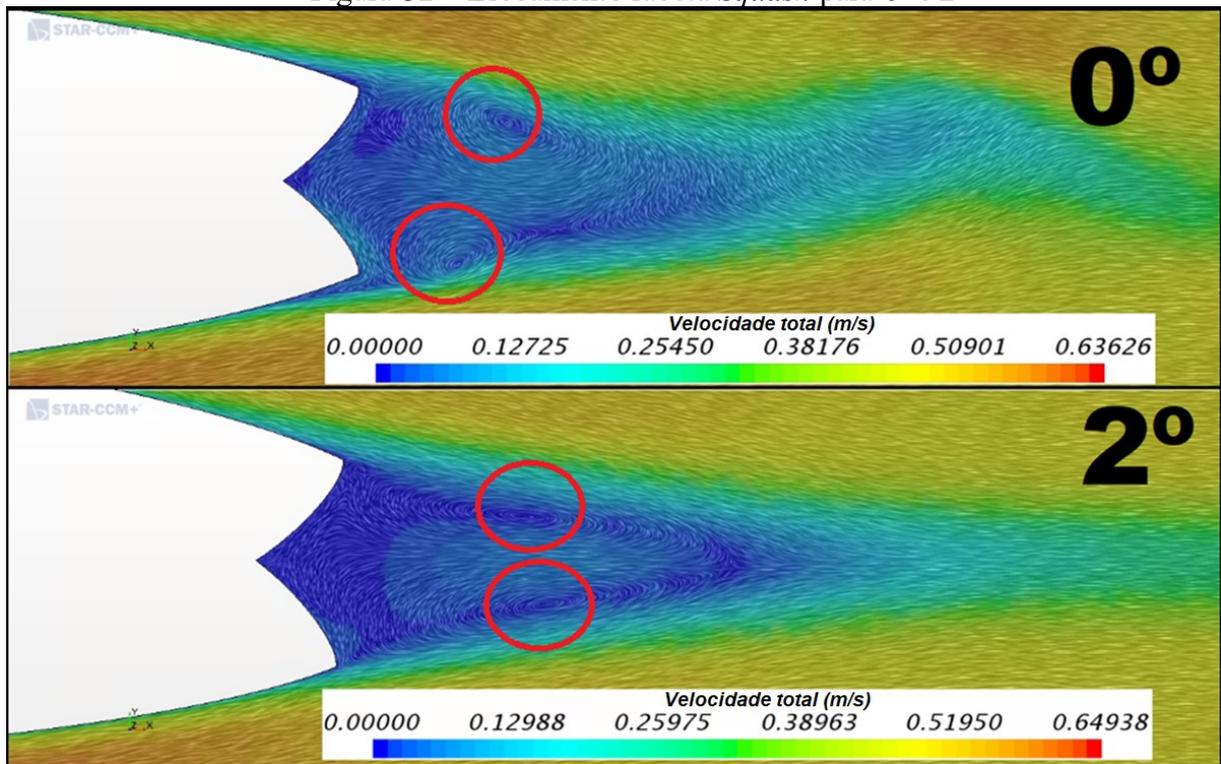
Para 8° a esteira do modelo *Squash* começa apresentar oscilações, aumentando ainda mais sua intensidade em 10°, ver Figura 31. Essa oscilação da esteira implica no aumento do coeficiente de arrasto.

Figura 31 – Oscilação na esteira da camada limite, rabeta *Squash* para 8° e 10° de ângulo de ataque.



Fonte: Autor (2021).

O perfil *Swallow* apresentou uma oscilação na esteira da camada limite para o ângulo de 0°, uma das razões pra essa oscilação pode ser a assimetria das zonas de recirculação que se encontram em tamanhos e posições distintas, ver Figura 32 para 0°. Já para 2° a duas zonas de recirculação aparecem com simetria de tamanho e posição, com um número crítico de R_E menor que para 0° diminuindo tamanho da esteira do escoamento e assim também diminuindo o valor do coeficiente de arrasto (C_D) em relação a 0°.

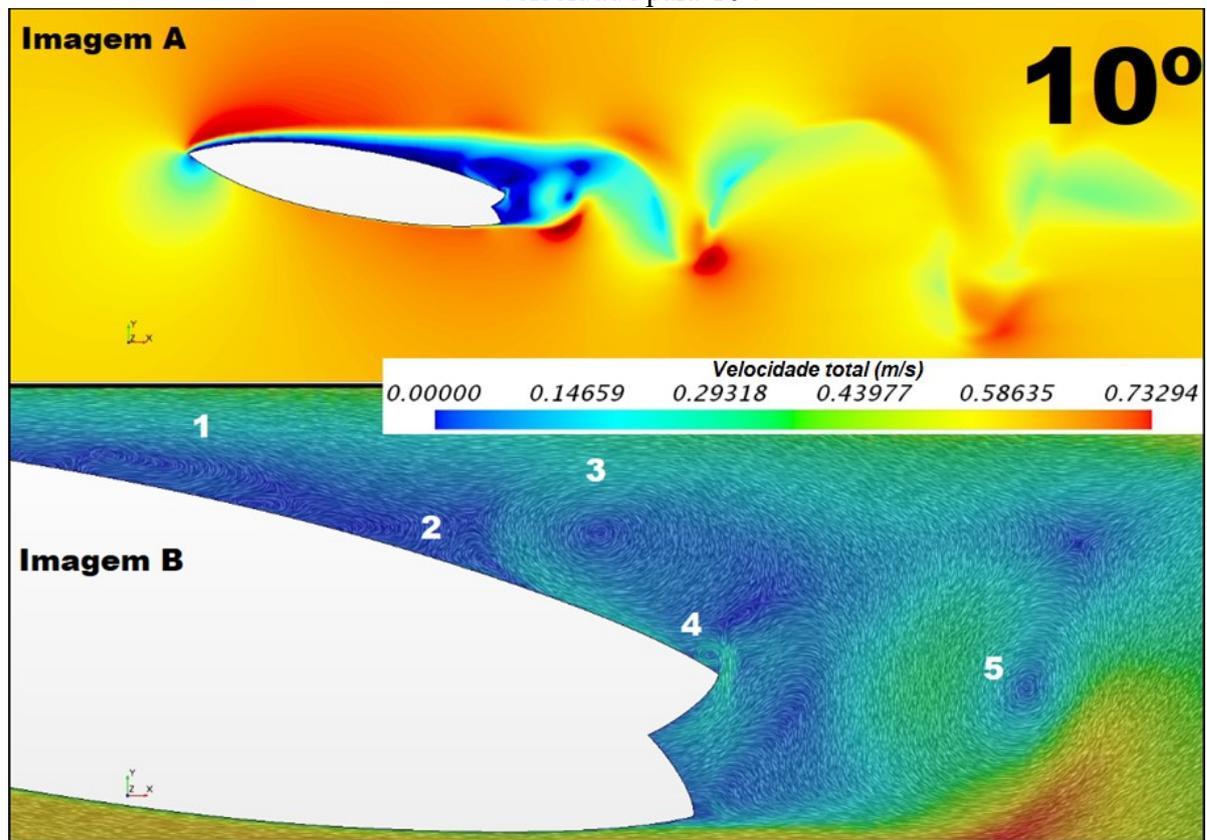
Figura 32 – Escoamento rabetado *Squash* para 0° e 2°

Fonte: Autor (2021)

Nos intervalos entre 2° a 8°, a esteira apresenta oscilações e o crescimento do coeficiente de arrasto (C_D) lembra uma equação linear. Para 10° o perfil apresenta descolamento da esteira de vórtices como podemos ver na Figura 33. O valor do coeficiente de arrasto (C_D) cresce de forma não linear e suas respostas de coeficiente de arrasto (C_D) passam a ser oscilatórias. As incertezas são calculadas através de desvio padrão e estão apresentadas através das barras verticais na curva em verde da Figura 27, nos pontos -10° e 10° do gráfico. Essa variação e aumento significativo do coeficiente de arrasto (C_D) é um indicativo que o escoamento apresenta estol.

Como podemos observar na Figura 33, a geometria da rabetado *Swallow* auxilia para o despreendimento das bolhas recirculantes. Através dessas bolhas, números de 1 a 5, é possível identificar os pontos de pressões adversas que causa o aumento coeficiente de arrasto (C_D).

Figura 33 – escoamento escalar (Imagem A) e vetorial (Imagem B) em função da velocidade para 10° .



Fonte 2: Autor (2021)

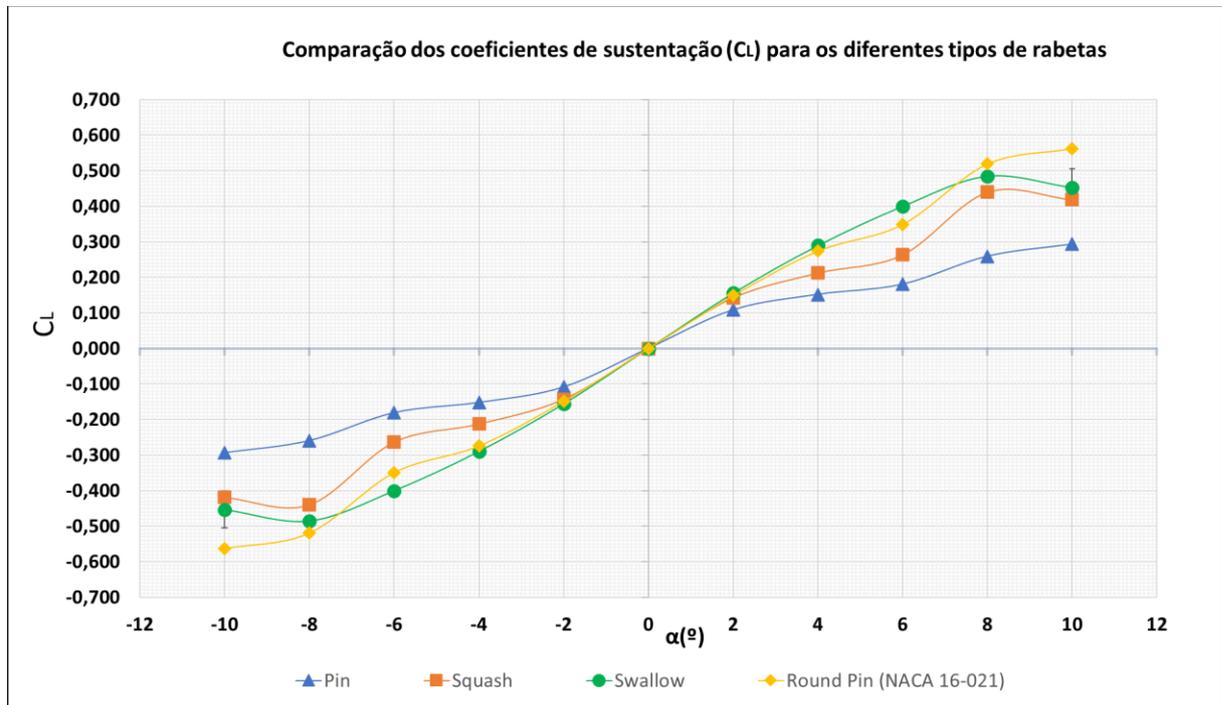
4.6 ANÁLISE DO COEFICIENTE DE SUSTENTAÇÃO (C_L)

A Figura 34 apresenta a comparação dos coeficientes de sustentação (C_L) para os modelos de rabetas.

O modelo *Pin* apresentou a curva com os menores valores do coeficiente de sustentação (C_L) entre os modelos e não apresentando decréscimo ao longo da curva, sendo assim é modelo que pode apresentar uma maior estabilidade lateral devido as baixas forças de sustentação (neste caso forças laterais) agindo sobre o perfil.

O modelo *Squash* apresentou a segunda menor curva do C_L , foi notado um decréscimo do valor do C_L entre 8° e 10° , o que indica perda de sustentação. Essa perda de sustentação entre esses ângulos de ataque está ligada ao descolamento da esteira da camada limite o que indica que o perfil está perdendo sustentação.

Figura 34 – Comparação dos coeficientes de sustentação para os diferentes tipos de rabetas.



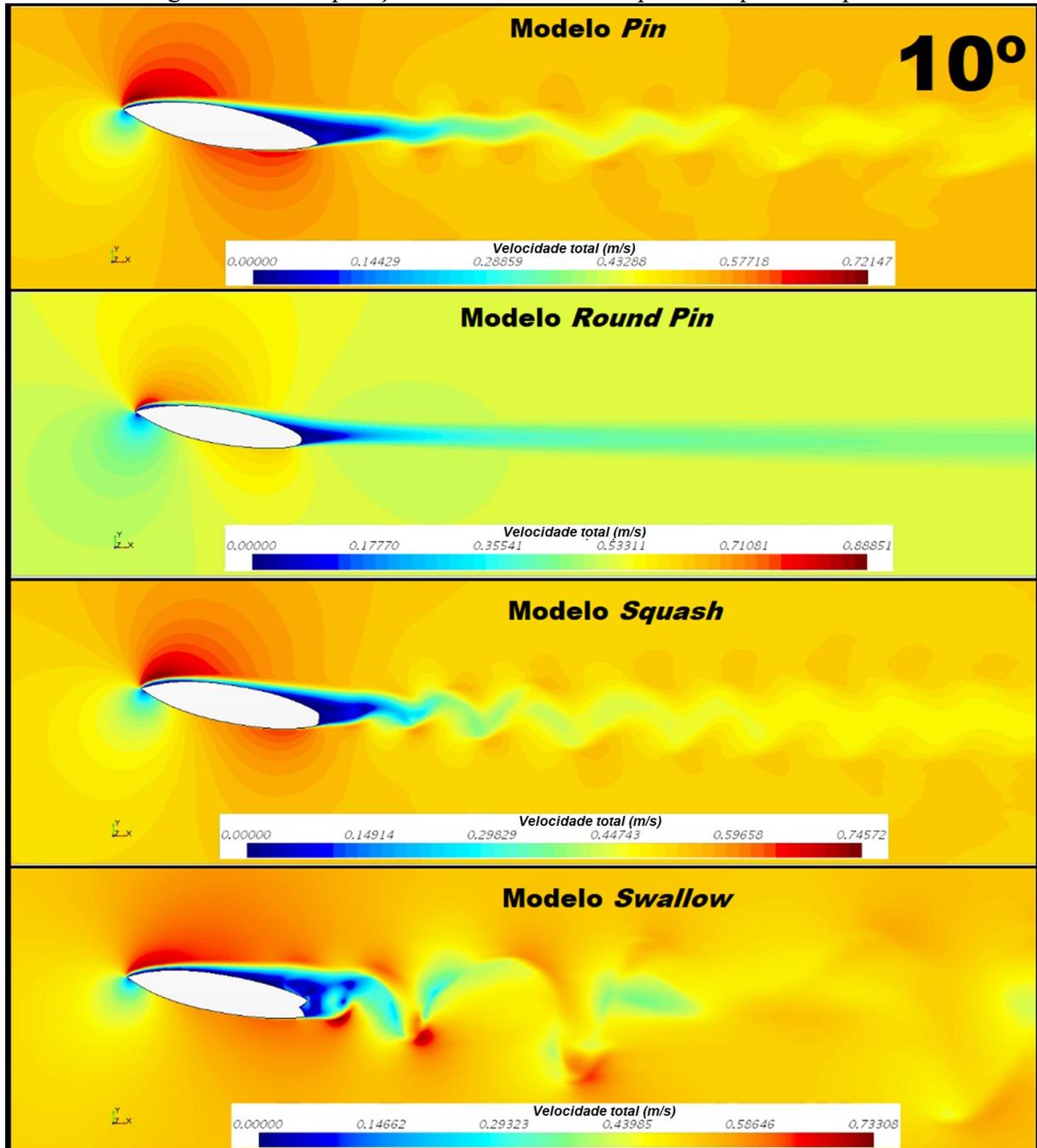
Fonte: Autor (2021).

Na Figura 35, é feita a comparação dos diferentes comportamentos das esteiras para os modelos de rabetas a 10° . O modelo *Round Pin* para 10° apresenta um menor número de R_E crítico na esteira da camada limite o que implica no crescimento do coeficiente de sustentação (C_L) como podemos ver no gráfico da Figura 34. O modelo *Squash* apresentam um decaimento do coeficiente de sustentação (C_L) para este ponto, este decaimento está diretamente ligado esteira instável com um início de formação de vórtices, isso explica o aumento do coeficiente de arrasto para 10° .

Já o modelo *Swallow*, apresentou a maior sustentação até 6° . Devido ao aumento da área de recirculação da esteira o modelo começa a perda sustentação até o ponto de entrar totalmente em estol em 10° , assim tornando-se totalmente instável.

O modelo *Round Pin* apresentou uma das maiores curvas do coeficiente de sustentação (C_L) em comparação aos outros perfis e também os maiores valores do coeficiente de sustentação (C_L) para os maiores ângulos de ataque, o que também pode ser um indicativo de um perfil com maior estabilidade entre os simulados.

Figura 35 – Comparação de esteiras entre os perfis de pranchas para 10°.



Fonte: Autor (2021).

5 CONCLUSÃO E PERSPECTIVAS

A evolução da análise CFD vem ajudando muito a indústria com problemas relacionados a fluidos. Essa ajuda não vem só em questões financeiras, mas também em questões de estrutura e tempo quando comparados a testes experimentais. E na indústria do surf ela vem sendo aplicada de forma ainda muito lenta. Por esse motivo, cria-se a necessidade de estudos científicos mais aprofundados para que cada vez mais possamos ver recordes sendo quebrados dentro do esporte. Não só isso, mas também que possa auxiliar na criação de equipamentos de surf que venham a facilitar o seu aprendizado e realizar o sonho de muitas pessoas mundo afora.

Esse trabalho vem para servir de referência para investigações numéricas de CFD no segmento do surf e também para ser ponto de partida para outros trabalhos sejam desenvolvidos dentro de uma indústria bilionária que investe pouco em pesquisa.

Ao longo desta dissertação muitas simulações foram testadas. Esses testes incluíram diferentes geometrias e tamanhos de malha, refinamentos de malhas, variações de volumes de controles, modelos de turbulência, modelos de perfis, funções de paredes entre outro. Isso acabou exigindo um tempo precioso. Primeiramente por não se saber as teorias por trás dos dados apresentados em no software XFOIL, foi pensado que o uso da função de parede e prejudicariam o valor dos resultados. Porém, ao analisar mais profundamente o método XFOIL, foi descoberto que se baseava nas teorias de escoamento potencial utilizando método dos painéis, o que consiste em uma abordagem CFD bem diferente do método dos volumes finitos utilizados no software STAR CCM+. Pois, o método dos painéis diferente dos métodos dos volumes finitos, usa algumas simplificações que venham a diferir os resultados e a principal é desconsiderar os efeitos viscosos na camada limite.

As comparações dos resultados em CFD do coeficiente de arrasto do perfil NACA 16-021 com o código XFOIL, sugere que a diferença de resultados está ligada diretamente com a forma de como são calculadas as forças viscosas na esteira do escoamento em cada método. Pois a diferença de resultados do coeficiente de sustentação entre os métodos foi satisfatória.

Através da análise das curvas do coeficiente de arrasto, coeficiente de sustentação e também da análise da camada limite foi possível retirar conclusões e reafirmar alguns conhecimentos empíricos. A Figura 36, apresenta uma tabela de comparação dos coeficientes de arrasto (C_D) e sustentação (C_L), velocidade e manobrabilidade dos diferentes modelos de

rabetas testados. Sendo a escala escolhida para comparação dos coeficientes de arrasto (C_D) e sustentação (C_L) dos perfis variando de baixo a alto. Sendo baixo para os perfis com menores coeficientes, médio para perfis com valores intermediários e alto para os perfis com maiores valores. Já a escala de velocidade dos perfis é ligada diretamente ao coeficiente de arrasto (C_D), sendo os perfis variando a sua escala entre baixa a alta. Por não haver neste trabalho uma análise quantitativa de manobrabilidade a análise feita será estimada através do coeficiente de sustentação (C_L), e a escala de manobrabilidade (possivelmente) varia entre baixa a alta.

Figura 36 – Comparação dos modelos de Rabetas.

				
	PIN	ROUND PIN	SQUASH	SWALLO
Coeficiente de arrasto (C_D)	Baixo	Baixo	Médio	Alto
Coeficiente de sustentação (C_L)	Baixo	Alto	Médio	Alto
Velocidade	Alta	Alta	Média	Baixa
Manobrabilidade (possivelmente)	Baixa	Alta	Média	Alta

Fonte: Autor (2021).

O perfil *Pin* apresentou baixa sustentação e um baixo coeficiente de arrasto, e está ligado diretamente a um modelo de prancha mais veloz e também com maior estabilidade direcional, não sendo tão manobrável. Muito indicado para ondas tubulares, ou ondas grandes onde a velocidade e a estabilidade direcional são mais importantes.

O modelo *Round pin* apresentou um baixo coeficiente de arrasto em relação aos outros modelos, porém uma maior sustentação lateral. Modelos com baixo coeficiente de arrasto são mais velozes e por conter uma alta sustentação atrelado a estabilidade podem ser perfis de prancha com maior manobrabilidade mesmo em ângulos altos de ataque. Prancha muito indicada para ondas mistas, que apresentam tubos, manobras de borda na onda e até manobras

aéreas. Sendo de todas os modelos de rabeta testados a que se torna a mais convencional para todo o tipo de onda e tamanho.

O modelo *Squash* apresentou valores intermediários do coeficiente de arrasto, o que indica ser uma prancha um pouco mais lenta em comparação aos modelos *Pin* e *Round Pin* para as condições simuladas. Já seu coeficiente de sustentação ficou abaixo dos modelos *Round Pin* e *Swallow*, dando um indicativo de menor manobrabilidade em comparação a esses outros modelos. Isso acaba contrariando os conhecimentos empiristas do mundo do surf, onde se tinha o conhecimento de que o modelo de rabeta *Swallow* era um dos modelos mais manobráveis. Porém, não podemos concluir se ao adicionar quilhas em um modelo 3D não poderia se tornar um perfil muito manobrável e ser utilizado para um surf com manobras nas bordas das ondas. Isso poderia manter os conceitos empiristas de uma prancha bem manobrável.

Já o modelo *Swallow* apresentou os maiores coeficientes de arrasto e sustentação até entrar em estol a partir de 8° . Assim sendo um perfil mais lento entre os simulados, mas que tudo indica, pode apresentar uma boa manobrabilidade para baixos ângulos de ataque devido as forças laterais que agem sobre o perfil. Para ângulos maiores apresenta instabilidade o que pode fazer o surfista perder a onda, termo conhecido no surf como “Desgarramento”. Com isso, confirma-se o conhecimento empirista do surf em ser um perfil muito bom para manobra, porém contraria o conhecimento em ser uma prancha rápida e instável para manobras com grandes ângulos de ataque. Assim através da comparação com outros perfis seria uma prancha bem utilizada em ondas menores e menos velozes, e que apresentem paredes para manobras de borda.

Todos os resultados deste trabalho foram feitos em cima de hipóteses, assim deixando o trabalho exclusivamente sem saber qual os efeitos reais causados por todos os outros elementos que podem estar presentes nas pranchas de surf. Por se tratar de uma análise bidimensional muitos destes elementos das pranchas como fundo, borda, quilhas não foram levadas em consideração, o que pode fazer uma grande mudança nos resultados finais dos coeficientes de arrasto (C_D) e sustentação (C_L) de uma prancha no seu todo.

Por conta da alta demanda computacional de tempo e processamento de dados do computador utilizado, não foi possível comparar as curvas dos coeficientes de arrasto (C_D) e sustentação (C_L) para outros números de Reynolds (R_e) maiores, também não foram feitas análise do coeficiente de momento. Com isso ficam algumas sugestões para pesquisas futuras relacionadas ao presente trabalho:

- Levantamento 2D em modelos de rabeta para diferentes números de Reynolds. Para este trabalho foi utilizado um número de $R_e = 10^6$ com velocidade de 0,52 m/s (1,87 km/h) que é a velocidade de uma onda pequena também conhecida como marola. Para novos trabalhos seriam indicados números de R_e para velocidades entre 4,16 a 8,33 m/s (15 a 30 km/h). Analisar diferentes curvas ainda mais precisas para as diferentes velocidades cria uma maior base de dados para serem utilizadas em trabalhos futuros.
- Análise transiente do escoamento nos perfis de pranchas para mapear com maior confiança os efeitos dos vórtices. Possibilitando assim uma maior compreensão dos fenômenos que ocorrem na camada limite.
- Levantamento dos dados experimentais em túnel de vento do perfil NACA 16-021, e também para o perfil invertido. Assim, validando assim os dados em CFD deste trabalho com os dados experimentais obtidos em túnel de vento.
- Levantamento das curvas do coeficiente de momento e análise de manobrabilidade para os perfis 2D e também 3D.
- Simulação CFD em pranchas de surf 3D para diferentes tipos de posicionamento de quilhas, porque trará um estudo complementar ao trabalho que está sendo feito, adicionando um elemento de estabilidade lateral que são as quilhas e não puderam ser abordadas neste trabalho.
- Estudo da influência da área molhada na resistência ao avanço em pranchas de surf, isso ajudaria tanto na performance como também ajudaria muito na hora do surfista compra sua nova prancha.
- Levantando das curvas dos coeficientes de arrasto e sustentação em CFD das quilhas de surf, para diferentes ângulos de ataque das quilhas laterais. Assim prevendo quais configurações geram maiores ou menores velocidades, permitindo assim que o

surfista faça sua própria configuração conforme sua necessidade. Também, através dos resultados deste estudo, permite a possibilidade de se pensar na aplicação de atuadores que venham a alterar o ângulo de ataque da quilha gerando mais ou menos velocidade com o surfista ainda na onda. Sendo os atuadores controlados de forma analógica ou até mesmo digital (controle remoto por exemplo).

- Estudo de manobrabilidade para diferentes perfis de pranchas e em diferentes velocidades. Permitindo assim a comparação de resultados de quais perfis apresentam uma menor ou maior manobrabilidade direcional.

REFERÊNCIAS

ABAD, Nour Sánchez. **Numerical study of the predictive capabilities of Reynolds Averaged Navier-Stokes (RANS) turbulence models applied to catalytic converters**. 2015. 68 f. Monografia (Especialização) - Curso de Engineering & Computing, Coventry University, Coventry, 2015.

ANDERSON, John D. Jr.; **Fundamentals of Aerodynamics**, 6. ed. New York, NY, McGraw-Hill Education, 2017. 1154 p.

CARSWELL, Dave; LAVERY, Nick. 3D solid fin model construction from 2D shapes using non-uniform rational B-spline surfaces. **Advances In Engineering Software**, [S.L.], v. 37, n. 8, p. 491-501, ago. 2006. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.advensoft.2006.01.002>.

CODER, James G.; MAUGHMER, Mark D. . Numerical Validation of the Squire–Young Formula for Profile-Drag Prediction. **Journal Of Aircraft**, [S.L.], v. 52, n. 3, p. 948-955, Maio 2015. American Institute of Aeronautics and Astronautics (AIAA). <http://dx.doi.org/10.2514/1.c033021>.

DANTAS, João Lucas Dozzi. **Metodologia numérica para estimativa da manobrabilidade de veículos autônomos submarinos**. 2014. 354 p. Tese (Doutorado) - Engenharia Mecatrônica, Departamento de Engenharia Mecatrônica e de Sistemas Mecânicos, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2014.

DEPARTMENT OF AEROSPACE ENGINEERING (Estados Unidos). Universidade de Illinois em Urbana-Champaign (ed.). **NACA 16-021**. Disponível em: <http://airfoiltools.com/airfoil/details?airfoil=naca16021-il>. Acesso em: 19 jun. 2019.

DRELA, Mark. XFOIL: an analysis and design system for low Reynolds number airfoils. **Lecture Notes in Engineering**, p. 1-12, 1989. Springer Berlin Heidelberg. http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-84010-4_1

EPPLER, Richard. **A computer program for the design and analysis of low-speed airfoils**. Hampton: Nasa Langley Research Center, 1980. 152 p.

EÇA, Luís; VAZ, Guilherme; HOEKSTRA, Martin. CODE VERIFICATION, SOLUTION VERIFICATION AND VALIDATION IN RANS SOLVERS. **Offshore and Arctic Engineering**, [s. l], p. 1-9, 11 jun. 2010.

FALK, S.; KNIESBURGES, S.; JANKA, R.; GROSSO, R.; BECKER, S.; SEMMLER, M.; DÖLLINGER, M. . Computational hydrodynamics of a typical 3-fin surfboard setup. **Journal Of Fluids and Structures**, [S.L.], v. 90, p. 297-314, out. 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jfluidstructs.2019.07.006>.

FALK, Sebastian; KNIESBURGES, Stefan; JANKA, Rolf; O'KEEFE, Tom; GROSSO, Roberto; DÖLLINGER, Michael. Numerical Investigation of the Hydrodynamics of Changing Fin Positions within a 4-Fin Surfboard Configuration. **Applied Sciences**, [S.L.], v. 10, n. 3, p. 816, 23 Jan. 2020. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/app10030816>.

FOSSEN, Thor I. Handbook of marine craft hydrodynamics and motion control. 5. ed. **John Wiley & Sons Ltd**, 2011. 582 p.

FOX, Robert W.; MCDONALD, Alan T.; PRITCHARD, Philip J. **Introdução a Mecânica dos Fluidos**. 7. ed. Rio de Janeiro: Ltd - Livros Técnicos e Científicos Editora Ltda., 2010. 441 p. V. 8.

FREI, Walter. **Which Turbulence Model Should I Choose for My CFD Application?** 2017. Disponível em: <https://www.comsol.com/blogs/which-turbulence-model-should-choose-cfd-application/>. Acesso em: 17 Abr. 2021.

HAMI, Khelifa. Turbulence Modeling a Review for Different Used Methods. **International Journal of Heat and Technology**, [S.L.], v. 39, n. 1, p. 227-234, 28 fev. 2021. International Information and Engineering Technology Association. <http://dx.doi.org/10.18280/ijht.390125>.

KENNEDY, J. L.; MARSDEN, D.J. . A Potential Flow Design Method for Multicomponent Airfoil Sections. **Journal Of Aircraft**, [S.L.], v. 15, n. 1, p. 47-52, jan. 1978. American Institute of Aeronautics and Astronautics (AIAA). <http://dx.doi.org/10.2514/3.58311>.

KYNAN MALEY (Singapore). STAR CCM+ (Org.). **The South East Asian Conference 2012**: Singapore: CD-Adapco, 2012. 40 slides, color.

KUNDU PK & COHEN IM. 2002. **Fluid Mechanics**. Academic Press Inc., 2ed., 730p.

KUNDU, Pijush K. et al. **Fluid Mechanics**. 5. ed. Cambridge: Academic Press, 2012. 919 p.

LAHLOU, Omar. **Experimental and Numerical Analysis of the Drag Force on Surfboards with Different Shapes**. 2019. 149 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Oceânica, College of Engineering and Sciences at Florida Institute Of Technology, University Of California, Melbourne, 2019.

LIMA, João de Sá Brasil de. **Implementação do método dos painéis para o estudo de características aerodinâmicas de aerofólios – utilizando o dipolo como elemento de singularidade**. 2011. 106 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Departamento de Engenharia Mecânica, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

LUGONES, Santiago Martín. **Método dos Painéis Bidimensional**. São Paulo: Fatec, 2020.

LUÍS CORUJA. **Rabeta: entendendo os diferentes tipos**. 2018. Disponível em: <https://pranchanova.com/conteudo/rabeta/>. Acesso em: 10 ago. 2020.

MARCHI, C. H. **Dinâmica dos fluidos computacionais (CFD)**. 2010. Disponível em: <http://ftp.demec.ufpr.br/disciplinas/TM257/Semestres_antteriores/Semestre_2010_1/

plano_TM257_CFD_2010_1.pdf>. Acesso em: 10 jul. 2016.

MENDIS, Hashan. **What y^+ should I run? Part: 2 - y^+ required to resolve different regions of the boundary layer**. 2019. Disponível em: <https://www.linkedin.com/pulse/what-y-should-i-run-part-2-required-resolve-different-hashan-mendis/>. Acesso em: 19 Fev. 2021.

MENTER, F. R., Kuntz, M., Langtry, R., 2003, “**Ten Years of Industrial Experience with the SST Turbulence Model**”, Proceedings of the 4th International Symposium on Turbulence, Heat and Mass Transfer, pp. 625-632.

MORAIS, Rodrigo. **Pranchas de Surf – Guia Completo**. 2018. Disponível em: <https://www.livresurf.com.br/blog/pranchas-de-surf-guia-completo/1030/>. Acesso em: 05 mar. 2021.

MOREIRA, Gilberto Augusto Amado. **Modelagem numérica da camada limite atmosférica com validação experimental**. 2007. 134 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Mestre em Engenharia Mecânica, Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2007.

MORGADO, J.; VIZINHO, R.; SILVESTRE, M.A.R.; PÁSCOA, J.C. . XFOIL vs CFD performance predictions for high lift low Reynolds number airfoils. **Aerospace Science and Technology**, [S.L.], v. 52, p. 207-214, Maio 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ast.2016.02.031>.

MITRE, João Felipe. **Introdução a Fluidodinâmica Computacional**. Rio de Janeiro: Universidade Federal Fluminense, 2018. 108 slides, color.

OGGIANO, Luca; PIERELLA, Fabio. CFD for Surfboards: comparison between three different designs in static and maneuvering conditions. **Proceedings**, [S.L.], v. 2, n. 6, p. 309, 14 Fev. 2018. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/proceedings2060309>.

PEREIRA, Ivo Alexandre Brás Barroso. **Escoamento Turbulento em Torno de um Cilindro a Baixo Número de Reynolds**: comparação entre modelos de turbulência. 2010. 75 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 200.

PRANCHARIA (Santos) (ed.). **Como escolher sua quilha?** Disponível em: <https://www.prancharia.com.br/guia-de-quilhas-pranchas-de-surf>. Acesso em: 17 ago. 2020.

TANG, Anthony. **Numerical investigation of turbulent modeling over a non-symmetric NACA 4412 airfoil**. Washington: University of Washington, 2019. 15 p.

LARSEN, J.W.; NIELSEN, S.R.K.; KRENK, S. . Dynamic stall model for wind turbine airfoils. **Journal Of Fluids and Structures**, v. 23, n. 7, p. 959-982, out. 2007. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jfluidstructs.2007.02.005>.

LAUNDER, B. E.; SANDHAM, N. D. . **Closure strategies for turbulent and transitional flows**. Cambridge University Pres, Cambridge, 2002.

LOU, Isa. UNIVERSO DAS RABETAS. 2016. Disponível em: <https://isasoulblog.wordpress.com/2016/07/27/universo-das-rabetas/>. Acesso em: 05 mar. 2021.

RAYMER, D. P. (1992). **Aircraft design: a conceptual approach** (2ª ed.). Washington: AIAA.

ROACHE, Patrick J.. **Verification and Validation in Computational Science and Engineering**. Alburquerque: Hermosa Publisher, 1998.

RUMSEY, C. (2017). **Turbulence Modeling Resource**. The Spalart-Allmaras Turbulence Model. Acesso em 03 de 09 de 2017, disponível em NASA: <https://turbmodels.larc.nasa.gov/spalart.html>.

SCOOT, J. **Advanced Wind Tunnel Test Methods for a Rolling Airframe**, Air Vehicle Engineering Conference, July 2009.

SCOTT, J. Lift Coefficient & Thin Airfoil Theory. In: www.aerospaceweb.org. **Aerospaceweb**. [S.l.]. 10 ago. 2003. Disponível em: https://www-aerospaceweb-org.translate.goog/question/aerodynamics/q0136.shtml?_x_tr_sch=http&_x_tr_sl=en&_x_tr_tl=pt&_x_tr_hl=pt-BR&_x_tr_pto=wapp. Acesso em: 10 out. 2022.

SOINNE, Erkki; LAINE, Seppo. An inverse boundary element method for single component airfoil design. **Journal Of Aircraft**, [S.L.], v. 22, n. 6, p. 541-543, jun. 1985. American Institute of Aeronautics and Astronautics (AIAA). <http://dx.doi.org/10.2514/3.45162>.

Souza, J. F. A. de, Oliveira, L. R. de, Azevedo, J. L. L. de, Soares, I. D., & Mata, M. M. (2011). **Uma revisão sobre a turbulência e sua modelagem**. Revista Brasileira de Geofísica, 29(1), 21–41. doi:10.1590/s0102-261x2011000100002

SPALART, P.; ALLMARAS, S.. A one-equation turbulence model for aerodynamic flows. **30Th Aerospace Sciences Meeting and Exhibit**, [S.L.], p. 1-23, 6 Jan. 1992. American Institute of Aeronautics and Astronautics. <http://dx.doi.org/10.2514/6.1992-439>.

WILCOX, David C.. Formulation of the k-w Turbulence Model Revisited. **AIAA Journal**, v. 46, n. 11, p. 2823-2838, Nov. 2008. American Institute of Aeronautics and Astronautics (AIAA). <http://dx.doi.org/10.2514/1.36541>.