

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ**

**GUSTAVO HENRIQUE FERREIRA SOARES**

**MICRO GERADORES DE VÓRTICE: ANÁLISE EM MVF E LBM PARA UM  
PERFIL AERODINÂMICO PARA PÁS EÓLICAS**

**GUARAPUAVA**

**2022**

**GUSTAVO HENRIQUE FERREIRA SOARES**

**MICRO GERADORES DE VÓRTICE: ANÁLISE EM CFD PARA UM PERFIL  
AERODINÂMICO PARA PÁS EÓLICAS**

**FEM AND LBM Analysis of Micro Vortice Generator for an Aerodynamic Profile for  
Wind Blade**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação apresentado como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Orientador: Prof. Dr. Sérgio Dalmás.

**GUARAPUAVA**

**2022**



Esta licença permite remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, para fins não comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es) e que licenciem as novas criações sob termos idênticos. Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

**GUSTAVO HENRIQUE FERREIRA SOARES**

**MICRO GERADORES DE VÓRTICE: ANÁLISE EM MVF E LBM PARA UM  
PERFIL AERODINÂMICO PARA PÁS EÓLICAS**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação apresentado  
como requisito para obtenção do título de Bacharel em  
Engenharia Mecânica da Universidade Tecnológica Federal  
do Paraná (UTFPR).

Data de aprovação: 8 de dezembro de 2022

---

Prof. Dr. Sergio Dalmas  
Doutor em Engenharia Mecânica  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

---

Prof. Dr. Denise Alves Ramalho  
Doutora em Engenharia Mecânica  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

---

Prof. Dr. Christian Naaktgeboren  
Doutor em Engenharia Mecânica  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

**GUARAPUAVA**

**2022**

## RESUMO

Geradores de vórtice são dispositivos para controle de escoamento, que atuam misturando a camada de corrente livre do escoamento com a de menor velocidade próxima a superfície sólida, aumentando a sustentação em troca de um pequeno aumento no arrasto. Este trabalho propõe um gerador de vórtice com perfil aerodinâmico fino em contrapartida com o padrão de aletas trapezoidais, diminuindo o arrasto induzido. A análise é feita de maneira computacional através do *software Ansys* e pelo método de *Lattice Boltzmann*, modelando os perfis e condições de contorno, ambas configurações vão ser de arranjos contra-rotacionais, permitindo a comparação do arrasto e sustentação para diferentes ângulos de ataque, criadas num perfil não fino de aerofólio e de fundo plano, encontrados frequentemente em pás eólicas, onde a aplicação de dispositivos controladores de escoamento é indispensável para se obter condições ideais de operação e a maior sustentação..

**Palavras-chave:** gerador de vórtice; controle de escoamento; simulação; Lattice Boltzmann

## ABSTRACT

Vortex generators are flow control devices, they work by mixing the free stream of flow with slower speed close to solid surface, increasing lift in exchange for a small increase in drag. This work proposes a vortex generator with a thin aerodynamic profile in contrast to the trapezoidal fin pattern, decreasing the induced drag. The analysis is done in a computational way through the Ansys software and Lattice Boltzmann Method, modeling the profiles and boundary conditions, both configurations will be of counter-rotational arrangements, allowing the comparison of drag and lift for different angles of attack, created in a non-thin airfoil profile and flatblack, often found in wind turbine blades, where the application of flow control devices is essential to obtain optimal operations conditions and the greatest lift.

**Keywords:** vortex generator; flow control; simulation; Lattice Boltzmann.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Molde Vestas para fabricação do modelo V236-15.0 MW.....	14
Figura 2 - Geradores de vórtice instalados em uma turbina Südwind S 70 1,5 kW.....	15
Figura 3 - Geometria do aerofólio DU 97-W-300.....	17
Figura 4 - Geometria do aerofólio NACA 0012.....	17
Figura 5 - Detalhes do escoamento viscoso em torno de um aerofólio.....	19
Figura 6 - Força de arrasto e sustentação num corpo.....	20
Figura 7 - Forças de pressão e viscosas num corpo.....	21
Figura 8 - Desenvolvimento da camada limite sobre uma placa plana.....	22
Figura 9 - Trajetória de partículas em escoamentos unidimensionais.....	23
Figura 10 - Escoamento sobre uma carenagem.....	23
Figura 11 – Esteira formada num aerofólio com ângulo de ataque de 15°.....	24
Figura 12 – Esteira formada num aerofólio com ângulo de ataque de 30°.....	24
Figura 13 - Visualização de um escoamento sobre um aerofólio NACA 63-621 onde metade da seção está equipada com VGs (direita) e metade não (esquerda).....	25
Figura 14 - Esquemática do escoamento com VGs.....	26
Figura 15 - Configurações de VGs: (a) Co-rotacionais e (b) contra-rotacionais.....	27
Figura 16 – Representação da discretização de espaços de velocidade (D3Q27).....	28
Figura 17 - Fluxograma para análise no <i>Ansys Fluent</i> .....	29
Figura 18 – Fluxograma para análise no <i>FluidX3D</i> .....	30
Figura 19 – Definições ativas para a simulação de um escoamento externo turbulento.....	31
Figura 20 – Definição das variáveis em SI e unidades de Lattice.....	32
Figura 21 – Definição do tamanho do volume de controle.....	32
Figura 22 – Importação da geometria e definição das condições de contorno.....	33
Figura 23 – Definição da duração das colisões.....	33
Figura 24 – DU 97-W-300 com VGs trapezoidais.....	34
Figura 25 – Vista superior dos VGs trapezoidais.....	34
Figura 26 – DU 97-W-300 com VGs perfil NACA 0012.....	34
Figura 27 – Vista superior dos VGs NACA 0012.....	34
Figura 28 - Variáveis dimensionais dos VGs.....	35
Figura 29 – Malha mostrando volume de controle para o escoamento no perfil DU 97-W-300 sem VGs.....	35
Figura 30 – Malha refinada na região de interesse do perfil DU 97-W-300 sem VGs.....	36
Figura 31 – Inflação criada vista em torno do perfil DU 97-W-300.....	37
Figura 32 – Campo de velocidades para um escoamento com $Re=3.106$ e AoA de 16°.....	38
Figura 33 – Coeficiente de arrasto e sustentação para o perfil DU 97-W-300 sem VGs obtida no <i>Ansys Fluent</i> com $Re = 3.10^6$ .....	39
Figura 34 – Malha do perfil DU 97-W-300 com VGs trapezoidais.....	40
Figura 35 – Residuais obtidos do Ansys Fluent para a simulação do perfil DU 97-W-300 com VGs de perfil NACA 0012 com $Re = 3.10^6$ .....	40

Figura 36 - Coeficiente de arrasto e sustentação para o perfil DU 97-W-300 sem VGs obtida pelo método de <i>Lattice Boltzmann</i> e $Re = 3.10^6$ .....	41
Figura 37 – Resultados do coeficiente de sustentação e arrasto obtidos em túnel de vento e $Re = 3.106$ para o perfil DU-97-W-300 sem modificações representado pela linha contínua.....	42
Figura 38 – Vorticidade gerada à um AoA de $12^\circ$ e $Re = 3.10^6$ .....	42
Figura 39 – Vorticidade gerada à um AoA de $15^\circ$ e $Re = 3.10^6$ .....	43
Figura 40 – Campo de velocidades com AoA de $9,5^\circ$ e $Re = 3.10^6$ .....	43
Figura 41 - Campo de velocidades com AoA de $16^\circ$ e $Re = 3.10^6$ .....	44
Figura 42 – Geometria DU 97-W-300 com VGs NACA 0012 após conversão para <i>Voxel</i> .....	44

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AoA	Ângulo de ataque
CAE	Engenharia Assistida por Computador (do inglês - <i>Computer-Aided Engineering</i> )
CAD	Desenho assistido por computador ( do inglês - <i>Computer Aided Design</i> )
CFD	Dinâmica dos fluidos computacionais (do inglês – <i>Computational Fluid Dynamics</i> )
CL	Coefficiente de sustentação
CD	Coefficiente de arrasto
LBM	Método de <i>Lattice Boltzmann</i> (do inglês- <i>Lattice Boltzmann Method</i> )
qdm	Quantidade de Movimento
STL	Linguagem Padrão de Triângulos (do inglês - <i>Standard Triangle Language</i> )
MVF	Método dos elementos finitos
NACA	Comitê Nacional para Aconselhamento sobre Aeronáutica (do inglês – <i>National Advisory Committee for Aeronautics</i> )
Re	Número de Reynolds
VGs	Geradores de Vórtice (do inglês – <i>Vortex generator</i> )



## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>13</b>
<b>1.1</b>	<b>JUSTIFICATIVA .....</b>	<b>16</b>
<b>1.2</b>	<b>OBJETIVOS .....</b>	<b>16</b>
1.2.1	Objetivo geral .....	16
1.2.2	Objetivos Específicos .....	17
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....</b>	<b>19</b>
<b>2.1</b>	<b>Escoamento externo.....</b>	<b>19</b>
<b>2.2</b>	<b>Sustentação e arrasto .....</b>	<b>20</b>
	A área de referência para um aerofólio é o produto entre sua corda e envergadura. ..	21
<b>2.3</b>	<b>Camada-Limite .....</b>	<b>21</b>
<b>2.4</b>	<b>Escoamento Laminar e Turbulento .....</b>	<b>22</b>
<b>2.5</b>	<b>Separação de Escoamento.....</b>	<b>23</b>
<b>2.6</b>	<b>Geradores de Vórtice (VGs) .....</b>	<b>25</b>
<b>2.7</b>	<b>Método de <i>Lattice Boltzmann</i> (LBM).....</b>	<b>27</b>
<b>3.1</b>	<b>Fluxograma .....</b>	<b>29</b>
<b>3.2</b>	<b>Softwares Utilizados .....</b>	<b>30</b>
3.2.1	Solid Edge 2021.....	30
3.2.2	Ansys .....	30
3.2.3	FluidX3D .....	31
<b>3.3</b>	<b>Etapas.....</b>	<b>33</b>
<b>4</b>	<b>RESULTADOS .....</b>	<b>38</b>
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO.....</b>	<b>45</b>
<b>6</b>	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>46</b>
	<b>APÊNTICE A – FIGURAS DOS CAMPOS DE VELOCIDADE OBTIDOS .....</b>	<b>48</b>
	<b>APÊNTICE B – FIGURAS DA VORTICIDADE GERADA .....</b>	<b>51</b>
	<b>APÊNTICE C – CÓDIGO PROGRAMADO PARA SIMULAÇÃO .....</b>	<b>57</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Uma solução prática para o problema de desprendimento do escoamento em maiores ângulos de ataque, consiste no uso de dispositivos para controle do escoamento, proporcionando uma maior liberdade na otimização do design (LIN, 2002).

VGs convencionais, do tipo aleta, têm sido usados há muito tempo para controlar a separação de escoamento (LIN, 2002). Taylor introduziu geradores de vórtices em 1947, e eles foram originalmente implementados no campo da aviação, para o controle de escoamento em asas de aeronaves (LIN e colab., 1994).

Os VGs são capazes de conseguir controlar o escoamento intervindo na camada limite. Eles são especialmente efetivos em atrasar a separação do escoamento para ambas condições de baixa e alta velocidade (XUE e colab., 2010).

VGs operam energizando esse escoamento de menor quantidade de movimento da camada limite, misturando-o com o escoamento de maior velocidade da parte externa da camada limite (XUE e colab., 2010).

VGs são empregados frequentemente em pás eólicas modernas, uma vez que eles são conhecidos por aumentar a sustentação máxima de um aerofólio e retardar a separação para ângulos de ataque mais altos (HANSEN e colab., 2016).

Os efeitos ocasionados pelos VGs estão sendo evidenciados conforme se utilizam maiores pás eólicas e conforme perfis mais largos de aerofólios são implementados, a instalação de geradores de vórtice (VGs) podem levar a um aumento moderado de 1 a 5% na produção de energia (HWANGBO e colab., 2017).

De acordo com a comissão europeia (EC), de 2000 até 2018 o comprimento médio de pás eólicas mais que duplicou. Modelos novos estão previstos para passar dos 85 metros até 2025 (BALOGH, 2021).

Modelos offshore como a Vestas V236-15.0 MW já passam dos 230 metros de diâmetro de rotor, com suas pás de 115.5 m (“V236-15.0 MW<sup>TM</sup>”, [S.d.], p. 23). Na Figura 1 é possível ter noção da dimensão de uma moderna pá eólica.

**Figura 1 – Molde Vestas para fabricação do modelo V236-15.0 MW**



**Fonte:** (“V236-15.0 MW™ prototype | Vestas”, [S.d.]

Para pás de turbinas eólicas, os VGs são especialmente eficazes na parte interna da pá, sua instalação é mostrada na Figura 2, onde as seções do aerofólio são espessas e geralmente operam em ângulos de ataque próximos ou além do ponto de estol. Em muitos aspectos, eles apresentam simplicidade vantajosa em relação a outros dispositivos de alta sustentação (como abas ou slats) devido à sua geometria, pequeno tamanho e peso (XUE e colab., 2010).

**Figura 2 - Geradores de vórtice instalados em uma turbina Südwind S 70 1,5 kW**



**Fonte: Cleynen (2005)**

Tradicionalmente, os VGs tinham uma altura aproximadamente igual à espessura da camada limite e eram capazes de controlar efetivamente a separação em uma área localizada. No entanto, eles tendiam a sofrer de um problema comum: o de induzir um arrasto parasita aproximadamente igual, em magnitude, à redução no arrasto por atrasar a separação da camada limite, resultando em pouco ou nenhum benefício.

Dispositivos micro geradores de vórtices tem alturas de dispositivos que são de 10% a 50% da espessura da camada limite (BOHMIE e MANOHARAN, 2020).

## 1.1 JUSTIFICATIVA

Este trabalho consiste em analisar e comparar os resultados como forma de utilizar esta geometria e reduzir o arrasto gerado através de um perfil aerodinâmico do VG.

Projetos de engenharia usados pela indústria de energia eólica hoje normalmente levam em consideração o efeito dos VGs, modificando o aerofólio para obter a maior razão entre sustentação e arrasto.

Como solução para o problema de maior arrasto e perda de sustentação em altos ângulos de ataque, os projetistas aplicam uma sequência de VGs no lado sucção, aumentando a sustentação gerada em compromisso de um aumento no arrasto.

Os coeficientes de arrasto e sustentação geralmente são obtidos através de experimentos em túnel de vento. No entanto, tais medições são caras e podem ser difíceis de realizar em números de Reynolds suficientemente altos, bem como nas seções de aerofólio relativamente espessas que são normalmente usadas em pás de turbinas eólicas hoje (TROLDBORG e colab., 2016).

Através de *softwares* de CFD é possível obter resultados válidos e contribuir com o desenvolvimento da energia renovável.

Turbinas eólicas operam mais eficientemente quando bem projetadas. Isso inclui o uso de aerofólios com uma alta razão entre os coeficientes de sustentação e arrasto. Devido às limitações estruturais, perfis mais largos que o ideal tem sido utilizado. Um exemplo bem conhecido é o DU 97-W-300 que já passou por uma extensa análise experimental (PETER SCHAFFARCZYK e colab., 2021a).

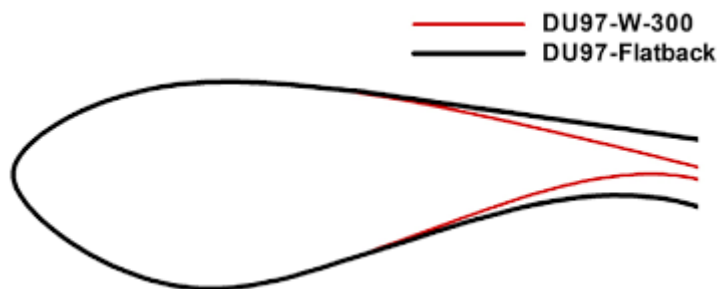
## 1.2 OBJETIVOS

### *Objetivo geral*

O objetivo deste trabalho é comparar o arrasto e sustentação produzidos em um perfil de aerofólio DU 97-W-300, o modelo contra-rotacional de forma trapezoidal proposto por Taylor, contra um modelo baseado no aerofólio NACA 0012, seus perfis estão representados nas Figura

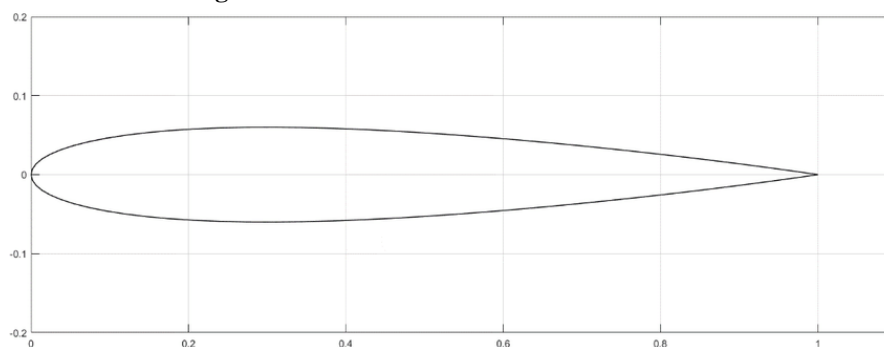
3 e Figura 4 respectivamente, através de simulação por MVF e MLB em um escoamento com  $Re = 3.10^6$ .

**Figura 3 - Geometria do aerofólio DU 97-W-300**



Fonte: Kim (2014)

**Figura 4 - Geometria do aerofólio NACA 0012**



Fonte: Russo (2019)

### *Objetivos Específicos*

Para o cumprimento do objetivo geral os seguintes objetivos específicos devem ser atendidos.

- Identificar os modelos de aerofólios utilizados em pás eólicas modernas;
- Buscar aplicações de VGs para otimização da relação  $L/D$ ;
- Determinar o melhor aerofólio para o VG;
- Buscar na literatura melhores posições do VG na corda e altura ideal;
- Em *software* CAM modelar o perfil da pá e do VG;
- Gerar a malha e refiná-la dentro do *software* Ansys;
- Simular a utilização dos VGs pelo método de *Lattice Boltzmann*;

- Determinar as condições de contorno e valores iniciais do campo;
- Simular o sistema e tratar os dados obtidos para futura discussão;
- Validar os resultados comparando com cada ângulo de ataque da pá;
- Comparar os resultados obtidos pelo Ansys Fluent ao obtido pelo LBM.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

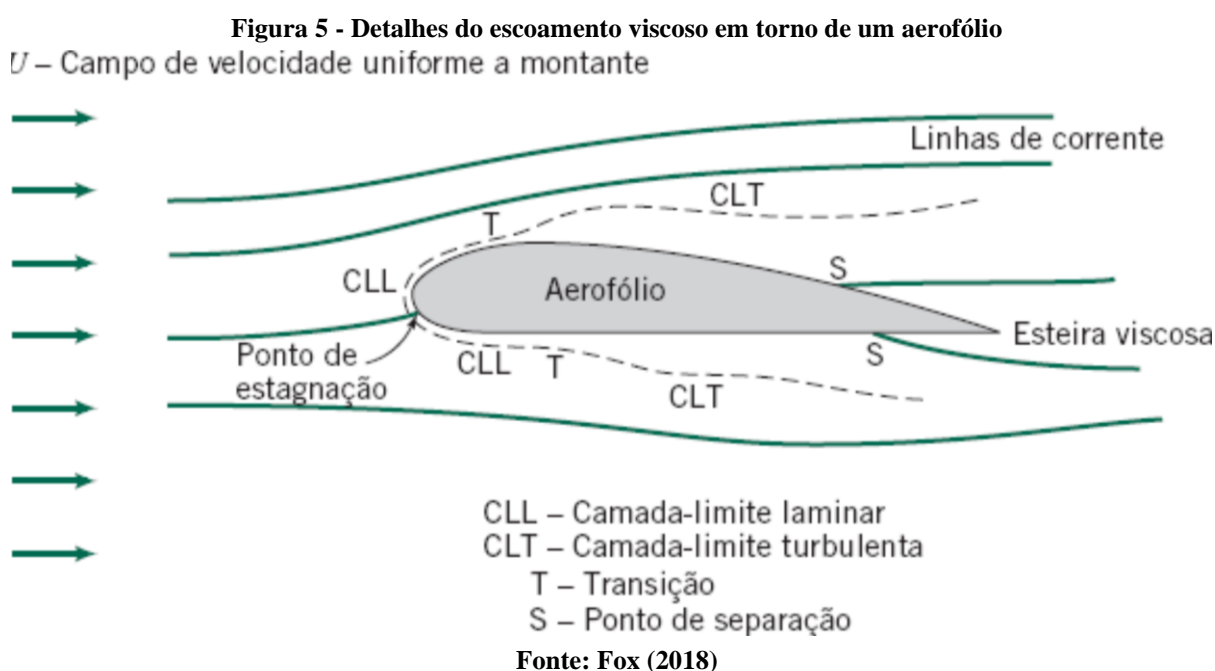
Para o entendimento deste trabalho, deve-se possuir prévio conhecimento em mecânica dos fluidos.

### 2.1 Escoamento externo

O escoamento de fluidos em torno de corpos sólidos ocorre frequentemente na prática, e ele é responsável por numerosos fenômenos físicos (ÇENGEL e CIMBALA, 2018).

Escoamentos externos são escoamentos sobre corpos imersos em um fluido sem fronteiras (FOX e MITCHELL, 2019).

Diversos fenômenos que ocorrem no escoamento externo sobre um corpo são ilustrados na Figura 5 do escoamento com alto número de Reynolds de um fluido viscoso sobre um aerofólio (FOX e MITCHELL, 2019).



Camadas-limite formam-se tanto na superfície superior quanto na superfície inferior do corpo. O escoamento da camada-limite normalmente se inicia laminar. A transição para



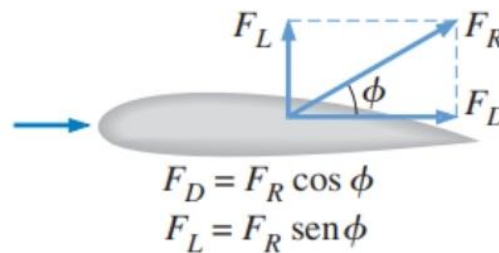
escoamento turbulento ocorre a alguma distância do ponto de estagnação (FOX e MITCHELL, 2019).

## 2.2 Sustentação e arrasto

O arrasto é definido como sendo o componente da força que um fluido em movimento exerce sobre um corpo na direção do escoamento. Em geral, ele é um efeito indesejado, assim como o atrito e fazemos o melhor possível para minimizá-lo (ÇENGEL e CIMBALA, 2018).

A força de arrasto é devido aos efeitos combinados das forças de pressão e cisalhamento na parede na direção do escoamento. A resultante dos componentes das forças de pressão e de cisalhamento na parede na direção normal ao escoamento tendem a mover o corpo nesta direção é chamada de sustentação (ÇENGEL e CIMBALA, 2018). Seus vetores podem ser vistos na Figura 6.

**Figura 6 - Força de arrasto e sustentação num corpo**



Fonte: Çengel (2015)

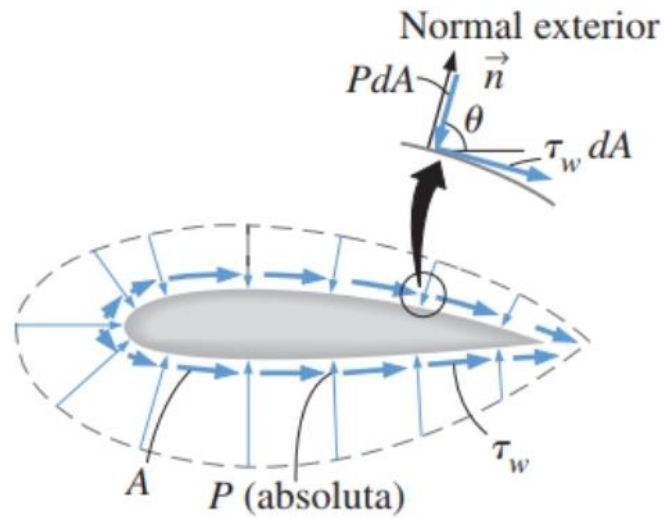
As forças de arrasto e sustentação diferenciais agindo sobre uma área infinitesimal no escoamento bidimensional são representadas na Figura 7 e obtidas respectivamente por

$$dF_D = -P dA \cos \theta + \tau_w dA \sin \theta \quad (1)$$

$$dF_L = -P dA \sin \theta + \tau_w dA \cos \theta \quad (2)$$

onde  $\theta$  é o ângulo que a normal externa de  $dA$  faz com a direção positiva do escoamento.

Figura 7 - Forças de pressão e viscosas num corpo



Fonte: Çengel (2015)

O coeficiente de arrasto expressa a razão entre a força de arrasto produzida pela pressão dinâmica multiplicada pela área de referência. É um coeficiente adimensional dado por

$$C_d = \frac{F_D}{A \frac{\rho V^2}{2}} \quad (3)$$

O coeficiente de sustentação expressa a razão entre a força de sustentação produzida pela pressão dinâmica multiplicada pela área de referência. É um coeficiente adimensional dado por

$$C_l = \frac{F_L}{A \frac{\rho V^2}{2}} \quad (4)$$

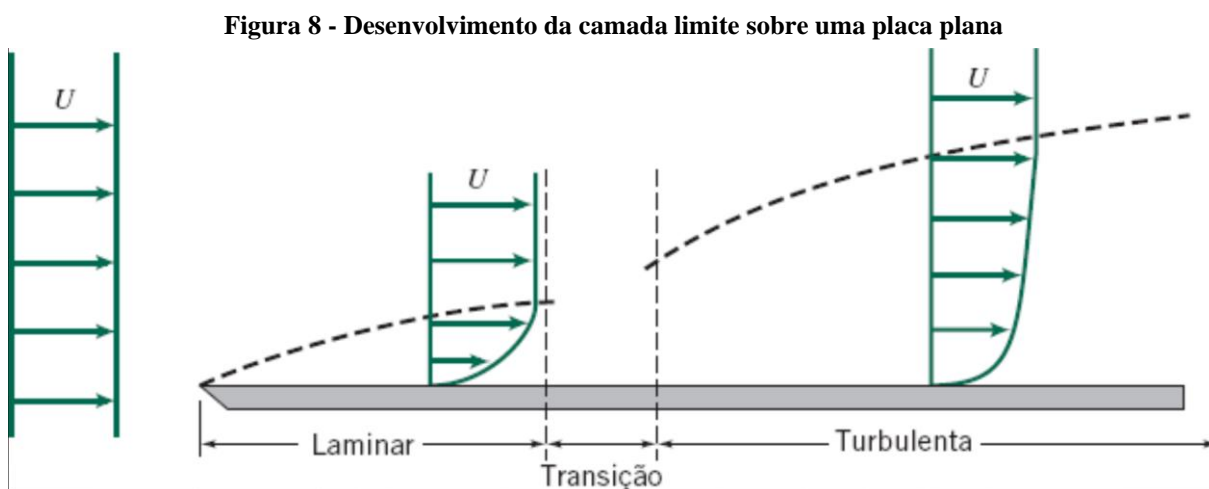
A área de referência para um aerofólio é o produto entre sua corda e envergadura.

### 2.3 Camada-Limite

Segundo Çengel e Cimbala (2018), podemos considerar que o escoamento é constituído por camadas adjacentes umas às outras, sendo que a velocidade da primeira camada adjacente a superfície é nula, o que é conhecido como *condição de não escorregamento*.

Essa camada retarda o escoamento da próxima e assim por diante, formando um gradiente de velocidades, representado na Figura 8. Assim, a presença da placa é sentida até uma certa distância normal  $\delta$  da placa além da qual a velocidade da corrente livre permanece praticamente.

A região do escoamento com as velocidades reduzidas até  $u = 0,99 V$  é conhecida como camada limite e, sua espessura é denotada por  $\delta$  (ÇENGEL e CIMBALA, 2018).



Para fins de cálculo, sob condições típicas de escoamento, considera-se que a transição ocorre, geralmente, em um número de *Reynolds* de 500.000 (FOX e MITCHELL, 2019).

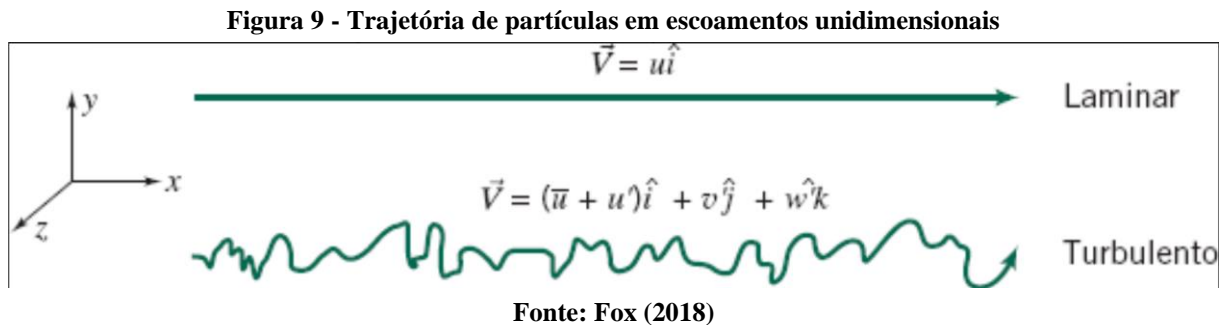
## 2.4 Escoamento Laminar e Turbulento

Um escoamento laminar é aquele em que as partículas fluidas se movem em camadas lisas, ou lâminas (FOX e MITCHELL, 2019).

Um escoamento turbulento é aquele que tem flutuações aleatórias no campo tridimensional de velocidades, resultando em que as partículas fluidas rapidamente se misturam enquanto se movimentam ao longo do escoamento (FOX e MITCHELL, 2019).

A turbulência é um fenômeno geralmente indesejável porque cria maior resistência ao escoamento. Ela também é inevitável, mas seu aparecimento pode ser postergado (FOX e MITCHELL, 2019).

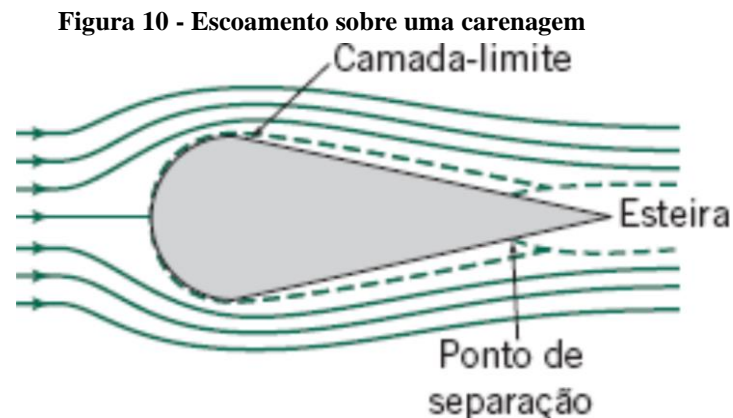
Na Figura 9, observa-se que a velocidade  $\vec{V}$  do escoamento laminar é simplesmente  $u\hat{i}$ , enquanto que a velocidade  $\vec{V}$  do escoamento turbulento é composta pela velocidade média  $u\hat{i}$  mais as três componentes das flutuações aleatórias de velocidade  $u'\hat{i}$ ,  $v'\hat{j}$  e  $w'\hat{k}$  (FOX e MITCHELL, 2019).



## 2.5 Separação de Escoamento

Quando um escoamento se separa de um corpo, a região de separação tem baixa pressão e ocorrem recirculações (escoamento de retorno) (ÇENGEL e CIMBALA, 2018).

Em aerodinâmica, a força de arrasto é decorrente, em geral, da esteira de baixa pressão e, se pudermos reduzir ou eliminar a esteira, o arrasto será bastante reduzido (FOX e MITCHELL, 2019). Na Figura 10 é possível ver a representação do ponto de separação, dando início a formação da esteira.

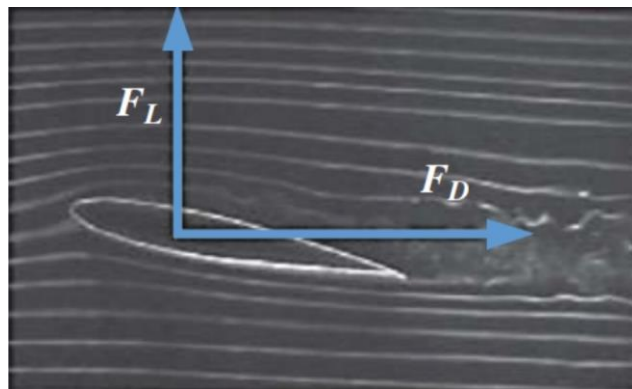


Fonte: Fox (2018)

A localização do ponto de separação depende de vários fatores como, por exemplo, o número de Reynolds, a rugosidade da superfície e o nível de flutuações na corrente livre, e, normalmente, é difícil prever com exatidão onde ocorrerá a separação (ÇENGEL e CIMBALA, 2018).

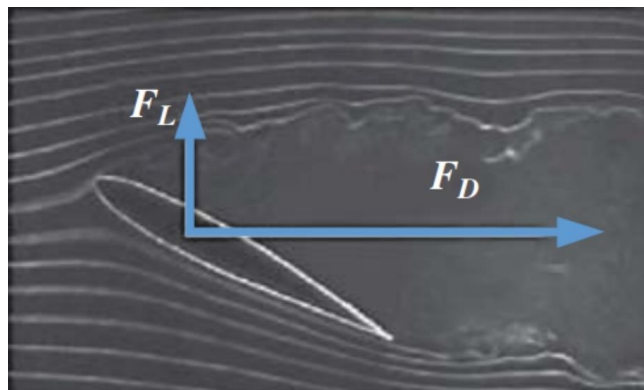
Em grandes ângulos de ataque (Figura 12), o escoamento pode se separar completamente da superfície superior de um aerofólio, reduzindo a sustentação drasticamente e fazendo o aerofólio entrar em regime de estol (ÇENGEL e CIMBALA, 2018). Em ângulos de ataque menos elevados o escoamento ainda está preso a superfície superior do aerofólio (Figura 11), gerando uma maior sustentação e menor arrasto.

**Figura 11 – Esteira formada num aerofólio com ângulo de ataque de 15°**



Fonte: Çengel (2015)

**Figura 12 – Esteira formada num aerofólio com ângulo de ataque de 30°**

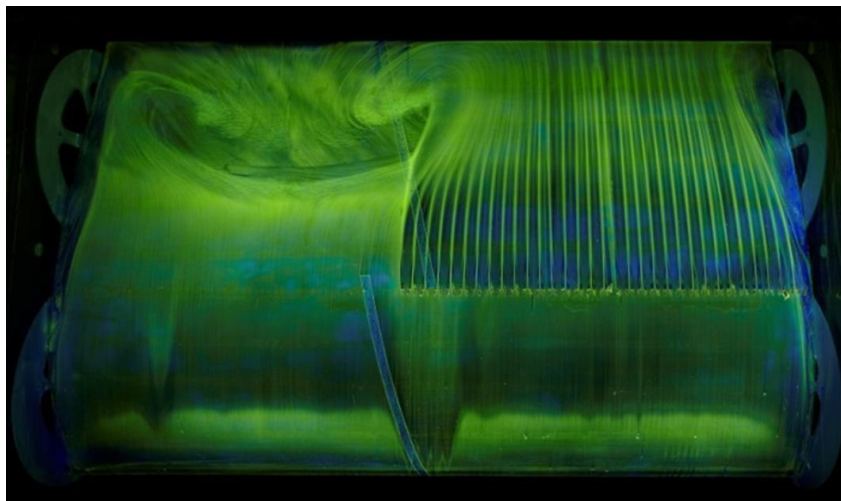


Fonte: Çengel (2015)

## 2.6 Geradores de Vórtice (VGs)

Os VGs são pequenos dispositivos adicionados a várias superfícies com o objetivo de retardar a separação da camada limite (BOHMIER e MANOHARAN, 2020). Seu funcionamento é muito bem visto na Figura 13.

**Figura 13 - Visualização de um escoamento sobre um aerofólio NACA 63-621 onde metade da seção está equipada com VGs (direita) e metade não (esquerda)**

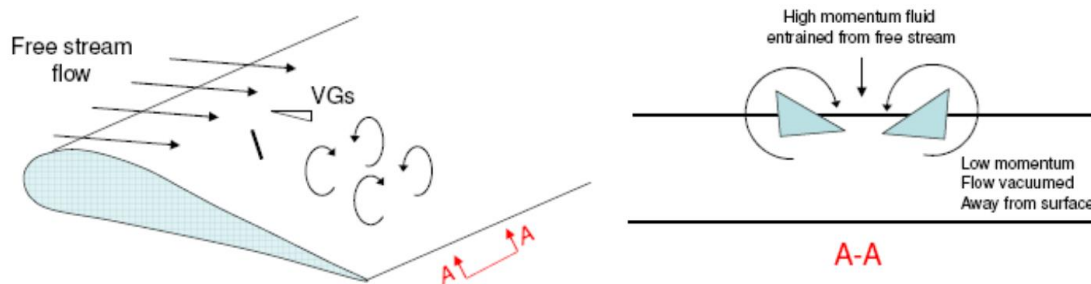


Fonte: Hansen (2016)

VGs passivos convencionais, do tipo palheta, com altura do dispositivo,  $h$ ; na ordem da espessura da camada limite,  $\delta$ ; têm sido usados há muito tempo para controlar a separação do escoamento aumentando a quantidade de movimento próxima a parede através da transferência de qdm do escoamento externo (corrente livre) para a região próxima a parede (LIN, 2002).

Os VGs operam energizando esse escoamento de baixa quantidade de movimento da camada limite, misturando-o com o escoamento de maior velocidade da parte externa da camada limite (XUE e colab., 2010). Conforme esquematização vista na Figura 14

Figura 14 - Esquemática do escoamento com VGs



Fonte: Xue (2010)

Tradicionalmente, os VGs tinham uma altura aproximadamente igual à espessura da camada limite e eram capazes de controlar efetivamente a separação em uma área localizada. No entanto, eles tendiam a sofrer de um problema comum de gerar arrasto parasita aproximadamente igual em magnitude à redução no arrasto por atrasar a separação da camada limite, resultando em pouco ou nenhum benefício (BOHMIER e MANOHARAN, 2020).

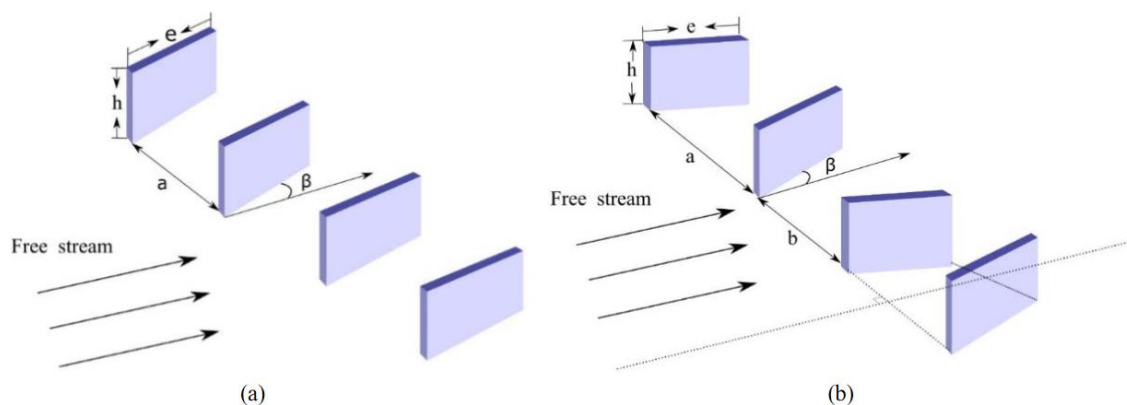
Vários pesquisadores desde então mostram que, usando VGs de baixo perfil com a altura do dispositivo apenas uma fração dos VGs convencionais do tipo palheta, esses geradores (ou seja,  $0,1 \leq h/\delta \leq 0,5$ ) ainda podem fornecer transferência de quantidade de movimento suficiente para a parede (LIN, 2002).

Além da geometria e orientação desempenharem um papel importante na eficácia dos micros geradores de vórtices, a posição também é crucial. Para que possam funcionar, devem poder ser colocados a montante do ponto de separação (BOHMIER e MANOHARAN, 2020).

As configurações de VGs são basicamente de dois tipos: conjuntos co-rotacionais ou contra-rotacionais.

Os conjuntos co-rotacionais produzem vórtices com o mesmo sentido de rotação, enquanto conjuntos contra-rotacionais produzem vórtices com regiões laterais de escoamento comum para cima e escoamento comum para baixo, as duas configurações podem ser vistas na Figura 15.

**Figura 15 - Configurações de VGs: (a) Co-rotacionais e (b) contra-rotacionais**



Fonte: Yan (2019)

Note que um conjunto co-rotacional possui apenas um único parâmetro de distância lateral,  $d$ , enquanto conjuntos contra rotacionais possuem dois parâmetros de distância lateral, sendo  $d$  a distância entre dois VGs que formam um par e  $D$  a distância entre cada par de VGs (GRIFFIN, 1996).

## 2.7 Método de *Lattice Boltzmann* (LBM)

O método de *Lattice Boltzmann* (LBM) possui muitas vantagens, sendo uma delas, a facilidade em aplicar o método para domínios complexos (MOHAMAD, 2011).

Ao contrário dos esquemas numéricos convencionais baseados em discretizações de equações macroscópicas contínuas, por exemplo o método *Lattice Boltzmann* é baseado em equações cinéticas mesoscópicas (CHEN e DOOLEN, 1998).

O LBM desfruta de vantagens em abordagens macroscópicas e microscópicas, com recursos de computador gerenciáveis (MOHAMAD, 2011).

Pode ser naturalmente adaptado a processos paralelos de computação como, por exemplo, o das placas de computação gráficas (GPU), ele pode lidar com um problema em micro e macroescalas com precisão confiável (MOHAMAD, 2011).

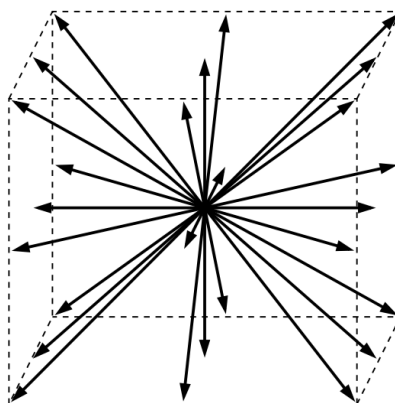
A equação de Boltzmann discretizada em uma rede, ou, *lattice* tem sua resolução numérica em termos da função de distribuição de massa dividida em etapas de (i) convecção e (ii) colisão.



A função de distribuição de massa (probabilidade de encontrar partículas dentro de uma certa faixa de velocidades em uma certa faixa de locais em um determinado momento) descreve o comportamento de um conjunto estatisticamente significativo de partículas em um espaço de fase. O método economiza os recursos do computador drasticamente (MOHAMAD, 2011).

A terminologia comum utilizada para os lattices é  $DnQm$ , onde  $n$  representa a dimensão Euclidiana dos *lattices* (1 para unidimensional, 2 para bidimensional e 3 para tridimensional) e  $m$  refere-se ao espaço de velocidades analisadas (NAAKTGEBOREN e DE ANDRADE, 2020)

**Figura 16 – Representação da discretização de espaços de velocidade (D3Q27)**



Fonte: Wagner (2008)

O cálculo da Equação (5) é realizado em duas etapas, a primeira é a da advecção, determinando qual direção cada partícula tende a ir, já a segunda etapa é a do operador de colisão, caso duas partículas vizinhas forem para mesma direção, sua colisão é então calculada.

$$\partial_t f + e \cdot \nabla_x f = (\partial_t f)_{coll} \quad (5)$$

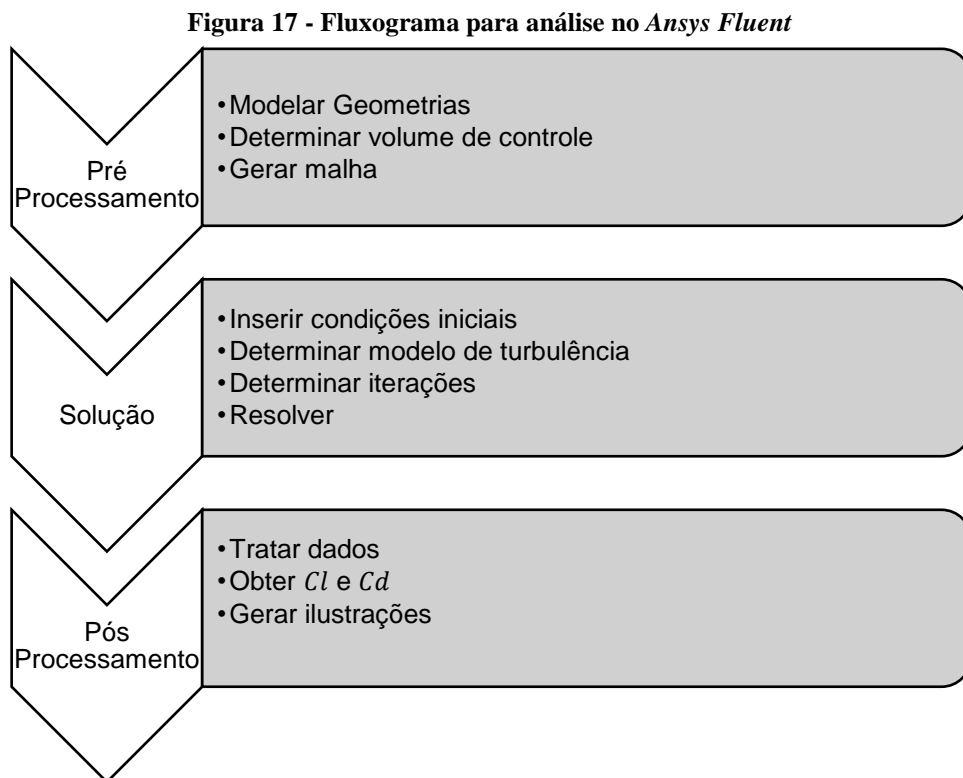
Este é o método Lattice Boltzmann que tem sido extraordinariamente bem sucedido para muitas aplicações, incluindo turbulência, fluxos multicomponentes e multifásicos, bem como aplicações adicionais, incluindo simulações da equação de Schroedinger (WAGNER, 2008).

### 3 ASPECTOS METODOLÓGICOS

Para obter-se resultados concretos e uma análise válida, é necessário modelar o volume de controle, condições de contorno e superfícies de maneira adequada. Um pré processamento bem feito é a chave para resultados coerentes e aplicáveis.

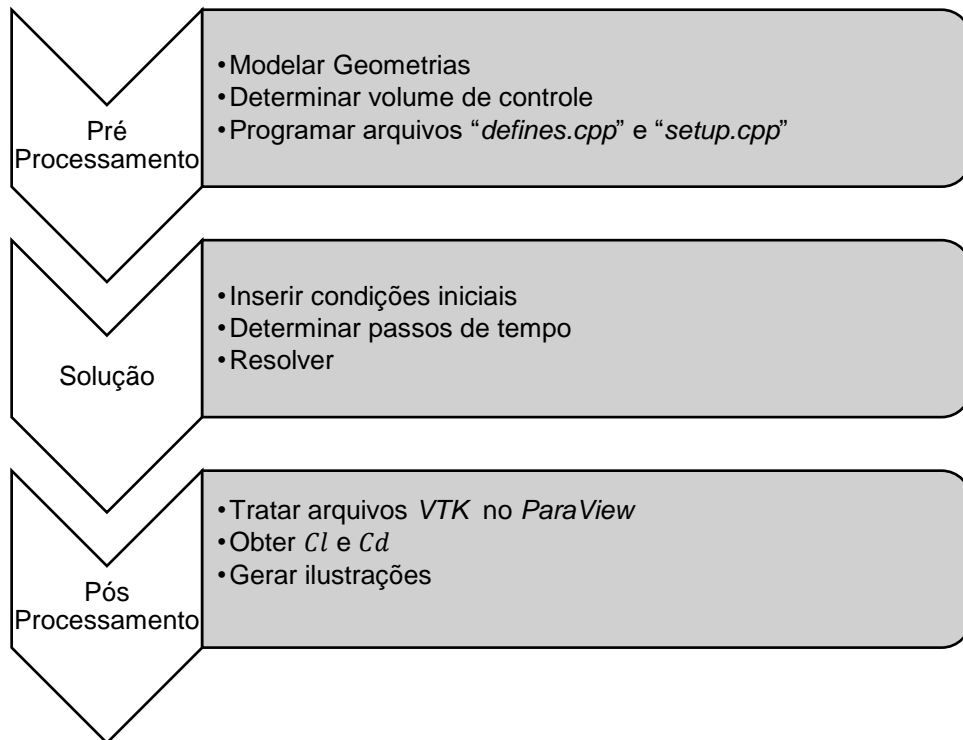
#### 3.1 Fluxograma

As etapas a serem seguidas estão ilustradas em dois fluxogramas, na Figura 17 para análise no *Ansys Fluent* e na Figura 18 para análise no *FluidX3D*



Fonte: Autoria própria (2022)

**Figura 18 – Fluxograma para análise no *FluidX3D***



**Fonte: Autoria própria (2022)**

### 3.2 Softwares Utilizados

#### *Solid Edge 2021*

O *Solid Edge* é um *software CAD* de modelagem 3D paramétrica que permite a alteração de dimensões através apenas de uma entrada numérica. Ele é utilizado para montagem, modelagem e elaboração de funcionalidades para mecânica.

#### *Ansys*

Dentro do seu ecossistema, existe o pré processamento, para a criação da malha e determinação dos parâmetros a serem modificados na análise e o *Fluent* para simulação e pós processamento.

O *Ansys Fluent* é um dos principais *software* de simulação de fluido, conhecido por seus recursos avançados de modelagem física e precisão líder do setor. Com ele é possível simular e prever as interações entre fluido e corpo sólido.

### *FluidX3D*

Este *software* está disponível no *GitHub* de forma gratuita e aberta para uso acadêmico. Ele consiste em um solucionador baseado em LBM. Para sua utilização é necessária a programação do arquivo setup em C++.

Primeiro o programa “*defines.cpp*” deve ser adequado para a simulação em particular, por utilizar um modelo com turbulência foi escolhido o modelo *D3Q27*, um operador de colisão com dois relaxadores de tempo, a compressão dos dados para 16 *bits*, se o *hardware* suportar esta compressão não é necessária.

Para cálculo da força em cada direção do aerofólio o campo de força deve ser ativado, alocando mais 12 *bytes* por *Lattice*. A condição de equilíbrio das fronteiras é ativada para simular a entrada e saída do escoamento. O sub gride de Smagorinsky-Lilly ajuda a estabilizar modelos com alta turbulência, portanto ele é ativado sem custo de memória. As definições ativas no programa “*defines.cpp*” são vistas na Figura 19

**Figura 19 – Definições ativas para a simulação de um escoamento externo turbulento**

```
#define D3Q27
#define TRT
#define FP16C
#define FORCE_FIELD
#define EQUILIBRIUM_BOUNDARIES
#define SUBGRID
```

**Fonte: Autoria própria (2022)**

Assim define-se os parâmetros para a simulação, de modo a serem inseridos no SI e convertidos para unidades de *Lattice*, através da relação do tamanho de corda em metros para o tamanho em *Lattices*. Após a definição, a função de conversão pode ser chamada, conforme Figura 20.

Figura 20 – Definição das variáveis em SI e unidades de Lattice

```
// variáveis em SI units (m, kg, s)
const float si_x = 0.914f; // corda do aerofólio m
const float si_u = 48.577665f; // velocidade do escoamento externo m/s
const float si_rho = 1.225f; // densidade do ar kg/m^3
const float si_nu = 1.48E-5f; // viscosidade cinemática do ar m^2/s

// variáveis em LBM
const float lbm_u = 0.075f;//0.072164f; // velocidade em unidades de Lattice
const float lbm_rho = 1.0f; // densidade em unidades de Lattice
const float lbm_x = 384.0*0.5f; // tamanho da corda em unidades de Lattice

// define a conversão entre as unidades no SI e em Lattice
units.set_m_kg_s(lbm_x, lbm_u, lbm_rho, si_x, si_u, si_rho);
```

Fonte: Autoria própria (2022)

O volume de controle é definido com base no tamanho da corda “*lbm\_x*” (Figura 21) e limitado apenas pela quantidade de *VRAM* da placa de vídeo. Com 10 *GB* consegue-se uma malha máxima teórica de  $1,073 \cdot 10^{10}$  *Lattices*. Utilizando o modelo *D3Q27*, a malhalimite real foi de  $24 \times 3456 \times 1024$ , totalizando  $8,493 \cdot 10^7$  *Lattices*.

Figura 21 – Definição do tamanho do volume de controle

```
// define a resolução do volume de controle baseado no tamanho da corda (lbm_x)
const uint Nx = 0.126*to_uint(lbm_x);
const uint Ny = 18*to_uint(lbm_x);
const uint Nz = 5.3333334*to_uint(lbm_x);
```

Fonte: Autoria própria (2022)

O programa converte o *STL* gerado pelo *Solid Edge* para o *Lattice* definido. Para o caso de um escoamento externo, o aerofólio é definido como uma parede sólida, o volume de controle, ou seja, o primeiro e último *Lattice* em cada direção é definido como parece sólida para os eixos *Y* e *Z*, para o eixo *X* a condição é de entrada e saída do escoamento, esta etapa é vista na Figura 22.

**Figura 22 – Importação da geometria e definição das condições de contorno**

```
// carrega a geometria e define o tipo de contorno
lbm.voxelize_stl(get_exe_path()+"/../stl/du-97-w-300.stl", center, rotation, size, TYPE_S|TYPE_X);

// condições de contorno do volume de controle
for(uint n=0u, x=0u, y=0u, z=0u; n<lbm.get_N(); n++, lbm.coordinates(n, x, y, z)) {
    if(!(lbm.flags[n]&TYPE_S)) lbm.u.y[n] = lbm_u; // initial velocity
    if(x==0u | x==Nx-1u | y==0u | y==Ny-1u | z==0u | z==Nz-1u) lbm.flags[n] = TYPE_E;
}
```

Fonte: Autoria própria (2022)

Para execução deve-se determinar os passos de tempo em unidades de *Lattice*, como na Figura 23.

**Figura 23 – Definição da duração das colisões**

```
// time steps até entrar em "equilíbrio"
lbm.run(50000u);
```

Fonte: Autoria própria (2022)

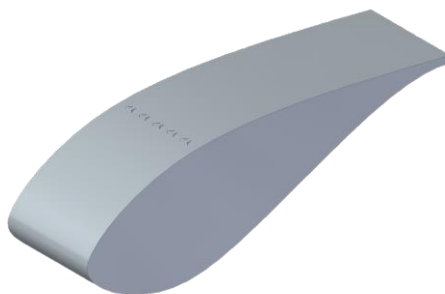
Após a conclusão da simulação as unidades são convertidas novamente para o SI.

O pós processamento dos dados tem a possibilidade de ser feita ativando funções programadas no código ou no *ParaView*, através de um arquivo *VTK*.

### 3.3 Etapas

A modelagem foi no *software Solid Edge 2021* importando os pontos pertencentes ao perfil dos aerofólios DU 97-W-300 e NACA 0012. Obteve-se três modelos com comprimento de corda de 914 mm e envergadura de 200 mm, sendo o primeiro sem nenhum dispositivo, o segundo (Figura 24 e Figura 25) com 5 conjuntos de VGs por aletas trapezoidais contrarrotacionais e o terceiro (Figura 26 e Figura 27) com 5 conjuntos de geradores de vórtice com o perfil NACA 0012.

**Figura 24 – DU 97-W-300 com VGs trapezoidais**



**Fonte: Autoria própria (2022)**

**Figura 25 – Vista superior dos VGs trapezoidais**



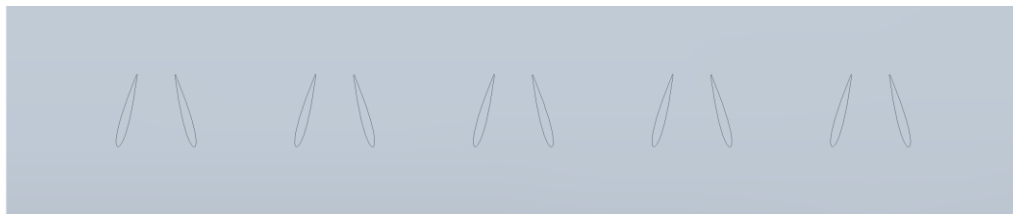
**Fonte: Autoria própria (2022)**

**Figura 26 – DU 97-W-300 com VGs perfil NACA 0012**



**Fonte: Autoria própria (2022)**

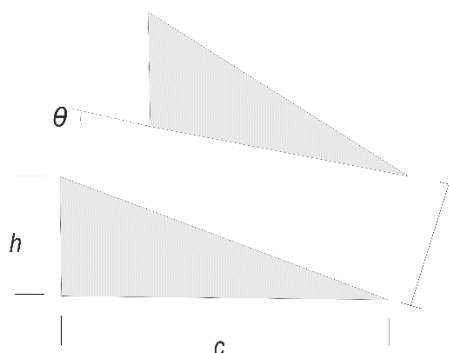
**Figura 27 – Vista superior dos VGs NACA 0012**



**Fonte: Autoria própria (2022)**

Os VGs foram posicionados a uma distância de 30% da corda, com um ângulo ( $\theta$ ) de  $15^\circ$ , um comprimento ( $c$ ) de 15 mm, uma altura ( $h$ ) de 5 mm e uma distância entre eles ( $l$ ) de 35 mm. Para melhor entendimento, as variáveis dos VGs estão representadas na Figura 28.

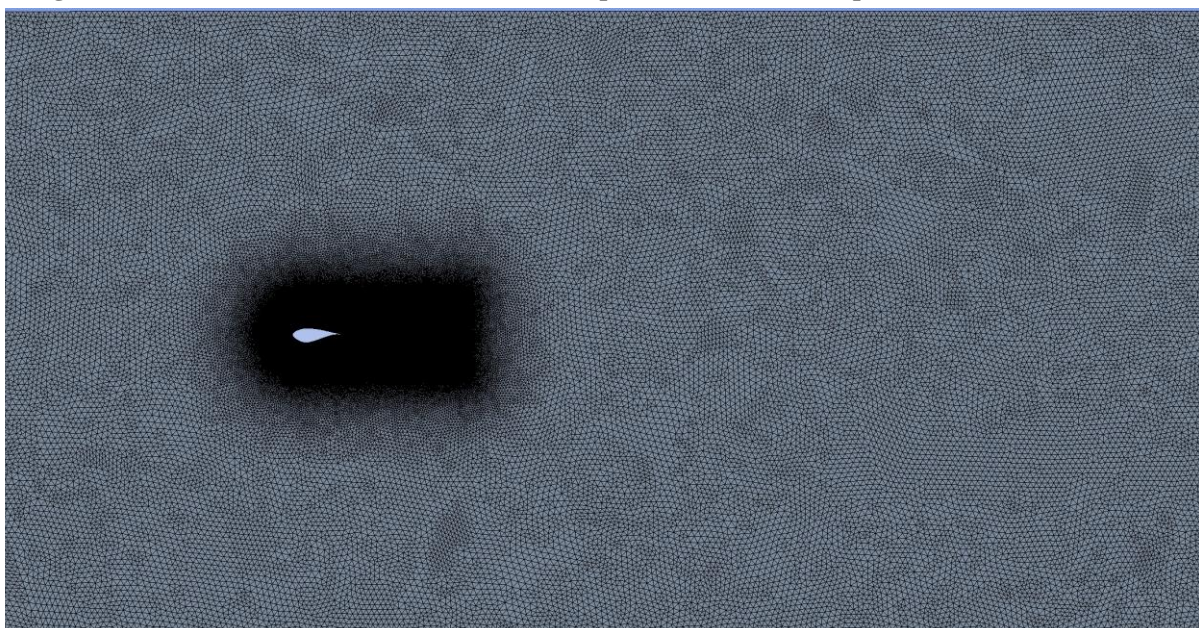
**Figura 28 - Variáveis dimensionais dos VGs**



**Fonte: Autoria própria (2022)**

Para ser possível observar os efeitos dos VGs e no escoamento deve-se possuir uma malha fina o bastante e um volume de controle grande o suficiente, este é visto na Figura 29. Com isso, mensura-se os micro e macro efeitos, aumentando a confiabilidade dos resultados. No entanto, a limitação está na quantidade de memória *ram* disponível.

**Figura 29 – Malha mostrando volume de controle para o escoamento no perfil DU 97-W-300 sem VGs**

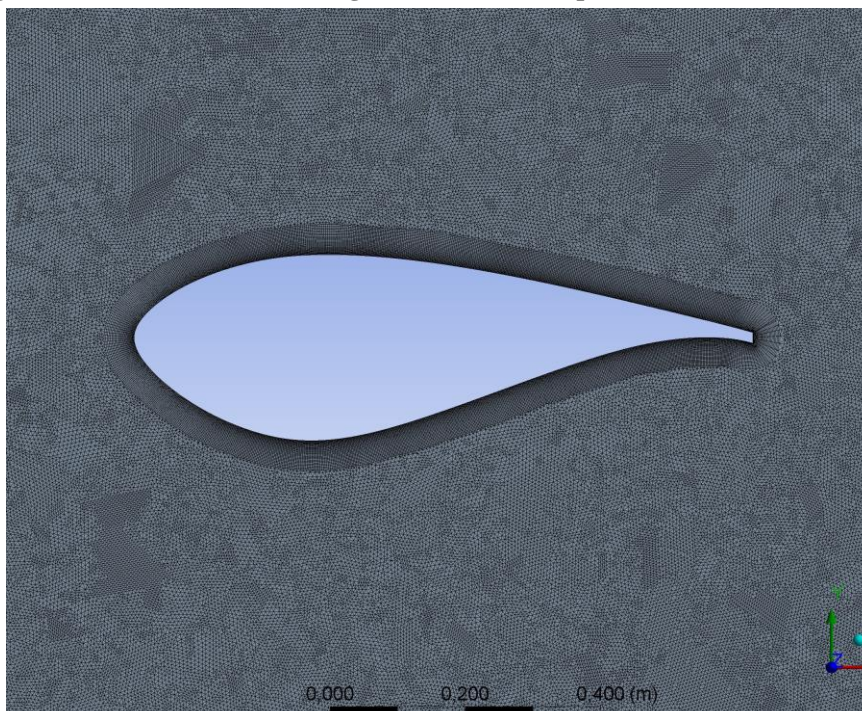


**Fonte: Autoria própria (2022)**



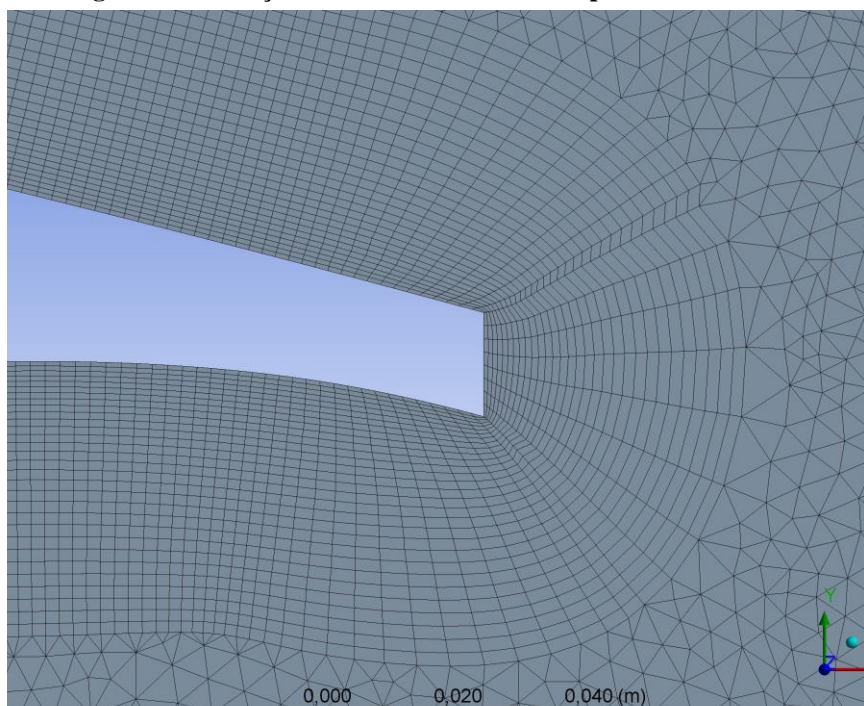
Na criação da malha foi utilizado um tamanho de elemento base de  $0,15\text{ m}$  e elementos de refinamento foram utilizados para criar mais elementos nas áreas de maior interesse, principalmente em torno do aerofólio, como mostra a Figura 30 e Figura 31.

**Figura 30 – Malha refinada na região de interesse do perfil DU 97-W-300 sem VGs**



**Fonte: Autoria própria (2022)**

**Figura 31 – Inflação criada vista em torno do perfil DU 97-W-300**



**Fonte: Autoria própria (2022)**

A próxima etapa é determinar as condições de contorno com base em dados já existentes para este aerofólio. Os estudos em túnel de vento conduzidos pela *Delft University* trazem os dados para  $Re = 3 \cdot 10^6$ .

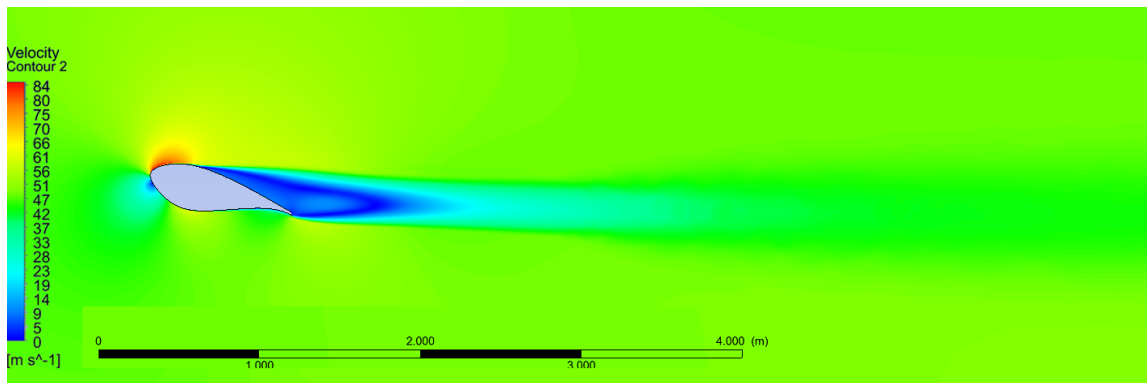
Com as etapas anteriores bem definidas é possível iniciar o solucionador e obter os resultados brutos, esses resultados serão tratados, de modo a serem possíveis de serem interpretados e comparados na próxima seção deste trabalho.

Os dados serão normalizados em gráficos da sustentação gerada em função do arrasto induzido, vários casos com diferentes ângulos de ataque e velocidade de escoamento serão comparados para melhor validação dos resultados.

## 4 RESULTADOS

Os resultados obtidos inicialmente no *Ansys Fluent* se mostraram numericamente próximos, porém, ao se analisar o campo de velocidades, o modelo viscoso de turbulência escolhido,  $k - \omega$ , não captura os efeitos de turbulência esperados num escoamento externo com  $Re = 3 \cdot 10^6$ , como mostrado na Figura 32, para esses efeitos serem capturados o modelo de turbulência deve ser mais elegante, como o *Large Eddy Simulation*, necessitando de um poder computacional muito maior.

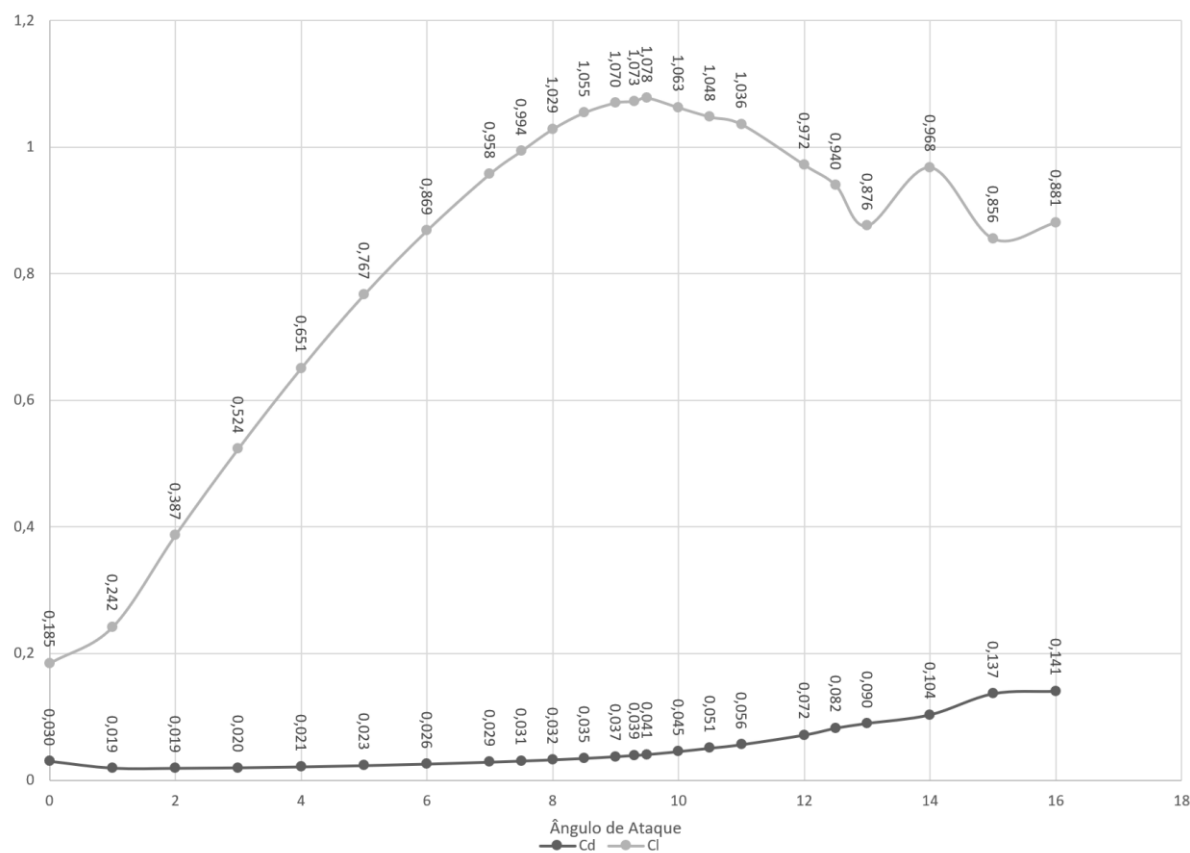
**Figura 32 – Campo de velocidades para um escoamento com  $Re = 3 \cdot 10^6$  e AoA de  $16^\circ$**



**Fonte: Autoria própria (2022)**

Os coeficientes de arrasto e sustentação obtidos no *Ansys Fluent* estão representados na Figura 33, a sustentação máxima obtida foi de 1,078. O desprendimento do escoamento ocorre por volta dos  $12^\circ$  de ângulo de ataque, conforme esperado. A análise para ângulos de ataque maiores que  $16^\circ$  não foi possível pois o solucionador não converge.

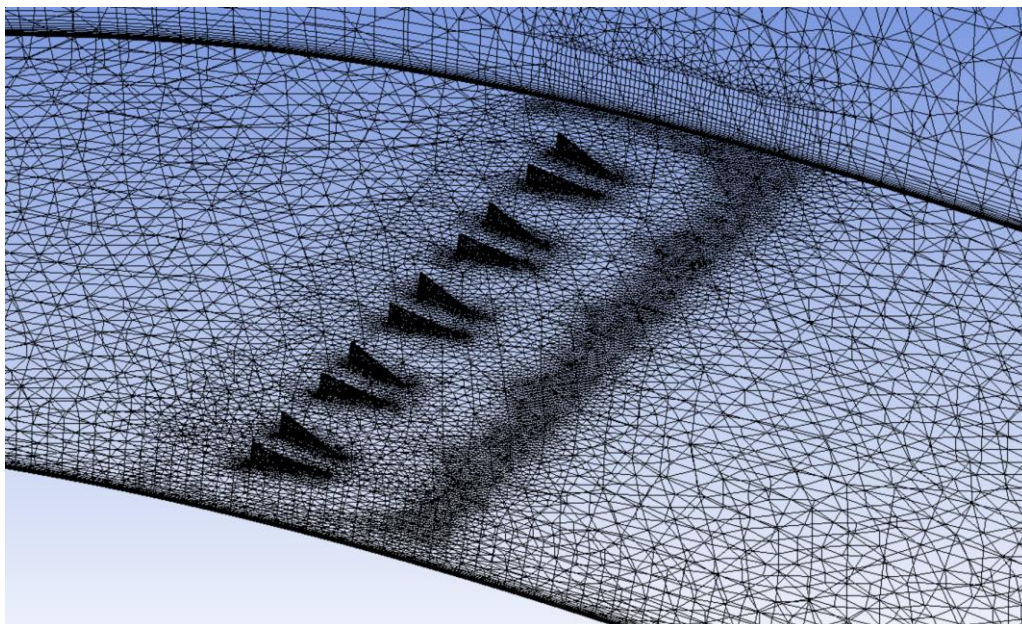
**Figura 33 – Coeficiente de arrasto e sustentação para o perfil DU 97-W-300 sem VGs obtida no Ansys Fluent com  $Re = 3.10^6$**



**Fonte: Autoria própria (2022)**

A análise no *Ansys Fluent* com os VGs não foi possível, a malha gerada não satisfaz a qualidade necessária, ficando pouco isométrica ou muito grande para capturar os possíveis efeitos gerados. Na Figura 34 é possível ver a baixa qualidade geométrica da malha, com elementos sobrepostos e grandes variações de tamanho entre elementos vizinhos.

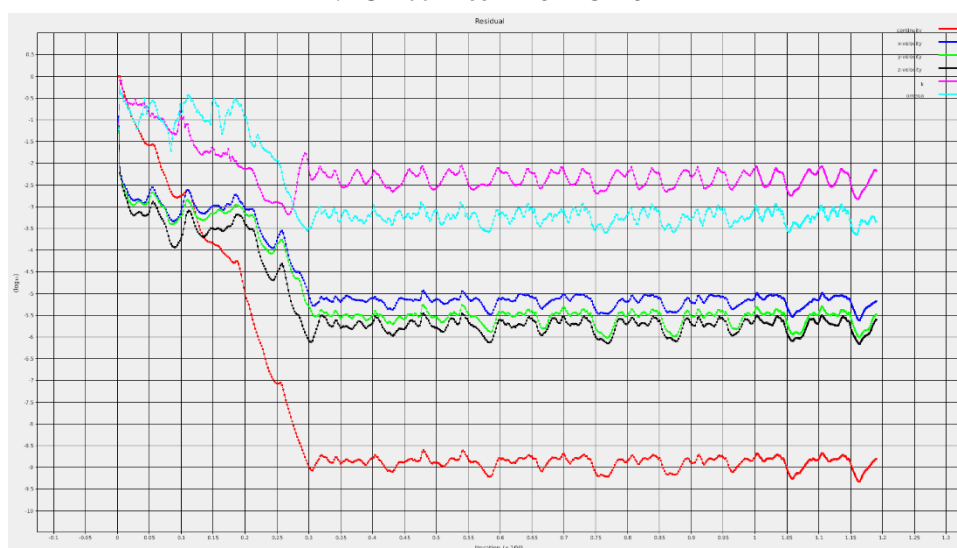
**Figura 34 – Malha do perfil DU 97-W-300 com VGs trapezoidais**



**Fonte: Autoria própria (2022)**

Foi possível se iniciar a simulação, porém. Como esperado não foi possível a convergência, como visto na Figura 35, onde os residuais oscilam entre valores *Ad infinitum*, não permitindo se chegar a uma conclusão sobre o comportamento dos geradores de vórtice no escoamento.

**Figura 35 – Residuais obtidos do Ansys Fluent para a simulação do perfil DU 97-W-300 com VGs de perfil NACA 0012 com  $Re = 3 \cdot 10^6$**

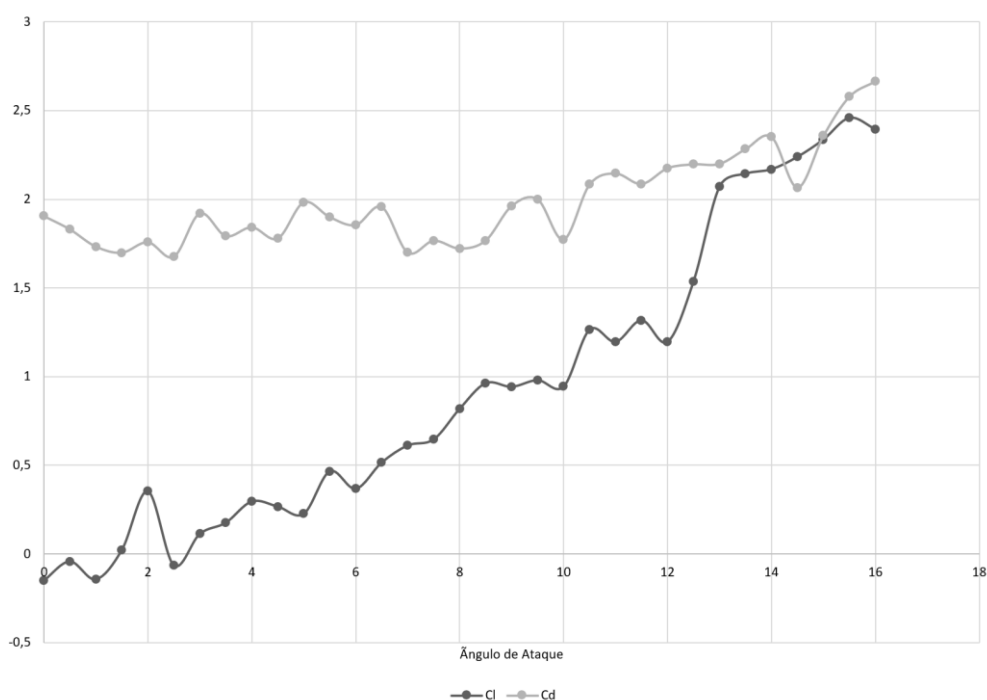


**Fonte: Autoria própria (2022)**

Os resultados obtidos por LBM, em contraponto aos do *Ansys*, capturaram muito bem os efeitos de turbulência. As figuras do APÊNTICE A mostram os resultados obtidos dos campos de velocidade para diferentes ângulos de ataque, exportados e tratados no *ParaView*.

Para o cálculo dos coeficientes de arrasto e sustentação foi utilizada as Equações (3 e (4 respectivamente e o resultado está mostrado no gráfico da Figura 36.

**Figura 36 - Coeficiente de arrasto e sustentação para o perfil DU 97-W-300 sem VGs obtida pelo método de *Lattice Boltzmann* e  $Re = 3.10^6$**



Fonte: Autoria própria (2022)

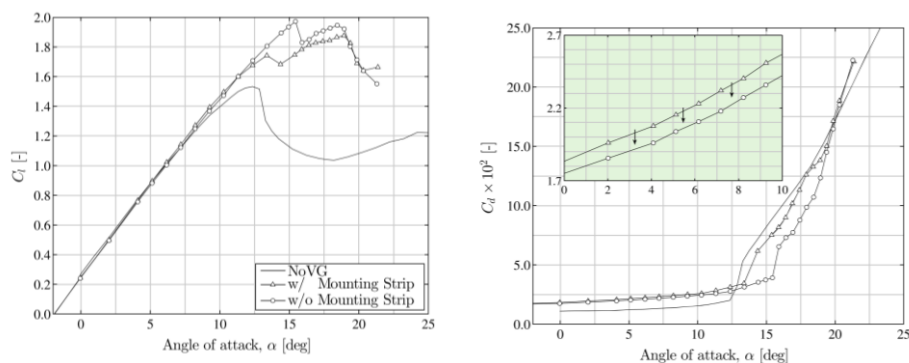
Os coeficientes de arrasto e sustentação para o perfil DU 97-W-300 resultados presentes na literatura são mostrados na Figura 37. Os resultados encontrados pelo método de *Lattice Boltzmann* não são como esperados.

A não exatidão dos resultados obtidos pode ser atribuída a diversos fatores, como, resolução e tamanho do volume de controle, ambos limitados pela quantidade de memória de vídeo disponível.

A resolução insuficiente faz com que ocorra um efeito de escada no aerofólio, mudando sua geometria e distanciando do problema real, já o tamanho do volume de controle limita a capacidade de analisar toda influência que o aerofólio trás no escoamento.

Outro fator relacionado ao método de cálculo está em se utilizar uma placa gráfica focada em computadores pessoais, cujo limite de ponto flutuante é de 16 *bits*, enquanto os cálculos são realizados em 32 *bits*, portanto perdendo precisão a cada iteração.

**Figura 37 – Resultados do coeficiente de sustentação e arrasto obtidos em túnel de vento e  $Re = 3 \cdot 10^6$  para o perfil DU-97-W-300 sem modificações representado pela linha contínua**



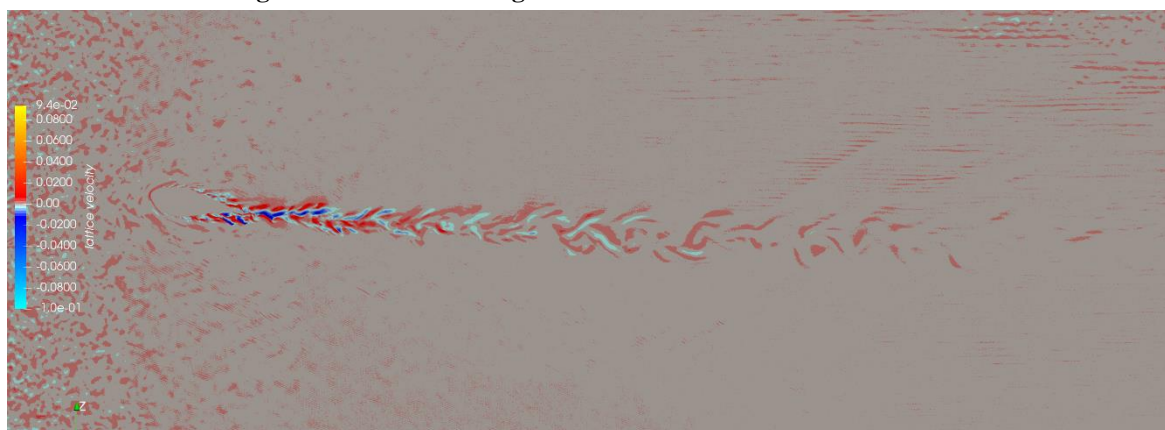
**Fonte: Baldacchino (2018)**

O desprendimento do escoamento neste aerofólio para  $Re = 3 \cdot 10^6$ , começa a ocorrer com um ângulo de ataque em torno de  $12^\circ$ . Na Figura 38 é possível ver esse desprendimento ocorrendo e a partir da

Figura 39 não há mais uma camada limite presa no perfil do aerofólio.

Segundo os dados obtidos por Barone (2009) este desprendimento realmente ocorre em torno de  $12^\circ$ , mostrado pela queda na sustentação gerada.

**Figura 38 – Vorticidade gerada à um AoA de  $12^\circ$  e  $Re = 3 \cdot 10^6$**



**Fonte: Autoria própria (2022)**

**Figura 39 – Vorticidade gerada à um AoA de 15° e  $Re = 3 \cdot 10^6$**

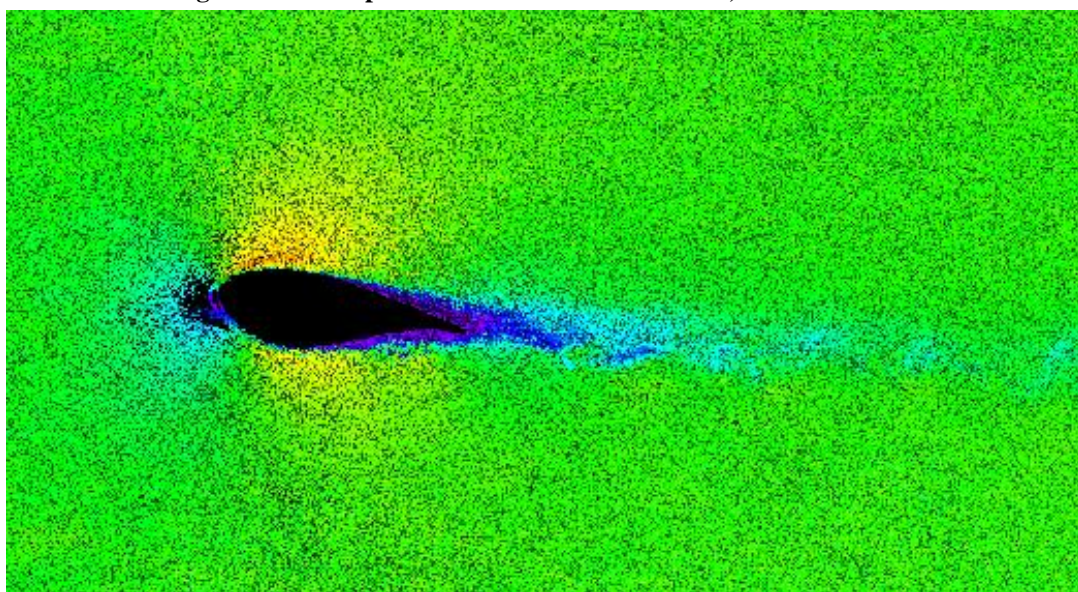


**Fonte: Autoria própria (2022)**

É possível se obter ainda toda a vorticidade gerada no escoamento devido ao alto número de *Reynolds* para um escoamento externo. Neste aspecto o solucionador baseado nas equações de *Lattice Boltzmann* se mostrou muito eficiente.

No campo de velocidades obtido pelo próprio *FluidX3D* é possível ver em cor roxa (Figura 40) uma maior velocidade na região de baixa pressão do aerofólio. Na esteira é possível notar a turbulência gerada (Figura 41), diferente do campo de velocidades apresentado pelo *Ansys Fluent* à um mesmo ângulo de ataque e número de *Reynolds*.

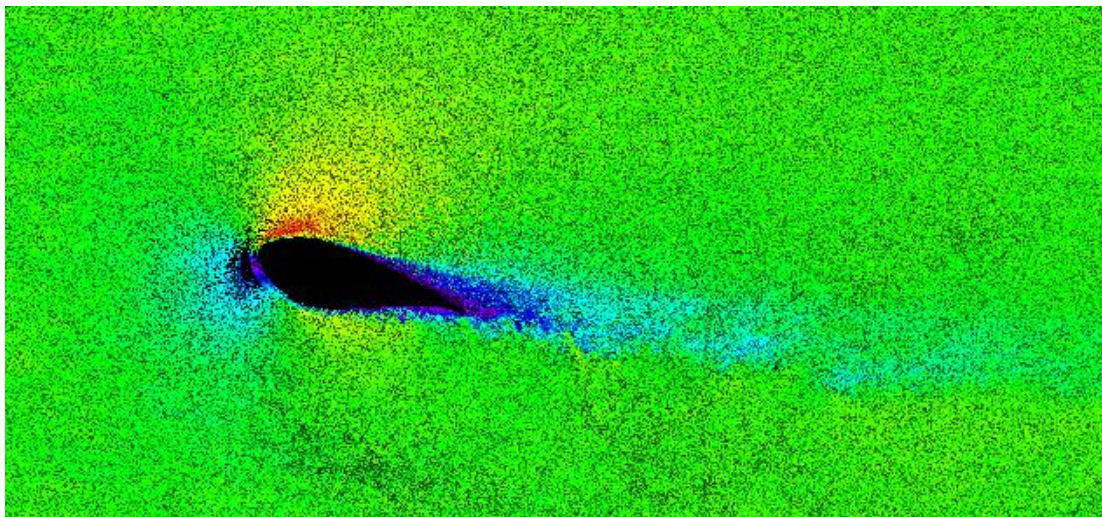
**Figura 40 – Campo de velocidades com AoA de 9,5° e  $Re = 3 \cdot 10^6$**



**Fonte: Autoria própria (2022)**



Figura 41 - Campo de velocidades com AoA de 16° e  $Re = 3 \cdot 10^6$



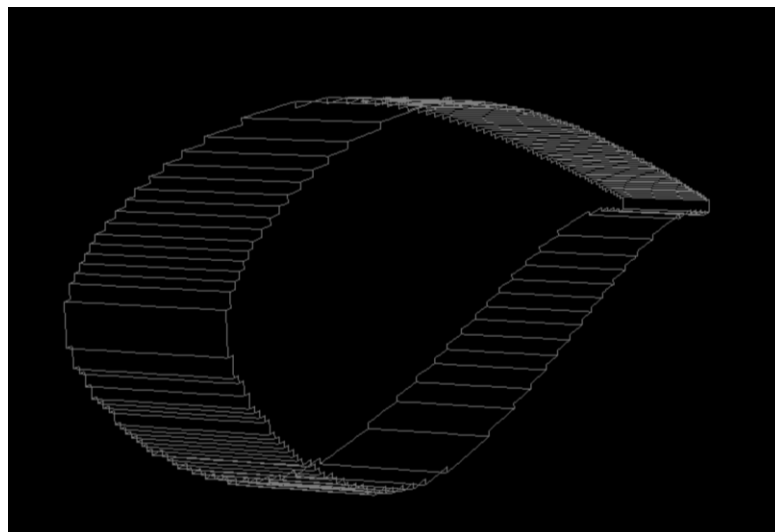
Fonte: Autoria própria (2022)

Para o caso com os geradores de vórtice a resolução não foi possível para capturar tais pequenas geometrias, o que impossibilitou a simulação e obtenção de dados para comparação.

A única forma de capturar a geometria do gerador de vórtice foi a de se diminuir o volume de controle, porém impossibilitando a captura do escoamento e geração da camada limite.

A Figura 42 mostra como ficou o aerofólio DU 97-W-300 com os geradores de vórtice após a conversão para *Voxels* no *software FluidX3D*.

Figura 42 – Geometria DU 97-W-300 com VGs NACA 0012 após conversão para *Voxel*



Fonte: Autoria própria (2022)

## 5 CONCLUSÃO

Nesse trabalho foi analisado o método mais tradicional utilizado em *softwares* comerciais, expondo seus pontos fracos, como a dificuldade em modelar problemas reais com alto Reynolds.

Também se analisou um método ainda pouco presente na indústria, porém já bastante difundido pela academia, baseado nas equações de Lattice Boltzmann. Este método se mostrou promissor e com um custo computacional bem menor, possibilitando capturar efeitos de turbulência de maneira rápida e com certa precisão.

Por mais que o objetivo final não tenha sido atingido e os dados não tenham se aproximado aos fornecidos pela literatura, foi possível se estudar a dificuldade e as limitações em simular escoamentos com alto número de *Reynolds*, além de também ter sido possível se capturar os efeitos causados pela turbulência.

Dentro do campo da mecânica dos fluídos e aerodinâmica, estudar o comportamento de um sistema e prever seu funcionamento é uma tarefa essencial, a simulação fluido computacional é uma ferramenta importante no desenvolvimento de máquinas, retirando a necessidade de grandes túneis de vento e elaboração de complexos protótipos, reduzindo o custo e tempo de um projeto.

Com o advento da tecnologia e do poder computacional, tais simulações estarão ao alcance através de qualquer computador, não necessitando de computadores de alto custo e complexidade, difundindo o conhecimento e domínio desta área para todos engenheiros, buscando sempre contribuir e causar um impacto positivo.

## 6 REFERÊNCIAS

AIDER, Jean-Luc e BEAUDOIN, Jean-François e WESFREID, José Eduardo. **Drag and lift reduction of a 3D bluff-body using active vortex generators**. Experiments in Fluids, v. 48, n. 5, p. 771–789, Maio 2010.

BALOGH, Allison. **Bigger, better blades for wind turbines | Research and Innovation**. Disponível em: <<https://ec.europa.eu/research-and-innovation/en/horizon-magazine/bigger-better-blades-wind-turbines>>. Acesso em: 9 maio 2022.

**Bigger, better blades for wind turbines**. [S.d.].

BOHMIE, Kyle e MANOHARAN, Sanjivan. **Testing the Efficacy of Micro Vortex Generator Geometries on Boundary Layer Separation Mitigation**. p. 17, 2020.

ÇENGEL, Yunus A. e CIMBALA, John M. **Fluid mechanics: fundamentals and applications**. Fourth edition ed. New York, NY: McGraw-Hill Education, 2018.

CEYHAN, Ozlem e TIMMER, W.A. (Nando). Experimental evaluation of a non-conventional flat back thick airfoil concept for large offshore wind turbines. In: 2018 APPLIED AERODYNAMICS CONFERENCE, 25 Jun 2018, Atlanta, Georgia. Anais... Atlanta, Georgia: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 25 Jun 2018. Disponível em: <<https://arc.aiaa.org/doi/10.2514/6.2018-3827>>. Acesso em: 2 maio 2022.

**CFD Analysis for the Performance of Micro-vortex Generator on aerofoil and vertical axis turbine.pdf**. . [S.l: s.n.]. , [S.d.]

CHEN, Shiyi e DOOLEN, Gary D. **LATTICE BOLTZMANN METHOD FOR FLUID FLOWS**. Annual Review of Fluid Mechanics, v. 30, n. 1, p. 329–364, Jan 1998.

FOX, Robert W. e MITCHELL, John W. **Fox and McDonald's introduction to fluid mechanics**. 10th edition ed. Hoboken: Wiley, 2019.

GAO, Linyue e colab. **Effects of vortex generators on a blunt trailing-edge airfoil for wind turbines**. Renewable Energy, v. 76, p. 303–311, Abr 2015.

GRIFFIN, D.A. **Investigation of vortex generators for augmentation of wind turbine power performance**. , nº NREL/SR--440-21399, 414367. [S.l: s.n.], 1 Dez 1996. Disponível em: <<http://www.osti.gov/servlets/purl/414367-2i25d4/webviewable/>>. Acesso em: 9 maio 2022.

HWANGBO, Hoon e colab. **Quantifying the effect of vortex generator installation on wind power production: An academia-industry case study**. Renewable Energy, v. 113, p. 1589–1597, Dez 2017.

JIRASEK, Adam. **Vortex-Generator Model and Its Application to Flow Control**. Journal of Aircraft, v. 42, n. 6, p. 1486–1491, Nov 2005.

LIN, John C. **Review of research on low-profile vortex generators to control boundary-layer separation**. Progress in Aerospace Sciences, v. 38, n. 4–5, p. 389–420, Maio 2002.

**Minha Biblioteca: Mecânica dos fluidos.** Disponível em: <<https://integrada.minhabiblioteca.com.br/reader/books/9788580554915/pageid/633>>. Acesso em: 5 maio 2022.

MOHAMAD, A. A. **Lattice Boltzmann Method**. London: Springer London, 2011. Disponível em: <<http://link.springer.com/10.1007/978-0-85729-455-5>>. Acesso em: 26 out 2022.

NAAKTGEBOREN, C e DE ANDRADE, Felipe Nascimento. **Lattice Nomenclature Survey from LGA to Modern LBM**. preprint. [S.l.]: engrXiv, 26 Jun 2020. Disponível em: <<https://engrxiv.org/index.php/engrxiv/preprint/view/1079>>. Acesso em: 12 dez 2022.

PETER SCHAFFARCZYK, Alois e MOMBER, Andreas e STENZEL, Volkmar. **Wind tunnel investigations of DU97-W-300-mod equipped with riblets**. Wind Energy, v. 24, n. 10, p. 1156–1161, Out 2021a.

PETER SCHAFFARCZYK, Alois e MOMBER, Andreas e STENZEL, Volkmar. **Wind tunnel investigations of DU97-W-300-mod equipped with riblets**. Wind Energy, v. 24, n. 10, p. 1156–1161, Out 2021b.

STORMS, Bruce L. e JANG, Cory S. **Lift enhancement of an airfoil using a Gurney flap and vortex generators**. Journal of Aircraft, v. 31, n. 3, p. 542–547, Maio 1994.

TROLDBORG, Niels e ZAHLE, Frederik e SØRENSEN, Niels N. **Simulations of wind turbine rotor with vortex generators**. Journal of Physics: Conference Series, v. 753, p. 022057, Set 2016.

**V236-15.0 MW<sup>TM</sup>**. Disponível em: <<https://us.vestas.com/en-us/products/offshore/V236-15MW>>. Acesso em: 10 maio 2022.

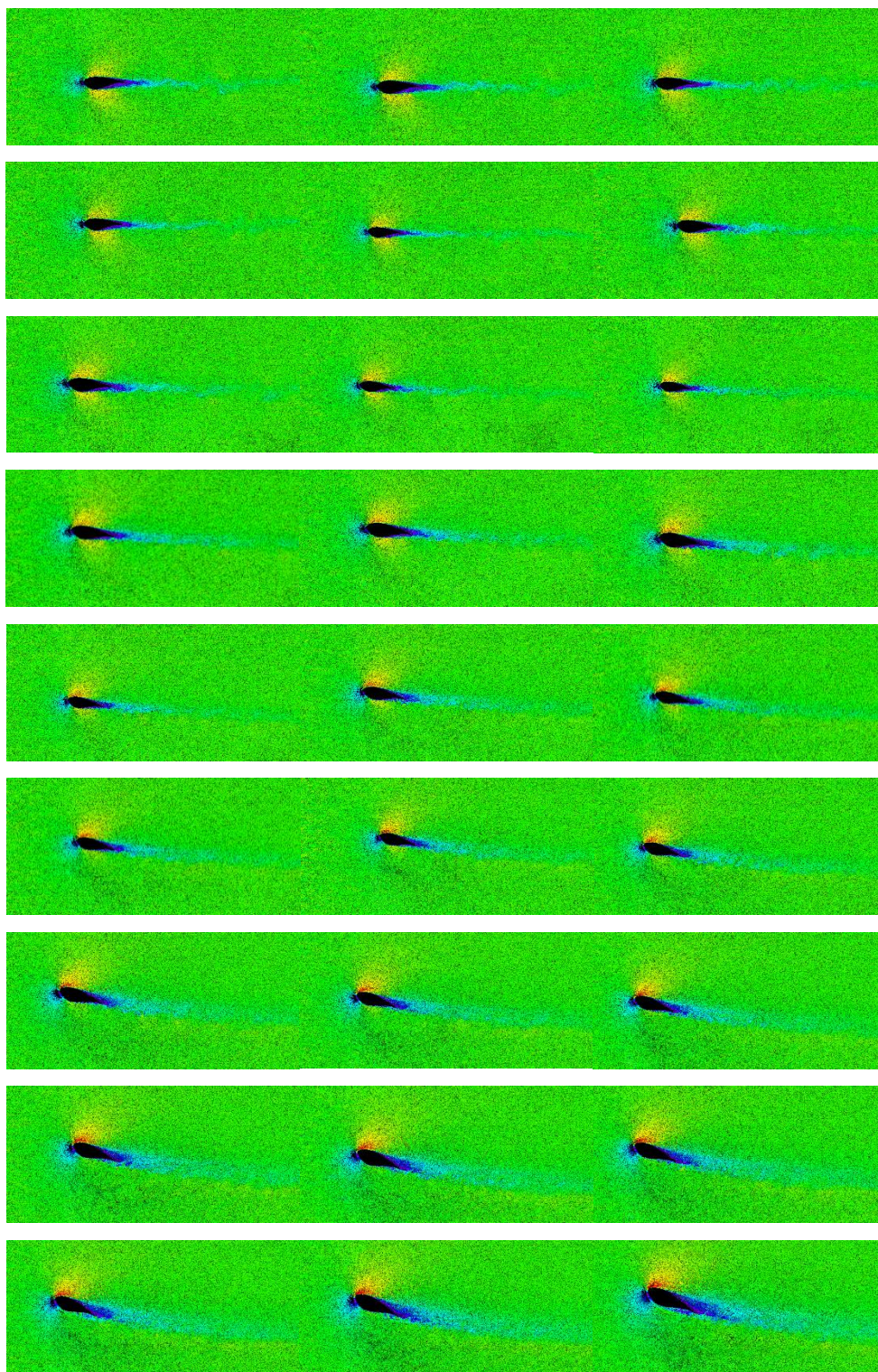
**V236-15.0 MW<sup>TM</sup> prototype | Vestas.** Disponível em: <<https://www.vestas.com/en/products/offshore/V236-15MW/prototype>>. Acesso em: 19 nov 2022.

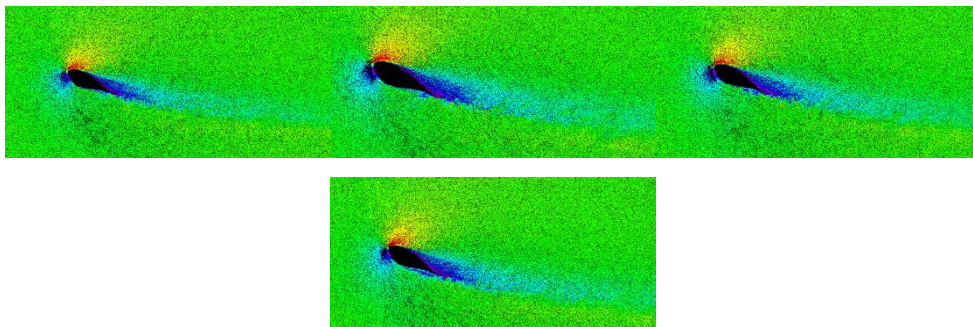
WAGNER, Alexander J. **A Practical Introduction to the Lattice Boltzmann Method**. p. 46, 2008.

XUE, Sidney e colab. **Advanced Aerodynamic Modeling of Vortex Generators for Wind Turbine Applications**. p. 11, 2010.

**APÊNDICE A – Figuras dos campos de velocidade obtidos**

**CAMPO DE VELOCIDADE OBTIDO AO VARIAR O ÂNGULO DE ATAQUE ENTRE  
0° E 30° COM  $Re = 3 \cdot 10^6$**

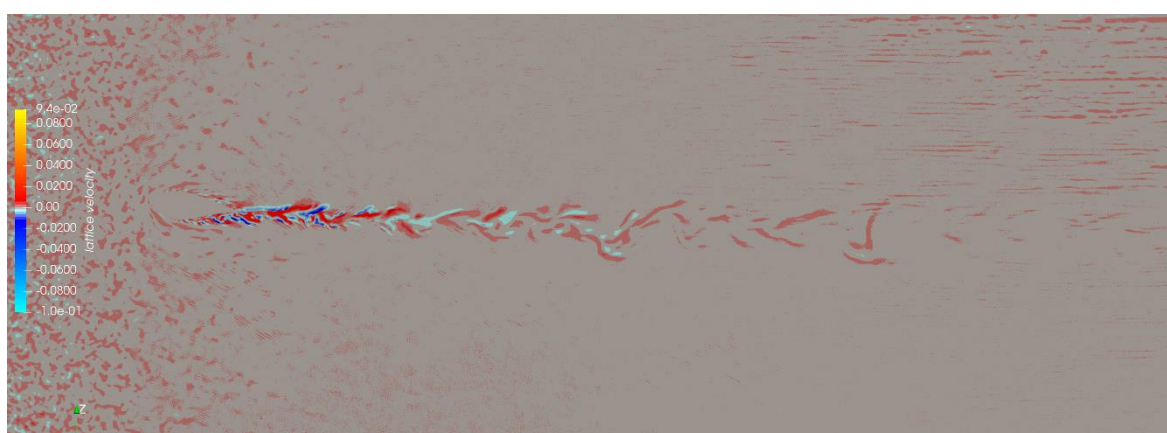
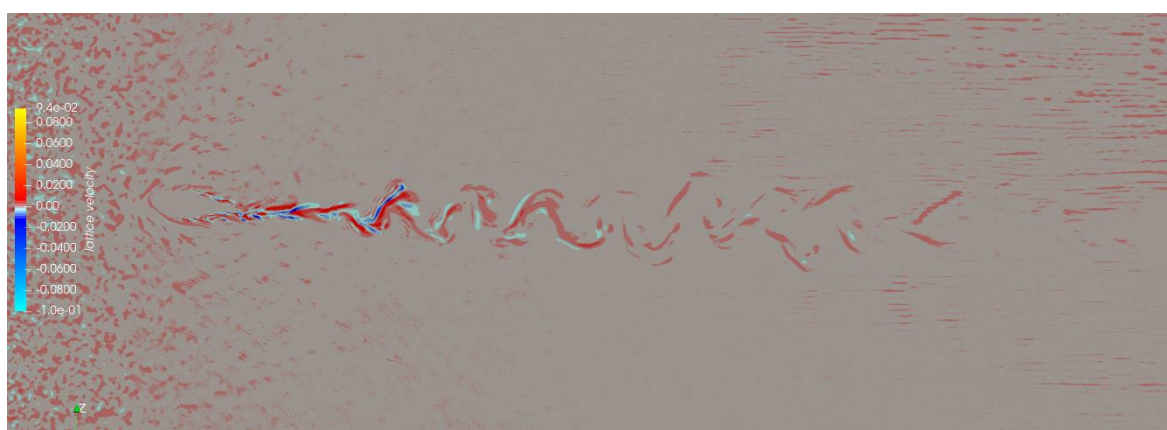
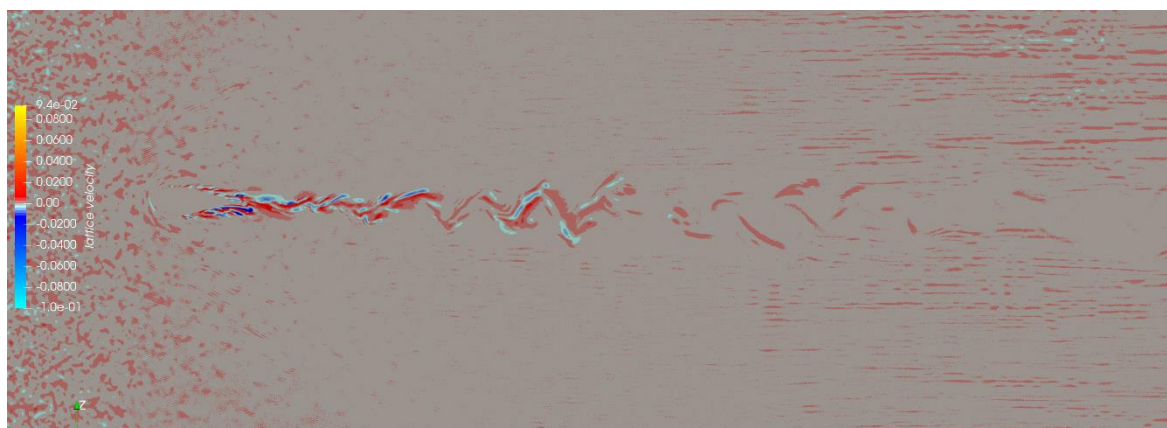


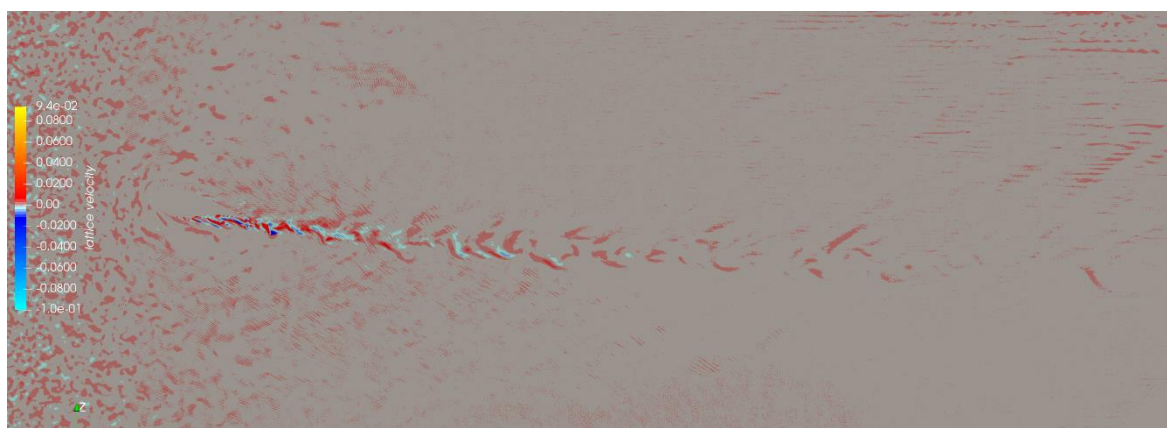
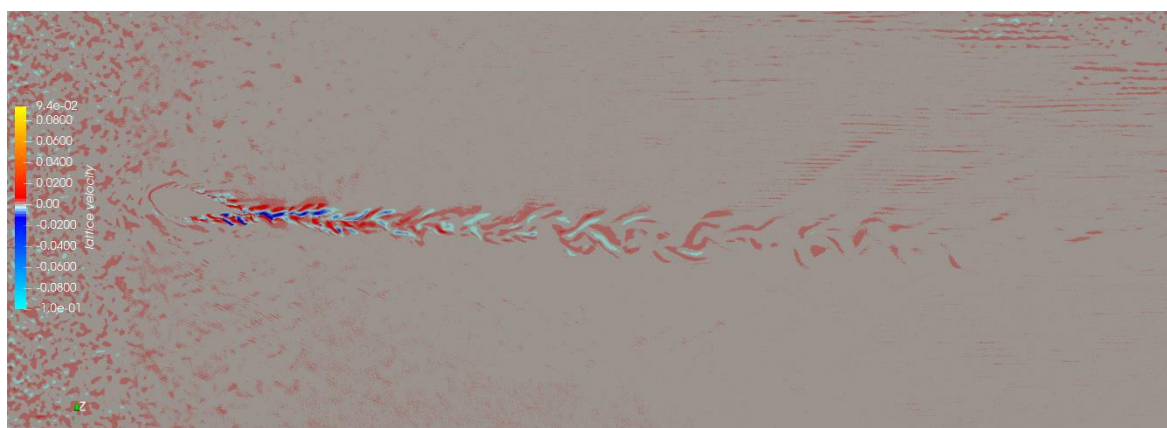
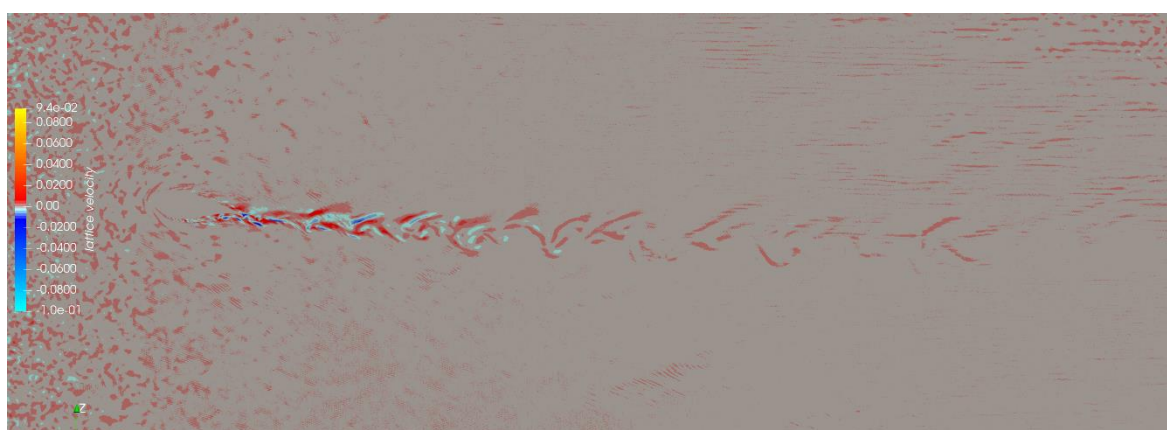
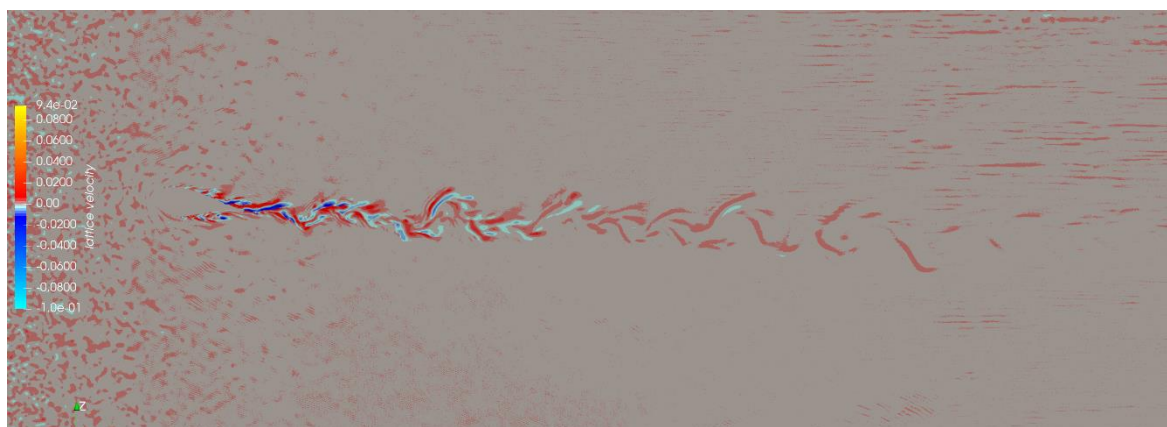


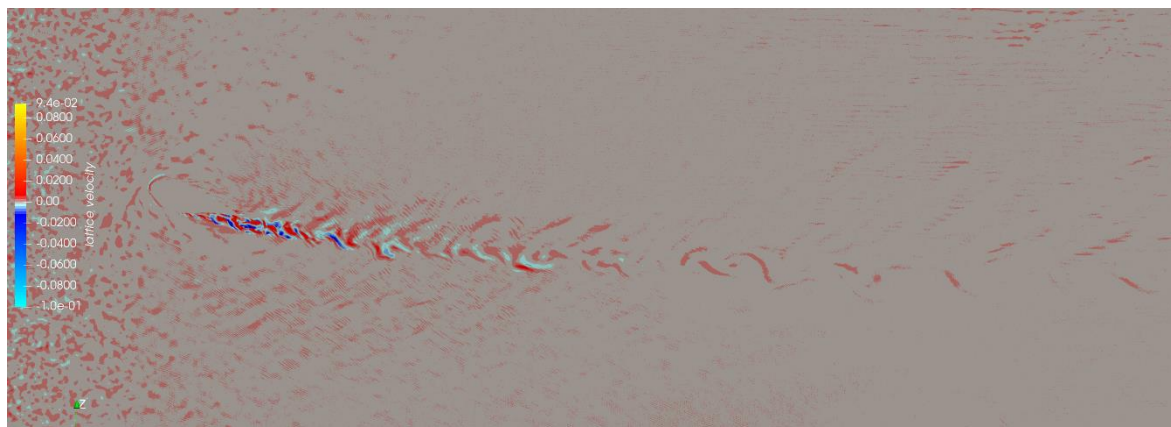
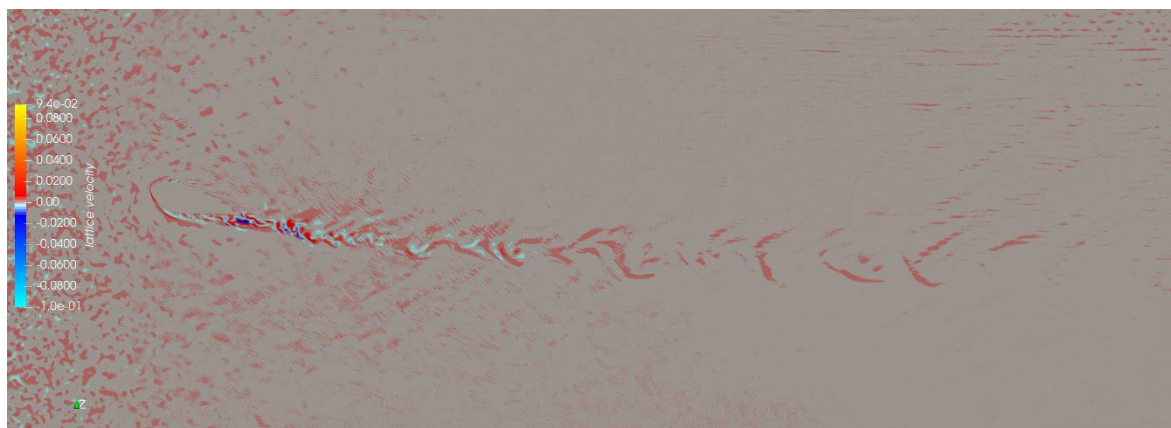
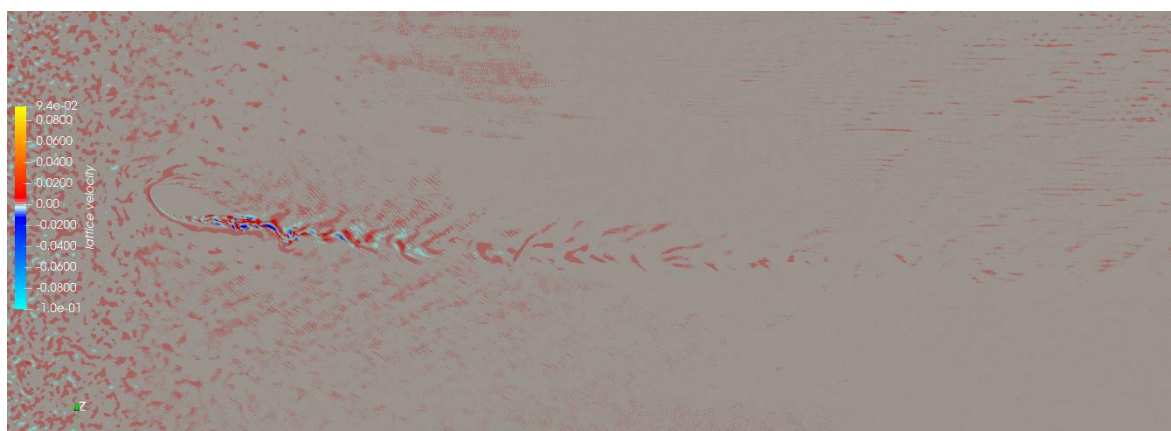
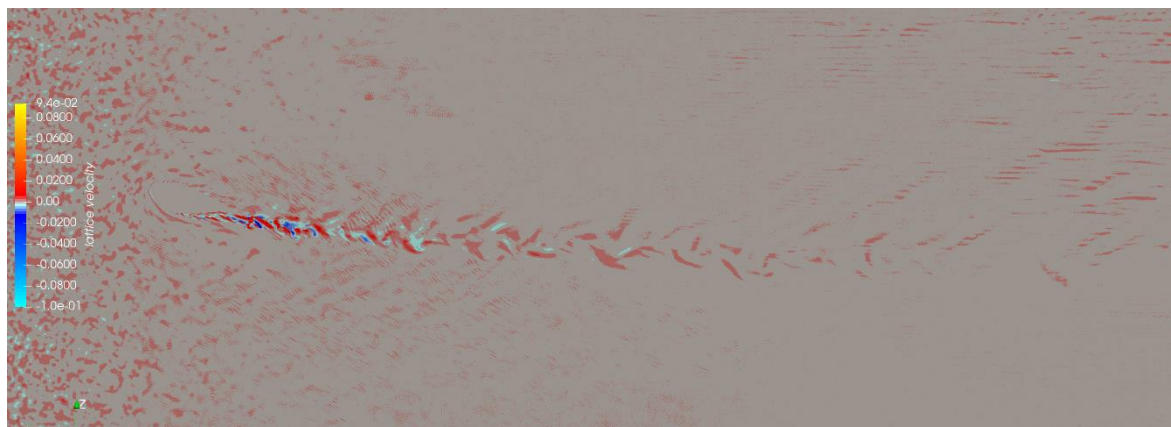
**APÊNDICE B – Figuras da vorticidade gerada**

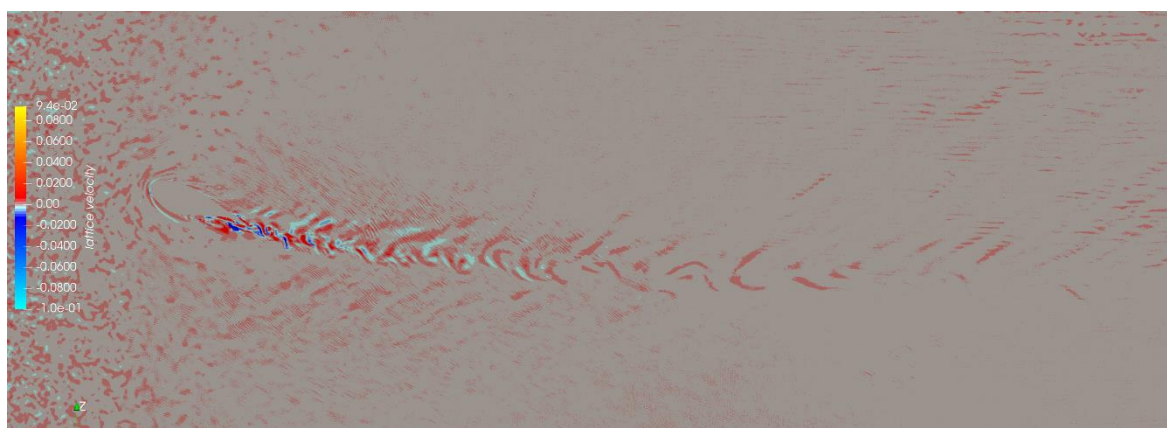
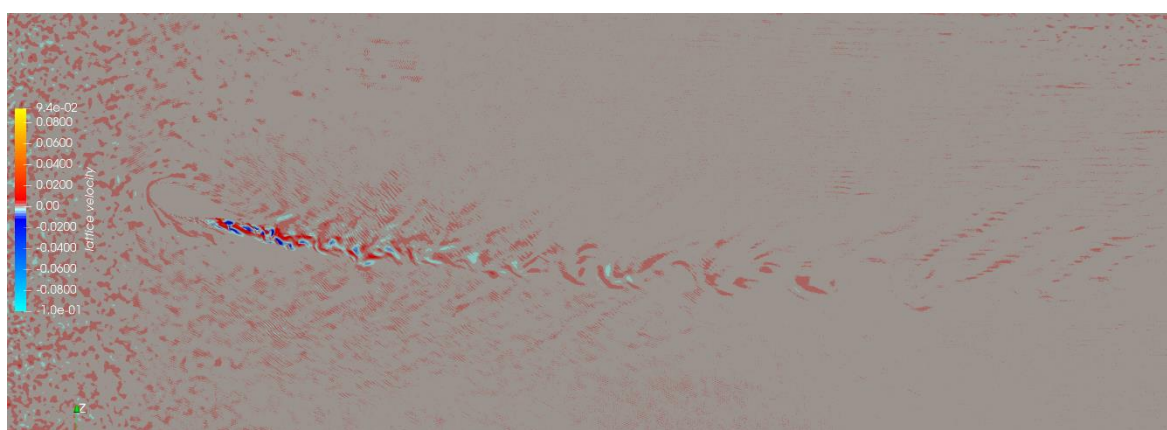


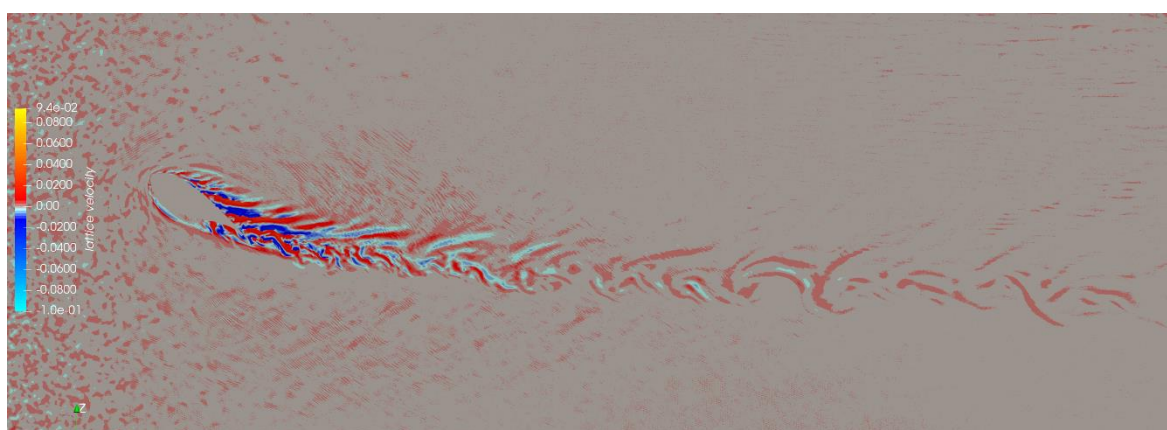
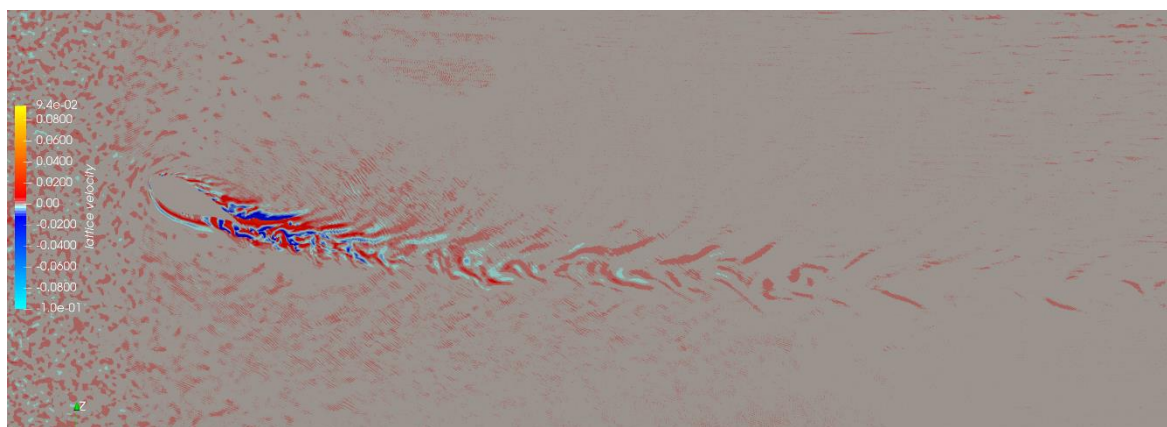
**VORTICIDADE OBTIDA AO VARIAR O ÂNGULO DE ATAQUE ENTRE 5° E 30°  
E 30° COM  $Re = 3 \cdot 10^6$**











## **APÊNDICE C – Código programado para simulação**

## CÓDIGO DO ARQUIVO CONFIGURAÇÃO DO SETUP CONTIDO NO PROGRAMA FLUIDX3D

```

#include "setup.hpp"
#include <iostream>
#include <fstream>

void main_setup() {

    // variáveis em SI units (m, kg, s)
    const float si_x = 0.914f;           // corda do aerofólio
    m
    const float si_u = 48.577665f; // velocidade do escoamento externo      m/s

    const float si_rho = 1.225f;        // densidade do ar
    kg/m^3
    const float si_nu = 1.48E-5f;      // viscosidade cinemática do ar      m^2/s

    // variáveis em LBM
    const float lbm_u = 0.075f//0.072164f;           // velocidade em unidades de Lattice

    const float lbm_rho = 1.0f;                    // densidade em unidades de
    Lattice
    const float lbm_x = 384.0*0.5f;                // tamanho da corda em
    unidades de Lattice

    // define a conversão entre as unidades no SI e em Lattice
    units.set_m_kg_s(lbm_x, lbm_u, lbm_rho, si_x, si_u, si_rho);

    // calculo da viscosidade cinemática do ar em unidades de Lattice
    const float lbm_nu = units.nu(si_nu);

    // define a resolução do volume de controle baseado no tamanho da corda (lbm_x)
    const uint Nx = 0.126*to_uint(lbm_x);
    const uint Ny = 18*to_uint(lbm_x);
    const uint Nz = 5.3333334*to_uint(lbm_x);

    // AoA inicial
    float rot = 0.0;
    int rot10 = 0;

    // loop variando AoA
    while(rot>=-30.0f) {

        int rot_step = 0;
    }
}

```

```

// create LBM object
    LBM lbm(Nx, Ny, Nz, lbm_nu );

//posição e rotação do aerofólio
    const float size = lbm_x;
    const float3 center = float3(lbm.center().x, 3.20f*size, lbm.center().z+0.00f*size);
    const float3x3 rotation = float3x3(float3(1, 0, 0), radians(rot))*float3x3(float3(0, 0, 1),
radians(90.0f))*float3x3(float3(1, 0, 0), radians(90.0f));

// carrega a geometria e define o tipo de contorno
    lbm.voxelize_stl(get_exe_path()+"/../stl/du-97-w-300.stl", center, rotation, size,
TYPE_S|TYPE_X);

// condições de contorno do volume de controle
    for(uint n=0u, x=0u, y=0u, z=0u; n<lbm.get_N(); n++, lbm.coordinates(n, x, y, z)) {
        if(!(lbm.flags[n]&TYPE_S)) lbm.u.y[n] = lbm_u; // initial velocity
        if(x==0u||x==Nx-1u||y==0u||y==Ny-1u||z==0u||z==Nz-1u) lbm.flags[n] =
TYPE_E;
    }

// time steps até entrar em "equilíbrio"
    lbm.run(50000u);
    //lbm.u_write_device_to_vtk(get_exe_path()+"export/vtk/"+to_string(rot10)+"");
    while(lbm.get_t())<60000u) {
        key_1 = false;

        // time steps entre salvar prints
        lbm.run(500u);

        // prints vorticidade
        // salva print em PNG panorâmica
        key_2= true;
        lbm.graphics.set_camera_centered(0.0f, 0.0f, 60.0f, 1.5f);

        lbm.graphics.write_frame_png(get_exe_path()+"export/prints/zoom1/vort/"+to_string(rot10)+" "+to_str
ing(rot_step));

        // salva print em PNG zoom
        lbm.graphics.set_camera_centered(0.0f, 0.0f, 60.0f, 2.5f);

        lbm.graphics.write_frame_png(get_exe_path()+"export/prints/zoom2/vort/"+to_string(rot10)+" "+to_str
ing(rot_step));

        key_2 = false;

        // prints velocidade
        key_4 = true;
        // salva print em PNG panorâmica
        lbm.graphics.set_camera_centered(0.0f, 0.0f, 60.0f, 1.5f);

```



```

    lbm.graphics.write_frame_png(get_exe_path()+"export/prints/zoom1/particulas/"+to_string(rot10)+" "+
to_string(rot_step));

                                // salva print em PNG zoom
                                lbm.graphics.set_camera_centered(0.0f, 0.0f, 60.0f, 2.5f);

    lbm.graphics.write_frame_png(get_exe_path()+"export/prints/zoom2/particulas/"+to_string(rot10)+" "+
to_string(rot_step));

                                key_4 = false;

                                rot_step = rot_step + 1;
                                }

                                // prints streamlines
                                key_3 = true;
                                // salva print em PNG panorâmica
                                lbm.graphics.set_camera_centered(0.0f, 0.0f, 60.0f, 1.5f);

lbm.graphics.write_frame_png(get_exe_path()+"export/prints/zoom1/linhas/"+to_string(rot10)+"");
                                // salva print em PNG zoom
                                lbm.graphics.set_camera_centered(0.0f, 0.0f, 60.0f, 2.5f);

lbm.graphics.write_frame_png(get_exe_path()+"export/prints/zoom2/linhas/"+to_string(rot10)+"");

                                // desativa streamlines
                                key_3 = false;

// calcula ao campo de força (GPU) e copia (CPU)
    lbm.calculate_force_on_boundaries();
    lbm.F.read_from_device();

// exporta o .vtk

    lbm.u_write_device_to_vtk(get_exe_path()+"export/vtk/"+to_string(rot10)+"");
    lbm.F_write_device_to_vtk(get_exe_path()+"export/vtk/"+to_string(rot10)+"");

// calcula a força resultante no aerofólio (pontos marcados com tipo S e X)
    double lbm_force_x=0.0, lbm_force_y=0.0, lbm_force_z=0.0;
    for(uint n=0u, x=0u, y=0u, z=0u; n<lbm.get_N(); n++, lbm.coordinates(n, x, y, z)) {
        if(lbm.flags[n]==(TYPE_S|TYPE_X)) {
            lbm_force_x += (double)lbm.F.x[n];
            lbm_force_y += (double)lbm.F.y[n];
            lbm_force_z += (double)lbm.F.z[n];
        }
    }

// conversão de Lattice para SI
    const float si_force_x = units.si_F((float)lbm_force_x);

```

```

const float si_force_y = units.si_F((float)lbm_force_y);
const float si_force_z = units.si_F((float)lbm_force_z);
const float si_u_calc = units.si_u((float)lbm_u);
const float Re_si = units.si_Re(si_x, si_u, si_nu);

// printa informações e salva força de arrasto e sustentação
print_info("lift force = "+to_string(si_force_z)+" N");
print_info("drag force = "+to_string(si_force_y)+" N");
print_info("z force = "+to_string(si_force_x)+" N");
print_info(" ");
print_info("Re = "+to_string(Re_si));
print_info("u = "+to_string(si_u_calc));
write_file(get_exe_path()+"export/txt/lift/"+to_string(rot10)+".txt",
to_string(si_force_z));
write_file(get_exe_path()+"export/txt/drag/"+to_string(rot10)+".txt",
to_string(si_force_y));

// limpar os dados antes de recomeçar
lbm.reset();

// incremento no AoA
rot = rot - 1.0;
rot10 = rot10 - 10;

}
}

```