# UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA "JÚLIO DE MESQUITA FILHO" CAMPUS DE SÃO JOÃO DA BOA VISTA

LUCAS TREVISAN LUCATELLI

ESTUDO NUMÉRICO DE BOLHAS DE SEPARAÇÃO LAMINAR EM UM CANAL CONVERGENTE-DIVERGENTE

> São João da Boa Vista 2022

### Lucas Trevisan Lucatelli

# ESTUDO NUMÉRICO DE BOLHAS DE SEPARAÇÃO LAMINAR EM UM CANAL CONVERGENTE-DIVERGENTE

Trabalho de Graduação apresentado ao Conselho de Curso de Graduação em Engenharia Aeronáutica do Campus de São João da Boa Vista, Universidade Estatual Paulista, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Graduação em Engenharia Aeronáutica.

Orientador: Profº Dr. Elmer Mateus Gennaro

São João da Boa Vista 2022

# L933e Lucatelli, Lucas Trevisan Estudo numérico de bolhas de separação laminar em um canal convergente-divergente / Lucas Trevisan Lucatelli. -- São João da Boa Vista, 2022 60 p. Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado - Engenharia Aeronáutica) - Universidade Estadual Paulista (Unesp), Faculdade de Engenharia, São João da Boa Vista Orientador: Elmer Mateus Gennaro 1. Aerodinâmica. 2. Mecânica dos fluidos. 3. Escoamento. 4. Bolhas (Física). 5. Turbulência. I. Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca da Faculdade de Engenharia, São João da Boa Vista. Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.

# UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA "JÚLIO DE MESQUITA FILHO" FACULDADE DE ENGENHARIA - CÂMPUS DE SÃO JOÃO DA BOA VISTA GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AERONÁUTICA

### TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

# ESTUDO NUMÉRICO DE BOLHAS DE SEPARAÇÃO LAMINAR EM UM CANAL CONVERGENTE-DIVERGENTE

Aluno: Lucas Trevisan Lucatelli Orientador: Prof. Dr. Elmer Mateus Gennaro

Banca Examinadora:

- Elmer Mateus Gennaro (Orientador)
- Daniel Sampaio Souza (Examinador)
- Luiz Augusto Camargo Aranha Schiavo (Examinador)

A ata da defesa com as respectivas assinaturas dos membros encontra-se no prontuário do aluno (Expediente nº 016/2022)

São João da Boa Vista, 07 de julho de 2022

Dedico esse trabalho aos meus pais, amigos e familiares que contribuíram em meu desenvolvimento acadêmico ao longo de todos esses anos.

#### **AGRADECIMENTOS**

Agradeço aos meus pais familiares, por todo o apoio ao longo de toda minha trajetória acadêmica. Agradeço ainda ao professor Dr. Elmer Mateus Gennaro, por ter sido meu orientador e ter desempenhado tal função com dedicação e me auxiliado no desenvolvimento desse presente trabalho. Além disso, agradeço aos professores e à Universidade Estadual "Júlio de Mesquita Filho"Campus São João da Boa Vista por todos os ensinamentos e por todas as condições oferecidas durante minha graduação.

Por fim, agradeço a todos aqueles que contribuíram, de alguma forma, para a realização deste trabalho e à CNPq pelo financiamento dos meus projetos de Iniciação Científica realizados ao longo da minha graduação.

Este trabalho contou com o apoio da seguinte entidade: CNPq - Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico

"Inventar é imaginar o que ninguém pensou; é acreditar no que ninguém jurou; é arriscar o que ninguém ousou; é realizar o que ninguém tentou. Inventar é transcender." (Alberto Santos-Dumont)

#### RESUMO

O objetivo principal desse Trabalho de Conclusão de Curso foi o estudo dos efeitos da intensidade turbulenta em bolhas de separação geradas em um canal convergente-divergente. Para o estudo de tais efeitos, foi realizada a análise de diferentes modelos de turbulência, escolhendo o modelo k-w SST para realização das simulações. As simulações numéricas bidimensionais, foram realizadas no software ANSYS Fluent, de modo que a etapa de pós-processamento dos resultados obtidos foi realizada em MATLAB. Assim, como condição de contorno na entrada do canal convergente-divergente, utilizou-se o perfil de velocidade na saída da placa plana, realizando ainda um estudo de convergência de malha de modo a escolher a malha mais adequada. Assim, um dos resultados desse trabalho foi a identificação da bolha de separação, dos pontos de separação e recolamento da camada limite e do comprimento da bolha, a partir de propriedades do escoamento como coeficiente de atrito,  $C_f$ , coeficiente de pressão,  $C_p$ , derivada da velocidade na direção x na posição y e a vorticidade. Concomitantemente, estudou-se os efeitos da variação de determinados parâmetros, como a velocidade na entrada do canal, o ângulo de divergência e a intensidade turbulenta, na bolha de separação. Assim, fixou-se o ângulo de divergência em 4° e variou-se a velocidade, variando em seguida a intensidade turbulenta para um valor fixo de velocidade e por fim, variou-se o ângulo de divergência para uma velocidade de 0,15 m/s. Desta forma, observou-se que o aumento da velocidade de entrada do canal, da intensidade turbulenta e do ângulo de divergência ocasionam a redução do comprimento da bolha. Ademais, plotou-se os contornos e streamlines, além dos perfis de velocidade em uma posição x fixa para diferentes velocidades e intensidades turbulentas, notando que o aumento desses parâmetros causa uma redução no escoamento reverso.

**PALAVRAS-CHAVE:** Aerodinâmica, Mecânica dos fluidos, Escoamento, Bolhas (Física), Turbulência.

#### ABSTRACT

The main objective of this Course Conclusion Work was the study of the effects of turbulence in separation bubbles generated in a convergent-divergent channel, for the study of such effects, the analysis of different turbulence models was performed, choosing the k- $\omega$  SST model to carry out the simulations. The two-dimensional numerical simulations were performed in the ANSYS Fluent software, so that the post-processing step of the results obtained was carried out in MATLAB. Thus, as a boundary condition at the entrance of the convergent-divergent channel, we used the velocity profile at the exit of the flat plate, also carrying out a study of mesh covergence in order to choose the most suitable mesh. Thus, one of the results of this work was the identification of the separation bubble, the boundary layer separation and reattachment points, and the length of the bubble, from flow properties such as friction coefficient,  $C_f$ , pressure coefficient,  $C_p$ , derivative of the velocity in the x direction at the y position and the vorticity. At the same time, we studied the effects of varying certain parameters, such as the velocity at the channel entrance, the angle of divergence and turbulent intensity, in the separation bubble, thus, the divergence angle was fixed at 4° and the velocity was varied, then the turbulent intensity was varied for a fixed value of speed and finally, the divergence angle was varied to a speed of 0.15 m/s. This way, it was observed that the increase in channel inlet velocity, turbulent intensity and angle of divergence cause the bubble length to be reduced. In addition, the contours and streamlines were plotted, in addition to velocity profiles at a fixed x position for different velocities and turbulent intensities, noting that the increase in these parameters causes a reduction in the flow reverse.

**KEYWORDS:** Aerodynamics, Fluid mechanics, Flow, Bubbles (Physics), Turbulence.

# LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1	Comparação dos escoamentos em torno de uma placa plana aguda com números	
	de Reynolds baixo e alto: (a) escoamento do Re baixo, laminar; (b) escoamento	
	com Re alto	19
Figura 2	Crescimento de uma camada-limite sobre uma placa plana	20
Figura 3	Camada limite sobre uma placa plana.	20
Figura 4	Efeito do gradiente de ressão sobre os perfis de camada limite	22
Figura 5	Crescimento da camada limite e separação em uma configuração bocal-difusor.	23
Figura 6	Detalhes do escoamento viscoso em torno de um aerofólio	23
Figura 7	Bolha de separação laminar em um aerofólio	23
Figura 8	Bolha de separação laminar em um aerofólio	24
Figura 9	Descrição do escoamento da bolha de separação	25
Figura 10	Bolha curta laminar	25
Figura 11	Bolha curta laminar	26
Figura 12	Escoamento sobre uma placa fina inclinada	26
Figura 13	Estrutura interna da bolha	27
Figura 14	Medição típica de velocidade em um escoamento turbulento	28
Figura 15	Geometria selecionadas pela AIAA para o evento de previsão de arrasto	30
Figura 16	Polar de arrasto nos testes da AIAA para previsão de arrasto (esquerda). Conver-	
-	gência da sustentação e do arrasto (direita)	31
Figura 17	Canal convergente-divergente	32
Figura 18	Dimensões externas do canal convergente-divergente	32
Figura 19	Ângulos de convergência e divergência do canal	33
Figura 20	Geometria original estabelecida por (PINEDO, 2018)	33
Figura 21	Junções modificadas do canal convergente-divergente para um ângulo de diver-	
	gência $\beta = 4^{\circ}$	33
Figura 22	Condições de contorno da geometria	34
Figura 23	Condições de contorno da placa plana	34
Figura 24	Geometria placa plana	35
Figura 25	Resíduos numéricos da simulação sobre placa plana	35
Figura 26	Velocidade média na direção x na saída da placa plana	36
Figura 27	Perfil de velocidade na saída da placa plana	36
Figura 28	Propriedades para diferentes modelos de turbulência e para o modelo laminar no	
	canal convergente-divergente	37
Figura 29	Propriedades para o modelo de turbulência $k - \epsilon$	37
Figura 30	Numeração de arestas de 1 a 6	38
Figura 31	Numeração de arestas de 7 a 8	38
Figura 32	Numeração de arestas de 7 a 8	39

Figura 33	Distribuição da velocidade ao longo de uma linha horizontal no interior da bolha	
	de separação para as diferentes malhas	40
Figura 34	Resíduos da malha M1	41
Figura 35	Resíduos da malha M2	41
Figura 36	Resíduos da malha M3	41
Figura 37	Velocidade média na saída do canal para malha M1	42
Figura 38	Velocidade média na saída do canal para malha M2	42
Figura 39	Velocidade média na saída do canal para malha M3	42
Figura 40	Vértice na saída do canal de máxima energia cinética turbulenta da malha M1 .	43
Figura 41	Vértice na saída do canal de máxima energia cinética turbulenta da malha M2 .	43
Figura 42	Vértice na saída do canal de máxima energia cinética turbulenta da malha M2 .	43
Figura 43	Distribuição do coeficiente de atrito $C_f$ para diferentes velocidades na entrada	
	do canal convergente-divergente com um ângulo de divergência fixao de 4° $\cdot$ .	44
Figura 44	Distribuição do coeficiente de atrito $C_p$ para diferentes velocidades na entrada do	
	canal convergente-divergente com um ângulo de divergência fixado em $4^\circ$	44
Figura 45	Distribuição da derivada $\frac{\partial u}{dy}$ para diferentes velocidades na entrada do canal	
	convergente-divergente com um ângulo de divergência em $4^{\circ}$	45
Figura 46	Distribuição da vorticidade para diferentes velocidades na entrada do canal	
	convergente-divergente com um ângulo de divergência em $4^\circ$	45
Figura 47	Coeficiente de atrito $C_f$ para diferentes intensidades turbulentas considerando as	
	três velocidades de entrada no canal	46
Figura 48	Derivada $\frac{\partial u}{\partial y}$ para diferentes intensidades turbulentas considerando as três veloci-	
	dades de entrada no canal	47
Figura 49	Vorticidade para diferentes intensidades turbulentas considerando as três veloci-	
	dades de entrada no canal	47
Figura 50	Contorno de velocidade para um intensidade turbulenta de 0,5 % e uma veloci-	
	dade de 0,15 m/s	49
Figura 51	Contorno de velocidade para um intensidade turbulenta de 1 % e uma velocidade	
	de 0,15 m/s	49
Figura 52	Contorno de velocidade para um intensidade turbulenta de 1,5 % e uma veloci-	
	dade de 0,15 m/s	50
Figura 53	Contorno de velocidade para um intensidade turbulenta de 2 % e uma velocidade	
	de 0,15 m/s	51
Figura 54	Streamline da velocidade para um intensidade turbulenta de 0,5 % e uma veloci-	
	dade de 0,25 m/s	51
Figura 55	Bolha de separação para um intensidade turbulenta de 0,5 % e uma velocidade	
	de 0,25 m/s	52
Figura 56	Streamline da velocidade para um intensidade turbulenta de 1 % e uma velocidade	
	de 0,15 m/s	52

Figura 57	Bolha de separação para um intensidade turbulenta de 1 % e uma velocidade de	
	0,15 m/s	52
Figura 58	Bolha de separação para um intensidade turbulenta de 1 % e uma velocidade de	
	0,25 m/s	53
Figura 59	Bolha de separação para um intensidade turbulenta de 1 % e uma velocidade de	
	0,30 m/s	53
Figura 60	Streamline da velocidade para um intensidade turbulenta de 1,5 % e uma veloci-	
	dade de 0,15 m/s	53
Figura 61	Bolha de separação para um intensidade turbulenta de 1,5 % e uma velocidade	
	de 0,15 m/s	54
Figura 62	Perfis de velocidade para diferentes intensidades turbulentas com uma velocidade	
	fixa de 0,15 m/s	54
Figura 63	Perfis de velocidade para diferentes intensidades turbulentas com uma velocidade	
	fixa de 0,25 m/s	54
Figura 64	Perfis de velocidade para diferentes intensidades turbulentas com uma velocidade	
	fixa de 0,30 m/s	55
Figura 65	Distribuição do coeficiente de atrito $C_f$ para diferentes ângulos de divergência	
	com uma velocidade fixa de 0,15 m/s	56
Figura 66	Distribuição do coeficiente de pressão $C_p$ para diferentes ângulos de divergência	
	com uma velocidade fixa de 0,15 m/s	56
Figura 67	Distribuição da derivada $\frac{\partial u}{\partial y}$ para diferentes ângulos de divergência com uma	
	velocidade fixa de 0,15 m/s	56
Figura 68	Distribuição da vorticidade para diferentes ângulos de divergência com uma	
	velocidade fixa de 0,15 m/s	57

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 –	Parâmetros malha da placa plana	35
Tabela 2 –	Parâmetros das diferentes malhas analisadas	40
Tabela 3 –	Pontos de separação e recolamento e comprimento da bolha de separação para cada	
	velocidade na entrada do canal convergente-divergente	45
Tabela 4 –	Pontos de separação e recolamento e comprimento da bolha de separação para	
	diferentes intensidades turbulentas para uma velocidade de 0,15 m/s na entrada do	
	canal	48
Tabela 5 –	Pontos de separação e recolamento e comprimento da bolha de separação para	
	diferentes intensidades turbulentas para uma velocidade de 0,25 m/s na entrada do	
	canal	48
Tabela 6 –	Pontos de separação e recolamento e comprimento da bolha de separação para	
	diferentes intensidades turbulentas para uma velocidade de 0,30 m/s na entrada do	
	canal	48
Tabela 7 –	Pontos de separação e recolamento e comprimento da bolha de separação para	
	diferentes ângulos de divergência do canal convergente-divergente	55

### LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

- BSL Bolhas de Separação Laminar
- RANS Reynolds-Averaged Navier-Stokes
- TCC Trabalho de Conclusão de Curso
- UNESP Universidade Estadual Paulista

# LISTA DE SÍMBOLOS

$\alpha$	Ângulo de convergência
β	Ângulo de divergência
$\epsilon$	Representação da escala de comprimento l
ω	Frequência turbulenta
ν	Viscosidade cinemática
$\mu$	Viscosidade dinâmica
$\mu_t$	Viscosidade de vórtice
ρ	Densidade
δ	Espessura da camada limite
$ au_p$	Ponto de separação
$C_{f}$	Coeficiente de atrito
$C_p$	Coeficiente de pressão
k	Representação da escala de velocidade v
l	Escala de comprimento
p	Pressão
$p_a$	Pressão atmosférica
U	Velocidade externa na direção x
V	Velocidade externa na direção y
W	Velocidade externa na direção z
Р	Pressão externa
U(x)	Escoamento principal
и	Componente da velocidade na direção x
ν	Componente da velocidade na direção y
u'	Componente da velocidade na direção x que varia no tempo
<i>v</i> '	Componente da velocidade na direção y que varia no tempo

<i>w</i> '	Componente da velocidade na direção z que varia no tempo
p'	Componente da pressão que varia no tempo
$\frac{\partial \tau}{\partial y}\Big _{parede}$	Quantidade de movimento aplicada à parede
$y^+$	Distância da parede adimensional
dp/dx	Gradiente de pressão
$Re_{crit}$	Número de Reynolds crítico
$Re_x$	Número de Reynolds em função da direção x
$X_R$	Posição de recolamento da camada limite

# SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO, MOTIVAÇÃO E OBJETIVOS	16
1.1	Introdução	16
1.2	Motivação	17
1.3	Objetivos	17
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
2.1	Camada limite	18
2.1.1	Camada limite sobre uma placa plana	18
2.1.2	Influência do gradiente de pressão sobre a camada limite	19
2.1.3	Separação da camada limite	20
2.2	Bolhas de Separação Laminar	21
2.2.1	Bolhas de separação laminar curta	24
2.2.2	Bolhas de separação laminar longa	25
2.3	Modelos de turbulência	27
2.3.1	Modelo k- $\omega$ SST	29
3	DESENVOLVIMENTO	32
3.1	Metodologia	32
3.1.1	Geometria	32
3.1.2	Simulação sobre a placa plana	34
3.1.3	Análise dos modelos de turbulência	36
3.1.4	Análise da convergência de malha do canal convergente-divergente	38
3.2	Resultados e Discussão	42
3.2.1	Análise da variação da velocidade de entrada do canal convergente-divergente	42
3.2.2	Análise da variação da intensidade turbulenta	46
3.2.2.1	Propriedades	46
3.2.2.2	Contornos de velocidade	48
3.2.2.3	Streamline de velocidade e bolha de separação	50
3.2.2.4	Perfis de velocidade	53
3.2.3	Variação do ângulo de divergência	55
4	CONCLUSÃO	58
	REFERÊNCIAS	59

### 1 INTRODUÇÃO, MOTIVAÇÃO E OBJETIVOS

### 1.1 INTRODUÇÃO

Bolhas de separação podem desempenhar um papel significativo em muitos escoamentos em aerofólios, turbinas e superfícies sustentadoras em geral, especialmente a baixo número de Reynolds. O processo de formação e desaparecimento de bolhas de separação produz forças não-estacionárias, dificultando a concepção de uma nova seção do aerofólio. Em condições próximos ao estol, as fortes variações observadas nas propriedades das bolhas de separação também podem gerar assimetrias nas forças aerodinâmicas nas semi-asas gerando importantes momentos que afetarão a controlabilidade do avião. O estudo de bolhas de separação laminar representa um grande desafio, já que elas envolvem um grande número de fenômenos, tais como separação da camada limite, transição laminar-turbulento, desprendimento de vórtices, dentre outros.

Adicionalmente, podem surgir outros fenômenos devido à instabilidade das bolhas, como o "flapping", o "bursting" e a transição by-pass. "Flapping" é a oscilação do tamanho da bolha, "bursting" a mudança súbita nas características da bolha (longa-curta ou curta-longa) e a transição by-pass aquela que não passa pelos mecanismos conhecidos de instabilidade primária e secundária da camada limite.

(MAYLE, 1991) comenta em seu trabalho que toda essa variedade de fenômenos não eram consideradas, por exemplo, pelos projetistas de turbo-máquinas, uma vez que vários desses fenômenos não eram compreendidos. No projeto de compressores e turbinas de baixa pressão era considerado mais uma arte que uma ciência. Atualmente vários desses fenômenos ainda não são completamente compreendidos. A eficiência de uma turbina tem forte impacto no consumo de combustível do motor.

Estudos computacionais envolvendo o processo da bolha de separação tem recebido ainda muita atenção, especialmente na tentativa de encontrar um método de previsão mais refinado para análise de desempenho de aerofólios e a localização do ponto de transição na separação da bolha (DAM, 2002).

Algumas aplicações, tais como dispositivos de hipersustentação, são especialmente sensíveis a problemas com predição de transição. A transição em uma bolha de separação no bordo de fuga do eslate, por exemplo, pode mudar consideravelmente características do elemento principal, a asa da aeronave. Mesmo em casos mais simples, o uso dos métodos de predição tradicionais utilizados na análise do aerofólio não são suficientes. Existe portanto uma clara necessidade de aprimorar os métodos de previsão, e entender o surgimento de instabilidades do escoamento na separação de bolhas podem contribuir para o aprimoramento destes métodos segundo (GRUBER K. BESTEK, 1987)

(HORTON, 1968) e (GASTER, 1969) estudaram a bolha de separação laminar em uma placa plana e fizeram uma classificação em dois tipos: "curta" ou "longa" na qual estabeleceu-se um critério para predizer de qual tipo será a bolha de separação. Porém, questões relacionadas com a aparência, estrutura e comportamento das bolhas de separação permanecem abertas. Algumas destas questões sobre características aerodinâmicas de um aerofólio em condições de estol (antes e depois) foram encaminhadas primeiramente nos trabalhos de (GAULT, 1949) e (MCCULLOUGH, 1951). Eles observaram a existência de três diferentes tipos de bolhas de separação laminar: para aerofólios relativamente espessos, a separação ocorre perto do bordo de fuga e se move para cima com o aumento

do ângulo de ataque; a física envolvida é semelhante ao que acontece nos corpos-rombudos. Em aerofólios em ângulo de ataque moderado e baixo número de Reynolds, bolhas de separação são formadas na vizinhança da região da corda média e podem ser divididas em três tipos: laminar, de transição e turbulenta, dependendo do estado da fronteira entre o escoamento interno à camada limite e à bolha de separação (HÄGGMARK; HILDINGS; HENNINGSON, 2001). Por outro lado, em aerofólios finos a separação ocorre próximo ao bordo de ataque, imediatamente depois do pico de sucção.

### 1.2 MOTIVAÇÃO

O estudo de bolhas de separação laminar via métodos computacionais tem-se tornado cada vez mais importante, visto que esse fenômeno pode ocasionar incremento na intensidade de forças indesejáveis, como o arrasto ou estolagem da aeronave, além da perda da sustentação.

Desta forma, de modo a entender melhor esse fenômeno, esse trabalho buscou induzir numericamente o surgindo de bolhas de separação laminar (BSL) em uma geometria de um canal convergentedivergente, estudando ainda os efeitos da variação de determinados parâmetros da bolha, de modo a identificar, de forma precisa, a bolha de separação e qual o seu comportamento com a variação de certos parâmetros.

#### 1.3 OBJETIVOS

Esse trabalho tem por objetivo principal o estudo dos efeitos da intensidade de turbulência em bolhas de separação geradas em um canal convergente-divergente.

Concomitantemente, tem-se como objetivo, caracterizar as bolhas de separação laminar na geometria de um canal convergente-divergente, obtendo os pontos de separação e recolamento da camada limite, além do comprimento da bolha. Além disso, busca-se estudar o efeito da variação de certos parâmetros como a velocidade de entrada, a intensidade turbulenta e o efeito do ângulo de divergência na formação da bolha de separação.

Ademais, tem-se por objetivo, a aplicação de conceitos de aerodinâmica e mecânica os fluidos em um estudo computacional, e a construção de uma base de dados para futuras comparações com dados experimentais.

### 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 2.1 CAMADA LIMITE

Prandlt, em 1904, publicou a teoria da camada limite, ao observar que os escoamentos de fluidos com baixa viscosidade, como por exemplo, os escoamentos de ar e água, podem ser divididos em uma camada viscosa delgada, denominada camada-limite, próxima às superfícies sólidas e interfaces, ligada a uma camada externa que pode ser considerada não viscosa, na qual são válidas as equações de Euler e Bernoulli. Assim, a camada limite se tornou uma ferramenta importante na análise de escoamentos (WHITE, 2018)

Segundo (SCHLICHTING; GERSTEN, 2017), no caso de escoamentos em que a distribuição de pressão se relaciona com a teoria dos fluidos ideais, como no caso de um aerofólio, a influência da viscosidade em um alto número de Reynolds se restringe a uma fina camada na proximidade da parede sólida do corpo. Assim, o fluido cola na parede, devido ao fato da força de atrito retardar o movimento do fluido em uma fina camada próxima a parede, denominada camada limite, na qual a velocidade aumenta partindo do zero na parede, até a velocidade externa do escoamento sem atrito.

Concomitantemente, a análise da camada limite pode ser utilizada para calcular os efeitos viscosos próximos a parede sólidas e sobrepor esses efeitos ao escoamento não viscoso externo ao corpo. Assim, essa sobreposição dos efeitos viscosos é melhor visualizada à medida que se aumenta o número de Reynolds, de modo que, conforme relatado por Prandlt, um escoamento com alto número de Reynolds é mais aplicável a um tratamento de camada limite.(WHITE, 2018).

A Figura 1 ilustra escoamentos com baixo e alto número de Reynolds sobre uma placa plana aguda. Observa-se uma corrente uniforme U movendo-se paralelamente a uma placa plana de comprimento L, de modo que se o número de Reynolds, dado por  $UL/\nu$ , for baixo, a região viscosa é mais ampla, se extendendo a montante e para os lados da placa plana.(WHITE, 2018).

Além disso, tem-se que a placa retarda a corrente uniforme, de modo que pequenas variações nos parâmetros do escoamento causem grandes alterações nas distribuições de pressão ao longo da placa (WHITE, 2018).

A espessura da camada-limite  $\delta$  é definida como o lugar geométrico dos pontos no qual a velocidade *u* paralela à placa alcança 99% da velocidade externa *U* (WHITE, 2018).

#### 2.1.1 Camada limite sobre uma placa plana

Como solução clássica da teoria da camada limite tem-se o escoamento sobre a placa plana, o qual pode ser tanto laminar como turbulento. Assim, as fórmulas para o escoamento sobre uma placa plana são apresentadas nas equações 1 e 2.

Para escoamento laminar com  $10^3 < Re_x < 10^6$ :

$$\frac{\delta}{x} = \frac{5,0}{Re_x^{1/2}}$$
(1)



Figura 1 – Comparação dos escoamentos em torno de uma placa plana aguda com números de Reynolds baixo e alto: (a) escoamento do Re baixo, laminar; (b) escoamento com Re alto

Fonte: (WHITE, 2018)

Para escoamento turbulento com  $Re_x > 10^6$ :

$$\frac{\delta}{x} = \frac{0,16}{Re_x^{1/7}}$$
(2)

 $Re_x = Ux/\nu$  é denominado número de Reynolds local do escoamento ao longo da superfície da placa plana, de modo que o escoamento é considerado turbulento quando  $Re_x > 10^6$ , aproximadamente (WHITE, 2018).

A Figura 2 ilustra o crescimento da camada limite sobre uma placa plana. A transição da camada limite de laminar para turbulenta em uma placa plana é ilustrada na Figura 3. Nessa Figura observamos que a camada limite é laminar por uma curva distância a jusante do bordo de ataque, de modo que haja a transição em uma região da placa, a qual se estente para jusante até o ponto em que a camada limite se torna turbulenta, conforme relatado por (FOX ALAN T. MCDONALD, 2014).

#### 2.1.2 Influência do gradiente de pressão sobre a camada limite

A separação do escoamento, apresentada por Prandlt, é originada pela perda excessiva de quantidade de movimento próximo à parede em uma camada limite que buscar mover-se a jusante do escoamento contra um aumento de pressão, dp/dx > 0, o qual é denominado de *gradiente adverso de pressão* (WHITE, 2018). Por outro lado, o caso de pressão descrescente dp/dx < 0 é denominado de *gradiente de pressão favorável*, sendo que nesse caso não haverá a separação do escoamento. Assim, em um





Fonte: (WHITE, 2018)





Fonte: (FOX ALAN T. MCDONALD, 2014)

escoamento sobre um corpo imerso, o gradiente de pressão favorável ocorre na parte frontal do corpo, enquanto o gradiente de pressão adverso ocorre na região traseira do corpo (WHITE, 2018).

#### 2.1.3 Separação da camada limite

A separação da camada limite pode ser explicada a partir da segunda derivada da velocidade u da parede. Considerando a equação da quantidade de movimento aplicada à parede, sendo u = v = 0, tem-se as Equações 3 e 4 aplicadas tanto para escoamentos laminares quanto para turbulentos (WHITE, 2018).

$$\frac{\partial \tau}{\partial y}|_{parede} = \mu \frac{\partial^2 u}{\partial y^2}|_{parede} = -\rho U \frac{dU}{dx} = \frac{dp}{dx}$$
(3)

$$\frac{\partial^2 u}{\partial y^2}|_{parede} = \frac{1}{\mu} \frac{dp}{dx} \tag{4}$$

Desta forma, com um gradiente de pressão adverso, a segunda derivada da velocidade é positiva na parede, devendo ser negativa na camada externa ( $y > \delta$ ), de modo que haja uma ligação suave com o escoamento principal U(x). Logo, a segunda derivada deverá passar por zero em algum ponto da camada limite, em um ponto de inflexão, sendo que qualquer perfil de camada limite com gradiente de pressão adverso deve possuir um formato característica em forma de S (WHITE, 2018).

A Figura 4 ilustra o caso geral do efeito do gradiente de pressão. Nessa figura, observa-se que, no caso de um gradiente de pressão favorável, o perfil é mais arredondado, não havendo ponto de inflexão, de forma que não seja possível haver separação e os perfis laminares desse caso são bastante resistentes a transição da camada limite de laminar para turbulenta (WHITE, 2018).

Concomitantemente, em um gradiente de pressão nulo, como no caso de um escoamento sobre uma placa plana, o ponto de inflexão ocorre sobre a própria parede, não havendo separação e o escoamento transicionará para um  $Re_x$  não superior a aproximadamente  $3 \times 10^6$  (WHITE, 2018).

Já no caso de um gradiente de pressão adverso, um ponto de inflexão, denotado por PI, ocorre na camada limite, com uma distância da parede que aumenta com a intensidade do gradiente adverso de pressão. Assim, para um gradiente fraco, não haverá separação do escoamento, podendo haver transição para turbulência a um Reynolds de aproximadamente  $10^5$ . No caso de um gradiente moderado, atinge-se uma condição crítica na qual o cisalhamento na parede é nulo ( $\partial u/\partial y = 0$ ). Esse ponto é definido como o *ponto de separação* ( $\tau_p = 0$ ), uma vez que qualquer gradiente mais elevado acarretará em um fluxo reverso junto à parede (WHITE, 2018).

Outro exemplo é o escoamento em um duto formado por bocal, garganta e difusor, conforme ilustrado na Figura 5. O escoamento no bocal possui um gradiente de pressão favorável, não havendo separação, assim como no escoamento na garganta, no qual o gradiente de pressão é aproximadamente zero. Contudo, o difusor, a partir da expansão de área, gera uma velocidade decrescente que resulta em uma pressão crescente e um gradiente de pressão adverso (WHITE, 2018).

Desta forma, caso o ângulo do difusor seja muito elevado, o gradiente adverso será excessivo, resultando na separação da camada limite em um ou em ambos os lados, além de fluxo reverso, aumento de perdas e uma recuperação fraca de pressão. Esse fenômeno é denominado como *estol de difusor*, também utilizado em aerodinâmica de aerofólios para denotar a separação massiva da camada limite sobre um aerofólio (WHITE, 2018).

Outro exemplo é o escoamento externo sobre um aerofólio, havendo a transição da camada limite e a separação da mesma, conforme ilustrado na Figura 6. Na Figura 6, segundo (FOX ALAN T. MCDONALD, 2014), tem-se que o escoamento da corrente livre dividi-se no ponto de estagnação, percorrendo o aerofólio, de modo que o fluido em contato com a superfície é acelerado devido a condição de não deslizamento. Assim, camadas limites se formam tanto na superfície superior quanto na superfície inferior do aerofólio. O escoamento da camada-limite é inicialmente laminar, havendo a transição de laminar para turbulenta nos pontos indicados pela letra "T", de modo que a camada limite turbulenta cresce mais rapidamente que a laminar.

Desta forma, havendo uma região de pressão crescente, ou seja, um gradiente de pressão adverso que desacelera as partículas fluidas, pode ocorrer a separação da camada limite nos pontos indicados pela letra "S"na Figura 6. Por fim, o fluido que estava nas camadas limites sobre a superfície do aerofólio forma a esteira viscosa atrás dos pontos de separação. (FOX ALAN T. MCDONALD, 2014).

#### 2.2 BOLHAS DE SEPARAÇÃO LAMINAR

As bolhas de separação laminares surgem devido à um gradiente de pressão adverso, ou seja, o auamento da pressão ao longo da superfície de um canal convergente-divergente ou de um aerofólio, o

Figura 4 – Efeito do gradiente de ressão sobre os perfis de camada limite





qual faz com que haja a separação da camada limite na superfície. O aumento da pressão é ocasionado devido a queda da velocidade em direção ao bordo de fuga do aerofólio (HEPPERLE, 2018).

A Figura 7 ilustra uma bolha de separação laminar em um aerofólio. A curvatura no bordo de ataque dos aerofólios atrasa o surgimento do ponto de separação sobre a superfície, de modo que,o aumento do ângulo de ataque insere uma assimetria no escoamento causando o aumento da sustentação, surgindo assim, uma bolha de separação próxima ao bordo de fuga. Em um escoamento laminar, o aumento do número de Reynolds causa o deslocamento do ponto de separação da camada limite em direção ao bordo de ataque, ocasionando o aumento do arrasto e a redução da sustentação, havendo assim uma queda no desempenho. Com o aumento do ângulo de ataque, tem-se o aumento da sustentação, contudo, a partir do aumento da bolha de separação, pode-se ocorrer o fenômeno da estolagem, no qual o escoamento se separa da superfície, acarretando uma forte perda da sustentação (REZENDE, 2009).



Figura 5 - Crescimento da camada limite e separação em uma configuração bocal-difusor

Figura 6 - Detalhes do escoamento viscoso em torno de um aerofólio





laminar flow

turbulent flow

A separação da camada limite e o fenômeno da estolagem são ilustrados na Figura 8. Conforme constatado por (BROWN; STEWARTSON, 1969), as bolhas de separação laminar ocorrem em uma faixa de números de Reynolds em função da corda entre  $5 \times 10^{-5}$  e  $5 \times 10^{-6}$  de acordo com a geometria do aerofólio, o nível de turbulência do escoamento livre e ângulo de ataque.

Concomitantemente, as bolhas de separação laminar surgem quando a camada limite laminar se





Fonte: (REZENDE, 2009)

separa antes da transição para turbulência. Assim, segundo (BROWN; STEWARTSON, 1969), o fluxo laminar separado apresenta uma elevada instabilidade, de modo que, após o ponto de separação, como existe um crescimento nas perturbações para que o escoamento se torne turbulento, existe um aumento da transferência de momentum através das diferentes regiões da camada cisalhante. Esse fenômeno ocasiona um aumento da quantidade de movimento próximo a parede, promovendo o recolamento da bolha, levando ao recolamento do escoamento, o que gera uma região fechada de baixo fluxo de momentum conhecida como bolha de separação laminar (PINEDO, 2018).

O fenômeno da separação do escoamento laminar e a formação de bolhas de separação laminar (BSL) possuem uma grande relação com com as propriedades aerodinâmicas das superfícies de sustentação que operam em altos ângulos de ataque (RODRÍGUEZ; GENNARO; JUNIPER, 2013).

A estrutura típica de uma bolha de separação de uma camada limite laminar 2D foi descrita por (HORTON, 1968) e pode ser vista na Figura 9. Na Figura 9, existe um gradiente de pressão adverso, após o pico de sucção do bordo de ataque, ocasionado devido à curvatura do aerofólio e ao ângulo de ataque, de modo que, caso esse gradiente de pressão seja suficiente forte, haverá a separação da camada limite e o surgimento de uma mistura separada. Esta camada de mistura apresenta uma região com movimento de fluido lento e na direção oposta ao escoamento, a qual é denominada zona de recirculação. A camada de mistura é bastante instável, podendo ocorrer a transição do escoamento laminar para o turbulento, de forma que uma camada de mistura forte fornecida pela turbulência induz o recolamento do escoamento (RODRÍGUEZ; GENNARO; JUNIPER, 2013).

#### 2.2.1 Bolhas de separação laminar curta

A bolha curta laminar surge após o ponto de separação da camada limite, o qual é determinado pelo número de Reynolds e pela geometria do aerofólio, sendo a camada limite laminar desenvolvida na superfície do aerofólio, conforme indica a Figura 10, e devido a curvatura, existe uma queda na pressão.



Figura 9 - Descrição do escoamento da bolha de separação

Fonte: (HORTON, 1968)

Assim, após a passagem pelo ponto de mínima pressão, existe um gradiente de pressão adverso na camada limite, a qual é desacelerada e o fluido próximo à superfície passa a se mover no sentido oposto, ocasionando a separação da camada limite (REZENDE, 2009).

Figura 10 – Bolha curta laminar



Fonte: (CROMPTON, 2001)

Após a separação, caso o número de Reynolds do escoamento seja elevado, a camada cisalhante laminar sofrerá transição para o regime turbulento, de modo que essa região apresentará uma energia cinética mais alta e atingirá novamente a superfície do aerofólio, gerando o fenômeno denominado recolamento da camada limite. Em seguida ao recolamento, o escoamento é dividido em duas correntes: uma camada limite turbulenta, a qual se direciona ao bordo de fuga; e uma segunda vertente, na qual ocorre o desvio para o montante do aerofólio, completando assim a recirculação (REZENDE, 2009).

Aumentando-se ainda mais o número de Reynolds, eleva-se a energia da camada de fluido, a qual passa a vencer o gradiente de pressão adverso, diminuindo a extensão da bolha até que não haja mais a separação da camada limite (REZENDE, 2009). A Figura 11 apresenta os fenômenos descritos para a bolha curta laminar.

#### 2.2.2 Bolhas de separação laminar longa

Em um escoamento sobre uma placa plana fina inclinada observa-se a formação de uma bolha fina e alongada, denominada de bolha de separação laminar longa, a qual surge devido à separação abrupta causada pela geometria. Assim, a camada cisalhante que se separa na placa é instável para

#### Figura 11 – Bolha curta laminar



certos níveis de escoamento reverso, de modo que existe o desprendimento de vórtices da ponta da placa, os quais se propagam ao longo da camada cisalhante livre (REZENDE, 2009). A Figura 12 ilustra o escoamento sobre uma placa fina inclinada.





Fonte: (REZENDE, 2009)

Segundo (CROMPTON, 2001), a camada cisalhante separada sofre transição imediatamente após o descolamento da placa, de modo que após a transição, existe um aumento da energia cinética turbulenta devido ao alto nível de cisalhamento. Tal aumento da energia cinética turbulenta torna a camada cisalhante mais espessa, fazendo com que o escoamento seja deslocado de volta para a superfície da placa. O recolamento do escoamento ocorre a uma distância  $X_R$ , conforme indicado na Figura 12, de modo que nesse ponto existe a bifurcação do escoamento, onde parte do fluxo se direciona a jusante da placa e a outra parte retorna a montante, completando assim a bolha de recirculação (REZENDE, 2009).

Concomitantemente, a camada limite que se forma a jusante do ponto de recolamento é turbulenta, apresentando a possibilidade da separação devido aos gradientes de pressão adversos. Por outro lado, a camada limite que vai em direção ao bordo de ataque está sujeita ao regime turbulento, sofrendo um gradiente de pressão favorável, o qual é formado entre o ponto de recolamento, sendo o ponto de pressão máxima, e a região central, onde existe a pressão mínima. Tal região de pressão mínima ocorre

para proporcionar a força centrípeta suficiente para manter a recirculação do fluido, de modo que entre essa região e o bordo de ataque, existe um gradiente de pressão adverso, o qual pode gerar uma nova separação da camada limite, formando uma bolha de recirculação secundária. Esse fenômeno ocorre, uma vez que após essa nova separação, o fluido provavelmente recolará antes de reencontrar as linhas de corrente oriundas da primeira separação da camada limite (REZENDE, 2009).

A Figura 13 apresenta a bolha de separação principal e a bolha de separação secundária.

Figura 13 – Estrutura interna da bolha



Fonte: (COLLIE, 2005)

#### 2.3 MODELOS DE TURBULÊNCIA

A caracterização de escoamentos laminares e turbulentos é baseada no número de Reynolds, de modo que em experimentos que possuem um número de Reynolds abaixo do Reynolds crítico  $Re_{crit}$ , o escoamento é organizado, de modo que as camadas de escoamento deslizam umas sobre as outras de forma ordenada. Assim as condições de parede não são alteradas em função do tempo, sendo esse escoamento denominado de laminar (VERSTEEG; MALALASEKERA, 2007).

Já em escoamentos com número de Reynolds superior ao número de Reynolds crítico  $Re_{crit}$  existem grades alterações nas propriedades do escoamento, como por exemplo a velocidade, tornando-o aleatório e caótico. Esse regime é denominado de escoamento turbulento (VERSTEEG; MALALASEKERA, 2007). Uma medição típica de velocidade ilustrada na Figura 14.

A velocidade apresentada na Figura 14 é decomposta, a partir da decomposição de Reynols, em dois termos, um valor médio constante U e um termo que varia no tempo u'(t), sendo a velocidade resultante u(t) = U + u'(t). Sendo assim, o escoamento turbulento é caracterizado pelo velor médio constante das propriedades (U, V, W, P) e as variações dessas propriedades (u', v', w', p'). Além disso, por mais que existam variações em apenas uma ou duas dimensões espaciais, as flutuações turbulentas possuem um caráter espacial tridimensional (VERSTEEG; MALALASEKERA, 2007).

Os modelos de turbulência podem ser divididos em três grupos:

• Modelos de turbulência do tipo Reynolds-averaged Navier-Stokes (RANS): focado no escoamento médio e nos efeitos da turbulência no valor médio das propriedades do escoamento. As equações de Navier-Stokes são calculadas em seus valores médios em função do tempo, antes da aplicação dos métodos numéricos. Assim, termos extras surgem no tempo médio das equações do escoamento em função das interações entre as diferentes flutuações turbulentas. Esses termos extras são determinados

Figura 14 - Medição típica de velocidade em um escoamento turbulento



Fonte: (VERSTEEG; MALALASEKERA, 2007)

a partir dos modelos de turbulência clássicos, como o modelo k- $\epsilon$ , modelo de tensões de Reynolds, o modelo k- $\omega$ , o modelo  $k - k_l - \omega$  e o modelo SST k- $\omega$  (VERSTEEG; MALALASEKERA, 2007).

• *Large eddy simulation*: forma que trata dos cálculos na vizinhança de grandes vórtices, sendo que esse método envolve a filtragem no espaço das equações de Navier-Stokes, de modo que sejam considerados os vórtices maiores e os vórtices menores têm o seu efeito modelado por um modelo sub-malha. Os efeitos, devido aos vórtices menores, no escoamento resolvido são incluídos a partir de um método em escala de sub-grade (VERSTEEG; MALALASEKERA, 2007).

• Direct numerical simulation (DNS): esse modelo considera tanto o valor médio da velocidade no escoamento quanto as flutuações da velocidade devido à turbulência. As equações instáveis de Navier-Stokes são resolvidas por meio de malhas finas que podem resolver as escalas de comprimento de Kolmogorov em que a energia de dissipação ocorre em passos de tempo pequenos para resolver o período de flutuações mais rápidas (VERSTEEG; MALALASEKERA, 2007).

O modelo de turbulência k- $\epsilon$  apresenta duas equações como base, uma para k, que representa a energia cinética turbulenta, e outra para  $\epsilon$ , que simboliza a taxa de dissipação turbulenta, utilizadas para representar a escala de velocidade v e a escala de comprimento l, conforme apresentado nas Equações 5 e 6 (VERSTEEG; MALALASEKERA, 2007).

$$v = k^{1/2} \tag{5}$$

$$l = \frac{k^{3/2}}{\epsilon} \tag{6}$$

Já o modelo *k*- $\omega$  utiliza, como segunda variável além do *k*, a frequência turbulenta  $\omega = \epsilon/k$  Logo, a escala de comprimento é dada por  $l = \sqrt{k}/\omega$  (VERSTEEG; MALALASEKERA, 2007).

Assim a viscosidade do vórtice é dada pela Equação 7.

$$\mu_t = \rho k / \omega \tag{7}$$

#### **2.3.1** Modelo k- $\omega$ SST

O modelo k- $\omega$  SST utiliza os maiores benefícios dos modelos k- $\omega$  e k- $\epsilon$ , sendo utilizado principalmente k- $\omega$  (REZENDE, 2009).

Concomitantemente, em escoamentos onde existe a formação da camada limite, na região viscosa próxima a parede, o modelo k- $\omega$  é superior ao modelo k- $\epsilon$ , uma vez que é mais eficiente em situações de gradiente de pressão adverso. Contudo, o modelo k- $\omega$ , na corrente livre, requer uma condição de contorno diferente de zero para  $\omega$ , de modo que a solução final é sensível a essa condição de contorno. Assim, o modelo k- $\epsilon$  não apresenta essa sensibilidade (REZENDE, 2009).

Sendo assim, o modelo k- $\omega$  SST combina a formulação robusta e precisa, próxima a parede, do modelo k- $\omega$ , com a independência, na corrente livre, do modelo k- $\epsilon$  (REZENDE, 2009).

O desenvolvimento do modelo k- $\omega$  SST foi inspirado na necessidade de uma precisão acurada para escoamentos aeronáuticos com fortes gradientes de pressão adverso e com separação da camada limite. Assim, considera-se o modelo k- $\omega$ , o qual é mais preciso nas proximidades da parede, sendo bem sucedido para escoamentos com gradientes de pressão adverso, mas que não é adequado para escoamentos com separação devido à pressão. Além disso, combina-se o fato do modelo k- $\epsilon$  ser menos sensível no escoamento livre fora da camada limite (MENTER, 2003).

O modelo k- $\omega$  SST foi inicialmente utilizado para aplicações aeronáuticas, mas devido a uma formulação adequada na região próxima a parede, reduziu-se a resolução de grade nesse região, proporcionando uma melhoria para a indústria de transferência de calor. Além disso, esse modelo é benéfico para a formulação *Detached Eddy Simulation* (DES) utilizada na indústria (MENTER, 2003). A formulação do modelo k- $\omega$  SST é descrita nas Equações 8,9, 10.

$$\frac{\partial \rho k}{\partial t} + \frac{\partial \rho U_i k}{\partial x_i} = \tilde{P}_k - \beta^* \rho k \omega + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ (\mu + \sigma_k \mu_t) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right]$$
(8)

$$\frac{\partial(\rho\omega)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho U_i\omega)}{\partial x_i} = \alpha^2 - \beta\rho\omega^2 + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ (\mu + \sigma_\omega\mu_t) \frac{\partial\omega}{\partial x_i} \right] + 2(1 - F_1)\rho\sigma_{w^2} \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_i} \frac{\partial\omega}{\partial x_i}$$
(9)

Sendo  $F_1$  definido na Equação 10.

$$F_1 = tanh\left[min\left[max\left(\frac{\sqrt{k}}{\beta^*\omega y}, \frac{500v}{y^2\omega}\right), \frac{4\rho\sigma_{w^2}k}{CD_{k\omega}y^2}\right]\right]$$
(10)

Onde  $CD_{k\omega} = max(2\rho\sigma_{\omega^2}\frac{1}{\omega}\frac{\partial k}{\partial x_i}\frac{\partial \omega}{\partial x_i}, 10^{-10})$ , sendo y a distância a parede mais próxima.

 $F_1$  é igual a zero longe da superfície (modelo k- $\epsilon$ ) e se torna igual a 1 dentro da camada limite (modelo k- $\omega$  (MENTER, 2003).

A viscosidade turbulenta é apresentada na Equação 11.

$$v_t = \frac{a_1 k}{max(a_1\omega, SF_2)}$$
(11)

Onde S é uma medida constante da taxa de deformação e  $F_2$  é uma segunda função, apresentada na Equação 12

$$F_2 = tanh\left[\left[max\left(\frac{2\sqrt{k}}{\beta^*\omega y}, \frac{500v}{y^2\omega}\right)\right]^2\right]$$
(12)

Um limitador de produção é utilizado nesse modelo para evitar o acúmulo de turbulência na região de estagnação (MENTER, 2003). Esse limitador é apresentado na Equação 13

$$P_{k} = \mu_{t} \frac{\partial U_{i}}{\partial x_{j}} \left( \frac{\partial U_{i}}{\partial x_{j}} + \frac{\partial U_{j}}{\partial x_{i}} \right) \to \tilde{P}_{k} = \min(P_{k}, 10 \cdot \beta^{*} \rho k \omega)$$
(13)

Destaca-se que todas as constantes são calculadas a partir da combinação de constantes dos dois modelos, k- $\omega$  e k- $\epsilon$ , por meio da seguinte expressão  $\alpha = \alpha_1 F + \alpha_2(1 - F)$ . Assim, as constantes do modelo k- $\omega$  SST são:  $\beta^*=0.09$ ,  $\alpha_1=5/9$ ,  $\beta_1=3/40$ ,  $\sigma_{k1}=0.85$ ,  $\sigma_{\omega 1}=0.5$ ,  $\alpha_2=0.44$ ,  $\beta_2=0.0828$ ,  $\sigma_{k2}=1$  e  $\sigma_{\omega 2}=0.856$  (MENTER, 2003).

Como aplicação do modelo SST em escoamentos aerodinâmicos tem-se a seleção desse modelo pela CFX para contribuir com os testes do segundo evento de previsão de arrasto da AIAA (http://aaac.larc.nasa.gov/tsab/cfdlarc/aiaa-dpw/) (MENTER, 2003).

Assim duas geometrias foram selecionadas pela AIAA, as quais são apresentadas na Figura Figura 15.

Figura 15 - Geometria selecionadas pela AIAA para o evento de previsão de arrasto



Fonte: (MENTER, 2003)

As malhas com baixo número de Reynolds possuem células hexaédricas de 5,83m (WB) e 8,43m (WBNP), de modo que a convergência do arrasto ocorreu por volta de 120 à 150 passos de tempo. A Figura 16 Figura apresenta a polar de arrasto dos resultados obtidos com os dados experimentais, além do histórico de convergência (MENTER, 2003).

Desta forma, a partir da Figura 16, observa-se que os resultados simulados são bem próximos aos dados experimentais, de modo que os modelos de turbulência do tipo RANS são precisos para simular configurações de aeronaves (MENTER, 2003).

Figura 16 – Polar de arrasto nos testes da AIAA para previsão de arrasto (esqeurda). Convergência da sustentação e do arrasto (direita)



#### **3 DESENVOLVIMENTO**

#### 3.1 METODOLOGIA

#### 3.1.1 Geometria

No desenvolvimento desse trabalho foi utilizada uma geometria de um canal convergente-divergente, o qual é apresentado na Figura 17, de modo que o canal deste trabalho utilizou-se de algumas dimensões externas do canal proposto por (PINEDO, 2018), as quais são apresentadas na Figura 18.



Figura 17 – Canal convergente-divergente

Figura 18 – Dimensões externas do canal convergente-divergente



Fonte: Elaborada pelo autor

Além das dimensões externas, outros dois parâmetros geométricos considerados no estudo foram os ângulos de convergência e de divergência do canal, representados pelos símbolos  $\alpha$  e  $\beta$ , respectivamente, e são apresentados na Figura 19. Assim, estabeleceu-se  $\alpha = 35^{\circ}$  e inicialmente  $\beta = 4^{\circ}$ , conforme definido por (PINEDO, 2018).

Modificações em relação ao projeto desenvolvido por (PINEDO, 2018) nas junções da geometria foram conduzidas com objetivo se obter uma malha mais estruturada, conforme ilustrado na Figura 21, sendo a geometria original apresentada na Figura 20

As condições de contorno estabelecidas para a simulação na geometria estão apresentadas na Figura 22. Estabeleceu-se como condição de contorno no *inlet*, um perfil de velocidade extraído do *outlet* da simulação sobre uma placa plana. No caso da saída, ou seja, do *outlet*, estabeleceu-se a condição de contorno de pressão, enquanto nas demais arestas da geometria inseriu-se a condição de

Figura 19 – Ângulos de convergência e divergência do canal



Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 20 – Geometria original estabelecida por (PINEDO, 2018)



Fonte: Elaborada pelo autor





Fonte: Elaborada pelo autor

contorno de parede. Além disso, inseriu-se um ponto de sucção na garganta do canal, ou seja, no início da região de divergência, com uma velocidade de 0,02 m/s.

Desta forma, para obter a condição de contorno do *inlet* realizou-se simulações sobre uma placa plana.



Figura 22 - Condições de contorno da geometria

Fonte: Elaborada pelo autor

#### 3.1.2 Simulação sobre a placa plana

Considerando a geometria de uma placa plana, realizou-se simulações para diferentes dimensões dessa geometria e diferentes malhas, totalizando um conjunto de 8 malhas analisadas, buscando a malha que tivesse melhor convergência nos resultados e um perfil de velocidade desenvolvido no *outlet*, de modo que fosse similar à um perfil de Blasius. Nas simulações, considerou-se o ar como fluido do escoamento e a placa com material de alumínio, além do modelo laminar para simulação.

Como condições de contorno da placa plana nas simulações realizadas, considerou-se a velocidade de entrada no *inlet*, estabelecendo uma velocidade uniforme de 0,15 m/s. No *outlet* estabeleceu-se a condição de pressão de saída, enquanto na aresta superior da geometria inseriu-se a condição de simetria e na aresta inferior a condição de placa. Assim, todas essas condições são apresentadas na Figura 23.





Fonte: Elaborada pelo autor

Após as simulações e análises dos resultados, escolheu-se a geometria da placa plana com dimensões de 3m de comprimento e 0,5 de altura, sendo essa geometria apresentada na Figura 24.

Para geração da malha da placa plana, estabeleceu-se um *Face meshing* com método dos quadriláteros para toda a geometria. No *inlet* e no *outlet* inseriu-se um *Edge sizing* com um número de 100 divisões e um *Bias Factor* de 100. Já para as arestas superior e inferior da geometria estabeleceu-se um *Edge sizing* com um número de 600 divisões. Tais números de divisões foram estabelecidos considerando que o número de divisões na direção x da placa deve ser 6 vezes maior que o número de divisões na direção y, uma vez que o comprimento da placa é 6 vezes maior que a altura da placa. Os principais parâmetros da malha utilizadas nas simulações de um escoamento sobre a placa plana são apresentados resumidamente na Tabela 1.

#### Figura 24 – Geometria placa plana



Fonte: Elaborada pelo autor

Tabela 1 – Parâmetros malha da placa pla	ina
--	-----

Número de nós	60701
Número de elementos	60000
Máxima relação de aspecto	20,8
Qualidade ortogonal mínima	1
Qualidade de elemento máxima	0,954

Fonte: Produção do Próprio Autor.

Na Tabela 1 cada nó representa a junção entre dois ou mais elementos da malha, sendo que cada elemento possui um formato quadrilátero. A razão de aspecto é para cada elemento quadrilátero utilizando apenas os nós de canto dos elementos. A qualidade ortogonal é limitada pela faixa de valores entre 0 e 1, de modo que o valor 0 seja o pior possível e o valor 1 o melhor. Por fim, a qualidade de elemento fornece uma métrica de qualidade composta que varia entre 0 e 1. Essa métrica é baseada na razão entre o volume e a soma do quadrado dos comprimentos das arestas para elementos 2D quadriláteros ou triangulares, ou a raiz quadrada do cubo da soma do quadrado dos comprimentos das arestas para elementos 3D. Um valor de 1 indica um cubo ou quadrado perfeito, enquanto um valor de 0 indica que o elemento tem um volume zero ou negativo.

A convergência da solução computacional é apresentado na Figura 25, e o gráfico da velocidade média na direção x na saída da placa em função das iterações, pode ser visto na Figura 26 e indica a convergência da velocidade.



Figura 25 – Resíduos numéricos da simulação sobre placa plana

Fonte: Elaborada pelo autor



Figura 26 – Velocidade média na direção x na saída da placa plana

Fonte: Elaborada pelo autor

Desta forma, a partir do estudo de convergência compilados nas figuras Figura 25 e Figura 26 observa-se que houve convergência no resultados, uma vez que a velocidade média na saída da placa convergiu ao longo das iterações e que os resíduos atingiram uma ordem na faixa entre  $10^{-4}$  e  $10^{-10}$ .

O perfil de velocidade na saída da placa plana que será utilizado como condição de contorno na entrada do canal convergente-divergente, é apresentado na Figura 27.





Fonte: Elaborada pelo autor

#### 3.1.3 Análise dos modelos de turbulência

Após a definição da geometria, da malha e das condições de contorno da placa plana, analisou-se os diferentes modelos de turbulência e o laminar, de modo a estabelecer o modelo a ser utilizado no *setup* da simulação do canal convergente-divergente. Os modelos de turbulência analisados foram os seguintes: modelo  $k - \omega$ , modelo  $k - k_l - \omega$ , modelo  $k - \epsilon$  e modelo  $k - \omega$  SST.

Assim, realizou-se simulações para os diferentes modelos considerando uma velocidade uniforme de 0,15 m/s na entrada do canal convergente-divergente, considerando a água líquida como fluido, a qual possui uma densidade  $\rho = 998,2 \ kg/m^3$  e uma viscosidade dinâmica  $\mu = 0,001003 \ kg/m.s$ , de modo que a viscosidade cinemática  $\nu = \mu/\rho$ . Logo, a viscosidade cinemática do fluido utilizada nas

simulações foi  $\nu = 1,00481 \times 10^{-6} m^2/s$ , sendo extraídos os gráficos do coeficiente de atrito ( $C_f$ ), do coeficiente de pressão ( $C_p$ ), da derivada da velocidade  $\frac{\partial u}{\partial y}$  e a vorticidade.

Os resultados obtidos para as propriedades nos diferentes modelos são apresentados na Figura 28. As propriedades para o modelo de turbulência  $k - \epsilon$  podem ser vistas em Figura 29.

Figura 28 – Propriedades para diferentes modelos de turbulência e para o modelo laminar no canal convergente-divergente



Fonte: Elaborada pelo autor





Fonte: Elaborada pelo autor

Analisando gráficos da Figura 28 e da Figura 29, nota-se que o modelo laminar não é adequado, uma vez que apresenta grandes oscilações nas propriedades, e o modelo de turbulência escolhido para estudo e realização das demais simulações numéricas foi o modelo  $k - \omega$  SST, pois é um modelo mais refinado, permitindo a identificação mais precisa e a melhor visualização da bolha, além de ter sido o modelo utilizado por (PINEDO, 2018). Observamos que existe uma melhor visualização do gráfico nesse caso, sem muitas variações, sendo possível identificar com uma maior precisão a bolha de separação.

O modelo SST é um modelo híbrido que combina dois modelos de turbulência:

(i) O modelo  $k - \epsilon$ , que prevê com boa aproximação de fluxo livre, mas tem baixo desempenho em regiões de camada limite com gradientes de pressão adversos;

(ii) O modelo  $k - \omega$  que apresenta bom desempenho para o fluxo dentro do camada limite com gradientes de pressão moderados, mas apresenta sensibilidade em relação aos valores de nas regiões fora da camada limite.

Outro aspecto importante do modelo de turbulência SST é a capacidade de ter um tratamento de parede preciso e robusto, considerando a distância adimensional y<sup>+</sup> que relaciona a distância do primeiro elemento de malha fora a parede, sua velocidade de referência e a viscosidade do fluido. Além disso, para modelo  $k - \omega$  SST y<sup>+</sup> < 2.

#### 3.1.4 Análise da convergência de malha do canal convergente-divergente

A partir da definição do modelo de turbulência  $k - \omega$  SST para realização das simulações numéricas, realizou-se o estudo de convergência de malha escolha da malha mais adequada a qual os resultados estejam convergidos numericamente.

Na primeira malha analisada, denominada de M1, considerou-se o método de multizona de quadriláteros para todo o corpo da geometria. Considerou-se a numeração das arestas apresentada nas Figura 30 e Figura 31 e a face apresentada na Figura 32.



Figura 30 - Numeração de arestas de 1 a 6

Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 31 – Numeração de arestas de 7 a 8



Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 32 – Numeração de arestas de 7 a 8



Fonte: Elaborada pelo autor

A partir das arestas numeradas na Figura 30 e Figura 31 e a face apresentada na Figura 32, estabeleceu-se, para malha M2, que as arestas de número 1 possuem 50 divisões, as arestas de número 2 possuem 10 divisões, as arestas de número 3 possuem 3 divisões, as arestas de número 4 possuem 50 divisões, as arestas de número 5 possuem 130 divisões, as arestas de número 6 possuem 195 divisões, as arestas de número 7 possuem 40 divisões e as arestas de número 8 possuem 210 divisões. Além disso, inseriu-se um *Face meshing* com método dos quadriláteros na face apresentada na Figura 32.

Para a segunda malha analisada, denominada de M2, estabeleceu-se diferentes *Edge sizing*, considerando um número de 89 divisões nas arestas de número 1 e um número de 20 divisões nas arestas de número 2 apresentadas na Figura 30, com um comportamento *hard* e sem estiramento. Já nas arestas de número 3 considerou-se um número de 4 divisões e nas arestas de número 4 considerou-se um número de 80 divisões, todas com comportamento *hard* e sem estiramento.

Nas arestas de número 5 considerou-se um número de 182 divisões e nas arestas de número 6 considerou-se um número de 266 divisões, toda com comportamento *hard* e sem estiramento. Além disso, nas arestas de número 7, apresentadas na Figura 31, considerou-se um número de 65 divisões com comportamento *hard* e um estiramento de transição suave, enquanto nas arestas de número 8 considerou-se um número de 354 divisões com um comportamento *hard* e sem estiramento. Por fim, manteve-se o *Face meshing* com métodos dos quadriláteros na face da Figura 32 e o método de multizona de quadriláteros para todo o corpo da geometria.

No caso da terceira malha analisada, denominada M3, aumentou-se o número de elementos, de modo que as arestas de número 1 possuem 110 divisões, as arestas de número 2 possuem 30 divisões, as arestas de número 3 possuem 10 divisões, as arestas de número 4 possuem 100 divisões, as arestas de número 5 possuem 200 divisões, as arestas de número 6 possuem 290 divisões, as arestas de número 7 possuem 85 divisões e as arestas de número 8 possuem 400 divisões. Além disso, manteve-se o procedimento de *face meshing* e o método de multizona de quadriláteros para essa malha.

Desta forma, os parâmetros das três malhas M1, M2 e M3, do canal convergente-divergente são apresentados na Tabela 2.

Após a definição das três malhas analisadas, realizou-se simulações em 2D em cada uma das malhas, utilizando precisão dupla e o Modelo k- $\omega$  SST, considerando o perfil de velocidade extraído do *outlet* da placa plana, a qual foi simulada com uma velocidade de uniforme 0,15 m/s, na entrada no

	Malhas		
Parâmetro	M1	M2	M3
Número de nós	127749	311370	423111
Número de elementos	127020	310244	421800
Máxima relação de aspecto	53,5	144	250
Qualidade ortogonal mínima	0,814	0,82	0,822
Qualidade de elemento máxima	0,941	0,95	0,95

Tabela 2 – Parâmetros das diferentes malhas analisadas

canal convergente-divergente.

A partir dessas simulações, plotou-se o gráfico da distribuição da velocidade ao longo de uma linha horizontal, em y = 0,0075m, no interior da bolha de separação para as diferentes malhas, o gráfico dos resíduos para cada malha, além do gráfico da velocidade média na saída do canal e o gráfico do vértice de máxima energia cinética turbulenta na saída do canal. Tais gráficos foram obtidos para realização da análise de convergência de malha e são apresentadosFigura 33, Figura 34, Figura 35, Figura 36-Figura 45.





Fonte: Elaborada pelo autor

A partir da Figura 33 observa-se que existe uma convergência das três malhas, uma vez que as curvas se sobrepõem. Além disso, os gráficos da Figura 34-Figura 36 ilustram uma convergência dos resultados, uma vez que os resíduos obtidos são da ordem de  $10^{-4}$  a  $10^{-8}$ , de modo que os resíduos da malha M2 estabilizam com as iterações.

Os gráficos da velocidade média e da energia cinética turbulenta na saída do canal, apresentados da Figura 37-Figura 45, demonstram que existe a convergência dessas propriedades para as três malhas. Desta forma, como as três malhas analisadas apresentam convergência nos resultados, a malha escolhida para prosseguir com as demais simulações é a malha M2.

Outro parâmetro analisado foi a velocidade na restrição do canal convergente-divergente. Logo, considerando a velocidade da corrente livre como 0,15m/s, tem-se que a velocidade na restrição é de aproximadamente 0,5 m/s, havendo assim uma relação de contração de 3,33:1.











Fonte: Elaborada pelo autor





Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 37 – Velocidade média na saída do canal para malha M1



Fonte: Elaborada pelo autor





Fonte: Elaborada pelo autor





Fonte: Elaborada pelo autor

#### 3.2 RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 3.2.1 Análise da variação da velocidade de entrada do canal convergente-divergente

Após a definição da geometria, da malha a ser utilizada e das condições de contorno, iniciou-se, primeiramente, a análise da variação da velocidade de entrada do canal convergente-divergente. Para

Figura 40 – Vértice na saída do canal de máxima energia cinética turbulenta da malha M1



Fonte: Elaborada pelo autor







Figura 42 – Vértice na saída do canal de máxima energia cinética turbulenta da malha M2



Fonte: Elaborada pelo autor

essa análise, simulou-se a placa plana com velocidades e 0,15 m/s, 0,25 m/s e 0,30 m/s, extraindo o perfil de velocidade no *outlet* da placa para cada velocidade, e inserindo esse perfil na entrada do canal convergente-divergente. Além disso, utilizou-se uma intensidade turbulenta de 0,5% e um ângulo de

divergência de 4º no canal.

Desta forma, a partir das simulações das diferentes velocidades, extraiu-se os gráficos do coeficiente de atrito  $(C_f)$ , do coeficiente de pressão  $(C_p)$ , da derivada da velocidade u na posição y e da vorticidade, de modo que fosse visualizada a bolha de separação para cada velocidade na entrada do canal.

Os resultados obtidos para as diferentes velocidades na entrada do canal são apresentadas da Figura 43-Figura 46.

Figura 43 – Distribuição do coeficiente de atrito  $C_f$  para diferentes velocidades na entrada do canal convergente-divergente com um ângulo de divergência fixao de 4°



Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 44 – Distribuição do coeficiente de atrito  $C_p$  para diferentes velocidades na entrada do canal convergente-divergente com um ângulo de divergência fixado em 4°



Analisando da Figura 43-Figura 46, tem-se que para o gráfico do coeficiente de atrito e da vorticidade, o ponto de separação da camada limite, ou seja, o início da bolha, ocorre quando o gráfico atinge o valor de zero, de modo que o coeficiente de atrito e a vorticidade sejam nulos. Assim, o ponto de recolamento da camada limite, ou seja, o final da bolha de separação, ocorre quando o gráfico retorna para o valor igual a zero, de forma que o coeficiente de atrito e a vorticidade sejam nulos novamente.

Concomitantemente, a partir da Figura 43-Figura 46, observando o gráfico da derivada  $\frac{\partial u}{\partial y}$ , tem-se que o ponto de separação da camada limite ocorre quando a derivada  $\frac{\partial u}{\partial y}$  atinge o valor igual a zero e

Figura 45 – Distribuição da derivada  $\frac{\partial u}{\partial y}$  para diferentes velocidades na entrada do canal convergentedivergente com um ângulo de divergência em 4°



Figura 46 – Distribuição da vorticidade para diferentes velocidades na entrada do canal convergentedivergente com um ângulo de divergência em 4°



passa a assumir um valor negativo, passando para o quadrante abaixo do zero, e o ponto de recolamento da camada limite ocorre quando a derivada retorna para zero. Já no gráfico do coeficiente de pressão  $C_p$  a bolha de separação ocorre quando existe um platô na curva dessa propriedade.

Desta forma, os pontos de separação e de recolamento da camada limite, além do comprimento da bolha para cada velocidade na entrada do canal são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 - Pontos de separação e recolamento e comprimento da bolha de separação para cada velo	)ci-
dade na entrada do canal convergente-divergente	

Velocidade (m/s)	0,15	0,25	0,30
Ponto de separação (m)	0,5913	0,5733	0,5703
Ponto de recolamento (m)	0,9629	0,8281	0,7921
Comprimento da bolha (m) 0,3716 0,2548 0,2218			
Fonte: Produção do Próprio Autor.			

A partir da Tabela 3 e da Figura 43-Figura 46 observa-se que conforme se aumenta a velocidade na entrada do canal os pontos de separação e de recolamento da camada limite ocorrem em uma posição

mais a montante do canal convergente-divergente. Além disso, conforme se aumenta a velocidade, o comprimento da bolha de separação diminui, devido ao aumento do gradiente de pressão adverso.

#### 3.2.2 Análise da variação da intensidade turbulenta

#### 3.2.2.1 Propriedades

Outra análise realizada foi da influência da variação da intensidade turbulenta nos resultados das simulações no canal. Os valores da intensidade turbulenta considerados no estudo foram 0,5%, 1%, 1,5% e 2%, e as velocidade de 0,15 m/s, 0,25 m/s e 0,30 m/s na entrada no canal.

Os gráficos do coeficiente de atrito  $C_f$ , do coeficiente de pressão  $C_p$ , da derivada  $\frac{\partial u}{\partial y}$  e da vorticidade para as diferentes intensidades turbulentas são apresentados da Figura 47-Figura 49.

Figura 47 – Coeficiente de atrito  $C_f$  para diferentes intensidades turbulentas considerando as três velocidades de entrada no canal



Fonte: Elaborada pelo autor.

Desta forma, a partir dos gráficos da Figura 47-Figura 49 é possível observar que para a velocidade de 0,15 m/s na entrada do canal, existe bolha de separação para as intensidades turbulentas de 0,5%, 1% e 1,5%, de modo que para a intensidade turbulenta de 2% não se observa a formação de bolha de separação.

Já para as velocidade de 0,25 m/s e 0,30 m/s na entrada do canal, existe bolha de separação para as intensidades turbulentas de 0,5%, 1%, sendo que para as intensidades turbulentas de 1,5% e 2% não se observa a formação de bolha de separação.

Concomitantemente, as Tabelas 4,5 e 6 apresentam os pontos de separação e de recolamento da camada limite, além do comprimento da bolha para as diferentes intensidade turbulentas de cada velocidade de entrada no canal.





Figura 49 – Vorticidade para diferentes intensidades turbulentas considerando as três velocidades de entrada no canal



A partir das Tabelas 4,5, nota-se que conforme se aumenta a intensidade turbulenta, o ponto

Tabela 4 – Pontos de separação e recolamento e comprimento da bolha de separação para diferentes intensidades turbulentas para uma velocidade de 0,15 m/s na entrada do canal

Velocidade (m/s)	0,15			
Intensidade turbulenta (%)	0,5	1	1,5	
Ponto de separação (m)	0,5913	0,5973	0,6542	
Ponto de recolamento (m)	0,9629	0,882	0,7502	
Comprimento da bolha (m)	0,3716	0,2847	0,096	
Fonte: Elaborada pelo autor.				

Tabela 5 – Pontos de separação e recolamento e comprimento da bolha de separação para diferentes intensidades turbulentas para uma velocidade de 0,25 m/s na entrada do canal

Velocidade (m/s)	0,25			
Intensidade turbulenta (%)	0,5	1		
Ponto de separação (m)	0,5733	0,6003		
Ponto de recolamento (m)	0,8281	0,7891		
Comprimento da bolha (m)	0,2548	0,1888		
Fonte: Elaborada pelo autor.				

Tabela 6 – Pontos de separação e recolamento e comprimento da bolha de separação para diferentes intensidades turbulentas para uma velocidade de 0,30 m/s na entrada do canal

Velocidade (m/s)	0,30			
Intensidade turbulenta (%)	0,5	1		
Ponto de separação (m)	0,5703	0,6183		
Ponto de recolamento (m)	0,7921	0,7741		
Comprimento da bolha (m)	0,2218	0,1558		
Fonte: Flaborada pelo autor				

Fonte: Elaborada pelo autor.

de separação da camada limite ocorre a uma posição mais a jusante do canal, enquanto o ponto de recolamento ocorre em uma posição mais antecipada do canal. Portanto, conforme se aumenta a intensidade turbulenta, o comprimento da bolha de separação diminui, sendo que para intensidades turbulentas mais elevadas não existe mais bolha, ou seja, a bolha de separação desaparece.

#### 3.2.2.2 Contornos de velocidade

Plotou-se ainda os contornos da componente da velocidade na direção x conforme se aumenta a intensidade turbulenta. Assim, fixando a intensidade turbulenta em 0,5% e variando a velocidade para os valores de 0,15 m/s, 0,25 m/s e 0,30 m/s, tem-se um desses casos apresentado na Figura 50, sendo que normalizando as velocidades máxima e mínima para o contorno apresentado pela velocidade de entrada tem-se os resultados de -0,1465 e 4,6407, de modo que para o caso de 0,25 m/s o contorno de velocidade normalizado pela velocidade de entrada do canal está na faixa de -0,1465 até 4,512. Já para o caso de 0,30 m/s o contorno de velocidade normalizado varia de -0,1756 até 4,4967.

Em seguida, fixando a intensidade turbulenta em 1% e variando a velocidade, tem-se o contorno apresentado na Figura 51, de modo que esse contorno normalizado pela velocidade de entrada varida de -0,1288 até 4,594. Assim, para esse mesmo valor de intensidade turbulenta e uma velocidade de 0,25 m/s, o contorno de velocidade normalizado está na faixa entre -0,1429 e 4,496, enquanto para



Figura 50 – Contorno de velocidade para um intensidade turbulenta de 0,5 % e uma velocidade de 0,15 m/s

Fonte: Elaborada pelo autor

uma velocidade de 0,30 m/s o contorno de velocidade possui valores de máximo e mínimo de -0,1762 e 4,4733, respectivamente.

Figura 51 – Contorno de velocidade para um intensidade turbulenta de 1 % e uma velocidade de 0,15 m/s



Fonte: Elaborada pelo autor

Para a intensidade turbulenta de 1,5 % tem-se o contorno de velocidade da Figura 52 referente à

uma velocidade de 0,15 m/s, sendo que esse contorno normalizado pela velocidade de entrada de 0,15 m/s varia da faixa de -0,0576 até 4,5487. No caso da velocidade de 0,25 m/s, o contorno de velocidade normalizado varia de -0,1377 até 4,468. Já para 0,30 m/s, o contorno de velocidade normalizado está na faixa entre -0,1609 até 4,4733.

Figura 52 – Contorno de velocidade para um intensidade turbulenta de 1,5 % e uma velocidade de 0,15 m/s



Fonte: Elaborada pelo autor

Por fim, para uma intensidade turbulenta de 2 %, onde já não existe bolha de separação para nenhuma das velocidades, tem-se o contorno de velocidade da Figura 53, sendo que esse contorno normalizado pela velocidade de entrada de 0,15 m/s varia de -0,0520 até 4,55. Nesse caso, para a velocidade de 0,25 m/s, o contorno de velocidade normalizado varia de -0,1376 até 4,46. Já para a velocidade de entrada de 0,30 m/s, o contorno de velocidade normalizado varia de -0,1923 até 4,43.

Considerando os gráficos da Figura 50-Figura 53, além dos demais casos descritos para as diferentes velocidades, tem-se que, conforme se aumenta a velocidade na entrada do canal, a velocidade na direção x aumenta. Além disso, aumentando a intensidade turbulenta, a velocidade na direção x diminui.

#### 3.2.2.3 *Streamline* de velocidade e bolha de separação

Além do contorno de velocidade, plotou-se a *streamline* colorida de acordo com a velocidade na direção x, de modo que fosse possível visualizar a bolha de separação a partir dessas imagens, aplicando ainda um zoom na bolha de separação para facilitar a visualização.

Fixando a intensidade turbulenta em 0,5 % e variando a velocidade, tem-se o caso para 0,25 m/s, onde a *streamline* é apresentada na Figura 54, de modo que essa intensidade turbulenta é a que apresenta o maior comprimento da bolha, sendo possível visualizá-la na Figura 55.



Figura 53 – Contorno de velocidade para um intensidade turbulenta de 2 % e uma velocidade de 0,15 m/s

Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 54 – *Streamline* da velocidade para um intensidade turbulenta de 0,5 % e uma velocidade de 0,25 m/s



Fonte: Elaborada pelo autor

Para o caso da intensidade turbulenta de 1 %, tem-se os casos para as três velocidades apresentados da Figura 56-Figura 59, de modo que é possível observar por meio das imagens do zoom da bolha que, conforme se aumenta a velocidade, o comprimento da bolha diminui.



Figura 55 – Bolha de separação para um intensidade turbulenta de 0,5 % e uma velocidade de 0,25 m/s

Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 56 – *Streamline* da velocidade para um intensidade turbulenta de 1 % e uma velocidade de 0,15 m/s



Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 57 – Bolha de separação para um intensidade turbulenta de 1 % e uma velocidade de 0,15 m/s



Fonte: Elaborada pelo autor

Já no caso da intensidade turbulenta de 1,5 %, plotou-se a *streamline* para velocidade de 0,15 m/s, sendo essa a única em que existe a formação da bolha para essa intensidade turbulenta, sendo os gráficos apresentados na Figura 60 e na Figura 61. Assim, nota-se que conforme a intensidade turbulenta aumenta, o comprimento da bolha diminui.

Desta forma, observando os gráficos da Figura 50-Figura 61 é possível visualizar a bolha de separação para os diferentes casos, corroborando o que foi apresentado na Seção 3.2.2.1 e nas Tabelas 4, 5 e 6, de que o aumento da velocidade faz com que haja a redução do comprimento da bolha, devido



Figura 58 – Bolha de separação para um intensidade turbulenta de 1 % e uma velocidade de 0,25 m/s

Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 59 – Bolha de separação para um intensidade turbulenta de 1 % e uma velocidade de 0,30 m/s



Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 60 – *Streamline* da velocidade para um intensidade turbulenta de 1,5 % e uma velocidade de 0,15 m/s



Fonte: Elaborada pelo autor

ao aumento do gradiente de pressão adverso e que o aumento da intensidade turbulenta também reduz o comprimento da bolha.

#### 3.2.2.4 Perfis de velocidade

Considerando a velocidade na entrada do canal fixa e variando a intensidade turbulenta, plotou-se os perfis da velocidade na direção x (u) em função da posição y para uma posição x fixa do canal.



Figura 61 – Bolha de separação para um intensidade turbulenta de 1,5 % e uma velocidade de 0,15 m/s

Fonte: Elaborada pelo autor

Assim, extraiu-se quatro perfis para cada velocidade sendo esses nas seguintes posições: x = 0,5913 m, que representa o início da bolha para uma intensidade turbulenta de 0,5 % e velocidade de 0,15 m/s; x = 0,7771 m, que representa o meio da bolha para uma intensidade turbulenta de 0,5 % e velocidade de 0,15 m/s; x = 0,87 m, x = 0,9629 m, que representa o final da bolha para uma intensidade turbulenta de 0,5 % e velocidade turbulenta de 0,5 % e velocidade de 0,15 m/s; x = 0,87 m, x = 0,9629 m, que representa o final da bolha para uma intensidade turbulenta de 0,5 % e velocidade de 0,15 m/s; x = 0,87 m, x = 0,9629 m, que representa o final da bolha para uma intensidade turbulenta de 0,5 % e velocidade de 0,15 m/s.

Os resultados dos perfis de velocidade obtidos são apresentados da Figura 62-Figura 64.

Figura 62 – Perfis de velocidade para diferentes intensidades turbulentas com uma velocidade fixa de 0,15 m/s



Figura 63 – Perfis de velocidade para diferentes intensidades turbulentas com uma velocidade fixa de 0,25 m/s



Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 64 – Perfis de velocidade para diferentes intensidades turbulentas com uma velocidade fixa de 0,30 m/s



Fonte: Elaborada pelo autor

A partir da Figura 62, observa-se que existe escoamento reverso, o qual surge devido ao aumento do gradiente de pressão adverso, nos perfis em x = 0,7771 m para as intensidades turbulentas de 0,5 % e 1 % e em x = 0,87 m para intensidade turbulenta de 0,5 %.

Na Figura 63 nota-se que existe escoamento reverso apenas na posição x = 0,7771 m para intensidade turbulenta de 0,5 %.

Já no caso da Figura 64 não existe escoamento reverso para nenhum dos perfis analisados.

Desta forma, a partir da Figura 62-Figura 64, nota-se que o aumento da velocidade, assim como o aumento da intensidade turbulenta, geram a redução do escoamento reverso, o qual não é possível de ser visualizado em determinadas velocidades e intensidades turbulentas.

#### 3.2.3 Variação do ângulo de divergência

Uma última análise realizada foi a variação do ângulo de divergência do canal, simbolizado por  $\beta$ , de modo a visualizar o efeito dessa variação na bolha. Logo, realizou-se simulações para  $\beta = 4^{\circ}, \beta = 6^{\circ}$  e  $\beta = 8^{\circ}$ . Os resultados obtidos para a variação do ângulo  $\beta$  são apresentados da Figura 65-Figura 68.

A partir da Figura 65-Figura 68, é possível obter os pontos de separação e de recolamento da camada limite, assim como o comprimento da bolha para cada ângulo analisado, sendo esses parâmetros apresentados na Tabela 7.

Tabela 7 – Pontos de separação e recolamento e comprimento da bolha de separação para diferentes ângulos de divergência do canal convergente-divergente

Ângulo de divergência (°)	4	6	8	
Ponto de separação (m)	0,5913	0,4983	0,4534	
Ponto de recolamento (m)	0,9629	0,9375	-	
Comprimento da bolha (m)	0,3716	0,4392	-	

Fonte: Produção do Próprio Autor.

Considerando a Figura 65-Figura 68 e a Tabela 7, nota-se que conforme se aumenta o ângulo de divergência, os pontos de separação e recolamento da camada limite ocorrem em uma posição mais





Figura 66 – Distribuição do coeficiente de pressão  $C_p$  para diferentes ângulos de divergência com uma velocidade fixa de 0,15 m/s



Figura 67 – Distribuição da derivada  $\frac{\partial u}{\partial y}$  para diferentes ângulos de divergência com uma velocidade fixa de 0,15 m/s



antecipada do canal, de modo que o comprimento da bolha diminua com o aumento do ângulo. A redução do comprimento da bolha com o aumento do ângulo de divergência é explicada devido ao

# Figura 68 – Distribuição da vorticidade para diferentes ângulos de divergência com uma velocidade fixa de 0,15 m/s



aumento do gradiente de pressão adverso.

Além disso, para  $\beta = 8^{\circ}$ , é possível identificar o ponto de separação, ou seja, o início da bolha, mas não existe o ponto de recolamento da camada limite, não sendo possível extrair o comprimento da bolha.

#### 4 CONCLUSÃO

No desenvolvimento desse trabalho, estudou-se os diferentes modelos de turbulência, verificando como tais modelos interferem nas propriedades do escoamento e na bolha de separação, de modo que foi o escolhido o modelo k- $\omega$  SST para realização das simulações, uma vez que esse modelo se mostrou mais preciso e adequado para o prosseguimento das análises.

Concomitantemente, estudou-se o efeito da variação de determinados parâmetros na bolha de separação, observando que o aumento da velocidade na entrada do canal, de modo que foram analisadas três velocidades, faz com que o ponto de separação ocorra em uma posição mais a montante do canal, reduzindo ainda o comprimento da bolha, sendo isso ocasionado devido ao aumento do gradiente de pressão adverso. Já com o aumento da intensidade turbulenta, onde foram analisados três valores dessa propriedade, a separação da camada limite ocorre em uma posição mais a jusante do canal e o recolamento em uma posição mais a montante, havendo ainda a redução do comprimento da bolha, de modo que em um valor de intensidade turbulenta não é possível observar a formação da bolha. Assim, a intensidade turbulenta pode ser um mecanismo de controle da bolha.

Além das propriedades do escoamento, estudou-se os contornos de velocidade, as *streamlines* e os perfis para diferentes velocidades e intensidades turbulentas, observando que o aumento da intensidade turbulenta reduz a velocidade na direção x do canal, enquanto o aumento da velocidade na entrada do canal aumenta a velocidade u. Outro fenômeno observado, é que o aumento da velocidade e da intensidade turbulenta induz na redução do nível de escoamento reverso.

Outra análise realizada foi da variação do ângulo de divergência  $\beta$  do canal, considerando três valores  $\beta$ , de forma que conforme se aumenta o ângulo  $\beta$ , existe um aumento do gradiente de pressão adverso, ocasionando a redução do comprimento da bolha. Além disso, observou-se ângulos de divergência  $\beta$  superiores a 8°, o escoamento separa, no entanto, não se observou o recolamento.

### REFERÊNCIAS

BROWN, S.; STEWARTSON, K. Laminar separation. **Department of Mathematics, University College London**, v. 1, 1969.

COLLIE, S. Application of Computational Fluid Dynamics to Two-Dimensional Downwind Sail Flows. Tese (Doutorado) — University of Auckland, Auckland - New Zealand, 2005. PhD thesis, Department of Mechanical Engineering and Engineering Science of the University of Auckland.

CROMPTON, J. M. **The Thin Airfoil Leading Edge Separation Bubble**. Tese (Doutorado) — University of Bristol, Bristol - United Kingdom, 2001. PhD thesis, Department of Aeroespace Engineering University of Bristol.

DAM, C. van. The aerodynamics design of multi element high-lift systems for transport airplanes. **Progress in Aerospace Sciences**, v. 38, p. 101 – 144, 2002.

FOX ALAN T. MCDONALD, P. J. P. R. W. Introdução à Mecânica dos Fluidos. [S.1.]: LTC, 2014.

GASTER, M. The structure and behaviour of laminar separation bubbles. ARC R M, v. 3595, 1969.

GAULT, D. Boundary-layer and stalling characteristics of the naca 63-009 airfoil section. NACA, TN 1894, 1949.

GRUBER K. BESTEK, H. F. K. Interaction between a tollmien-schlichting wave and a laminar separation bubble. **AIAA Paper**, v. 8-10, p. 87–1256, 1987.

HEPPERLE, M. Laminar Separation Bubbles. 2018. Disponível em: <www.mh-aerotools.de/ airfoils/bubbles.htm>.

HORTON, H. Laminar separation in two and three-dimensional incompressible flow. **University of London**, 1968.

HORTON, H. A semi-empirical theory for the growth and bursting of laminar separation bubbles. **Aeronautical Research Council**, Technical Report ARC CP-1073, p. 44, 1969.

HÄGGMARK, C. P.; HILDINGS, C.; HENNINGSON, D. S. A numerical and experimental study of a transitional separation bubble. **Aerospace Science and Technology**, v. 5, 2001.

MAYLE, R. The role of laminar-turbulent transition in gas turbine engines. **Journal of Turbomachinery**, v. 113(4), p. 509 – 536, 1991.

MCCULLOUGH, D. G. G. Examples of three representative types of airfoil-section stall at low speed. **NACA**, TN 2502, 1951.

MENTER, M. K. e. R. L. F. R. Ten years of industrial experience with the sst turbulence mode. Software Development Department, ANSYS - CFX, p. 1 - 8, 2003.

PINEDO, O. E. H. **Projeto e Qualificação de um Aparato para o Estudo Experimental de Bolhas de Separação Laminar**. Rio de Janeiro, RJ - Brasil: [s.n.], 2018. Dissertação apresentada ao Programa de Pósgraduação em Engenharia Mecânica da PUC-Rio como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica.

REZENDE, A. L. T. Análise Numérica da Bolha de Separação do Escoamento Turbulento sobre Placa Plana Fina Inclinada. Tese (Doutorado) — Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ - Brasil, 2009. Tese apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Doutor pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da PUC-Rio.

RODRÍGUEZ, D.; GENNARO, E. M.; JUNIPER, M. P. The two classes of primary modal instability in laminar separation bubbles. **Journal of Fluid Mechanics**, v. 734, 2013.

SCHLICHTING, H.; GERSTEN, K. **Boundary-Layer Theory**. New York - United States of America: Springer, 2017.

VERSTEEG, H. K.; MALALASEKERA, W. An Introduction to Computational Fluid Dynamics. Harlow - England: Pearson, 2007.

WHITE, F. M. Mecânica dos Fluidos. Porto Alegre, Rio Grande do Sul - Brasil: Mc Graw Hill, 2018.