



ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DE COLUNA DE ILUMINAÇÃO AUTONOMA SOLAR

Matheus Wessling

Nº 39697

Dissertação apresentada(o) à
Escola Superior de Tecnologia e Gestão
Instituto Politécnico de Bragança
para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Industrial

Esta dissertação não inclui as críticas e sugestões feitas pelo Júri

Julho 2020



ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DE COLUNA DE ILUMINAÇÃO AUTONOMA SOLAR

Matheus Wessling

Dissertação apresentada(o) à
Escola Superior de Tecnologia e Gestão
Instituto Politécnico de Bragança
para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Industrial
no âmbito da dupla diplomação com a
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Este trabalho foi efetuado sob orientação de:
Professor Doutor Carlos Alberto Rodrigues Andrade
E coorientação de:
Professor Doutor Sérgio Manuel de Sousa Rosa
Professor Doutor Francisco Augusto Aparecido Gomes

Esta dissertação não inclui as críticas e sugestões feitas pelo Júri

Julho 2020

Agradecimentos

Primeiramente gostaria de agradecer a minha família pelo apoio incondicional que me foi prestado em toda minha trajetória acadêmica, desde o início na UTFPR, até a decisão de participar do programa que culminou na realização deste trabalho.

Também gostaria de agradecer as instituições que fizeram com quem tudo isso foi possível através da realização do programa de Dupla Diplomação, tanto a Universidade Tecnológica Federal do Paraná como o Instituto Politécnico de Bragança, em especial esta última que sempre trabalhou ativamente para acolher todos os estudantes internacionais com igualdade e fraternidade.

Cabe também o agradecimento a todos que fizeram desta jornada especial, tanto os amigos e colegas da minha universidade no Brasil que auxiliaram na obtenção de conhecimento agregada em toda minha jornada acadêmica, mas ainda em especial os que puderam participar ativamente e prestaram seu apoio emocional neste período longe de casa.

Por fim, mas não menos importante, gostaria de agradecer de forma especial meus orientadores que auxiliaram no caminho da realização deste trabalho, o Professor Doutor Carlos Alberto Rodrigues Andrade pela orientação prestada e os coorientadores Professor Doutor Sérgio Manuel de Sousa Rosa e Professor Doutor Francisco Augusto Aparecido Gomes que auxiliaram em pontos-chaves no andamento e execução do presente estudo.

Resumo

Na elaboração de projetos de colunas autónomas solares, estas estarão sujeitas aos efeitos externos oriundos da natureza, torna-se necessário a avaliação destes com um certo grau de confiabilidade. Contudo, as implicações destes esforços apresentam quantificações não muito precisas e podem gerar comportamentos não previstos, promovendo um desempenho final inferior ao desejado, como o que ocorre com a ação do vento. Neste trabalho realizou-se um estudo a cerca do coeficiente de arrasto através da construção de um modelo em escala de 1:30 de uma coluna de iluminação autónoma solar através de impressão 3D, para realização de ensaios experimentais em túnel de vento, com objetivo de analisar o provável comportamento de uma estrutura real frente aos esforços submetidos. Além disso, utilizando-se de um modelo computacional, estabeleceu-se uma análise numérica a fim de comparar quantitativamente os resultados obtidos através de dois diferentes *solvers* e duas diferentes teorias de turbulência frente aos resultados experimentais. Os estudos computacionais feitos neste trabalho empregam modelos de elementos finitos e volumes finitos, desenvolvidos com o *software* ANSYS®. A relevância dos resultados obtidos são primordiais para a empresa a qual fábrica o componente, visto que futuras correções podem ser feitas a nível de projeto tomando como base o presente estudo aqui elaborado, possibilitando ganhos na vida útil dos componentes e reduzindo possíveis custos de reposição de peças que não atendem o objetivo desejado.

Palavras Chave: coeficiente de arrasto, análise numérica de fluídos, impressão 3D, iluminação autónoma solar.

Abstract

In the elaboration of autonomous solar column designs, these will be subject to external effects from nature, it is necessary to evaluate these with a certain degree of reliability. However, the implications of these efforts present quantifications that are not very accurate quantifications and can generate unpredictable behaviors, promoting a lower than desired final performance, as with wind action. In this work, a study was carried out about the drag coefficient through the construction of a 1:30 scale model of an autonomous solar lighting column through 3D printing, to carry out experimental tests in a wind tunnel, with the objective of analyze the likely behavior of a real structure in the face of the efforts submitted. Also, a computational model to perform a numerical analysis in order to quantitatively compare the results obtained through two different solvers and two different turbulence theories compared to the experimental results. The computational studies done in this work employ finite element and finite volume models, developed in ANSYS®. The relevance of the results obtained are paramount for the company that manufactures the component, since corrections can be made in the project and consequently the life of the components will be longer, reducing possible replacement costs of parts that do not meet the desired goal.

Keywords: drag coefficient, numerical analysis of fluids, 3D printing, autonomous solar lighting

Índice

AGRADECIMENTOS	I
RESUMO.....	II
ABSTRACT.....	III
ÍNDICE.....	IV
LISTA DE FIGURAS.....	VI
LISTA DE TABELAS	XI
NOMENCLATURA	XIII
CAPÍTULO 1: INTRODUÇÃO	1
1.1 JUSTIFICATIVA	2
1.2 OBJETIVOS	3
1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO.....	3
1.4 ESTRUTURA EM ESTUDO	4
1.5 APRESENTAÇÃO DA EMPRESA.....	5
CAPÍTULO 2: ESTADO DA ARTE	7
2.1 MECÂNICA DOS FLUÍDOS	7
2.1.1 <i>Equações Básicas</i>	8
2.1.2 <i>Forças Oriundas do Escoamento</i>	8
2.1.2.1 Lei de Conservação da Massa	9
2.1.2.2 Equações de Navier-Stokes	11
2.1.2.3 Número de Reynolds	14
2.1.2.4 Camada Limite	15
2.1.2.5 Regimes de Escoamento.....	17
2.1.2.6 Força de Arrasto	18
2.1.2.7 Força de Sustentação	21
2.2 AÇÕES DO VENTO	21
2.2.1 <i>Perfis de Velocidade do Vento</i>	26
2.2.1.1 Lei Logarítmica.....	26
2.2.1.2 Lei de Potência.....	27
2.2.2 <i>Turbulência</i>	28
2.2.2.1 Intensidade de Turbulência.....	28
2.2.2.2 Função Densidade de Probabilidade.....	29

2.2.2.3	Espectros de Potência das Rajadas de Vento.....	30
2.2.3	<i>Coefficiente de correlação</i>	32
2.2.4	<i>Influência da Rugosidade no escoamento do Vento</i>	33
2.3	INTRODUÇÃO AO TÚNEL DE VENTO.....	34
2.4	MANUFATURA ADITIVA	36
2.4.1	<i>Modelação por Fusão e Deposição (FDM)</i>	39
2.5	MÉTODO NUMÉRICO.....	41
2.5.1	<i>Método dos Elementos Finitos</i>	42
2.5.2	<i>Método dos Volumes Finitos</i>	44
2.5.3	<i>Camada Limite Computacional</i>	47
CAPÍTULO 3: MATERIAIS E MÉTODOS.....		49
3.1	TÚNEL DE VENTO	49
3.2	MODELAÇÃO 3D.....	52
3.3	IMPRESSÃO 3D	55
3.4	SIMULAÇÕES DE ESCOAMENTO	58
3.4.1	<i>Túnel de Vento</i>	58
3.4.2	<i>Espessura da Camada Limite</i>	62
3.4.3	<i>Modelação do escoamento Computacional</i>	62
CAPÍTULO 4: RESULTADOS E DISCUSSÕES.....		69
4.1	EXPERIMENTOS EM TÚNEL DE VENTO	69
4.2	SIMULAÇÕES DE ESCOAMENTO	75
4.3	ANÁLISE DOS RESÍDUOS	79
4.4	ANÁLISE COMPARATIVA	83
CAPÍTULO 5: CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS.....		93
REFERÊNCIAS		97
ANEXOS		100
A1.	DESENHOS TÉCNICOS DOS COMPONENTES ESTRUTURAIS	100
A2.	DESENHOS TÉCNICOS DOS COMPONENTES ESTRUTURAIS EM ESCALA REDUZIDA	106
A3.	RESULTADOS PARA PRIMEIRA CAMADA DE CÉLULAS NA CAMADA LIMITE	109
A4.	RESULTADOS PARA A ESPESSURA DA CAMADA LIMITE	112
A5.	RESULTADOS SIMULAÇÃO	113
A6.	RESULTADOS EXPERIMENTAIS	117

Lista de Figuras

Figura 1. 6 modelos de estruturas fabricadas pela empresa, com foco na estrutura estudada no presente trabalho, adaptado de [4].	4
Figura 2. Diferença em comportamento de um sólido e um líquido devido à força de corte [7].	7
Figura 3. Vazão mássica entrando e saindo por cada uma das faces do volume de controlo [10].	9
Figura 4. Fluxo que entra e que sai do componente x do momento linear através de cada face de um volume de controlo infinitesimal [10].	13
Figura 5. Campos de fluxo laminar e turbulento [14].	15
Figura 6. Esquema de uma camada limite [7].	15
Figura 7. Exemplo dos dois modos de escoamento em uma esfera [7].	17
Figura 8. Demonstração da velocidade durante um escoamento laminar e turbulento [7].	18
Figura 9. Coeficiente de arrasto para um cilindro circular liso como função do número de Reynolds [7].	19
Figura 10. Distribuição de pressão em torno de uma esfera lisa para escoamento nas camadas limite [7].	20
Figura 11. Formação dos ventos devido ao deslocamento das massas de ar.	22
Figura 12. Esquema de representação da força de Coriolos atuando no hemisfério sul [20].	22
Figura 13. Diferentes perfis de velocidade para diferentes tipos de rugosidade do solo, adaptado de [20] originalmente disponível em [23].	24
Figura 14. Esquema do comportamento da “Espiral de Ekman” [24].	24
Figura 15. Espectro de potência da velocidade horizontal do vento perto do solo (Van der Hoven, Brooklyn, EUA), adaptado de [20]., disponível originalmente em [23].	25
Figura 16. Espectro normalizado do componente de velocidade longitudinal (Von Karman-Harris) [26].	31
Figura 17. Escoamento em diferentes topografias do terreno [26].	33

Figura 18. Avião em escala sendo testado em túnel de vento da NASA [29].....	34
Figura 19. Desenho da W. C. Kernot's 'blowing machine' adaptado de[26], originalmente em [30]	35
Figura 20. Layout de um túnel de vento de circuito aberto [26],	35
Figura 21. Um teste de túnel de vento mostra como uma bola de tênis se move pelo ar [29].....	36
Figura 22. Princípio de funcionamento de uma impressora da tecnologia FDM [36].	39
Figura 23. Estratégias de preenchimento de camadas no processo FDM [37].....	40
Figura 24. Representação do domínio e seus subdomínios [53].	42
Figura 25. Elemento triangular [40].	43
Figura 26. Elemento quadrilateral [40].	43
Figura 27. Domínio discretizado em triângulos e quadriláteros [13].	43
Figura 28. Elemento tetraédrico [40].....	44
Figura 29. Elemento hexaédrico [40].	44
Figura 30. a) Estrutura de referência Euleriana: fixa no espaço. b) Estrutura de referência Lagrangeana: móvel no espaço, adaptado de [14].....	45
Figura 31. Desenvolvimento das soluções para a variável de interesse com diferentes malhas [41].	47
Figura 32. Seção de teste do túnel de vento já com a estrutura montada, autoria própria. .	49
Figura 33. Túnel de vento do Laboratório de Mecânica dos Flúidos e Hidraulica do Instituto Politécnico de Bragança, autoria própria.	50
Figura 34. Gráfico da velocidade prevista na seção de testes em função da frequência, autoria própria.....	51
Figura 35. Estrutura de medição das forças atuando sobre a estrutura, autoria própria.....	52
Figura 36. Elementos constituintes da estrutura original: a) Suporte painel solar; b) Placa solar; c) Cabeçote de suporte para painel; d) Fuste (Poste); e) Suporte triangular da luminária; f) Suporte tubular luminária; g) Contentor (Suporte das baterias) [42].	53
Figura 37. Estrutura modelada em tamanho real [42]	54
Figura 38. Exemplo de impressão das estruturas preenchidas, autoria própria.....	55
Figura 39. Conjunto de itens que forma a estrutura: a) Estrutura de suporte do painel solar acoplado com o painel; b) Suporte tubular de iluminação; c) Suporte de	

baterias; d) Tubo acoplado com o suporte superior para o apoio do painel solar [42].	56
Figura 40. Suporte de acoplamento no túnel de vento [42].	57
Figura 41. Modelos finais impressos para testes, autoria própria.	57
Figura 42. Posições da estrutura no experimento: a) face lateral esquerda alinhada; b) face posterior alinhada; c) face direita alinhada; d) face frontal alinhada com o escoamento, autoria própria.	58
Figura 43. Estrutura montada e aferida pronta para o experimento, autoria própria.	59
Figura 44. Comportamento dos carregamentos sobre a estrutura: a) longitudinal e b) transversal, autoria própria.	60
Figura 45. Comprimento característico: a) comprimento frontal do painel; b) comprimento lateral do painel; c) diâmetro poste [42]	63
Figura 46. Domínio de simulação numérica do escoamento [45].	65
Figura 47. Representação da malha elaborada para o domínio [45].	66
Figura 48. Representação das regiões com as condições de fronteira estabelecidas [45]...	67
Figura 49. Coeficiente de arrasto para a posição esquerda, autoria própria.	70
Figura 50. Coeficiente de arrasto para a posição posterior, autoria própria.	71
Figura 51. Coeficiente de arrasto para a posição direita, autoria própria.	72
Figura 52. Coeficiente de arrasto para a posição frontal, autoria própria.	72
Figura 53. Coeficiente de arrasto médio em função da velocidade para cada configuração de teste, autoria própria.	74
Figura 54. Coeficiente de arrasto em função da velocidade do escoamento para a posição esquerda, autoria própria.	75
Figura 55. Coeficiente de arrasto em função da velocidade do escoamento para a posição posterior, autoria própria.	76
Figura 56. Coeficiente de arrasto em função da velocidade do escoamento para a posição direita, autoria própria.	77
Figura 57. Coeficiente de arrasto em função da velocidade do escoamento para a posição frontal, autoria própria.	78
Figura 58. Resíduos obtidos nas soluções para o <i>solver</i> Fluent com a teoria de turbulência $k - \omega$: a) esquerda; b) traseira. [45].	79
Figura 59. Resíduos obtidos nas soluções para o <i>solver</i> Fluent com a teoria de turbulência $k - \omega$: a) direita; b) frontal. [45].	80

Figura 60. Resíduos obtidos nas soluções para o <i>solver</i> Fluent com a teoria de turbulência $k - \varepsilon$: a) esquerda; b) traseira, [45].	80
Figura 61. Resíduos obtidos nas soluções para o <i>solver</i> Fluent com a teoria de turbulência $k - \varepsilon$: a) direita; b) frontal, [45].	81
Figura 62. Resíduos obtidos nas soluções para o <i>solver</i> CFX com a teoria de turbulência $k - \omega$: a) esquerda; b) traseira, [45].	81
Figura 63. Resíduos obtidos nas soluções para o <i>solver</i> CFX com a teoria de turbulência $k - \omega$: a) direita; b) frontal, [45].	82
Figura 64. Resíduos obtidos nas soluções para o <i>solver</i> CFX com a teoria de turbulência $k - \varepsilon$: a) esquerda; b) traseira, [45].	82
Figura 65. Resíduos obtidos nas soluções para o <i>solver</i> CFX com a teoria de turbulência $k - \varepsilon$: a) direita; b) frontal, [45].	83
Figura 66. Comparação entre os dados experimentais e numéricos na configuração esquerda, autoria própria.	84
Figura 67. Comparação entre os dados experimentais e numéricos na configuração posterior, autoria própria.	85
Figura 68. Comparação entre os dados experimentais e numéricos na configuração direita, autoria própria.	86
Figura 69. Comparação entre os dados experimentais e numéricos na configuração frontal, autoria própria.	88
Figura 70. Distribuição de pressão sobre a coluna na configuração frontal: a) CFX($k - \omega$); b) Fluent($k - \omega$); c) CFX($k - \varepsilon$); d) Fluent($k - \varepsilon$) [45].	89
Figura 71. Distribuição da velocidade sobre a coluna e seus arredores na configuração frontal: a) CFX($k - \omega$); b) Fluent($k - \omega$); c) CFX($k - \varepsilon$); d) Fluent($k - \varepsilon$) [45].	89
Figura 72. Distribuição de pressão sobre a coluna na configuração direita: a) CFX($k - \omega$); b) Fluent($k - \omega$); c) CFX($k - \varepsilon$); d) Fluent($k - \varepsilon$) [45].	90
Figura 73. Distribuição da velocidade sobre a coluna e seus arredores na configuração direita: a) CFX($k - \omega$); b) Fluent($k - \omega$); c) CFX($k - \varepsilon$); d) Fluent($k - \varepsilon$) [45].	90
Figura 74. Linhas de fluxo sobre a coluna para a configuração direita: a) CFX($k - \omega$); b) Fluent($k - \omega$); c) CFX($k - \varepsilon$); d) Fluent($k - \varepsilon$) [45].	91
Figura 75. Linhas de fluxo sobre a coluna para a configuração frontal: a) CFX($k - \omega$); b) Fluent($k - \omega$); c) CFX($k - \varepsilon$); d) Fluent($k - \varepsilon$) [45].	92

Lista de Tabelas

Tabela 1. Características gerais das colunas do tipo canguru [4].	4
Tabela 2. Configurações de colunas do tipo canguru [4].	5
Tabela 3. Intensidade de turbulência longitudinal em terrenos rurais $z_0 = 0,004 [m]$ [26].	29
Tabela 4. Classificação das tecnologias segundo o princípio de processamento [33].	37
Tabela 5. Características do equipamento utilizado ara manufatura aditiva [43].	55
Tabela 6. Características do equipamento utilizado ara manufatura aditiva [44].	56
Tabela 7. Velocidade do vento no túnel em função da frequência, autoria própria.	59
Tabela 8. Área projetada de cada orientação de testes, autoria própria.	60
Tabela 9. Número de Reynolds para um escoamento sem obstrução no túnel de vento, autoria própria.	61
Tabela 10. Número de Reynolds para as possíveis posições em função da velocidade, autoria própria.	62
Tabela 11. Espessura da camada limite em função da velocidade, autoria própria.	62
Tabela 12. Altura da primeira camada da malha referente ao painel na posição frontal, autoria própria.	64
Tabela 13. Altura da primeira camada da malha referente ao painel na posição lateral, autoria própria.	64
Tabela 14. Altura da primeira camada da malha referente ao poste, autoria própria.	65
Tabela 15. Número de nós e elementos em cada posição, autoria própria.	67
Tabela 16. Dados referentes a análise de qualidade da malha utilizando o recurso <i>Skewness</i> , [45].	68
Tabela 17. Valores finais médios para cada posição, autoria própria.	73
Tabela 18. Valor final médio para esquerda para cada <i>solver</i> utilizando cada teoria de turbulência analisada, autoria própria.	84

Tabela 19. Valor final médio para posterior para cada <i>solver</i> utilizando cada teoria de turbulência analisada, autoria própria.	86
Tabela 20. Valor final médio para direita para cada <i>solver</i> utilizando cada teoria de turbulência analisada, autoria própria.	87
Tabela 21. Valor final médio frontal para cada <i>solver</i> utilizando cada teoria de turbulência analisada, autoria própria.	88
Tabela 22. Valores médios finais para o coeficiente de arrasto, autoria própria.	94

Nomenclatura

ρ	Densidade
t	Tempo
V	Volume
\vec{n}	Vetor normal a superfície
A	Área da superfície de controlo
\dot{m}	Fluxo de massa sobre um determinado volume de controlo
VC	Volume de controlo
SC	Superfície de controlo
u	Velocidade local na direção X
v	Velocidade local na direção Y
w	Velocidade local na direção Z
V_n	Velocidade na direção normal a face do volume de controlo
S	Fronteira da superfície de controlo
\vec{k}	Forças de campo atuando sobre o volume de controlo
τ_{xx}	Tensão de corte sobre o eixo X e longitudinal ao eixo X atuando sobre o volume de controlo
τ_{yy}	Tensão de corte sobre o eixo Y e longitudinal ao eixo Y atuando sobre o volume de controlo
τ_{zz}	Tensão de corte sobre o eixo Z e longitudinal ao eixo Z atuando sobre o volume de controlo
τ_{yx}	Tensão de corte sobre o eixo Y e longitudinal ao eixo X atuando sobre o volume de controlo
τ_{zx}	Tensão de corte sobre o eixo Z e longitudinal ao eixo X atuando sobre o volume de controlo

τ_{xy}	Tensão de corte sobre o eixo X e longitudinal ao eixo Y atuando sobre o volume de controle
τ_{zy}	Tensão de corte sobre o eixo Z e longitudinal ao eixo Y atuando sobre o volume de controle
τ_{xz}	Tensão de corte sobre o eixo X e longitudinal ao eixo Z atuando sobre o volume de controle
τ_{yz}	Tensão de corte sobre o eixo Y e longitudinal ao eixo Z atuando sobre o volume de controle
μ	Viscosidade dinâmica
σ_{ij}	Tensor tensão
δ_{ij}	Delta de Kronecker
ε_{ij}	Tensor taxa de deformação
p	Tensão resultante sobre um volume de controle
σ_{xx}	Tensão normal na direção de X
σ_{yy}	Tensão normal na direção de Y
σ_{zz}	Tensão normal na direção de Z
U_{∞}	Velocidade de corrente livre no escoamento desenvolvido
δ	Comprimento da camada limite
y	Distância vertical partindo da fronteira no qual o escoamento se desenvolve
Re_x	Número de Reynolds na direção longitudinal do escoamento
ν	Viscosidade cinemática
F_D	Força de arrasto sobre uma superfície
C_D	Coefficiente de arrasto sobre uma superfície
A_p	Área projetada ortogonalmente ao escoamento
C_L	Coefficiente de sustentação
F_L	Força de sustentação
A_{pl}	Área planiforme longitudinal ao escoamento
\bar{U}	Velocidade média do vento

z	Altura do escoamento sobre a superfície terrestre a partir do solo
τ_o	Força de fricção por unidade de área exercida pela superfície da terra sobre o escoamento
ρ_a	Densidade do ar
z_o	Comprimento de rugosidade
k	Constante de von Karman
u_*	Velocidade de fricção
\bar{U}_{10}	Velocidade média a uma altura de 10 metros
z_{ref}	Altura de referência
σ_u	Desvio padrão da intensidade de turbulência do vento num escoamento qualquer
$u(t)$	Parcela flutuante da velocidade longitudinal do vento
I_u	Intensidade de turbulência
f_u	Função densidade probabilidade da velocidade longitudinal do vento
S_u	Função densidade espectral das flutuações da velocidade longitudinal do vento
n	Frequência de ocorrência de uma determinada intensidade de turbulência
l_u	Comprimento de turbulência
f_o	Parâmetro de Monin
u'	Velocidade do vento atmosférico em uma altura qualquer
ψ	Coefficiente de correlação entre velocidades do vento atmosférico em diferentes alturas
\vec{v}	Função que descreve a velocidade de uma partícula
\vec{s}	Função que descreve a trajetória da partícula
\vec{a}	Função que descreve a aceleração da partícula
y^+	Parâmetro normalizado para calculo da primeira camada de células da camada limite de um escoamento sobre uma dada superfície
U_τ	Velocidade de atrito
τ_w	Tensão de corte na parede

C_f Coeficiente de atrito na parede

f Frequência definida no inversor para determinação da velocidade do escoamento no túnel de vento

Capítulo 1: INTRODUÇÃO

Num contexto de corrida tecnológica vivenciada nos anos setenta, se estabeleceu um vasto aumento no uso de eletricidade. Esta tem um uso intimamente ligado ao desenvolvimento de uma nação já que é em suma a forma mais democrática que a energia se apresenta, visto que é possível transformá-la em qualquer outra, bem como permite o seu emprego nos mais diversos sistemas.

Tendo isso em mente, surgiu a necessidade de estabelecer pesquisas a cerca de formas alternativas de produzir energia, de forma mais limpa, utilizando menos recursos ambientais, assim tomou corpo a ciência por trás da geração de energia através da utilização de painéis fotovoltaicos [1].

Esta nova abordagem abriria as portas para no futuro, até culminar no momento atual onde pode-se cogitar a substituição completa de uma matriz energética por outra sensivelmente mais conveniente a longo prazo [2].

Estes dispositivos na maior parte das vezes se encontram-se em locais públicos e estão disponíveis nas mais diversas configurações, visto a sua ampla possibilidade de utilização, elas apresentam variações nos seus elementos estruturais, de modo que a depender do local de instalação, a sua altura efetiva pode ser diferente, bem como a capacidade de geração e armazenagem de energia.

O princípio de funcionamento em suma consiste na conversão da radiação solar captada durante o dia através dos painéis fotovoltaicos em corrente elétrica que é armazenada em baterias, para que no período noturno alimente lâmpadas que possam iluminar o ambiente em seu em torno [1].

Dado que o componente normalmente se encontra instalado em locais onde está sujeito aos esforços da natureza e por apresentar um caráter estrutural delgado é deveras importante a correta análise dos esforços que serão impostos sobre a mesma, como por exemplo os originados dos ventos atmosféricos, mais especificamente a força de arrasto.

Mesmo que em média estas forças não atinjam valores que ultrapassem o limite de cedência da estrutura, momentaneamente podem chegar a valores muito elevados ou mesmo o seu ciclo de atuação, nomeadamente forças flutuantes, podem agir de forma agressiva sobre a vida em fadiga da estrutura e assim levar a sua rutura prematura [3].

Desenvolveu-se então, uma análise comparativa acerca do coeficiente de arrasto da estrutura, com objetivo de observar seu comportamento neste cenário e possibilitar melhorias estruturais em futuros projetos. Isto se deu através submissão de experimentos em protótipos em escala num dado túnel de vento, bem como análise de uma estrutura real com o *software* ANSYS®.

1.1 Justificativa

No contexto empresarial, tem havido um crescente uso de *softwares* de simulação numéricas, nomeadamente chamados de CAE ou *Computer Aided Engineering*, atrelado aos processos de prototipagem rápida com intuito de prever o comportamento dos projetos em fases muito primárias do processo de desenvolvimento de produto.

Este cenário torna-se ainda mais preponderante quando posto em áreas onde os métodos de análises analíticos demandam muito tempo de resolução, como a mecânica dos fluídos, no qual a obtenção de resultados relevantes demanda processos iterativos devido as equações não possuírem solução analítica exata.

Nesta conjuntura de fatos, é notório a importância do desenvolvimento de ferramentas de repetição, que sejam eficientes e que acima de tudo sejam capazes de solucionar problemas complexos envolvendo dinâmica dos fluídos dentro de um tempo hábil para que seja útil em um projeto.

Contudo, dado que os resultados contem um determinado grau de erro, se estabelece uma forma de validar o comportamento dos produtos destas simulações através de análises experimentais. Para o presente estudo, onde o intuito é a análise comparativa do coeficiente de arrasto, os testes em túneis de vento com estruturas em tamanho reduzido, diversas vezes confeccionadas através de métodos comumente chamados de impressão 3D, apresentam resultados satisfatórios no que tange este tipo de abordagem.

1.2 Objetivos

O objetivo geral do trabalho é a obtenção do coeficiente de arrasto de uma coluna de iluminação autónoma solar, através de túnel de vento e posterior análise comparativa dos dados junto a *softwares* de simulação CFD, nomeadamente *Computational Fluid Dynamics*.

Como caminho para chegada nos objetivos elencados, alguns passos intermediários foram definidos, como o que se segue:

- Modelação da estrutura em *software Computational Aided Design (CAD)* utilizando-se de desenhos técnicos fornecidos pela empresa fabricante;
- Redução em escala, com simplificação das estruturas necessárias mantendo a área planificada experimentada pelo escoamento próxima da real, para posteriormente produzir um elemento estrutural em polímero, através de impressora 3D fornecido pelo Instituto Politécnico de Bragança, capaz de possibilitar os testes em túnel de vento;
- Obtenção de dados de força longitudinal e transversal em quatro direções distintas no escoamento em túnel de vento para a posterior análise e cálculo dos esforços na estrutura, bem como do coeficiente de arrasto tema principal deste trabalho;
- Simulação em ambiente virtual, através de *software* de simulação numérica do comportamento da estrutura em tamanho real, submetido ao mesmo padrão de escoamento produzido em túnel de vento, sob as mesmas direções analisadas experimentalmente no Laboratório de Mecânica dos Fluidos e Hidráulica do Instituto Politécnico de Bragança;
- Comparação dos resultados obtidos;

1.3 Estrutura do Trabalho

A dissertação é apresentada de modo que ao longo de todo seu desenvolvimento seja demonstrado toda a base teórica utilizada para formalizar o trabalho, em todas as frentes apresentadas no item 1.2, bem como os métodos experimentais utilizados tanto na obtenção de dados práticos como nas simulações computacionais.

O capítulo 2 apresenta através de trabalhos anteriores, uma breve visão sobre a mecânica dos fluídos, com foco nos processos envolvendo a dinâmica dos escoamentos, uma contextualização sobre as tecnologias de manufatura aditiva e contextualização do método numérico utilizado para as simulações.

O capítulo 3 aborda a metodologia experimental utilizada no desenvolvimento dos ensaios produzidos.

No capítulo 4 são apresentados os resultados obtidos e as discussões sobre estes.

E por fim no capítulo 5 é abordada respectivamente a conclusão do trabalho e os possíveis trabalhos futuros com base nos resultados obtidos.

1.4 Estrutura em Estudo

A empresa possui 8 produtos exclusivos sendo um deles a coluna de iluminação solar autônoma, tendo esta 6 modelos distintos, os quais podem ser visualizados na Figura 1.



Figura 1. 6 modelos de estruturas fabricadas pela empresa, com foco na estrutura estudada no presente trabalho, adaptado de [4].

Tabela 1. Características gerais das colunas do tipo canguru [4].

Índice de restituição de cor	> 70 %
Potência	30 e 40 [W]
Tensão entrada	24 [V] DC
Temperatura de funcionamento	-20°C + 60°C
Índice de proteção	IP 65
Perda de luz	Menos de 1% a cada 3000 horas em funcionamento constante
Ângulo de feixe da lente	120°
Material	Ferro galvanizado
Duração	35000 a 50000 horas

O presente trabalho trata das características da estrutura fabricada pela empresa Valled Lda., nomeadamente canguru, o qual é constituída pelos componentes fuste, luminária, painéis fotovoltaicos, baterias, sistema de regulação de carga e controlo de iluminação. Este sistema permite uma autonomia de 3 a 5 dias, com uma utilização diária de 12 horas [4][4].

Na Tabela 1 pode ser visualizado os detalhes deste modelo, bem como na Tabela 2, as diferentes configurações disponíveis também para este tipo de construção.

Tabela 2. Configurações de colunas do tipo canguru [4].

Ref.	Altura [m]	Potência [W]	Cor	Fluxo Luminoso [LM]	Temperatura da Cor [K]
VL640 CA WW	6	40	BR Quente (WW)	3200	3000
VL640 CA CW	6	40	BR Frio (CW)	4000	6000
VL540 CA WW	5	40	BR Quente (WW)	3200	3000
VL540 CA CW	5	40	BR Frio (CW)	3200	6000
VL430 CA WW	4	30	BR Quente (WW)	2400	3000
VL430 CA CW	4	30	BR Frio (CW)	3200	6000

1.5 Apresentação da Empresa

O componente aqui estudado é fabricado pela empresa Valled Lda., localizada na zona industrial de Bragança, em Portugal, esta que tem como foco o desenvolvimento de sistemas de aproveitamento de energia solar, atuando nos ramos de iluminação pública autónoma, infraestruturas autónomas de eletrobombas para captação de água, sistemas de irrigação para agricultura e soluções de autonomia energética como um todo [5][5].

Fundada devido a identificação da necessidade de corresponder às demandas do mercado no âmbito da autonomia elétrica com fonte solar, os fundadores, com amplo conhecimento no sector elétrico, uniram sua base na área e juntando experiências também na montagem industrial, puderam proceder para a formação da empresa.

A empresa apresenta uma ampla gama de atuação no mercado, tendo mais de 3000 produtos produzidos, subdividas em 4 grandes áreas de serviços: projetos e design, engenharia metálica, consultoria de sistemas e análise de necessidades e por fim arquitetura de sistemas de energia [5, 6][5, 6].

Capítulo 2: ESTADO DA ARTE

2.1 Mecânica dos Fluídos

Podemos definir um fluído como sendo uma substância que quando sob aplicação de uma força de tensão de corte, apresenta uma deformação continua não importando a magnitude desta, é um estado da matéria que não é capaz de sustentar uma tensão de corte quando em repouso.

A fim de se analisar a diferença no comportamento entre os diferentes modos de apresentação dos elementos, pode-se montar entre dois planos quaisquer uma região com substâncias em estado sólido ou líquido/gasoso e então movimentar um destes planos através da aplicação de uma determinada força [7].

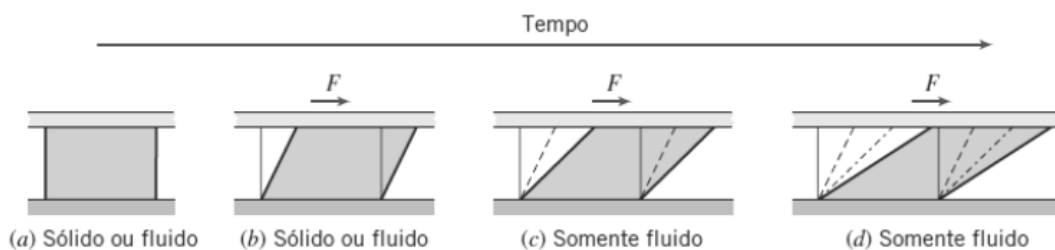


Figura 2. Diferença em comportamento de um sólido e um líquido devido à força de corte [7].

Em ambos os casos possíveis haverá uma deformação inicial, porém, somente o fluído seguirá se deformando indefinidamente até que outra força interrompa ou acelere este processo (Figura 2), já o sólido se manterá em repouso. Pode-se perceber também, que na região de contato entre as superfícies, assume-se que o fluído tem a mesma força que a dos planos o qual está em contato devido a condição de não deslizamento [7].

No estado sólido a deformação depende do módulo de rigidez G , ao passo que a razão de deformação do fluído depende da viscosidade dinâmica μ . Por exemplo, ao se analisar o sistema de amortecimento de um veículo, pode-se notar a presença de propriedades oriundas dos sólidos, como a elasticidade, bem como a dos fluídos na viscosidade [7].

2.1.1 Equações Básicas

O estudo do movimento dos fluídos vem sendo feito há séculos e obviamente é muito anterior as formulações matemáticas que hoje concebem a análise do comportamento dos elementos que compõem este amplo campo da engenharia [8].

Dentro do escopo da mecânica dos fluídos as equações diferenciais oferecem uma abordagem mais detalhada do escoamento, como as encontradas nas formulações do movimento e um bom exemplo pode ser a distribuição de pressão sobre a superfície de uma asa de aeronave [7].

Porém, frequentemente a informação procurada não requer um conhecimento detalhado do escoamento e nestes casos se esta interessado no comportamento de um dispositivo como um todo, logo é mais apropriado empregar a formulação integral das leis básicas [7].

Ao passo que estas equações estejam introduzidas, são passíveis de simplificações que englobem os problemas os quais irão representar, isto se torna importante principalmente pelo fato de não serem triviais e possuírem resoluções complexas, quando possuem, necessitando de um poder computacional muito elevado, para se obter soluções em sua maioria ainda limitadas [9].

2.1.2 Forças Oriundas do Escoamento

Escoamentos em geral podem ser descritos através de duas forças, classificadas como de campo ou de superfície, tendo estas inclusas tanto as normais como as de corte.

Uma importante parcela que são os esforços gerados em corpos imersos em escoamentos e dada a definição de fluído e o que o compõem (líquidos e gases), temos que todo e qualquer objeto não presente em uma atmosfera inerte, tal qual como o vácuo, estarão sim sobre o efeito de alguma movimentação e logo terão de passar por esta análise [7].

Neste sentido, sempre que houver a presença de deslocamento relativo entre um corpo sólido imerso em um fluído viscoso, este elemento vivenciará uma força resultante \vec{F} que depende de diversos fatores, como muito certamente a velocidade relativa \vec{V} , da forma/tamanho do corpo, como também das propriedades constituintes do fluído, nomeadamente ρ, μ , etc [7].

Ao passo que ocorre o escoamento em torno do corpo, serão geradas tensões superficiais sobre os elementos constituintes do corpo, que resultarão na força. Estas tensões

são compostas de parcelas tangenciais, atribuídas a ação viscosa e de outras parcelas normais devido a pressão local.

Tradicionalmente, pode-se decompor esta força total em uma componente responsável pelo arrasto experimentado pelas estruturas, F_D , definida como uma componente paralela a direção do escoamento, e a força de sustentação, F_L , definida como pode se imaginar, perpendicular ao movimento [7].

2.1.2.1 Lei de Conservação da Massa

Considerando um volume de controlo diferencial, tal qual apresentado na Figura 3, pode-se definir uma expressão geral para a conservação de massa como sendo:

$$\int_{VC} \frac{\partial \rho}{\partial t} dV + \int_{SC} \rho \vec{v} \cdot \vec{n} dA = 0 \quad (1)$$

A expressão (1) mostra que, para um dado sistema, a variação da massa total no tempo somada as trocas desta através das fronteiras é igual a zero.

Se as entradas e saídas estiverem bem definidas, a Equação (1) pode ser reduzida de modo que a variação seja dada pela diferença entre as entradas e saídas como segue:

$$\int_{VC} \frac{\partial \rho}{\partial t} dV = \sum_e \dot{m} - \sum_s \dot{m} \quad (2)$$

Existem diversas maneiras de se obter a equação da continuidade e neste caso, será utilizada uma baseada em séries de Taylor.

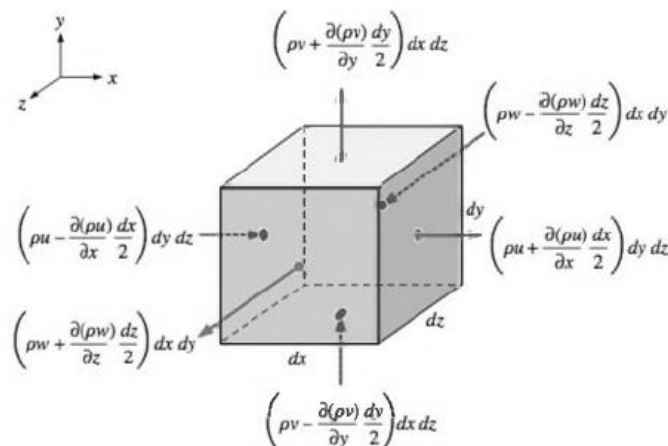


Figura 3. Vazão mássica entrando e saindo por cada uma das faces do volume de controlo [10].

Dado um volume de controlo com medidas laterais dx, dy, dz , estando o centro em um ponto O em algum lugar do espaço a partir da origem, tomando a densidade no centro desta caixa como ρ e as componentes da velocidade como sendo u, v e w .

Podemos determinar o fluxo de massa sobre a face a direita como sendo:

$$(\rho V_n)_{face\ direita} = \rho V_n + \frac{\partial(\rho V_n)}{\partial x} \frac{dx}{2} + \frac{1}{2!} \frac{\partial^2(\rho V_n)}{\partial x^2} \left(\frac{dx}{2}\right)^2 + \dots \quad (3)$$

Sendo V_n a velocidade normal saindo da face a direita.

A medida que as dimensões desta caixa sejam infinitesimais, os termos de ordens mais altas, tornam-se desprezíveis e logo, reduz-se-ma:

$$(\rho u)_{face\ direita} \cong \rho u + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} \frac{dx}{2}$$

E o mesmo se aplica as demais faces.

Ao passo que o volume de controlo é comprimido, a integral do volume, descrito no lado esquerdo da Equação (2) se reduz a:

$$\int_{VC} \frac{\partial \rho}{\partial t} dV \cong \frac{\partial \rho}{\partial t} dx dy dz \quad (4)$$

que também pode ser escrita como sendo o fluxo de massa em cada face como se segue:

$$\dot{m} = \rho V_n A \quad (5)$$

Aplicando as aproximações feitas e considerando as contribuições individuais de cada uma das faces e eliminando os termos que dão origem ao volume obtém-se a equação da continuidade em coordenadas cartesianas.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0 \quad (6)$$

Considerando um escoamento incompressível, como é o caso do presente estudo, a densidade do fluido não se alterará significativamente e desta forma a derivada parcial $\frac{\partial \rho}{\partial t} \cong 0$ e assim pode-se simplificar a Equação (4) e obter:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (7)$$

Mesmo que o escoamento não seja permanente, a equação se aplica em qualquer instante do tempo, isto significa que o balanço de massa para cada ponto pertencente ao escoamento deve possuir campo de velocidade de divergência livre no espaço e no tempo, que também é conhecido como a restrição de incompressibilidade [11].

2.1.2.2 Equações de Navier-Stokes

Dentro da mecânica dos fluidos a porção que compreende a análise matemática de problemas que visam interpretar a interação fluido estrutura é governada pelas equações de Navier-Stokes, que foram postuladas ainda em meados do século XIX [12].

Por conta destas expressões utilizarem de equações diferenciais parciais não lineares a solução analítica desenvolvida a partir destas se torna extremamente complexa, haja vista que abordam regiões arbitrárias, com condições de contorno generalistas.

Estas análises foram positivamente impactadas com o surgimento das soluções numéricas possibilitadas sobretudo pelo uso da computação, para através disto se obter aproximações satisfatórias nos resultados de campos de velocidade e pressão de um escoamento, isto que por sua vez deu origem a Dinâmica de Fluidos Computacional (CFD) [13].

Além das equações até aqui determinadas que descrevem como se dá o comportamento da massa internamente ao volume de controle, pode-se também descrever o movimento das partículas de fluido de massa infinitesimal dm aplicando a segunda lei de Newton [14].

Utilizando o teorema de transporte de Reynolds obtém-se a expressão (8), a forma geral para a conservação do momento linear quando aplicada a um volume de controle:

$$\sum \vec{F} = \int_{VC} \rho \vec{g} dV + \int_{SC} \sigma_{ij} \cdot \vec{n} dA = \int_{VC} \frac{\partial}{\partial t} (\rho \vec{V}) dV + \int_{SC} (\rho \vec{V}) \vec{V} \cdot \vec{n} dA \quad (8)$$

onde σ_{ij} é o tensor tensão. A equação (8), se aplica a volumes de controle fixos e móveis, desde que \vec{V} seja a velocidade absoluta [7].

Aplicando o teorema do divergente sobre a expressão (8), é obtido para o último termo desta a seguinte relação:

$$\int_{SC} (\rho\vec{V})\vec{V} \cdot \vec{n} dA = \int_{VC} \vec{\nabla} \cdot (\rho\vec{V}\vec{V}) dV \quad (9)$$

Enquanto que para o segundo termo do lado direito da mesma expressão (8) tem-se que:

$$\int_{SC} \sigma_{ij} \cdot \vec{n} dA = \int_{VC} \vec{\nabla} \cdot \sigma_{ij} dV \quad (10)$$

Combinando ambos os termos (9) e (10) e rearranjando, é possível rescrever a equação (8) para qualquer volume de controle, que da origem a (11), nomeadamente Equação de Cauchy.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\vec{V}) + \vec{\nabla} \cdot (\rho\vec{V}\vec{V}) = \rho\vec{g} + \vec{\nabla} \cdot \sigma_{ij} \quad (11)$$

Considerando um fluido qualquer em movimento, o tensor tensão é dado por:

$$\sigma_{ij} = \begin{pmatrix} \sigma_{xx} & \sigma_{xy} & \sigma_{xz} \\ \sigma_{yx} & \sigma_{yy} & \sigma_{yz} \\ \sigma_{zx} & \sigma_{zy} & \sigma_{zz} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -P & 0 & 0 \\ 0 & -P & 0 \\ 0 & 0 & -P \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \tau_{xx} & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \tau_{yy} & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \tau_{zz} \end{pmatrix} \quad (12)$$

sendo P a pressão hidrostática atuando sobre cada uma das faces do volume de controle.

Dado um escoamento incompressível e aproximadamente isotérmico, o tensor de tensões viscosas é definido como sendo:

$$\tau_{ij} = 2\mu\varepsilon_{ij} \quad (13)$$

onde ε_{ij} é tensor de taxa de deformação.

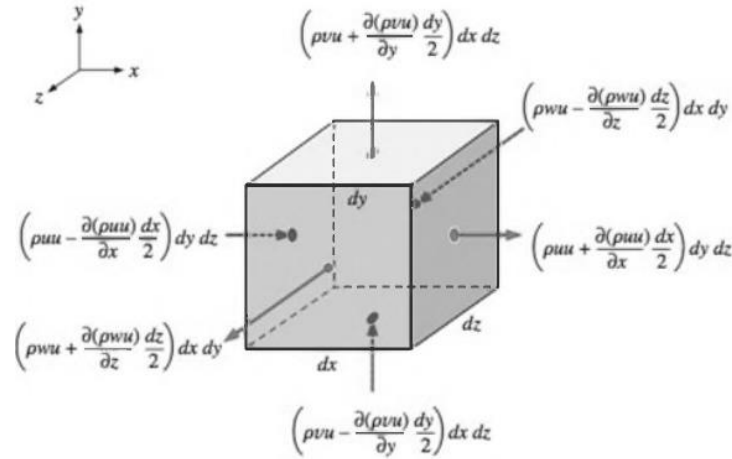


Figura 4. Fluxo que entra e que sai do componente x do momento linear através de cada face de um volume de controle infinitesimal [10].

Substituindo a expressão (12) em (11) na sua forma cartesiana, para o caso do componente x, como o caso da Figura 4 se obtém a expressão (14):

$$\rho \frac{du}{dt} = -\frac{\partial P}{\partial x} + \rho g_x + 2\mu \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \mu \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \mu \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \right) \quad (14)$$

que ao ser rearranjado lugar a expressão (15).

$$\rho \frac{du}{dt} = -\frac{\partial P}{\partial x} + \rho g_x + \mu \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) + \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right] \quad (15)$$

onde o termo entre parênteses é nulo conforme a equação (7).

Os três últimos termos desta mesma expressão representam o laplaciano sobre a componente da velocidade u em coordenadas cartesianas.

Desta forma, tomando estas considerações, é possível obter a expressão para cada uma das componentes do momento linear como sendo:

$$\rho \frac{du}{dt} = -\frac{\partial P}{\partial x} + \rho g_x + \mu \nabla^2 u \quad (16)$$

$$\rho \frac{dv}{dt} = -\frac{\partial P}{\partial y} + \rho g_y + \mu \nabla^2 v \quad (17)$$

$$\rho \frac{dw}{dt} = -\frac{\partial P}{\partial z} + \rho g_z + \mu \nabla^2 w \quad (18)$$

o que combinado apresenta a forma vetorial da forma geral da equação de Navier-Stokes como um dado escoamento incompressível qualquer com viscosidade constante.

$$\rho \frac{d\vec{V}}{dt} = -\vec{\nabla}P + \rho \vec{g} + \mu \nabla^2 \vec{V} \quad (19)$$

Esta expressão é válida para qualquer que seja o sistema de coordenadas desde que apresente a condição de ortogonalidade entre elas. Ela apresenta quatro incógnitas (três componentes da velocidade e a pressão), onde para que possa haver solução, se adiciona a equação (7).

A equação de Navier-Stokes é a pedra fundamental de toda a mecânica dos fluidos. Ela se apresenta no formato de uma equação diferencial parcial não-linear, não permanente de segunda ordem onde soluções analíticas ainda não podem ser obtidas para qualquer caso.

2.1.2.3 Número de Reynolds

A definição para o número de Reynolds surgiu em homenagem ao físico Osborne Reynolds em 1883, toda via teve seu conceito introduzido primeiramente por George Gabriel Stokes ainda em 1851 e posteriormente recebeu por meio do criador e que nomeia este número a definição formal utilizada ainda nos dias de hoje.

Trata-se de um valor adimensional utilizado para fins de cálculos na determinação analítica do regime de escoamento de determinado fluido confinado no interior de um túnel/tubulação ou ao redor de superfícies. Pode dizer-se ainda que dois sistemas são dinamicamente semelhantes se o número de Reynolds for o mesmo para ambos. Este baseia-se na ideia do quociente entre as forças de inércia e viscosas [15].

$$Re = \frac{\rho \cdot v \cdot D}{\mu} \quad (20)$$

Em que, ρ representa a densidade do fluido, v a velocidade média do escoamento, D o diâmetro característico do objeto e μ a viscosidade dinâmica do fluido.

O número de Reynolds indica o quanto as forças viscosas são capazes em compensar as forças de inércia. Para valores baixos o transporte através do momento viscoso irá neutralizar o momento causado pela inércia do fluido. Dado o mesmo escoamento, se a velocidade aumentar, em um determinado ponto o fluido não é mais capaz de transportar o momento gerado pela inércia do líquido de modo a manter o fluxo estabilizado e nesta condição inicia-se a formação de turbulência [14].

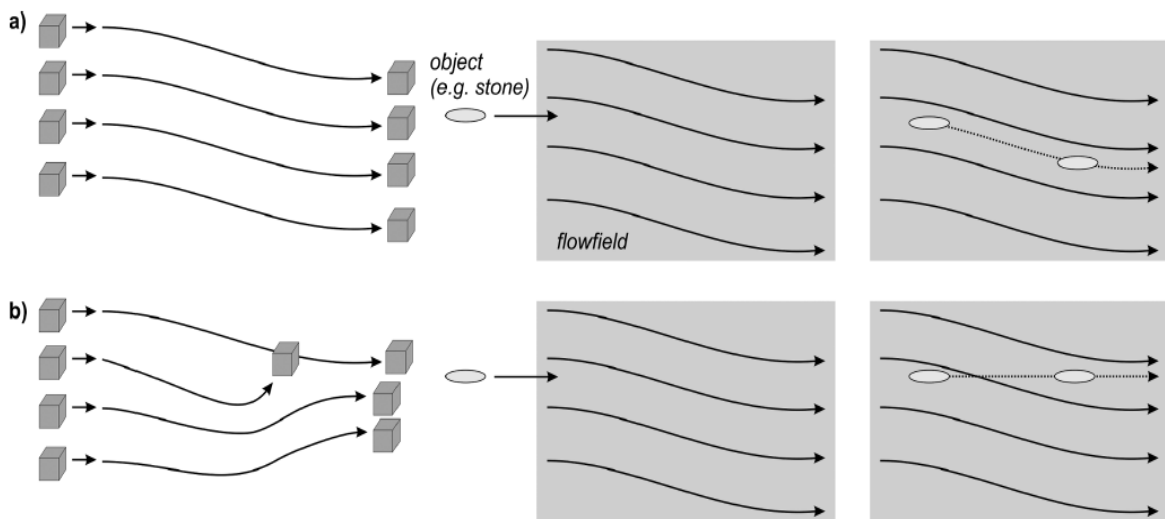


Figura 5. Campos de fluxo laminar e turbulento [14].

2.1.2.4 Camada Limite

Ludwig Prandtl foi o primeiro que buscou explicar o fenômeno da camada limite ainda no ano de 1904 [16]. O seu foco foi perceber do que dependiam as diferentes partes do escoamento e desta forma através de dados experimentais dividir este em duas regiões, sendo a primeira nas vizinhanças de superfícies sólidas por onde o escoamento se desenvolve com uma espessura delgada e a segundo todo o restante, onde na primeira é possível perceber um forte impacto da viscosidade enquanto que fora desta o efeito é desprezível e assim o fluido poderia ser considerado como *invíscido*, como é demonstrado na Figura 7 [7].

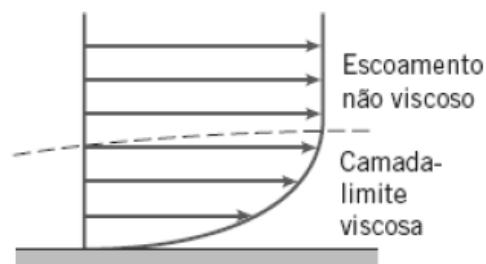


Figura 6. Esquema de uma camada limite [7].

A espessura da camada limite, δ , é definida como sendo a distância para qual a velocidade é de 99% da velocidade de corrente livre [7].

São definidas 4 hipóteses as quais servem como base para simplificar a abordagem na determinação da camada limite que unidas dão origem a expressões em análises aproximadas que são capazes de descrever o comportamento desta região na situação laminar, de transição e turbulenta [7]:

- $u \rightarrow U_\infty$ para $y = \delta$;
- $\frac{\partial u}{\partial y} \rightarrow 0$ para $y = \delta$;
- $u \ll U_\infty$ dentro da camada limite;
- A variação da pressão na camada limite é desprezível;

Dado que o presente trabalho tem enfoque na análise do comportamento do vento atmosférico, pode-se entender como uma boa aproximação a determinação das equações da camada limite em uma placa plana pensando no escoamento do mesmo.

A solução foi obtida inicialmente por H. Blasius, em 1908, para escoamento bidimensional, permanente, incompressível, com gradiente de pressão nulo [17, 18].

Tomando as equações que governam o movimento, (7) e (19) e assumindo as condições de fronteira:

$$y = 0 \rightarrow u = 0$$

$$y = \infty \rightarrow u = U_\infty$$

$$y = \infty \rightarrow \frac{\partial u}{\partial y} = 0$$

É possível se obter utilizando dados empíricos e estatístico a expressão (21) que dita a espessura em caso de escoamento laminar.

$$\delta = \frac{5,0 \cdot x}{\sqrt{Re_x}} \quad (21)$$

Já para o caso de transição entre um escoamento laminar e turbulento, uma boa aproximação para escoamentos com valores de Reynolds de $5 \cdot 10^5$ é dada por (22):

$$\delta = \frac{5,48 \cdot x}{\sqrt{Re_x}} \quad (22)$$

Por fim, quanto ao caso de um escoamento puramente turbulento, apresenta-se na equação (23) o comportamento previsto para a espessura da camada limite.

$$\delta = \frac{0,382 \cdot x}{Re_x^{1/5}} \quad (23)$$

Experimentos demonstram que a expressão (23) é capaz de prever o comportamento com alto nível de confiabilidade para valores $5 \cdot 10^5 < Re_x < 10^7$ mas que pode ser aplicada a valores acima desta faixa.

2.1.2.5 Regimes de Escoamento

Anteriormente já foi citado o fato de haver dois tipos bem definidos de escoamento, o laminar e o turbulento e um terceiro que é composto pela transição entre estes dois e mesmo com caráter instável do ar, ambos estão presentes.

O primeiro, como seu próprio nome refere-se e como pode ser visualizado na primeira parte da Figura 7, indica que ao se desenhar linhas imaginárias que acompanham o deslocamento das partículas durante o seu trajeto, estas teriam um caráter suave, apresentando uma aparência simples e regular, de acordo com a Figura 8 a).

Contudo, os escoamentos não mantem esta característica indefinidamente. Ao passo que este se desenvolve e ganham velocidade a probabilidade de os filamentos do escoamento se desprenderem um do outro se torna maior e devido as pequenas flutuações de velocidade de alta frequência, conforme é ilustrado na Figura 8 b), superpostas ao movimento principal, a mistura entre as camadas adjacentes causam movimentos aleatórios e difusos que iram dar origem a pequenos vórtices formando assim o escoamento turbulento [7].

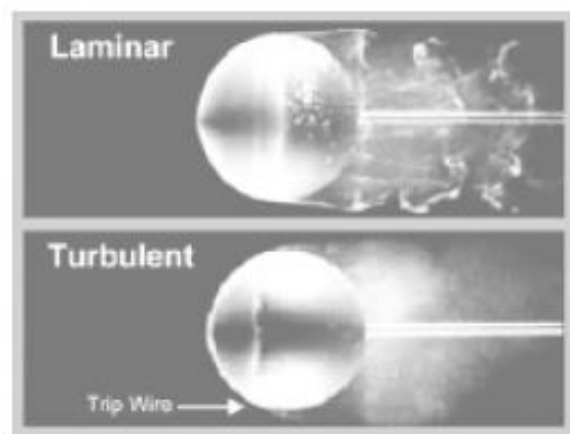


Figura 7. Exemplo dos dois modos de escoamento em uma esfera [7].

Todavia não somente estes impactos oriundos do desenvolvimento que podem dar origem a turbulência em altas velocidade, há também de se considerar as perturbações oriundas da rugosidade a qual este escoamento está sujeito e nestes casos, ocorre o desprendimento da camada limite e propagação da turbulência de forma precoce, gerando então este tipo de escoamento em velocidade mais baixas.

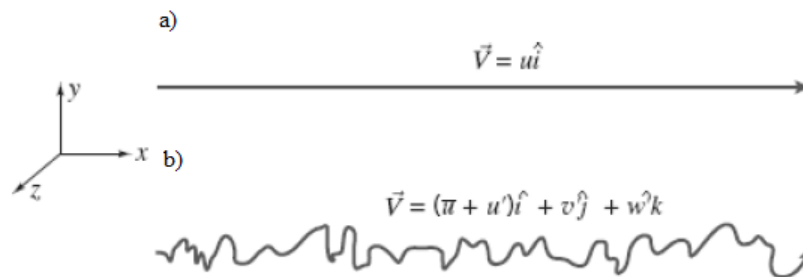


Figura 8. Demonstração da velocidade durante um escoamento laminar e turbulento [7].

Segundo [19], “a turbulência é uma condição irregular do movimento tal que as diferentes grandezas em jogo apresentam bruscas variações quer no espaço, quer no tempo, as quais, na impossibilidade de serem caracterizadas de outro modo, se consideram aleatórias.”.

2.1.2.6 Força de Arrasto

Finalmente, tendo como base as formas constituintes dos fluídos e seu comportamento característico, é possível analisar as forças que atuam sobre corpos rígidos imersos nos deslocamentos desta matéria.

Neste sentido, o arrasto é visto como a componente das forças atuantes que esta paralela a direção do movimento e esta pode ser definida como uma função tanto das características do objeto imerso como das características do escoamento.

$$F_D = f_1(d, V, \mu, \rho) \quad (24)$$

Partindo desta relação (24) e aplicando o teorema dos Pi de Buckingham [7], é possível obter (25), que nada mais é que o coeficiente de arrasto.

$$C_D = \frac{2 \cdot F_D}{\rho V^2 A} \quad (25)$$

F_D é uma soma tanto do arrasto de atrito produzida na superfície do corpo, como também da pressão sobre a área A paralela perpendicular ao escoamento. Para esta expressão são desconsiderados os efeitos da compressibilidade ou superfície livre.

Um caso interessante de ser analisado é o escoamento sobre um cilindro como posto na Figura 9. Para casos em que o número de Reynolds é essencialmente muito baixo, da ordem de $Re \leq 1$, não há separação do escoamento e a esteira é laminar [7].

Ao passo que a velocidade do escoamento é acrescida, até 10^3 , o coeficiente cai continuamente quase concordando com a Teoria de Stokes, sendo um resultado da separação, que faz com que o arrasto se torne uma função das duas parcelas contribuintes.

Dentro da faixa de $10^3 < Re < 10^5$, a curva se achata até que ocorra uma queda brusca, onde experimentalmente já foi demonstrado que para valores antes deste ponto, a camada limite na porção dianteira do cilindro ainda é laminar.

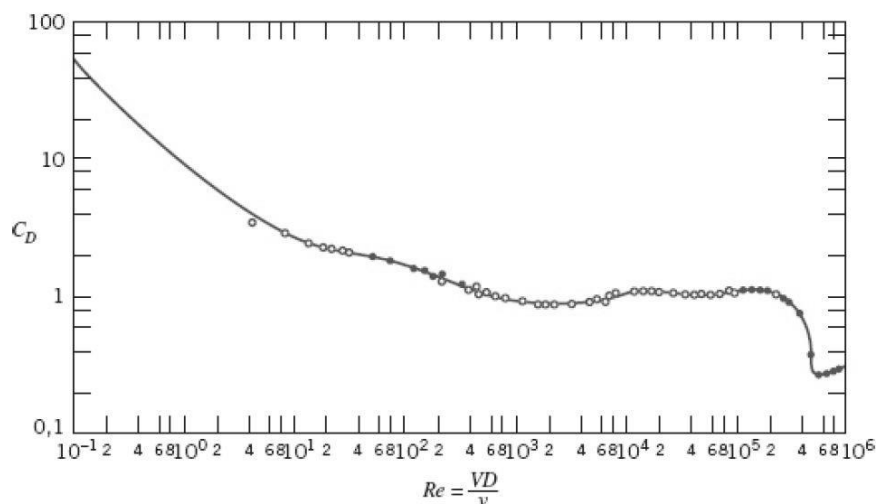


Figura 9. Coeficiente de arrasto para um cilindro circular liso como função do número de Reynolds [7].

A Figura 10 demonstra um importante comportamento inerente ao escoamento, onde a distribuição de pressão sobre uma esfera é dada em função do ângulo com o escoamento, partindo de 0° , paralelo ao escoamento, porém no sentido contrário até 180° que também esta paralelo, mas concordando com o sentido. Este comportamento, da distribuição de pressão, demonstra uma importante conduta que é a separação da camada limite que ocorre ainda na parte frontal da esfera, formando uma esteira turbulenta relativamente larga, onde a pressão é “constante” e inferior a presente na porção dianteira.

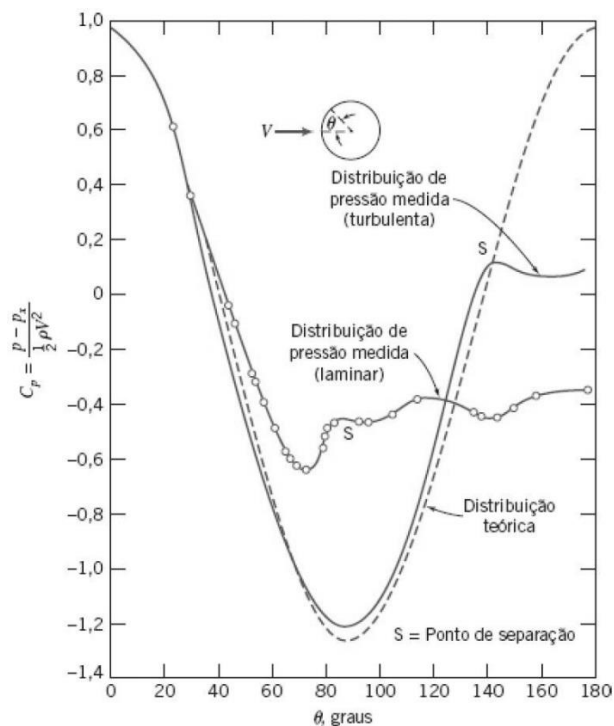


Figura 10. Distribuição de pressão em torno de uma esfera lisa para escoamento nas camadas limite [7].

Isto explica o comportamento do decaimento abrupto do coeficiente de arrasto quando se está num escoamento acima de $3 \cdot 10^5$, onde o ponto de separação passa a ser a jusante, diminuindo o comprimento da esteira, além de produzir uma camada limite turbulenta ainda na porção dianteira da esfera. Contudo, este ponto não é fixo, ele pode ser antecipado ou retardado com base em características que não são inclusas no cálculo do R_e como é o caso da rugosidade superficial da esfera ou mesmo a turbulência na corrente do fluxo [7].

Experimentos demonstraram que a geração de vórtices ocorre com maior intensidade em faixas não muito altas, da ordem de 60 a 5000. Outros experimentos também demonstram que o coeficiente de arrasto sofre um decréscimo de aproximadamente 4 vezes quando a camada limite passa de laminar a turbulenta no corpo do cilindro.

Contudo, estes dados são obtidos para situações ótimas em experimentos laboratoriais em túnel de vento, na prática ocorrem diversas alterações no escoamento oriundas das interações do fluido com objetos, especialmente se a análise visa perceber o comportamento de estrutura sujeitas ao vento atmosférico.

2.1.2.7 Força de Sustentação

De maneira complementar ao exposto anteriormente, surge a força aerodinâmica perpendicular, nomeadamente força de sustentação, que atua perpendicularmente ao escoamento dando origem ao coeficiente de sustentação, demonstrado na expressão (26) [7].

$$C_L = \frac{2 \cdot F_L}{\rho V^2 A_p} \quad (26)$$

Sendo A_p a área planiforme, mas diferente da utilizada para o coeficiente de arrasto, neste caso ela é definida como sendo a área projetada paralela ao escoamento.

Desta forma, tanto o arrasto (25), como a sustentação (26), são definidos como sendo a razão entre a força real e o produto da pressão dinâmica, sendo também funções diretas do número de Reynolds e do ângulo de ataque.

2.2 Ações do Vento

Os ventos atmosféricos ou naturais, são dados em sua grande maioria devido a diferenças de zonas de pressão existentes nos escoamentos externos. Conforme Figura 11, estes movimentos se originam graças a aspetos térmicos aos quais o ar está submetido além da movimentação de rotação da Terra, bem como por distúrbios altamente localizados [20].

A força de Coriolos manifesta-se devido a rotação do planeta causa uma modificação na movimentação das partículas sobre as quais atua. Esta apresenta uma magnitude desprezável numa zona de 5 graus perto do Equador, no hemisfério Norte atua na direção direita ao movimento da partícula, já no hemisfério Sul atua na direção contrária, para a esquerda.

A Figura 12 apresenta uma representação desta carga atuando sobre uma dada partícula no ponto P afastando-se horizontalmente a partir do polo Sul, com velocidade U , em direção ao ponto A . Devido ao movimento de rotação, há a presença de uma velocidade angular Ω , que atua alterando a posição originalmente em A , para B , ao passo que ponto que antes estaria em C , agora está em B . Isto implica que, ao visualizar a trajetória da partícula o que se vê é algo semelhante ao vetor \overline{PC} , comparativamente, se este movimento fosse executado a partir do pólo Norte, o resultado se inverteria e então o deslocamento seria algo como \overline{PB} .

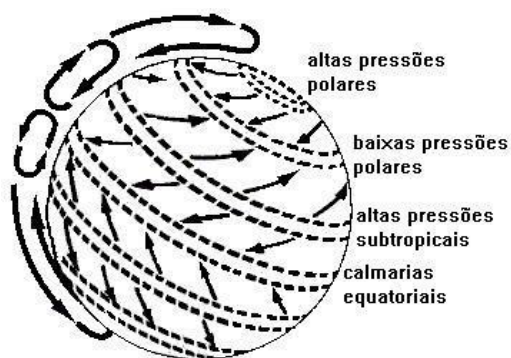


Figura 11. Formação dos ventos devido ao deslocamento das massas de ar.

Esta ação, a qual da origem a mudança de direção estão associadas a uma aceleração aparente denominada “aceleração de Coriolos”, atuando de forma perpendicular ao deslocamento original da partícula. Se esta força e a força devida ao gradiente de pressão forem exatamente iguais e opostas, e dado que a altura seja suficiente para que não se façam sentir os efeitos da força de fricção, o escoamento dar-se a paralelamente às isobáricas.

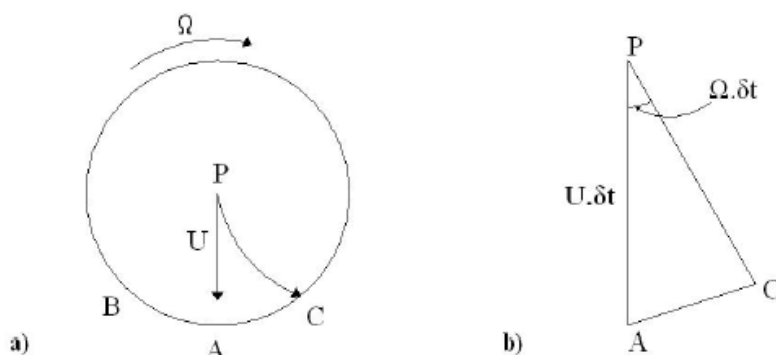


Figura 12. Esquema de representação da força de Coriolos atuando no hemisfério sul [20].

Tomando a equação dos gases ideais como base, torna-se fácil perceber as causas mais fundamentais para estes deslocamentos. O calor absorvido pela atmosfera, junto da gigantesca parcela oriunda da irradiação da superfície terrestre provoca variações locais na temperatura do ar, este que por sua vez apresentará uma alteração na densidade também local, estas variações que por sua vez implicam uma alteração na pressão [20, 21].

Neste sentido, a região na qual a variação térmica tem o maior impacto sobre os deslocamentos é a qual é perturbada pela topografia do terreno, seja pela distribuição, forma ou dimensão dos obstáculos inseridos, podendo ter caráter natural ou artificial, é comumente denominada, camada de limite atmosférico [22].

Em certas regiões do globo os ventos estão sempre a ter um comportamento considerável, visto que os mecanismos que os formam derivam de eventos que são constantes, independe da época e conseqüentemente estação do ano, como o aquecimento dos ventos na região do Equador e o arrefecimento nas regiões junto aos polos. Os ventos desta natureza, nomeadamente planetários.

Há também de se considerar as variações sazonais nas intensidades destes ventos, visto que como detalhado anteriormente, as movimentações estão intimamente ligadas as variações térmicas e dentro disto, a inclinação inerente do globo de cerca de $23,5^\circ$, produz alterações no nível de incidência de radiação em cada área do globo, modificando assim o regime de ventos nas regiões ao longo do tempo.

Ainda existe a presença de diversos outros métodos de alteração dos regimes dos ventos que são locais, mas em geral estes não alteram substancialmente o regime padrão de uma região e impactam de forma mais momentânea através de rajadas. Para os casos onde estes efeitos são sentidos a longo prazo, isto já é incluído nas normas vigentes para calculo das cargas externas, estas que serão apresentadas nas próximas seções.

Assim como em qualquer escoamento, no limite onde ocorre o contato entre o fluído e a fronteira sólida haverá uma dada quantidade de atrito. Isto se intensifica e apresenta principal atuação, em um dado escoamento externo atmosférico, nas zonas perto da superfície onde a rugosidade exerce uma força de fricção formando uma camada de ar lenta adjacente a qualquer superfície que esteja exposta ao vento. Esta por sua vez varia com a altura, decrescendo logaritmicamente. Portanto, o fluxo de ar não é algo constante e há variações locais de velocidade e intensidade denominadas rajadas de vento.

A Figura 13 representa a influência da camada limite no perfil de velocidades do vento, dado que a altura z varia conforme a rugosidade da zona de análise, podendo estender-se até 1km de altura e, acima disto, dar-se-á p nome de atmosfera livre.

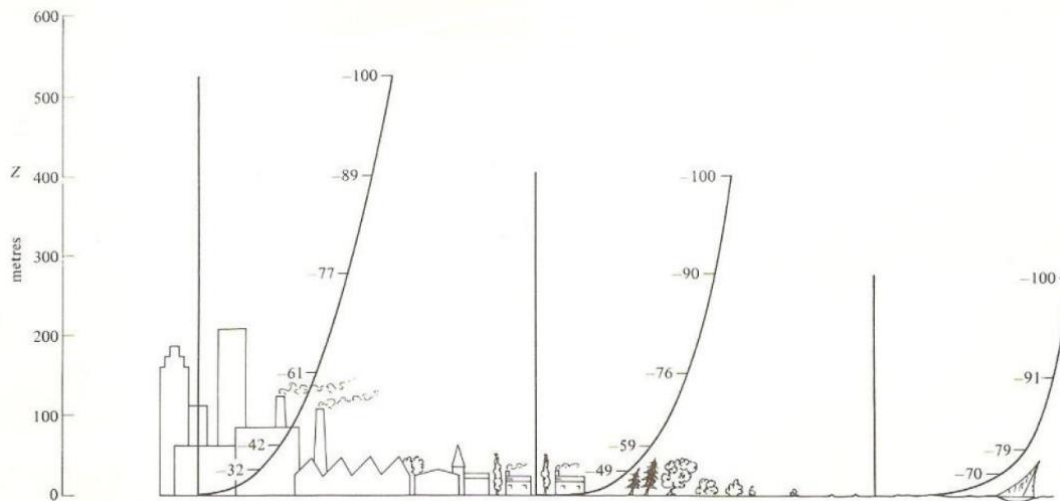


Figura 13. Diferentes perfis de velocidade para diferentes tipos de rugosidade do solo, adaptado de [20] originalmente disponível em [23].

Ao se considerar duas diferentes partículas, *A* e *B* respectivamente, estando a primeira em uma altura superior a segunda conforme Figura 14. É possível perceber os comportamentos previstos das três forças, força de Coriolos, força de fricção e a força devido ao gradiente de pressão. Ocorre então um ângulo de desvio entre a direção do vento e as isobáricas, denominado de α , e este será tanto menor quanto mais alta estiver a partícula e terá o seu valor máximo atingido nas proximidades do solo (α_0), sendo este efeito conhecido como “Espiral de Ekman” [24].

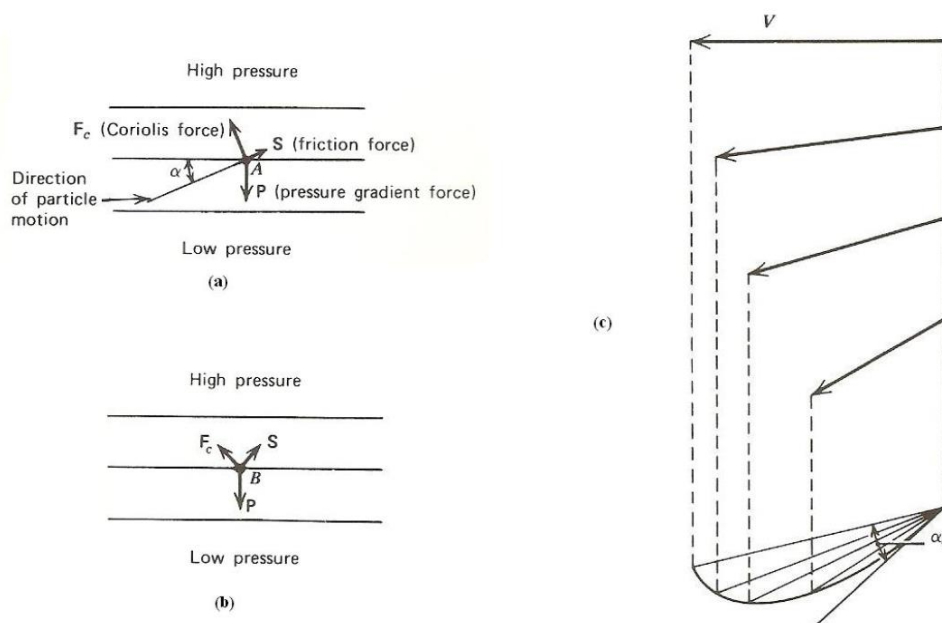


Figura 14. Esquema do comportamento da “Espiral de Ekman” [24].

Uma das principais características que impactam diretamente na vida útil de estruturas sujeitas as pressões oriundas da dinâmica dos ventos está intimamente ligada com o papel da escala e frequência de ocorrência de tais eventos [24].

Usualmente considera-se na escala do tempo uma sobreposição de dois diferentes movimentos, primeiro um de natureza aleatório, nomeadamente turbulência, e outro definido por dimensões médias.

Haja vista este caráter muito local de um parte e o outro muito mais abrangente, é usual a análise separada da influência de ambos e naturalmente, espera-se que comportamentos distintos sejam esperados, ao passo que o primeiro impacta diretamente no tempo útil de um determinado projeto, relacionando-se com a sua vida em fadiga, o segundo esta ligado aos valores nominais assumidos no projeto que terão de ser supridos a todo instante.

Analisando-se a Figura 15 é possível perceber que para baixos valores de frequência, o espectro apresenta dois “picos” sensivelmente para valores de frequência na ordem de um ciclo por 12 horas e na ordem de um ciclo por 4 dias. Estes estão associados, respetivamente, com as mudanças de dia para noite e com variações devidas a movimentos de massas de ar em grande escala. O “pico” para valores de frequências mais elevados está separado por um vazio espectral com frequência na ordem de 1 ciclo por hora. Para valores de frequência maiores do que as correspondentes ao vazio espectral, as variações devem-se ao carácter turbulento do vento que é consequência das características das camadas inferiores que compõem a atmosfera relacionadas também com a rugosidade do solo [20].

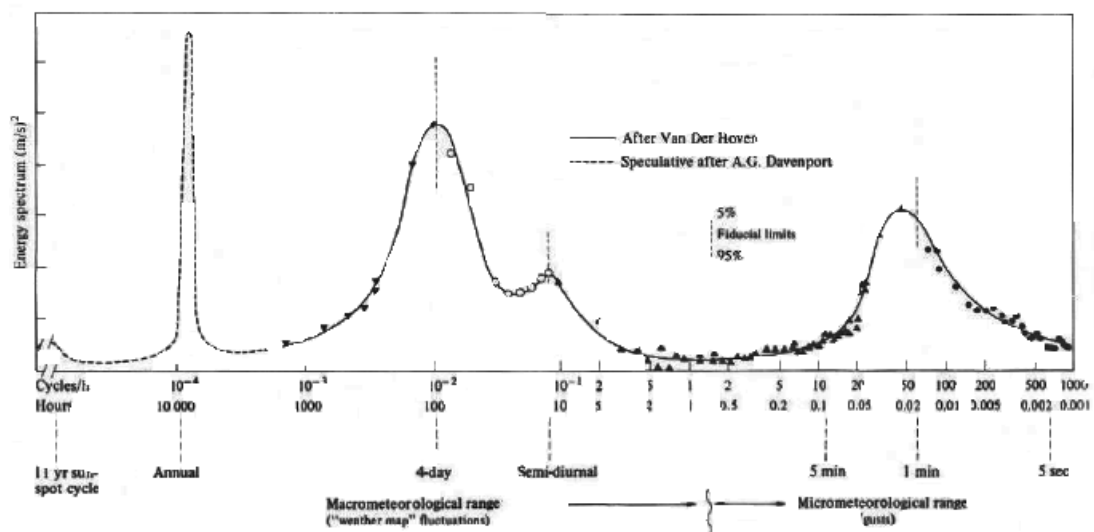


Figura 15. Espectro de potência da velocidade horizontal do vento perto do solo (Van der Hoven, Brooklyn, EUA), adaptado de [20]., disponível originalmente em [23].

Ainda, os dois picos de maior frequência anteriormente citados, conforme demonstrado em [23] podem ser plenamente representados através das mudanças médias da velocidade horária do vento e por esta mesma denominação, sabe-se que dentro de uma análise do comportamento de estruturas sobre rajadas, que se caracterizam por valores mais elevados de sollicitação em um curto espaço de tempo.

2.2.1 Perfis de Velocidade do Vento

2.2.1.1 Lei Logarítmica

O primeiro perfil do vento é composto por uma relação quase empírica que regularmente é utilizada para descrever a distribuição vertical das velocidades médias horizontais do vento na região mais baixa da camada limite, sendo esta usualmente limitada aos 100 metros iniciais acima da atmosfera [25].

Considerando esta “limitação” de altura e analisando as situações mais graves, de maior sollicitação, a expressão (27) é a que melhor define a variação da velocidade média do vento em condições de vento forte. Analisa-se então, \bar{U} , que representa a velocidade média e esta por sua vez se apresenta em função de alguns fatores, que originam uma tensão de corte adimensional [26]:

$$\frac{\partial \bar{U}}{\partial z} z \sqrt{\frac{\rho_a}{\tau_o}} = \frac{1}{k} \quad (27)$$

- Altura do solo, z ;
- Força de fricção por unidade de área exercida pela superfície da terra no escoamento, τ_o ;
- Densidade do ar, ρ_a ;

Sendo que $\sqrt{\frac{\tau_o}{\rho_a}}$ tem dimensões de velocidade e por este motivo denomina-se como “velocidade de atrito” ou ainda “velocidade de fricção”, atribuída através da simbologia u_* . Isto posto, substituindo o termo, tomando esta relação como sendo constante e integrando tem-se que:

$$\bar{U}(z) = \frac{1}{k} u_* \ln \frac{z}{z_o} \quad (28)$$

Onde (28) descreve a forma mais usual da lei logarítmica que tem seu comportamento influenciado diretamente pela altura acima do solo, nela também se observa z_o que nada mais é que uma constante de integração, nomeadamente “comprimento de rugosidade” e k é denominação constante de von Karman e tem um valor fixo de 0,4.

Por fim, cabem duas reflexões acerca da expressão encontrada, a primeira que diz respeito ao fato de que para valores em que $z < z_o$ a velocidade seria negativa, o que nos diz que para este caso as forças tangenciais exercidas pela superfície seriam superiores a força normal imprimida pelo vento, o que apesar de ser real muito próximo a superfície, não é um resultado completamente confiável. Já a segunda é que, dado que a lei é aplicável em um escoamento plenamente desenvolvido, sobre um terreno homogêneo, é fácil perceber que seus resultados não são puramente replicáveis na natureza e desta forma precisam sempre de um caráter interpretativo.

2.2.1.2 Lei de Potência

Assim como a lei logarítmica, esta apresenta uma explicação para o perfil do vento também num terreno horizontal homogêneo de modo a considerar uma relação entre as velocidades em diferentes alturas. Para se estabelecer uma relação entre a velocidade média em uma dada altura z e a mesma velocidade a uma altura de 10 metros, valor este que não é fixo, mas sim variável dado as diferentes rugosidades apresentadas pelos terrenos, tem-se que [24]:

$$\bar{U}(z) = \bar{U}_{10} \left(\frac{z}{10} \right)^\alpha \quad (29)$$

Onde α em (29) varia com a respectiva rugosidade do terreno. Uma forma de correlacionar este, com o “comprimento de rugosidade”, z_o , anteriormente apresentado é dado por (...):

$$\alpha = \left(\frac{1}{\ln \frac{z_{ref}}{z_o}} \right) \quad (30)$$

Sendo z_{ref} a altura de referência.

2.2.2 Turbulência

O comportamento da velocidade do vento é o de não apresentar valores constantes, ou seja, a tendência é que haja uma variância padronizada no comportamento dos esforços originados do caráter turbulento do vento, que cria zonas locais de alta e baixa pressão.

Disto, pode-se tirar 3 diferentes, mas igualmente importantes observações [24]:

- Estruturas rígidas além dos esforços normais esperados estão sob ação de flutuações de cargas variáveis;
- Estruturas flexíveis podem apresentar problemas ainda mais significativos devido ao caráter dinâmico imprimido por este tipo de solicitação;
- O comportamento aerodinâmico pode – e irá – depender fortemente da turbulência do escoamento.

Como tudo, o nível de turbulência pode ser quantificado ou melhor, especificamente sua variação pode ser medida e isto se dá aplicando ferramentas estatísticas de solução, nomeadamente o desvio padrão ou raiz quadrática média [26].

Ao efetuar uma subtração a partir da velocidade média com o perfil de velocidades ($U(t)$), que nada mais é que uma função que rege o comportamento da intensidade da velocidade do vento em cada instante, tem-se então o desvio da segunda em relação a média, estes valores apresentarão logicamente uma parcela positiva em dados momentos e negativa em outros e por conta disso, elevam-se ao quadrado para que todos estejam “normalizados”. Feito isso, aplica-se então a raiz quadrada sobre o resultado de modo a obter as unidades originais.

$$\sigma_u = \sqrt{\frac{1}{t} \int_0^t (U(t) - \bar{U})^2 dt} \quad (31)$$

Sendo $U(t)$ o conjunto de $\bar{U} + u(t)$, onde \bar{U} é a velocidade média do vento e $u(t)$ parcela flutuante da mesma função.

2.2.2.1 Intensidade de Turbulência

Define-se e quantifica a intensidade de turbulência como uma medida da amplitude das oscilações atribuídas ao escoamento do vento, de modo que seja representado matematicamente como sendo a razão entre o desvio padrão, apresentado pela expressão (31) e valor médio da velocidade do vento, tal como apresentado em (32):

$$I_u = \frac{\sigma_u}{U} \quad (32)$$

Tomando como base a lei logarítmica e assumindo uma aproximação para o desvio padrão em que $\sigma_u = 2,5 \cdot u_*$, a equação (32) modifica-se e da origem a (33) [26]:

$$I_u = \frac{2,5 \cdot u_*}{\left(\frac{u_*}{0,4}\right) \cdot \ln\left(\frac{z}{z_o}\right)} = \frac{1}{\ln\left(\frac{z}{z_o}\right)} \quad (33)$$

Analisando a equação (33) é possível concluir que a intensidade da turbulência esta ligada ao comprimento de rugosidade e da altura z . Neste sentido, apresenta-se na Tabela 3 para uma área rural, com poucos obstáculos naturais em que o comprimento de rugosidade é de $z_o = 0,004$ [m] [26], os valores correspondes da intensidade de turbulência em função da altura acima do solo e como já é de se esperar, a intensidade da turbulência decresce logaritmicamente ao passo que a altura vai se elevando, visto que ao passo que a distância do solo aumenta os impactos no escoamento oriundos da força de corte tornam-se cada vez mais imperceptíveis [20].

Tabela 3. Intensidade de turbulência longitudinal em terrenos rurais ($z_o = 0,004$ [m]) [26].

Altura, z [m]	Intensidade de Turbulência, I_u
2	0,26
5	0,21
10	0,18
20	0,16
50	0,14
100	0,13

2.2.2.2 Função Densidade de Probabilidade

As variações da velocidade na camada limite não são repetitivas com o tempo, ou se são apresentam uma distribuição relativamente aleatória, e assim como já citado anteriormente isto se dá devido aos vórtices contidos no escoamento do ar que por nunca serem realmente idênticos são comumente descritos através de recursos estatísticos.

Neste sentido, a função densidade de probabilidade $f_u(u)$ concede em um dado intervalo de tempo a noção desta variação média do vento, além disso, já é bem estabelecido que as componentes da velocidade nesta dada região apresentam uma distribuição Normal (Distribuição de Gauss) [28], que é definida pela equação (34):

$$f_u(u) = \frac{1}{\sigma_u \cdot \sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{u - \bar{U}}{\sigma_u} \right)^2 \right] \quad (34)$$

Em que a probabilidade de ocorrência de qualquer que seja a intensidade do vento pode ser estimada.

2.2.2.3 Espectros de Potência das Rajadas de Vento

Apesar da expressão (34) ser capaz de descrever a amplitude da velocidade do vento ela ainda apresenta limitações quanto a outras características que também são importantes na análise, como é o caso da necessidade de se compreender como se dá esta variação, se esta ocorre de forma mais lenta ou rápida. Isto então pode ser analisado através dos espectros de potência que atuam descrevendo a distribuição da turbulência em função da frequência de ocorrência dentro de um dado um intervalo, sendo este representado por n e $n + dn$ e dado pela função de espectro de potência do vento, dada por $S_u(n)dn$, que ao se integrar para todas as frequências possíveis resulta em (35):

$$\sigma_u^2 = \int_0^{\infty} S_u(n) dn \quad (35)$$

Pode-se compreender a região delimitada pela curva que representa o espectro de potência elucidada a energia do vento, que em outras palavras nada mais é do que uma forma de determinar quando uma dada intensidade do vento, agindo dentro de uma frequência específica de excitação, produz uma maior quantidade de energia acumulada em si [20].

Como é de se esperar, existem diversas abordagens literárias que dão conta de analisar e determinar equações matemáticas para a definição de $S_u(n)$ e inicialmente se analisará a proposta de Von Karman-Harris.

A forma mais conveniente matematicamente para a componente média paralela ao escoamento é dada pela equação que foi inicialmente estudada por Von Karman em 1948 e

posteriormente foi adaptada especificamente a engenharia do vento por Harris já em 1968, que é agora apresentada em (36) em seu modo adimensional [26].

$$\frac{n \cdot S_u(n)}{\sigma_u} = \frac{4 \cdot \left(\frac{n \cdot l_u}{\bar{U}}\right)}{\left[1 + 70,8 \cdot \left(\frac{n \cdot l_u}{\bar{U}}\right)\right]^{\frac{5}{6}}} \quad (36)$$

Onde n é a frequência e l_u o comprimento de turbulência.

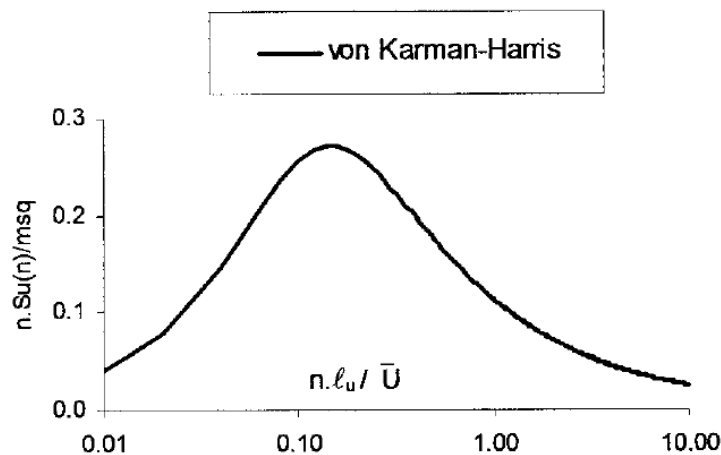


Figura 16. Espectro normalizado do componente de velocidade longitudinal (Von Karman-Harris) [26].

Como pode ser visualizado na Figura 16 a equação apresenta um ponto de máxima que esta associado l_u , ou seja o máximo está diretamente ligado ao comprimento de turbulência do terreno e a distância vertical de análise.

Contudo, esta não é a única maneira de se descrever o comportamento e Davenport foi um dos primeiros a também estabelecer uma relação matemática capaz de representar o espectro de potência do vento. Sua expressão, que esta representada em (37), bem como Von Karman-Harris apresenta-se no formato adimensional, mas tem a particularidade de não depender da altura acima da superfície [23].

$$\frac{n \cdot S_u(n)}{u_*^2} = \frac{4 \cdot x^2}{(1 + x^2)^{\frac{4}{3}}} \quad (37)$$

Onde

$$x = \left(\frac{1200 \cdot n}{U_{10}} \right) \quad (38)$$

Em que U_{10} representa a velocidade média, dada em m/s , do vento a uma altura padrão de 10 metros acima do solo.

Por fim, há também de se citar a função densidade espectral proposta por Kaimal que é representada em (39).

$$\frac{n \cdot S_u(n)}{u_*^2} = \frac{200 \cdot f_o}{(1 + 50 \cdot f_o)^{\frac{5}{3}}} \quad (39)$$

Onde f_o é conhecido como o parâmetro de Monin e é definido por:

$$f_o = \left(\frac{n \cdot z}{U(z)} \right) \quad (40)$$

2.2.3 Coeficiente de correlação

Dá-se o nome de covariância a medida do grau de inter-relação entre duas variáveis aleatórias quaisquer, de modo que se esta tiver um valor nulo, ambas são independentes uma da outra e conseqüentemente para qualquer valor diferente disso apresentará alguma relação, seja tanto positivo como negativo, ao passo que caso este valor seja 1 ou -1 a sua relação é total [27].

Partindo deste pressuposto e analisando em termos do caráter do vento atmosférico pode-se estabelecer uma covariância entre a velocidade deste em duas alturas distintas, z_1 e z_2 , definida por sua vez através da expressão (41).

$$\overline{u'(z_1) \cdot u'(z_2)} = \frac{1}{T} \int_0^T [U_{z_1,t} - \bar{U}_{z_1}] \cdot [U_{z_2,t} - \bar{U}_{z_2}] dt \quad (41)$$

Que por sua vez, da origem a (42), onde esta definido coeficiente de correlação ψ .

$$\rho = \frac{\overline{u'(z_1) \cdot u'(z_2)}}{\sigma_u(z_1) \cdot \sigma_u(z_2)} \quad (42)$$

Ao se analisar as respostas em ressonância das estruturas sob ação do vento a correlação entre as flutuações em dois diferentes pontos torna-se ainda mais importante, de modo que depende da frequência desta excitação induzida pode ser descrita em termos de funções de densidade espectral cruzada [26].

2.2.4 Influência da Rugosidade no Escoamento do Vento

Considerando um escoamento plenamente desenvolvido, haverá a presença de uma camada limite nas fronteiras que tem contato com uma superfície sólida, e quanto esta experimenta o encontro com uma modificação da rugosidade, irá ocorrer um ajuste nas propriedades dentro da camada, partindo como é obvio do solo e se dissipando no eixo z com altura acima deste.

A velocidade média do vento passa a diminuir quando o escoamento atinge uma zona mais rugosa, ao passo que com a intensidade de turbulência apresenta um aumento abrupto momentaneamente e diminuindo com o decorrer do escoamento até atingir um novo equilíbrio. Desta maneira, estruturas que estão sujeitas a regiões onde há zonas de transição de rugosidade irão sentir um impacto mais considerável das cargas dinâmicas.

Primeiramente, as Figura 17 a) e b) apresentam situações mais amenas, para ambos os casos tem-se que o vento ao se aproximar gradativamente da região de alteração de relevo, experimenta uma redução da velocidade até que se atinja o ponto de mudança. Ao passar por esta região, passa-se a haver uma alteração desta vez aumentando até atingir o ponto mais alto onde aproximadamente a velocidade máxima é atingida, posteriormente ocorre uma nova diminuição até que se estabilize quando o escoamento estiver desenvolvido a jusante [26].

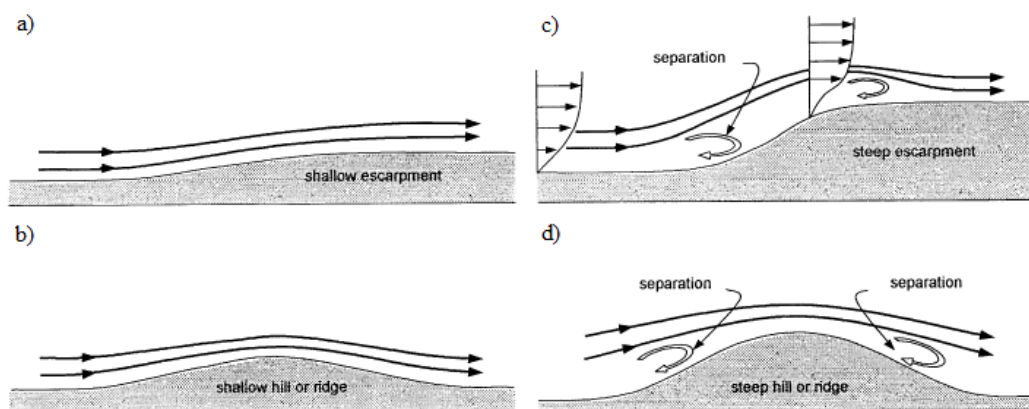


Figura 17. Escoamento em diferentes topografias do terreno [26].

Já na situação demonstrada na Figura 17 c) e d) é apresentado uma separação no escoamento ao se atingir o crescente gradiente de pressões impostas ligeiramente antes e depois da alteração topográfica [20].

2.3 Introdução ao Túnel de Vento

Túnel de vento consiste num dispositivo para a produção de um fluxo controlado de ar com a finalidade de produzir estudos dos efeitos do movimento ou a resistência ao movimento do mesmo em máquinas e objetos. Pressupondo que a corrente de ar seja controlada adequadamente para a finalidade de estudo, torna-se irrelevante o fato de o modelo em teste for ou não projetado para se mover pelo ar ou para suportar as pressões do vento enquanto estiver no lugar [28].

Um bom exemplo são as análises feitas pela NASA que os utiliza testando modelos de aeronaves espaciais em escala (Figura 18), mas ainda assim, mesmo que mais raros, há também túneis de vento em que possibilitam a utilização de modelos em seu tamanho real, como ocorre com veículos na indústria automobilística [29].

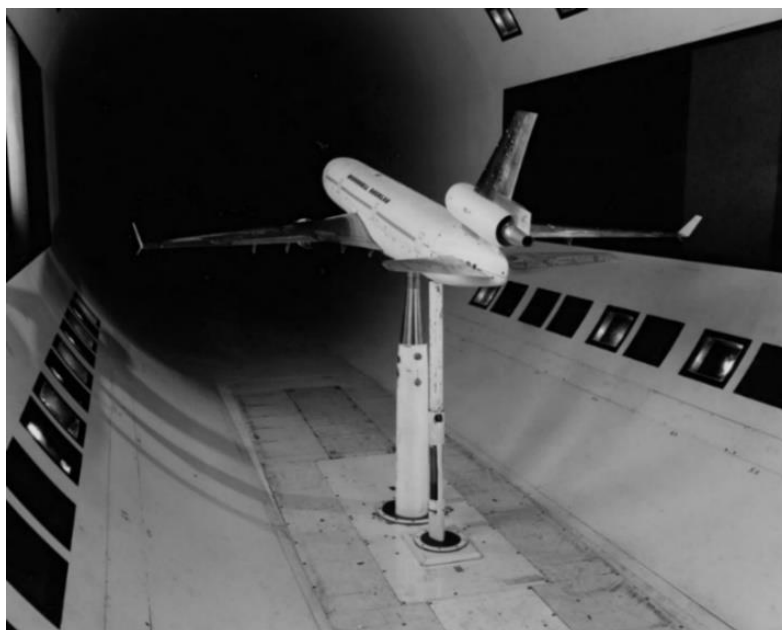


Figura 18. Avião em escala sendo testado em túnel de vento da NASA [29].

Os primeiros dispositivos desenvolvidos para fins semelhantes aos atuais túneis de vento remontem a medição de forças em edifícios, feito por Kernot em Melbourne, na Austrália (1893). A Figura 19 apresenta um esboço esquemático da provável concepção deste dispositivo, nomeadamente “máquina de sopro” [28]. Neste utilizava-se de conceitos básicos

onde o ar viaja lentamente através de uma seção de grande diâmetro, era então acelerado em uma seção de teste semelhante a um bico e posteriormente diminuía na seção do difusor de grande diâmetro antes de ser liberado [28].

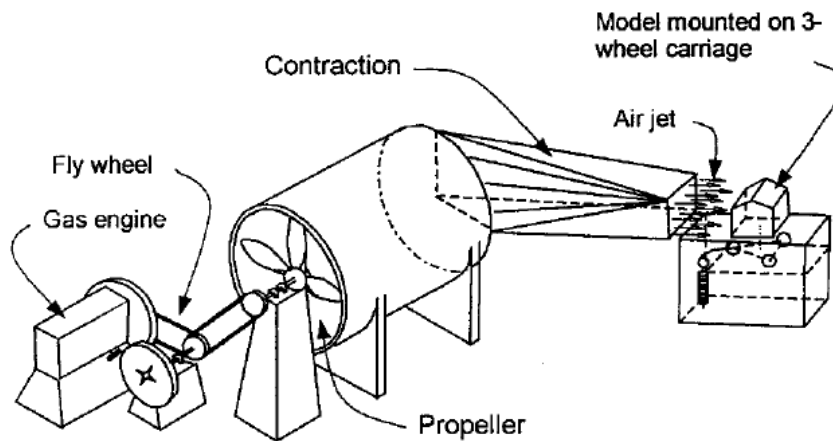


Figura 19. Desenho da W. C. Kernot's 'blowing machine' adaptado de [26], originalmente em [30]

Ainda no mesmo período, Irminger no ano de 1894 em Copenhague, utilizou o fluxo de uma chaminé para estudar a pressão do vento em alguns modelos básicos [31]. Posteriormente houve um desenvolvimento rápido durante a primeira metade do século XX, especialmente no período durante e entre as duas guerras mundiais [26].

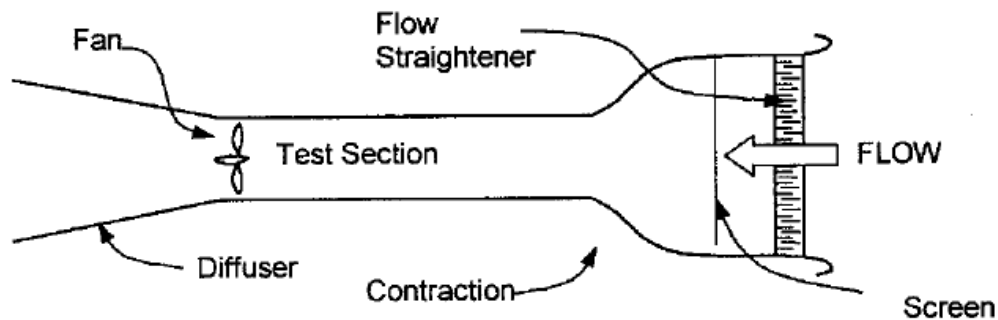


Figura 20. Layout de um túnel de vento de circuito aberto [26],

Os dois layouts básicos do túnel de vento consistem no circuito aberto ou N.P.L. (*National Physical Laboratory*) e o circuito fechado ou Gottingen [28]. Como pouco controlo podia ser exercido sobre importantes variáveis como pressão, temperatura e humidade, estes foram substituídos por projetos de circuito fechado no qual o ar soprado pela seção de teste já estava contido no túnel, e após passar pelos ventiladores retorna à seção de testes com o auxílio de palhetas giratórias. Nestes modelos a velocidade do ar é controlada

alterando a velocidade dos ventiladores rotativos ou ajustando o ângulo das pás do ventilador. Quando o objetivo era alterar outras condições do escoamento como nos túneis de alta velocidade, os sistemas de refrigeração a água são instalados nas seções de baixa velocidade para resfriar o ar reciclado [28]

O ar que se move mostra então o que ocorreria no caso de aquele caso acontecer em um dispositivo real. Podem ser utilizadas diferentes maneiras de fazer o seu estudo, como fumaça ou corante, que não tem impacto considerável na densidade do mesmo e fazem com que seja possível analisar enquanto o mesmo se move. Outra maneira é anexar linhas ou fitas no componente e ver como estas reagem ao escoamento. Por fim, também são utilizados dispositivos de medição para determinação tanto dos efeitos e forças do vento, como a resposta atuante deste na estrutura de estudo [29]

Os túneis de vento são classificados conforme a sua velocidade de operação, podendo subdividir-se em subsônico, transônico, supersônico (até 6 vezes a velocidade do som), hipersônico (6 a 12 vezes) e hipervelocidade (mais de 12 vezes) [28]

As gamas de pesquisas desenvolvidas no âmbito de análises em túnel de vento variam desde testes mais básicos como os de rotina em estruturas, até mais elaborados abordando o comportamento da camada limite. Neste sentido, as medições das características do escoamento em diversos pontos do modelo contribuem com informações a cerca da carga total do vento e como esta se encontra distribuída [28].

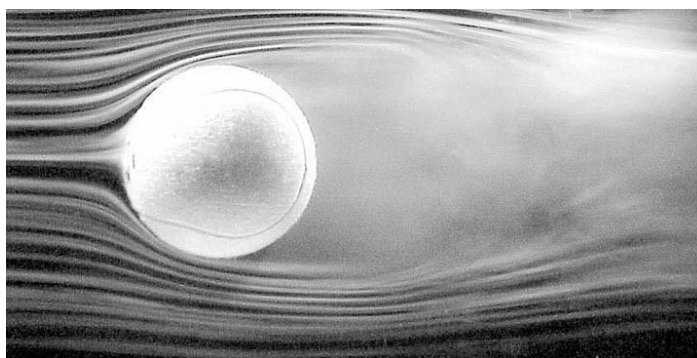


Figura 21. Um teste de túnel de vento mostra como uma bola de tênis se move pelo ar [29].

2.4 Manufatura Aditiva

Atualmente tem se intensificado a concorrência tanto no desenvolvimento de novos produtos como na corrida para validação da alteração em outros já lançados e a fim de se reduzir o tempo deste processo como um todo e juntamente obter um ganho de qualidade, acaba-se necessitando alterações fundamentais no processo de desenvolvimento do produto.

Dentre todas as atividades envolvidas neste processo, destaca-se a utilização de protótipos físicos utilizados para redução da possibilidade de falhas e melhora da qualidade do produto final [32].

Tabela 4. Classificação das tecnologias segundo o princípio de processamento [33].

Classificação das Tecnologias	Descrição dos Princípios	Exemplos de Tecnologia da Categoria
Foto polimerização em cuba	Polímero fotossensível líquido é curado seletivamente em uma cuba por polimerização ativada por luz	<i>Estereolitografia</i> (SL), produção contínua com interface líquida (CLIP), tecnologia da empresa Invision-TEC, outros
Extrusão de material	Material é expelido através de um bico ou orifício, sendo seletivamente depositado	Modelagem por fusão e deposição (FDM), MakerBot, RepRap, Fab@Home, outros
Lançamento de material	Material é depositado em pequenas gotas de forma seletiva	Polyjet, impressão por múltiplos jatos (MJP), tecnologia da Solidscape, outros
Lançamento de aglutinante	Um agente aglutinante líquido é seletivamente depositado para unir materiais em pó	Impressão colorida por jato (CJP), tecnologia da VoxelJet, tecnologia da ExOne, outros
Fusão de leito de pó	Energia térmica funde seletivamente regiões de um leito de pó	Sinterização seletiva a laser (SLS), sinterização direta de metal a laser (DMLS), fusão seletiva a laser (SLM), LaserCUSING, fusão por feixe de elétron (SBM), outros
Adição de lâminas	Lâminas recortadas de material são unidas para formar um objeto	Manufatura laminar de objetos (LOM), tecnologia da Solido, deposição seletiva de laminados (SDL), outros
Deposição com energia direcionada	Energia térmica utilizada para fundir materiais à medida que estes são depositados	Forma final obtida com laser (LENS), deposição direta de metal (DMD), revestimento a laser tridimensional, outros

A manufatura aditiva, ou prototipagem rápida como era chamada inicialmente, pode ser definida como um processo de fabricação, assim como fundição, torneamento, estampagem entre outros, em que por meio da adição sucessiva de material em camadas, na

sua maioria planas, mas apresentando também variações, utilizando-se de informações obtidas diretamente de um modelo CAD, forma-se o objeto desejado. A grande vantagem deste método, é que ele tem um processo de construção automatizado, rápido e que ainda tem a possibilidade de conceção de formas muito complexas, utilizando materiais diversos e através de técnicas distintas [33].

O processo de obtenção de uma peça fabricada em manufatura aditiva pode ser dividido em alguns passos, que se inicia pela modelagem tridimensional em um sistema CAD, isto é devido a necessidade da segunda etapa, onde este modelo deve ser exportado em um formato possível de ser interpretado no equipamento de impressão, em geral formado por uma malha de triângulos, um padrão muito semelhante ao estabelecido em simulações computacionais baseadas no métodos dos elementos finitos (seção 2.5.1), por exemplo, STL - *STereoLithography*.

Na sequência, já no equipamento em si, faz-se o planeamento do processo de fabricação por camada, como a definição de estruturas de suporte quando necessário ou ainda estratégias de deposição. Tendo todos os detalhes definidos se inicia a fabricação, esta que pode demorar horas ou até dias a depender do equipamento e da complexidade da peça manufaturada.

Ao fim do processo ainda são necessárias operações de pós processamento que consistem na limpeza ou até etapas de acabamento tradicionais, a depender do processo e material utilizado.

A norma ISO/ASTM 52900:2015 apresenta uma forma de divisão dos processos de manufatura aditiva que visa enquadrar os diferentes métodos em agrupamentos que levem em consideração tanto o estado do material utilizado como também o método de processamento deste e isto está disposto na Tabela 4 [34].

Além das vantagens já citadas, é possível perceber que há muitos outros aspetos que são positivamente impactados pelo método, como é o caso da possibilidade de redução do número de peças individuais na fabricação, além da otimização de resistência e peso estrutural. Outro ponto importante que se conecta com os dois anteriores reside no fato de haver menos desperdício de material bem como utilização eficiente de energia.

Apresenta a capacidade de além de não necessitar a troca de equipamento no meio do processo, também não há imposição de substituição de ferramental, assim como não requer,

em geral, métodos de fixação para a peça. Por fim ainda apresenta a possibilidade de produção de peças finais com mais de um material em simultâneo.

Quanto as limitações do processo, a grande maioria esta atrelada ao material, desde o fato de haver limitação na gama que pode ser utilizada na fabricação, até o fato de que apesar das propriedades como a resistência em alguns casos poder ser melhorada, esta possui um limite que ainda é consideravelmente inferior ao obtido em processos tradicionais, devido ao caráter anisotrópico produzido exatamente pela deposição de camadas que impossibilita uma continuidade. Outro ponto também é a o acabamento superficial que é consideravelmente inferior a processos como a usinagem.

2.4.1 Modelação por Fusão e Deposição (FDM)

O processo FDM, que foi o utilizado na produção dos protótipos utilizadas no âmbito deste trabalho, popularizou-se através da empresa Stratasys, Inc., EUA, que em 1992 comercializou o primeiro equipamento com a tecnologia, apesar da mesma ter sido criada ainda em 1988. Assim como anteriormente descrito na Tabela 4, esta faz uso de matéria prima ainda em estado sólido, podendo ser tanto em forma de filamento, lâmina ou ainda sem forma definida, pois passará pelo processo de fusão antes de ser depositado [35].

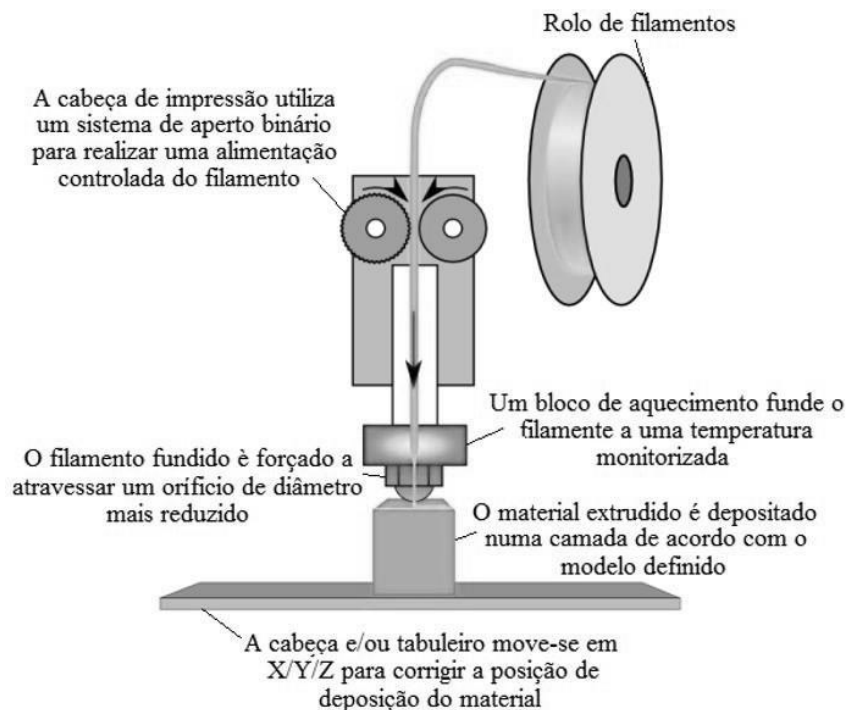


Figura 22. Princípio de funcionamento de uma impressora da tecnologia FDM [36].

Conforme pode ser visualizado na Figura 22, a construção se dá através da deposição do material através da cabeça de extrusão, que possui movimentos no eixos X-Y, enquanto a mesa onde o material é depositado se movimenta em relação ao eixo Z. O rolo de filamentos alimenta o equipamento que aquece o fio até o ponto em que o material se encontre em um estado semilíquido, este mesmo movimento de alimentação produz uma força que continuamente empurra a material já em estado ideal através de um bico calibrado [32].

O filamento por sua vez, ao tocar a superfície rapidamente se solidifica e adere a esta ou a camada anterior no caso de já haver deposição de outras anteriormente, enquanto a mesa, que em geral é composto de poliuretano ou policarbonato, funciona como um elevador, se movimenta de modo a permitir a formação das camadas com a espessura previamente determinada. Outra etapa que se faz necessária é a formação de uma superfície plana sobre a placa através da deposição de algumas camadas muito finais sobre toda a área onde ocorrerá a impressão.

Também como mencionado anteriormente, esta tecnologia necessita de suportes, visto que este é necessário para que a construção entre regiões que não esteja conectada no corpo da peça desde a base, ou ainda em outros estágios do processo. Nestes casos, o próprio equipamento em geral apresenta um segundo bico auxiliar, que se apresenta exatamente para construções de tais partes. O material destes tende a ser mais frágil de modo que nas primeiras versões poderia ser removida no estágio de pós processamento manualmente, contudo nos mais atuais já é possível sua remoção com um banho da peça completa em uma solução líquida aquecida [32].

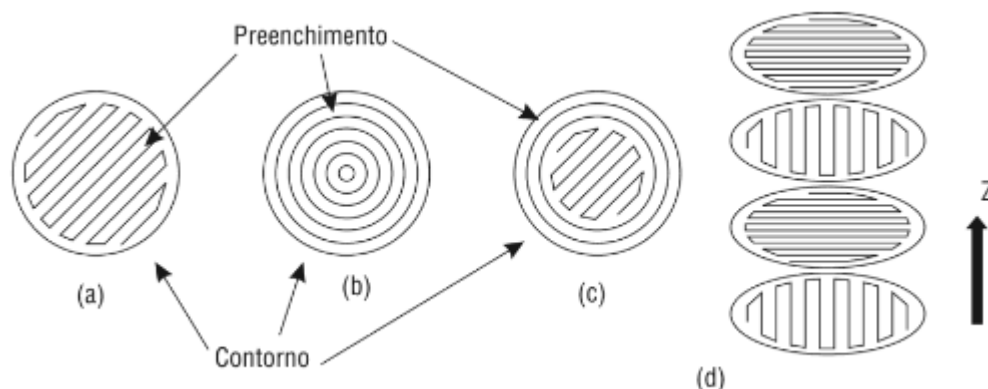


Figura 23. Estratégias de preenchimento de camadas no processo FDM [37].

Encontram-se disponíveis comercialmente para impressão filamentos compostos de *polifenilsulfona*, policarbonato, ABS (Acrlonitrila Butadieno Estireno), ABSi (material esterilizável), poliéster e cera [37].

Quanto as técnicas de preenchimento, elas irão variar com base no processo utilizado de modo que nem todos são aplicáveis. No processo de modelagem por fusão e deposição é possível verificar duas estratégias bem definidas, o *raster* (Figura 23 a)) e o *contour* (Figura 23 b)), podem surgir variações tanto da junção de ambos como simples alternância de direções (Figura 23 c) e d)) [32].

A deposição e preenchimento se dá de maneira a primeiramente estabelecer o contorno externo e em seguida preencher as partes internas, sempre se atentando ao fato de que para garantir a máxima resistência mecânica possível, as camadas são posicionadas orientadas sempre com um desfasamento de 90° entre os níveis.

Os equipamentos disponíveis apresentam a possibilidade de alteração e calibração da espessura de extrusão, contudo isto não é automático e caso se necessite alteração em meio a um processo o mesmo deve ser parado para que a troca ocorra.

2.5 Método Numérico

Não é consenso, mas há grandes indícios de que a publicação mais antiga a tratar da simplificação de estruturas complexas através da solução de elementos remonta ao artigo denominado “elemento finito”, por Ray Clough, em 1956 [38].

Consiste em uma ferramenta matemática numérica que foi desenvolvida com a finalidade de avaliar e dimensionar os comportamentos de alguns elementos quando estes estão sob ação de forças, ações e/ou carregamentos variáveis, com o objetivo de auxiliar na obtenção da melhor distribuição estrutural de projetos de engenharia.

A *Computational Fluid Dynamics* (CFD), se apresenta como um muito útil instrumento para abordar problemas de escoamentos fundamentados em equações de transporte, conservação de massa e energia. Esta utiliza métodos numéricos para determinar as grandezas de interesse no escoamento em pontos chamados de nós.

Os principais métodos utilizados para simulação numérica de escoamentos de fluidos são: Métodos de Diferenças Finitas (*FDM - Finite Difference Method*); Métodos de Diferenças Finitas baseado em Volumes de Controlo (*CVFDM - Control Volume Finite Difference Method*); Método de Volumes Finitos (*FVM - Finite Volume Method*); Métodos

de Elementos Finitos (*FEM - Finite Element Method*) e Métodos de Elementos Finitos baseado em Volumes de Controlo (*CVFEM - Control Volume-Finite Element Method*) [13].

2.5.1 Método dos Elementos Finitos

Este método tem por finalidade a discretização do domínio de integração em uma coleção de subdomínios, cada qual com uma geometria conhecida, estando todos interligados e apresentando cada qual seus graus de liberdade. Cada subdomínio apresenta uma equação própria, sendo ela atribuída através da formulação variacional. Dada esta divisão e tendo em mente que é possível prever os comportamentos dentro destes subdomínios, torna-se então mais fácil representar uma função não-trivial através de vários segmentos polinomiais simples, onde estes devem ser interligados de maneira que se estabeleça uma continuidade nos pontos de intersecção [39].

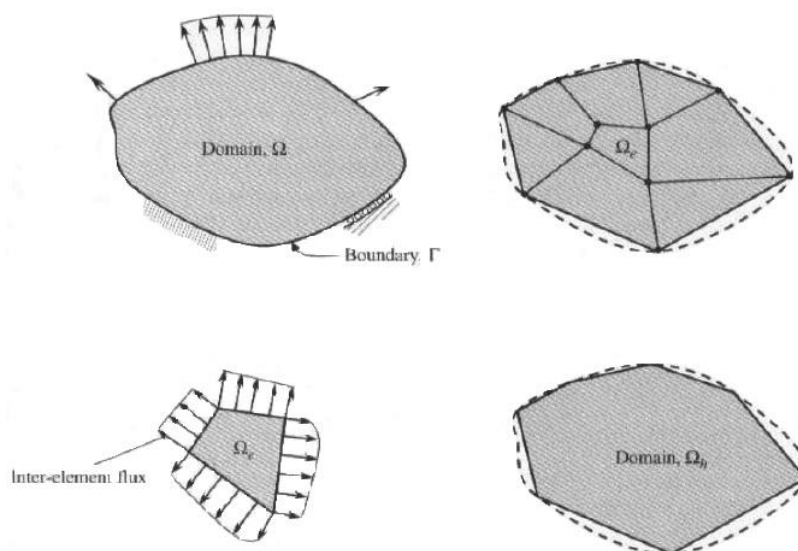


Figura 24. Representação do domínio e seus subdomínios [53].

A Figura 24 a) apresenta um exemplo de domínio complexo Ω em que é subdividido em partes menores, que sejam capazes de expressar o domínio original com certa fidelidade (Figura 24 b)), cada um destes será responsável por soluções locais de equações algébricas (Figura 24 c)), que quando unidas mediante condições de continuidade ou descontinuidade, descreveram o comportamento aproximado esperado do domínio Ω .

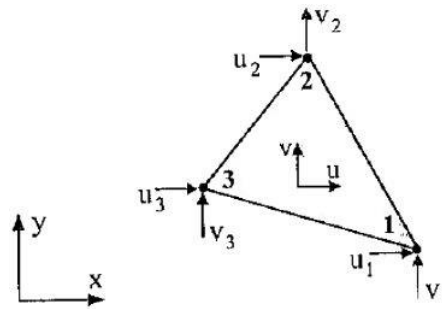


Figura 25. Elemento triangular [40].

Tem-se em geral a aplicação de duas diferentes geometrias, a triangular com três pontos nodais (Figura 25) e a quadrilátera com quatro (Figura 26), mas em geral é mais comum a utilização de malhas híbridas compostas de ambos os elementos como mostrado na Figura 27.

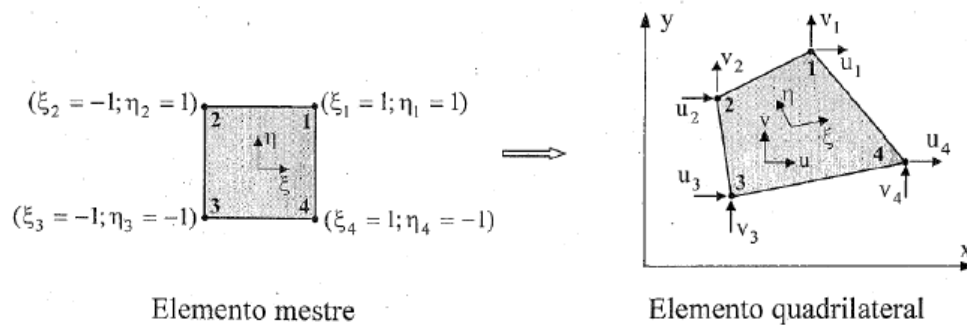


Figura 26. Elemento quadrilátero [40].

A grande vantagem do primeiro tipo de elementos em relação ao segundo reside no fato de além ser mais simples quanto a resolução dos problemas de valor de contorno, além deste ter uma maior capacidade de representar regiões irregulares, especialmente as que apresentam regiões arredondadas. Já os quadriláteros, em geral são mais aplicados em regiões regulares. O que acaba ocorrendo por fim é a união da vantagem de ambos em malhas híbridas [13].

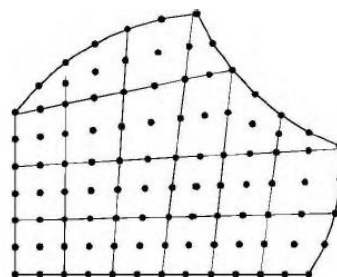


Figura 27. Domínio discretizado em triângulos e quadriláteros [13].

2.5.2 Método dos Volumes Finitos

Este método expande as fronteiras para além de duas dimensões, subdividindo o domínio Ω em um número finito de volumes de controlo, sendo estes adjacentes, onde as equações de conservação são aplicadas.

A Figura 28 e a Figura 29 apresentam os modelos de elementos presentes na malha de um modelo de 3 dimensões.

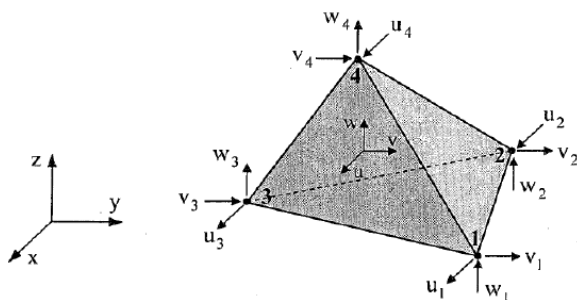


Figura 28. Elemento tetraédrico [40].

Desta forma, quando estes métodos são transportados para o meio computacional o desafio torna-se a produzir malhas com um nível de precisão suficiente que seja capaz de transcrever em elementos finitos uma dada geometria complexa. No entanto, agregar um número elevado de elementos produz um cenário onde o custo computacional torna muito elevado e em muitos casos inviável a depender da geometria modelada.

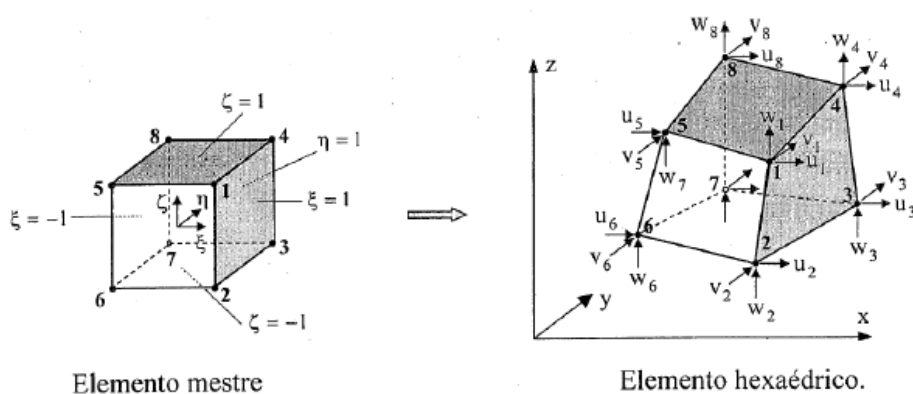


Figura 29. Elemento hexaédrico [40].

Existem diversas “ferramentas” desenvolvidas para explicar o comportamento da mecânica clássica e dentre estas, destacam-se aqui dois diferentes métodos, a Lagrangeana

e Euleriana, que abordam a modelagem do comportamento do deslocamento do fluido e as consequentes ações contidas neste que ocasionam as suas variações ao longo do tempo.

Conforme apresentado anteriormente, a expressão (19) descreve o comportamento do escoamento e nesta, ao se analisar os termos do lado esquerdo da equação, pode-se reescrever em duas diferentes formas, estas que são as duas principais abordagens de análise de elementos finitos, citadas anteriormente.

$$\rho \cdot \frac{D\vec{v}}{Dt} = \rho \cdot \left(\frac{\delta\vec{v}}{\delta t} + (\vec{v} \cdot \nabla)\vec{v} \right) \quad (43)$$

O lado esquerdo de (43) caracteriza a derivativa substancial temporal, que representa a estrutura referencial Lagrangeana, ao passo que o lado direito é composto de duas partes, onde $\frac{\delta\vec{v}}{\delta t}$ simboliza a variação local e $(\vec{v} \cdot \nabla)\vec{v}$ a parte convectiva, que nada mais é do que a representação referencial Euleriana, que é a forma mais simples da abordagem da representação das equações fundamentais da mecânica dos fluídos [14]

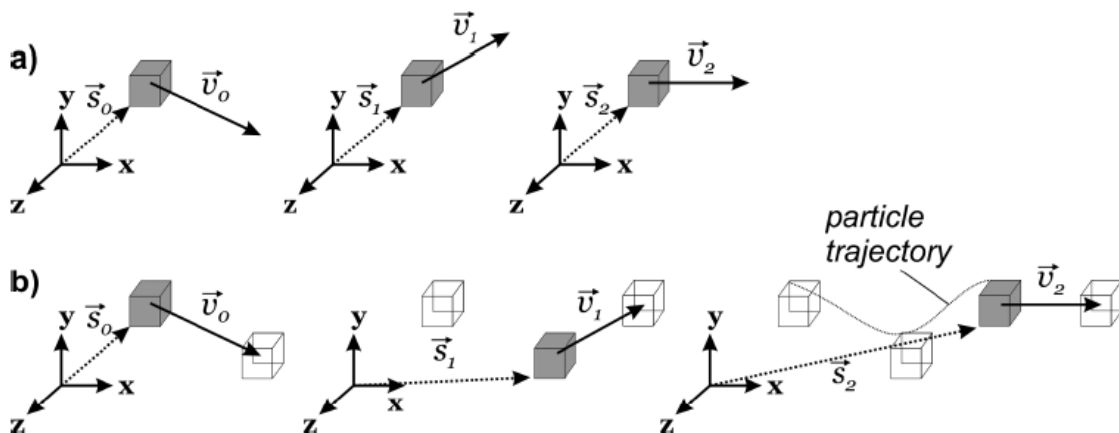


Figura 30. a) Estrutura de referência Euleriana: fixa no espaço. b) Estrutura de referência Lagrangeana: móvel no espaço, adaptado de [14].

A estrutura referencial Euleriana utiliza-se de volumes de controle que são fixos no espaço, diferente da Lagrangeana, onde os volumes de controle acompanham o deslocamento das partículas em todo o movimento do escoamento. Na primeira a direção do fluxo dentro do volume de controle pode-se alterar com frequência, especialmente se na

região analisada ocorrer a presença de vórtices ou outras perturbações que induzam a escoamentos turbulentos.

Conforme Figura 30 a), o volume de controlo s_0 está localizado na exata mesma posição que s_1 e s_2 , logo o vetor de posição deste não é uma função do tempo [14]

Neste referencial, posição, velocidade e aceleração das partículas, são representadas pelas equações (44), (45) e (46) respetivamente, são uma função única do tempo t .

$$s(t) \quad (44)$$

$$v(t) = \frac{ds(t)}{dt} \quad (45)$$

$$a(t) = \frac{dv(t)}{dt} = \frac{d^2s(t)}{dt^2} \quad (46)$$

Já na segunda, o referencial Lagrangeano, este se move junto com as partículas do fluído, logo o volume de controlo acompanha a mesma parcela do fluído durante todo o seu escoamento, e desta forma, a análise essencial seria dada por um acompanhamento a nível de cada partícula.

Neste referencial o vetor posição depende não somente de t mas também da posição anterior no escoamento, dando origem as expressões (47), (48) e (49).

$$s(s(t), t) \quad (47)$$

$$v(s(t), t) = \frac{\partial s}{\partial t} + (v \cdot \vec{\nabla}) s \quad (48)$$

$$a(v(t), t) = \frac{\partial v}{\partial t} + (v \cdot \vec{\nabla}) v \quad (49)$$

Na Figura 30 b), inicialmente, em t_0 , o contorno geométrico analisado encontra-se em s_0 , posteriormente move-se para s_1 em t_1 , agora com velocidade v_1 e assim ocorre sucessivamente. Ao fim, ao se conectar o vetor dos deslocamentos entre cada uma das posições individuais das partículas, ao longo do tempo, é possível reconstruir toda a trajetória de tal [14].

Como pode ser verificado, os termos da velocidade e aceleração do referencial Lagrangeano contem os mesmos termos que podem ser identificados no referencial Euleriano, contudo no Lagrangeano se apresentam em forma de derivadas parciais e são complementadas por um segundo termo. Estes termos $(v \cdot \vec{\nabla}) s$ e $(v \cdot \vec{\nabla}) v$ podem ser vistos como uma parcela da contribuição convectiva. Isto se torna ainda mais importante em altas velocidades, onde a parcela contribuinte da partícula se torna menos relevante [14].

2.5.3 Camada Limite Computacional

Regiões de turbulência são fenômenos comuns em CFD e acabam por ser significativamente afetados pela presença de paredes, onde devido a formação da camada limite as variáveis de interesse são afetadas pela viscosidade e conseqüentemente apresentam grandes gradientes na solução e como é óbvio, uma solução adequada nesta região determina uma previsão bem-sucedida.

A Figura 31 trás uma comparação onde em a) é possível verificar como uma malha com elementos grandes na região da camada limite apresenta dificuldade em transcrever o comportamento das variáveis de interesse, neste caso a velocidade, problema este que é amenizado em b) devido a presença de mais elementos com menor tamanho próximo a superfície.

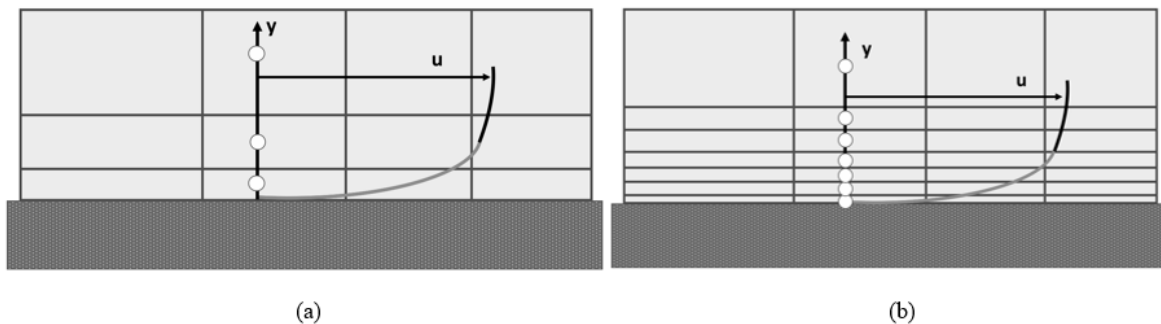


Figura 31. Desenvolvimento das soluções para a variável de interesse com diferentes malhas [41].

Assim, Nikuradse e Prandtl desenvolveram uma abordagem onde o eixo y e u foram normalizados, nomeadamente y^+ e u^+ , que posteriormente foi utilizada para determinar a espessura da camada limite próxima a parede, mais especificamente o tamanho máximo recomendado para a primeira parcela de células próximas a parede [3].

Sendo assim, define-se como sendo,

$$y^+ = \frac{yU_\tau}{\nu} \quad (50)$$

onde, y representa a altura e ν a viscosidade dinâmica do fluido e U_τ a velocidade de atrito que é dada pela equação (51),

$$U_\tau = \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}} \quad (51)$$

em que, τ_w é a tensão de corte na parede dada por,

$$\tau_w = \frac{1}{2} C_f \rho U_\infty^2 \quad (52)$$

onde v_∞ é a velocidade de corrente livre e C_f o coeficiente de atrito na parede que para uma placa plana pode ser definido como,

$$C_f = 0,0576 R_e^{-\frac{1}{5}} \quad (53)$$

em que R_e é dado pela equação (20).

Conduto, como é obvio, o real interesse no cálculo deste número adimensional é utilizar valores previamente definidos para a obtenção da altura das camadas de células e posteriormente construir um modelo computacional capaz de prever o comportamento na camada limite.

Sendo assim, no presente estudo utilizaram-se de duas teorias de turbulências, $k - \varepsilon$ e $k - \omega$ para todas as configurações estudadas em ambos os *solvers*, as quais respetivamente apresentam um valor de y^+ de 30 para a primeira e 1 para a segunda, as quais logicamente darão origem a valores naturalmente diferentes para a as camadas limites adjacentes ao modelo. Para além disso, no caso da configuração frontal utilizou-se uma terceira via de análise para comparação entre ambas as anteriores, a teoria SST, que se apresenta como uma forma híbrida das duas anteriores, onde próximo a superfície as equações são tratadas como para um caso $k - \omega$, já no restante do escoamento as equações da teoria $k - \varepsilon$ são aplicadas, além disso, nesta o valor de y^+ comumente utilizado é de 1 também e desta maneira a altura da camada segue sendo a mesma utilizada para o $k - \omega$.

Capítulo 3: MATERIAIS E MÉTODOS

Com o objetivo de obtenção dos resultados utilizou-se de um modelo experimental construído através de manufatura aditiva o qual foi submetido a um escoamento no túnel de vento subsônico instalado no Laboratório de Mecânica dos Fluidos e Hidráulica do Instituto Politécnico de Bragança. Neste objetivou-se a obtenção da resposta da estrutura nos termos de forças atuantes, tanto na direção longitudinal como transversal, além da observação do comportamento dinâmico e visual do componente para obtenção da frequência de excitação característica do vento nesta situação a fim de obter as frequências naturais da estrutura para comparação com o modelo teórico.

Na sequência desenvolveram-se análises numéricas do comportamento do mesmo em escala natural para verificação e validação dos resultados obtidos na estrutura reduzida.

3.1 Túnel de Vento

A fim de proceder com os testes experimentais, utilizou-se do equipamento disponível o qual apresenta uma configuração do tipo circuito aberto, subsônico, com uma seção de testes de 300 x 300 x 400 [mm], em altura, largura e comprimento respetivamente.

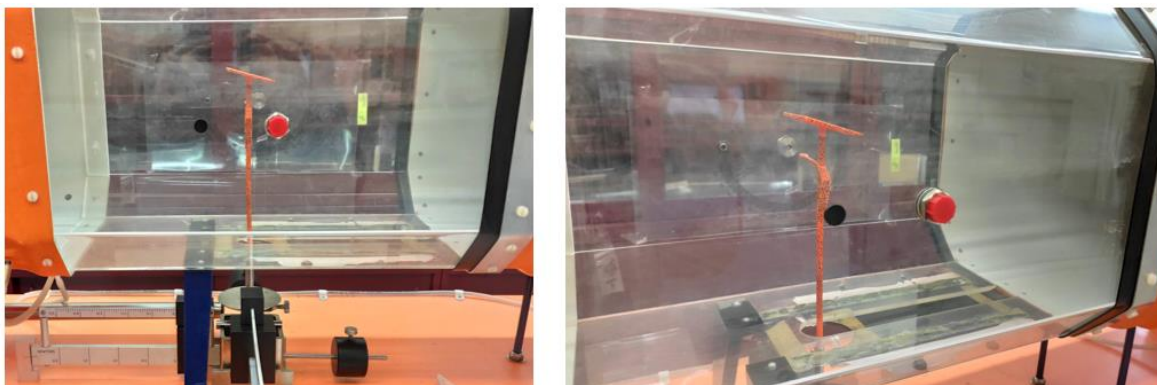


Figura 32. Seção de teste do túnel de vento já com a estrutura montada, autoria própria.

O equipamento possui um ventilador instalado como exaustor, que esta conectado a um motor elétrico, este por sua vez que é o responsável pelo movimento do ventilador. Há também, na seção de entrada, a presença de tubos para homogeneização do escoamento a fim de que para baixos valores de Reynolds, seja garantido um escoamento uniforme na seção de teste.



Figura 33. Túnel de vento do Laboratório de Mecânica dos Fluídos e Hidraulica do Instituto Politécnico de Bragança, autoria própria.

A velocidade do ventilador está diretamente relacionada com a frequência do inversor responsável pelo controlo do motor elétrico, partindo de 1 a 60 [Hz], onde apresenta a velocidade máxima de aproximadamente 28,44 [m/s], com um comportamento aproximadamente linear conforme pode ser verificado na Figura 34, a qual através de diversos resultados experimentais originou a equação (54).

$$U_{\infty} = 0,4694 \cdot f + 0,28 \left[\frac{m}{s} \right] \quad (54)$$

onde, U_{∞} representa a velocidade e f a frequência determinada no inversor.

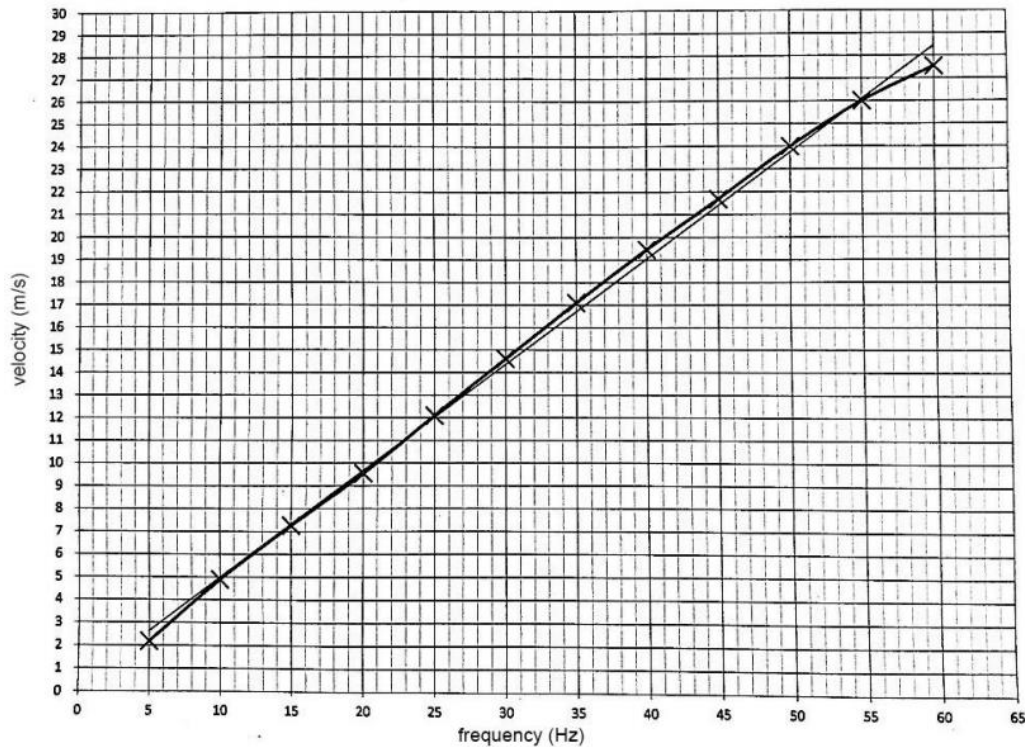


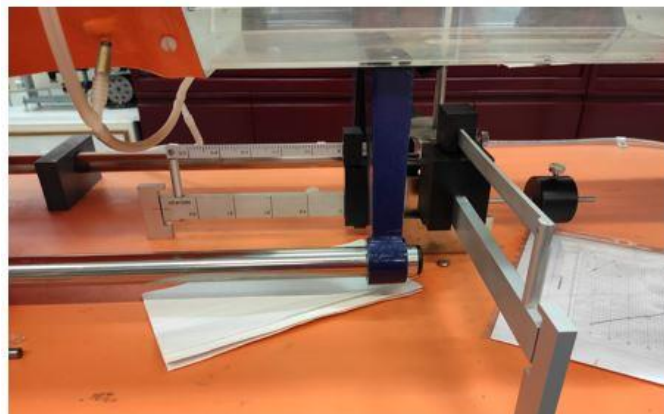
Figura 34. Gráfico da velocidade prevista na seção de testes em função da frequência, autoria própria.

A Figura 35 mostra foi efetuado o encaixe do componente estrutural no túnel de vento. Neste há a presença de um sistema de contrapeso, onde ao ser imprimida uma certa magnitude de forças ou longitudinais ou transversais, estas são mensuradas em um mecanismo que se assemelha a uma balança, onde um contrapeso preso na haste de suporte posterior, para as forças longitudinais, ou a esquerda para forças transversais da estrutura esta configurado na posição inicial, posição esta que permite que a estrutura esteja calibrada.

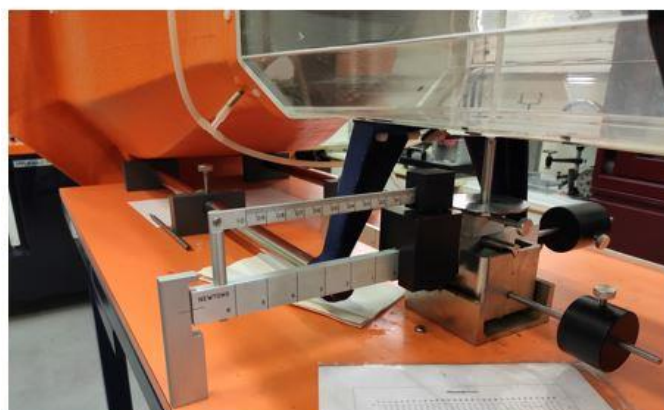
O escoamento então, ao passar pela estrutura presa a este sistema induz um deslocamento angular que se transmite a da haste de medição graduada para cima ou para baixo, a depender de se a velocidade do escoamento foi reduzida ou aumentada, então o usuário deve movimentar a segunda massa presa na haste contrário a onde é configurada a posição inicial, de modo que o deslocamento angular sofrido seja desfeito graças ao contrapeso exercido na haste.

É possível também verificar a presença de um suporte cilíndrico que adentra o túnel de vento e este que será utilizado para fixar a estrutura de análise, este que é furado, logo a estratégia utilizada neste caso foi acoplar uma parcela adicional na base da estrutura, que tenha o diâmetro do tamanho deste furo e assim acoplar a estrutura e mantê-la presa.

Inclusive esta disponível também um corpo de prova que tem as referidas dimensões de 5 [mm] de diâmetro e 25 [mm] de comprimento na sua base.



(A)



(B)

Figura 35. Estrutura de medição das forças atuando sobre a estrutura, autoria própria.

3.2 Modelação 3D

Antes da realização da análise ocorreu uma fase de estudo e planejamento, onde a primeira etapa de preparação constitui na transposição dos desenhos técnicos fornecidos pela empresa Valled, em modelos tridimensionais utilizando o *software* educacional SolidWorks®. Estes desenhos por sua vez, não apresentavam todas as medidas exatas e desta forma assumiu-se alguns valores tomando como base a disponibilidade comercial de elementos estruturais características presentes.

A Figura 36 apresenta cada um dos itens que compõem a estrutura modelados em sua forma original tomando como base todas as medidas fornecidas as quais podem ser encontradas no anexo A1. Esta versão inicial contava com um total de sete elementos, contando a estes a placa solar.

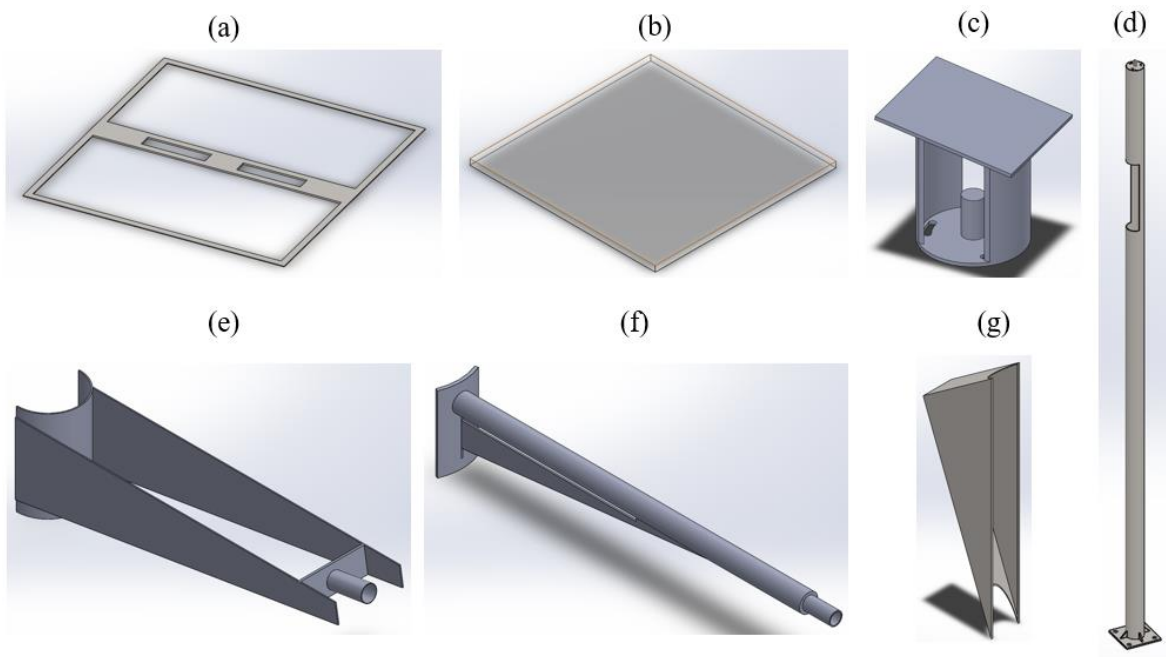


Figura 36. Elementos constituintes da estrutura original: a) Suporte painel solar; b) Placa solar; c) Cabeçote de suporte para painel; d) Fuste (Poste); e) Suporte triangular da luminária; f) Suporte tubular luminária; g) Contentor (Suporte das baterias) [42].

Na sequência, devido ao fato da complexidade dos componentes constituintes, especialmente no que diz respeito a rasgos, recortes e furos, foram efetuadas diversas alterações na estrutura, recorrendo inclusive a união de elementos quando necessário. As alterações mais características foi na remodelagem das hastes que dão suporte a presença da luminária e na remoção da base do poste, tanto dos apoios como da chapa que efetua a fixação, visto que estes elementos não preponderantes para o presente estudo.

Todas estas alterações e outras mais podem ser visualizadas na Figura 37, a qual não apresenta o painel, mas que terá esta presença tanto na versão fabricada através de manufatura aditiva como na versão utilizada nos testes de simulação fluido dinâmica. Esta segunda versão, apresenta um total de cinco componentes distintos incluindo a placa, sendo composto pelo fuste agora unido ao cabeçote de suporte da luminária, formando um único item; o contentor segue como um item a parte; a haste de suporte a luminária é composta pela união dos dois suportes anteriores em um único item; o suporte do painel solar e o próprio painel seguirão sem alterações.



Figura 37. Estrutura modelada em tamanho real [42]

Utilizando-se das medidas da seção de testes e tomando como base os cálculos para o tamanho esperado da camada limite em cada possível caso presente nos escoamentos do túnel de vento (ver item 3.4.2), obteve-se então uma altura útil entre 20 e 25 [cm].

Desta maneira, os elementos estruturais foram reduzidos em uma certa escala, dado que naturalmente o mesmo possui uma altura total de 6,32 metros. Medindo então as dimensões do túnel chegou-se a uma redução em escala de 30 vezes, para uma estrutura de 21 [cm].

Contudo, dado que o componente ao ser reduzido apresentou certas medidas com valores muito reduzidos, como é o caso da espessura dos tubos, por conta disso foram necessárias algumas correções, especialmente devido ao fato de a resolução que a impressora era capaz de imprimir. Assim, todas as medidas com valores abaixo deste mínimo foram redimensionadas para cima até o mínimo.

Outro item alterado foi o suporte para direção do painel solar, onde foram removidos todas as suas cavidades, furos e rasgos, passando assim a ser um componente inteiriço. Outras alterações necessárias foram no fuste, onde o mesmo possuía uma espessura tão pequena que impossibilitava os testes devido a baixa resistência mecânica, por conta disso

foram modificados para um formato inteiro como os demais componentes utilizando uma técnica de preenchimento onde uma estrutura cruzada é impressa e não necessariamente todo o componente é preenchido, um exemplo de impressão desta técnica pode ser visualizada na Figura 38.

Todas estas alterações podem ser visualizadas de forma completa no anexo A2.

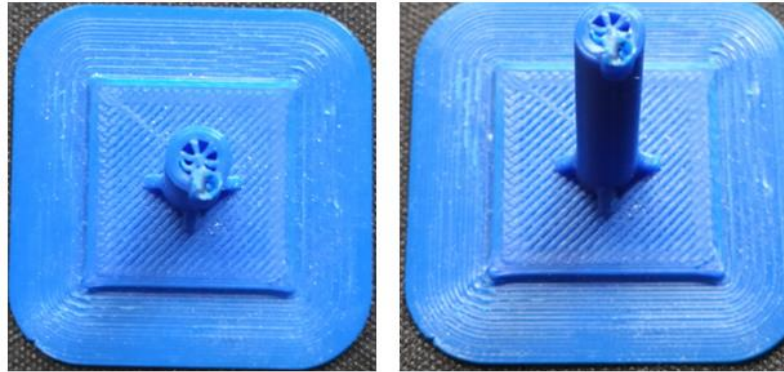


Figura 38. Exemplo de impressão das estruturas preenchidas, autoria própria.

3.3 Impressão 3D

No que tange ao equipamento utilizado no processo de impressão, foi escolhido o melhor equipamento disponível que possuísse a capacidade de além de atingir a resolução e impressão desejada, também fosse capaz de imprimir nas dimensões necessárias.

Tabela 5. Características do equipamento utilizado para manufatura aditiva [43].

Modelo	Ultimaker 3 Extended
Tecnologia	<i>Fused Deposition Modeling</i> (FDM)
Dimensões da área de construção	215 x 215 x 300 [mm]
Diâmetro do filamento	2,85 [mm]
Resolução da camada	Bico de 0,25 [mm]: 150 - 60 micrones Bico de 0,4 [mm]: 200 - 20 micrones Bico de 0,8 [mm]: 600 - 20 micrones
Velocidade de impressão	30 - 300 [mm/s]
Materiais suportados	PLA, Tough PLA, ABS, Nylon, CPE, CPE+, PC, PP, TPU 95A, PVA, Breakaway

Para isto utilizou-se do equipamento Ultimaker 3 Extended para a impressão de 3 versões em PLA, o qual tem suas características apresentadas na Tabela 5, e o dispositivo RoboxDual para a impressão de uma última versão em ABS, que tem suas características apresentadas na Tabela 6, ambos disponíveis no laboratório FABLAB do Instituto Politécnico de Bragança.

Das seis partes iniciais, somando a este o painel solar, que constituíam o componente estrutural, este foi simplificado tanto nas formas como com a junção de alguns componentes e remoção de outros, finalizando com um total de quatro partes individuais para impressão conforme pode ser visualizado na Figura 39.

Tabela 6. Características do equipamento utilizado para manufatura aditiva [44].

Modelo	RoboxDual by CEL
Tecnologia	<i>Fused Deposition Modeling (FDM)</i>
Dimensões da área de construção	210 x 150 x 100 [mm]
Diâmetro do filamento	1,75 [mm]
Resolução da camada	Personalizado de 50 a 500 micrones Predefinições 100, 200, 300 micrones
Materiais suportados	PLA, ABS, HIPS, Nylon, PC, PVOH, CO-PET, PETG, TPU e variações destes materiais.

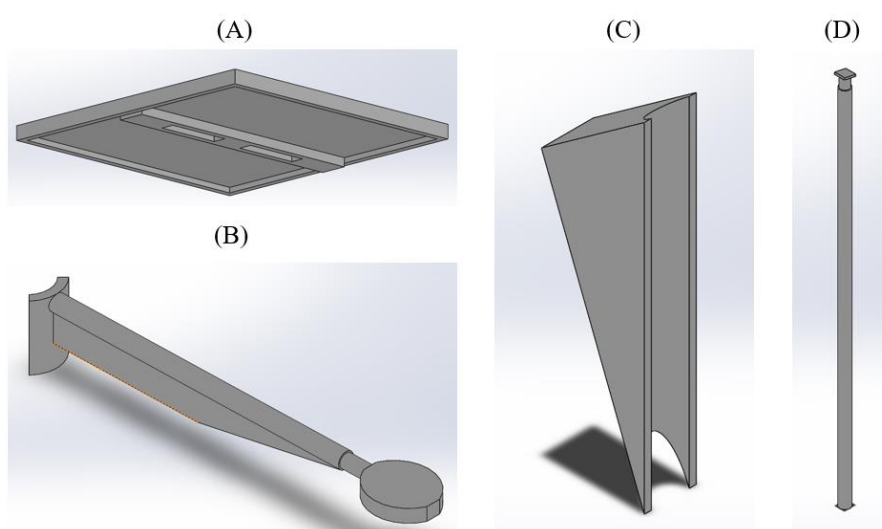


Figura 39. Conjunto de itens que forma a estrutura: a) Estrutura de suporte do painel solar acoplado com o painel; b) Suporte tubular de iluminação; c) Suporte de baterias; d) Tubo acoplado com o suporte superior para o apoio do painel solar [42].

Contudo, além dos itens que irão formar a estrutura foi impresso um suporte para que se pudesse acoplar este objeto no equipamento de medição disposto no túnel de vento. Para isso, bem como pode ser visualizado na Figura 40, foi construído um suporte circular que se acoplaria no suporte do túnel de vento e permitiria que toda a estrutura de interesse estivesse posicionada na região de teste do túnel.

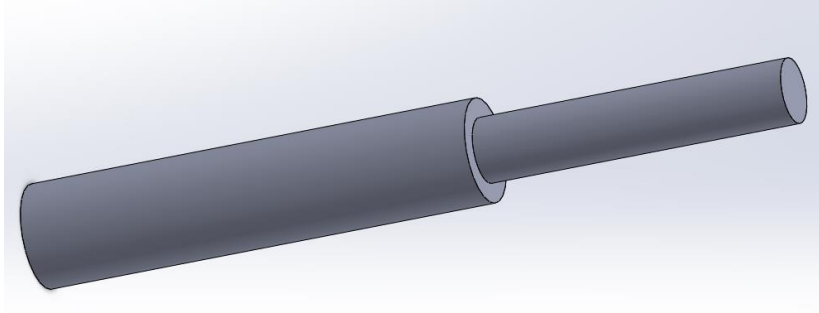


Figura 40. Suporte de acoplamento no túnel de vento [42].

A Figura 41 apresenta as versões finalizadas dos modelos utilizados para testes experimentais. A esquerda é apresentada o modelo em laranja, o qual é feito em ABS e a direita, em branco, a versão em PLA.



Figura 41. Modelos finais impressos para testes, autoria própria.

3.4 Simulações de Escoamento

No que se refere aos procedimentos experimentais para realização dos ensaios certos passos foram seguidos para obtenção dos dados que posteriormente serão apresentados.

Foram escolhidas quatro diferentes posições de ensaio, visto que estas abrangeriam as possibilidades principais de ocorrência do vento sobre a estrutura, mesmo que isso não aborde todas as situações possíveis. A Figura 42 apresenta uma descrição gráfica das posições em relação ao escoamento e apesar de em termos absolutos a área projetada das faces direita e esquerda serem as mesmas, procurou-se ensaiar ambos os lados afim de confirmar se a geometria tridimensional teria o mesmo desempenho no que diz respeito ao coeficiente de arrasto final.

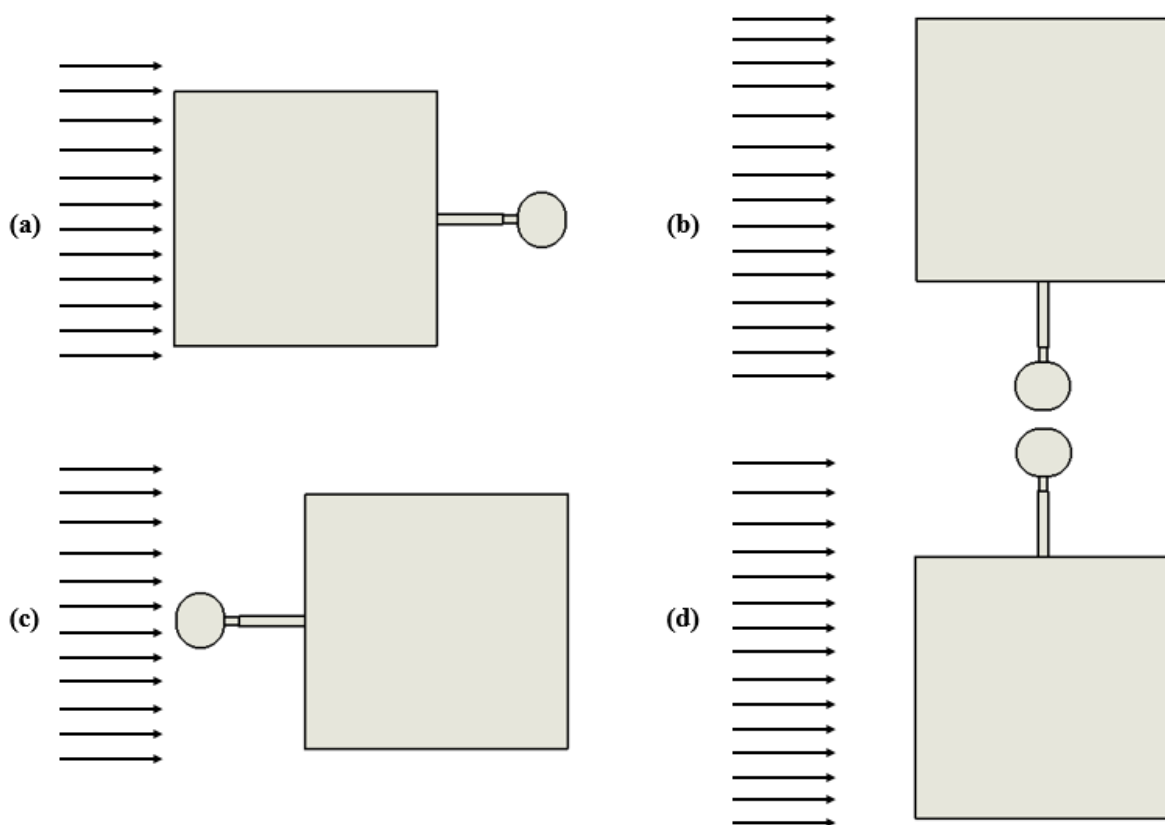


Figura 42. Posições da estrutura no experimento: a) face lateral esquerda alinhada; b) face posterior alinhada; c) face direita alinhada; d) face frontal alinhada com o escoamento, autoria própria.

3.4.1 Túnel de Vento

Como apresentado anteriormente, o túnel apresenta um equipamento de medição com um suporte cilíndrico furado o qual serviu de encaixe para a base montada para a estrutura. Então o primeiro passo é a fixação deste item no local desejado conforme a posição escolhida, as mesmas utilizadas posteriormente na análise numérica computacional.

Após o posicionamento da estrutura na referida posição, um encaixe é colocado na parte inferior do túnel com objetivo de reduzir a fuga de escoamento a jusante da estrutura, visto que uma abertura relativamente longa é encontrada nesta região que possibilita o acoplamento de estruturas dos mais variados tamanhos.

O próximo passo é efetuar a aferição do equipamento de medição este que como citado anteriormente funciona em um esquema semelhante a uma balança, logo busca-se calibrar o equipamento na posição correta já com a estrutura presa como é apresentado na Figura 43.

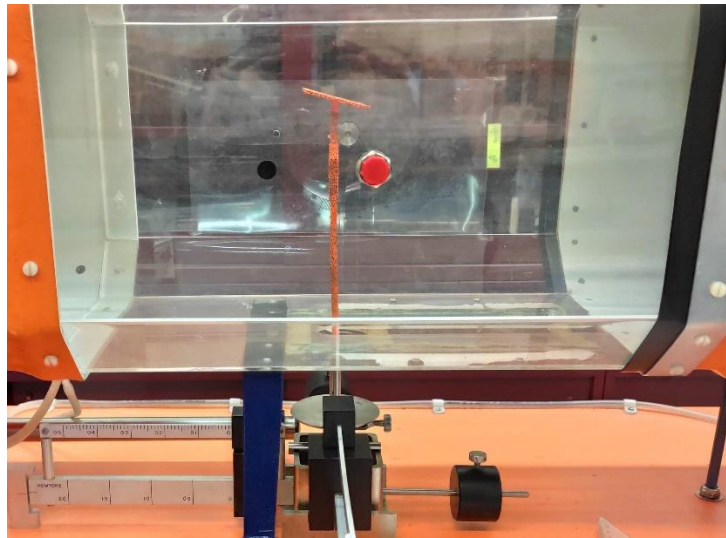


Figura 43. Estrutura montada e aferida pronta para o experimento, autoria própria.

Na sequência o processo segue com o acionamento do motor submetendo um escoamento sobre a estrutura seguindo certos valores predeterminados escolhidos, este tiveram um intervalo de 2 Hz no inversor, partindo de 10 a 26 Hz, que corresponde a um determinada velocidade seguindo a equação (54) a qual também esta elucidada na Tabela 7. Contudo é importante salientar que, nem todas as posições foram ensaiadas em todos os experimentos com estes valores, visto que ou a estrutura rompeu e se despedaçou ao encontrar o ventilador devido a falta de resistência neste sentido ou como notou-se que a estrutura iria aguentar valores ainda maiores, buscou-se aumentar ainda mais estes valores, mas a priori buscou-se atender sempre um padrão.

Tabela 7. Velocidade do vento no túnel em função da frequência, autoria própria.

Frequência [Hz]	10	12	14	16	18	20	22	24	26
Velocidade [m/s]	4,974	5,913	6,852	7,790	8,729	9,668	10,607	11,546	12,484

Tendo a força de arrasto aproximada para cada situação de escoamento em cada uma das faces, segue-se a obtenção do coeficiente de arrasto conforme a equação (25) através da determinação da área frontal projetada de cada uma das faces expostas ao escoamento. Visto que é esperado que com a precisão apresentada no equipamento de impressão a área seja aproximadamente igual ao valor modelado, foram utilizados os valores obtidos através do *software* SolidWorks®.

Sendo assim, a Tabela 8 apresenta os dados de área utilizadas em cada uma das orientações utilizadas nos testes experimentais.

Tabela 8. Área projetada de cada orientação de testes, autoria própria.

Orientação	Frontal	Posterior	Esquerda	Direita
Área [m ²]	0,002242	0,002242	0,001739	0,001739

Nos testes experimentais, são previstas dois diferentes comportamentos e consequentemente esforços atrelados a estes, o primeiro devido as forças longitudinais, ver Figura 44 a), seja em qual for a orientação setada, bem como uma segunda resposta transversal, ver Figura 44 b), esta por sua vez atrelada principalmente as vorticidades formadas a jusante, onde uma esteira de turbulência é formada.

Na segunda em geral os valores são essencialmente muito menores, dado que a excitação produzida pelo escoamento nesta direção seja suficiente baixa e posteriormente na análise de resultados isto ficará mais evidente. É importante salientar inclusive, que este comportamento pode-se dar tanto para direita como para esquerda, mas em geral irá apresentar uma natureza oscilatória.

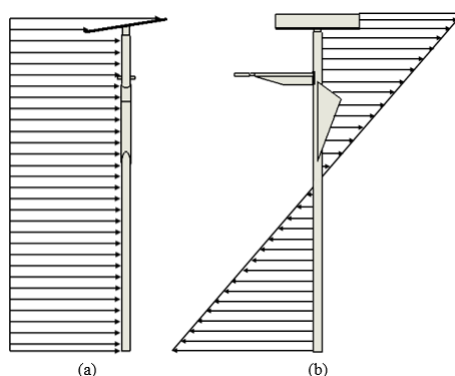


Figura 44. Comportamento dos carregamentos sobre a estrutura: a) longitudinal e b) transversal, autoria própria.

Outro importante parâmetro é o número de Reynolds e conforme a equação (20), pode-se obter o valor do escoamento de duas maneiras distintas, uma para o túnel em si sem obstrução de algo no escoamento, utilizando um diâmetro hidráulico adaptado a uma geometria retangular como também, um segundo que leva em consideração o objeto disponível e que irá impactar no escoamento.

A primeira situação tem o valor do comprimento característico, dado pelo diâmetro na equação (20) pela equação (55), a qual retorna um valor de $D_h = 0,3$ [m] que será utilizado no calculo.

$$D_h = \frac{4 \cdot A}{P} \quad (55)$$

sendo, A a área da seção transversal e P o perímetro molhado da seção.

Tabela 9. Número de Reynolds para um escoamento sem obstrução no túnel de vento, autoria própria.

Frequência [Hz]	Velocidade [m/s]	Reynolds (Túnel sem obstrução)
10	4,97	100.396,56
12	5,91	119.349,59
14	6,85	138.302,62
16	7,79	157.235,46
18	8,73	176.188,49
20	9,67	195.141,52
22	10,61	214.094,55
24	11,55	233.047,58
26	12,48	251.980,42

O que demonstra que para o presente escoamento, se não houver a presença de nenhum corpo contribuindo na geração de turbulência isto não irá ocorrer e conseqüentemente o escoamento se manteria laminar.

Para o segundo caso, foi analisado duas situações distintas, a primeira sobre um cilindro, levando em consideração o diâmetro do poste (5,54 [mm]) e na segunda uma placa plana, sendo o comprimento máximo imposto pelo painel em cada uma das situações.

Para o caso frontal e posterior apresentam um comprimento característico de 53,46 [mm], para lateral direita e esquerda um valor de 52,14 [mm]. Considerando as velocidades da Tabela 9, estão dispostos na Tabela 10 os resultados obtidos para o número de Reynolds em cada uma destas situações citadas. Nesta percebe-se novamente que mesmo com a imposição de um item obstruindo o escoamento o resultado segue sendo laminar.

Tabela 10. Número de Reynolds para as possíveis posições em função da velocidade, autoria própria.

Velocidade [m/s]	Reynolds (Diâmetro Poste)	Reynolds (Placa Frontal)	Reynolds (Placa Lateral)
4,97	3.727,27	34.675,77	35.967,53
5,91	4.472,73	41.610,92	43.161,04
6,85	5.218,18	48.546,07	50.354,54
7,79	5.963,64	55.481,23	57.548,05
8,73	6.709,09	62.416,38	64.741,55
9,67	7.454,55	69.351,53	71.935,06
10,61	8.200,00	76.286,69	79.128,57
11,55	8.945,46	83.221,84	86.322,07
12,48	9.690,91	90.156,99	93.515,58

3.4.2 Espessura da Camada Limite

Tendo assim determinados todos os dados para identificar o escoamento, finalmente é possível determinar a espessura da camada limite conforme as equações (21), (22) e (23) nas paredes do túnel e assim validar o tamanho determinado para a estrutura em escala.

Tabela 11. Espessura da camada limite em função da velocidade, autoria própria.

Velocidade [m/s]	Número de Reynolds	Escoamento Turbulento [cm]	Laminar Exato [cm]	Laminar Aproximado [cm]
4,97	133.754,43	1,44	0,55	0,60
5,91	159.052,05	1,39	0,50	0,55
6,85	184.349,66	1,35	0,47	0,51
7,79	209.647,28	1,32	0,44	0,48
8,73	234.944,90	1,29	0,41	0,45
9,67	260.242,52	1,26	0,39	0,43
10,61	285.540,14	1,24	0,37	0,41
11,55	310.837,75	1,22	0,36	0,39
12,48	335.866,25	1,20	0,35	0,38

Desta forma, é possível perceber que mesmo no pior cenário em que uma camada limite turbulenta se estabeleça, a altura desta seguirá sendo muito inferior ao valor adotado neste trabalho como valor de segurança de 1,44 [cm].

3.4.3 Modelação do Escoamento Computacional

As análises computacionais consistiram em buscar replicar o comportamento esperado da estrutura em seu tamanho original de projeto sob efeito de um escoamento real.

Desta forma, as simulações apresentadas serão estruturas de modo a replicar a situação em diferentes velocidades de escoamento assim como foram os experimentos em túnel de

vento. Dentre as escolhas feitas para as análises, foram executadas simulações computacionais em dois diferentes *solvers*, Fluent e CFX.

Passado este passo, o próximo no desenvolvimento de um estudo numérico é a geração da malha, contudo dado que a qualidade desta dita todo o resultado obtido, objetivou-se compreender um prévio estudo de como esta estabelecido a camada limite na vizinhança ao pórtico, a fim de garantir a geração de uma malha que preveja com certa qualidade o comportamento do escoamento.

Visto que, para a estrutura em tamanho real haverá nas situações de interesse sempre a presença de um escoamento turbulento, logo uma análise considerando as teorias de turbulência faz-se necessária e para tal necessitou-se determinar a espessura das primeiras camadas próximas ao componente estrutural.

Para isto, utilizou-se da equação (20) para verificação do escoamento presente em cada situação de interesse, além das equações (50), (51), (52) e (53) para determinar o tamanho da primeira camada da malha, onde duas teorias de turbulência foram empregadas, $k - \varepsilon$ e $k - \omega$.

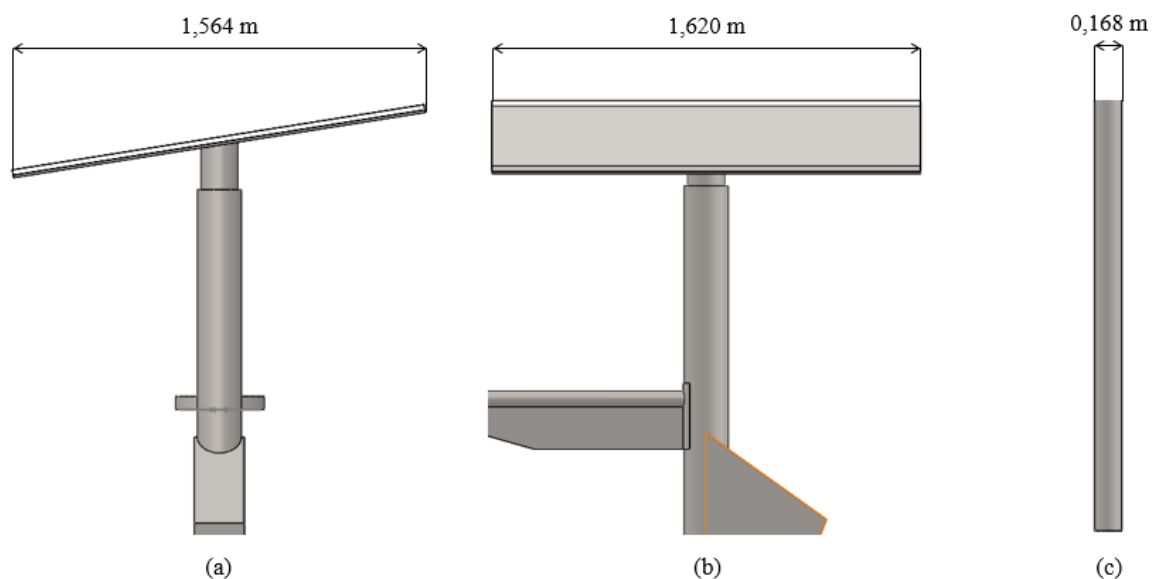


Figura 45. Comprimento característico: a) comprimento frontal do painel; b) comprimento lateral do painel; c) diâmetro poste [42]

Foram considerados três diferentes cenários para posteriormente construção das análises, nestas a condição alterada diz respeito ao comprimento característico conforme a Figura 45, estes valores impactam no número de Reynolds e consequentemente no cálculo final de y .

Tabela 12. Altura da primeira camada da malha referente ao painel na posição frontal, autoria própria.

U_{∞} [m/s]	Re	U_{τ}	τ_w	C_f	$y(k - \varepsilon)$ [mm]	$y(k - \omega)$ [mm]
10	1.052.558,20	0,00362	0,21811	0,42557	705,63635	23,52121
12	1.263.069,84	0,00349	0,30284	0,50146	598,84968	19,96166
14	1.473.581,48	0,00339	0,39968	0,57609	521,27358	17,37579
16	1.684.093,12	0,00330	0,50828	0,64965	462,24579	15,40819
18	1.894.604,76	0,00322	0,62831	0,72230	415,75329	13,85844
20	2.105.116,40	0,00315	0,75952	0,79415	378,14116	12,60471
22	2.315.628,04	0,00309	0,90166	0,86528	347,05678	11,56856
24	2.526.139,68	0,00304	1,05454	0,93576	320,91560	10,69719
26	2.736.651,32	0,00299	1,21797	1,00566	298,61040	9,95368
28	2.947.162,96	0,00295	1,39177	1,07502	279,34359	9,31145
30	3.157.674,60	0,00291	1,57580	1,14389	262,52569	8,75086

Tabela 13. Altura da primeira camada da malha referente ao painel na posição lateral, autoria própria.

U_{∞} [m/s]	Re	U_{τ}	τ_w	C_f	$y(k - \varepsilon)$ [mm]	$y(k - \omega)$ [mm]
10	1.089.925,14	0,00360	0,21660	0,42409	708,10229	23,60341
12	1.307.910,17	0,00347	0,30073	0,49972	600,94244	20,03141
14	1.525.895,20	0,00336	0,39690	0,57408	523,09524	17,43651
16	1.743.880,22	0,00327	0,50474	0,64739	463,86117	15,46204
18	1.961.865,25	0,00320	0,62394	0,71979	417,20619	13,90687
20	2.179.850,28	0,00313	0,75424	0,79138	379,46262	12,64875
22	2.397.835,31	0,00307	0,89539	0,86226	348,26962	11,60899
24	2.615.820,34	0,00302	1,04721	0,93250	322,03708	10,73457
26	2.833.805,36	0,00297	1,20950	1,00216	299,65394	9,98846
28	3.051.790,39	0,00293	1,38209	1,07128	280,31980	9,34399
30	3.269.775,42	0,00289	1,56485	1,13990	263,44313	8,78144

Na sequência objetivou-se a criação de malha levando conta os cálculos efetuados para os tamanhos das camadas adjacentes as paredes da estrutura, mas também com as limitações devido a licença estudantil utilizada, logo, construiu-se primeiramente um invólucro onde buscou-se as medidas h , w , l e L , tal qual apresentado na Figura 46.

Tabela 14. Altura da primeira camada da malha referente ao poste, autoria própria.

U_∞ [m/s]	Re	U_τ	τ_w	C_f	$y(k-\varepsilon)$ [mm]	$y(k-\omega)$ [mm]
10	113.029,27	0,00566	0,34080	0,53196	564,51492	18,81716
12	135.635,13	0,00546	0,47317	0,62682	479,08470	15,96949
14	158.240,98	0,00529	0,62449	0,72010	417,02318	13,90077
16	180.846,84	0,00515	0,79416	0,81206	369,80046	12,32668
18	203.452,69	0,00503	0,98171	0,90287	332,60607	11,08687
20	226.058,55	0,00493	1,18672	0,99267	302,51606	10,08387
22	248.664,40	0,00483	1,40882	1,08158	277,64830	9,25494
24	271.270,26	0,00475	1,64769	1,16969	256,73514	8,55784
26	293.876,11	0,00468	1,90303	1,25706	238,89079	7,96303
28	316.481,97	0,00461	2,17460	1,34376	223,47719	7,44924
30	339.087,82	0,00454	2,46214	1,42985	210,02273	7,00076

A primeira tentativa de geração de malha baseou-se em construir um domínio como o que pode ser visualizado na Figura 46, em que a altura h total do domínio tivesse um comprimento de 5 vezes da altura total da estrutura analisada, w com um comprimento de 10 vezes a largura total da estrutura, l com um tamanho de 2 vezes a altura da estrutura e finalmente L com um valor de 10 vezes a altura total da estrutura montada, isto tudo para garantir que o escoamento se desenvolvesse e apresentasse um comportamento natural sobre a estrutura, não apresentando impactos oriundos das paredes laterais e superior.

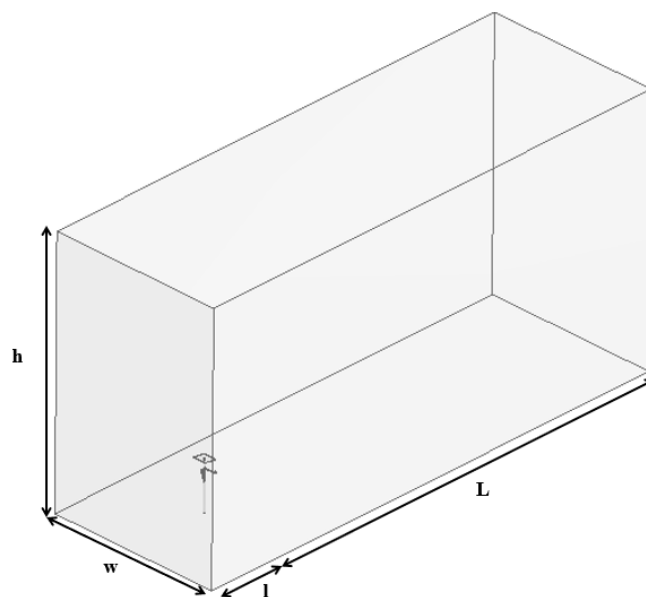


Figura 46. Domínio de simulação numérica do escoamento [45].

Assim, na próxima etapa a geração da malha utilizou-se em todas as posições uma malha com valor padrão de 500 [mm], com o recurso *adaptive size* ativo com resolução padrão de 2, *transition* lenta e *span angle center* como fino.

Outra configuração utilizada, foi adaptar o cálculo do tamanho dos elementos nas camadas adjacentes e para tal, utilizou-se a opção *inflation*, com a opção *first layer thickness*, onde os tamanhos utilizados foram os calculados previamente na Tabela 12, Tabela 13 e Tabela 14, além de ter sido configurado uma quantidade máxima de 10 camadas com taxa de crescimento de 1,1 entre elas.

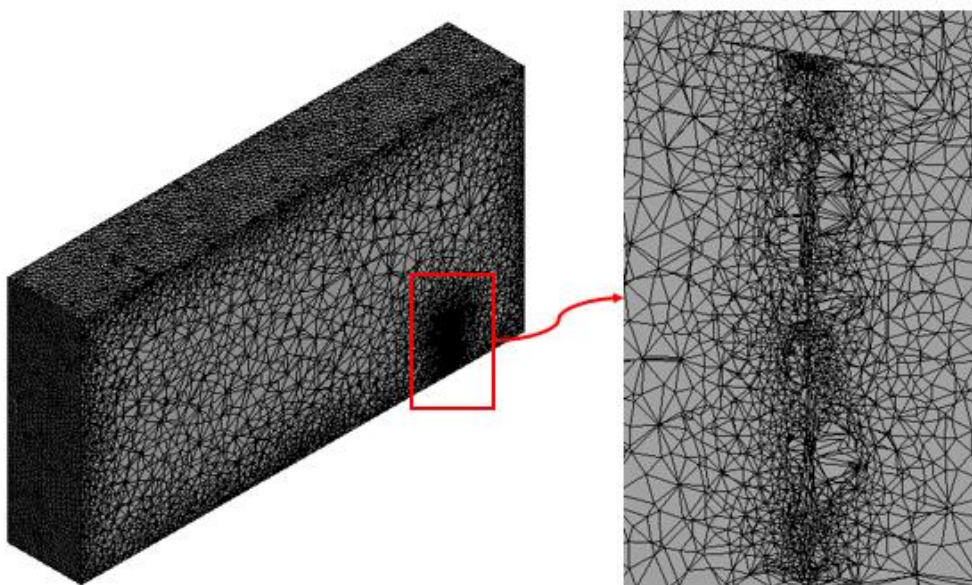


Figura 47. Representação da malha elaborada para o domínio [45].

Contudo, esta configuração não pode se concretizar, dado que que o limite de elementos era ultrapassado, então tentou-se a diminuição das camadas menores adjacentes e aumento do tamanho padrão dos elementos o que mesmo assim não surtiu efeito a ponto de permitir gerar as malhas. A segunda opção para correção de tal problema foi a diminuição de todas as dimensões em 20% do tamanho original e assim o domínio ficou definido com $h = 25,6$ [m], $w = 19,2$ [m], $l = 9,6$ [m] e $L = 50,4$ [m], mantendo-se as demais opção conforme apresentado anteriormente.

A Tabela 15 apresenta exatamente os dados de nós e elementos para cada uma das configurações de teste. Percebe-se que mesmo tomando configurações que apresentam área projetadas aproximadamente iguais, ainda se percebe que as malhas são distintas e desta forma há de se esperar alguma diferença nos resultados obtidos a frente.

Tabela 15. Número de nós e elementos em cada posição, autoria própria.

	Frontal	Esquerda	Direita	Posterior
Nós	97530	96668	96701	97537
Elementos	505987	500638	500940	505789

Por fim, para que se estabeleça uma simulação é necessário modelar as condições de contorno e foram testadas diferentes configurações que eram possíveis ser aplicadas em ambos os *solvers* da ferramenta ANSYS® e para padronização e comparação dos resultados objetivou-se os cálculos utilizando as teorias $k - \varepsilon$ e $k - \omega$.

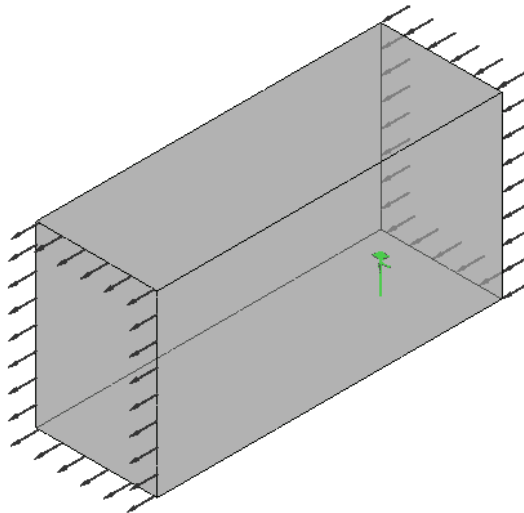


Figura 48. Representação das regiões com as condições de fronteira estabelecidas [45].

Quanto as condições de fronteira, estabeleceu-se o chão onde estaria fixado o componente como uma parede onde o fluido é impedido de deslizar, mesma condição empregada nos próprios componentes da estrutura e nas paredes do domínio fluido.

Para a entrada foi determinada uma entrada de ar com velocidades variando de 4 a 30 [m/s], ao passo que a saída foi modelada com somente um local sendo ele com pressão atmosférica, ambas as condições são apresentadas na Figura 48.

Por fim, após a construção das malhas conforme as características apresentadas anteriormente, foi produzida a Tabela 16, onde são apresentados os de mínimo, máximo,

média e desvio padrão para as malhas e cada uma das configurações utilizando do recurso *Skewness* disponível no *software* ANSYS®.

Tabela 16. Dados referentes a análise de qualidade da malha utilizando o recurso *Skewness*, [45].

	Frontal	Esquerda	Direita	Posterior
Mínimo	0,00003203	0,00047454	0,00012872	0,00012212
Máximo	0,99987	0,99987	0,99987	0,99988
Média	0,27493	0,27588	0,27544	0,27543
Desvio padrão	0,16405	0,16528	0,1661	0,16476

Capítulo 4: RESULTADOS E DISCUSSÕES

Na sequência são apresentados os resultados obtidos através dos experimentos executados em túnel de vento, bem como as adaptações feitas para a contrapartida através de análise numérica.

Ao fim também serão apresentadas uma análise a cerca dos resíduos das simulações numéricas, bem como comparações entre estes resultados e as implicações destes para o presente trabalho.

4.1 Experimentos em Túnel de Vento

Nesta etapa objetivou-se o teste prático nas posições previamente definidas na Figura 42 do item 3.4 .

Os dados foram coletados utilizando o ferramental disponível, onde tirou-se nota dos valores das forças longitudinal, agindo diretamente sobre a estrutura, como também transversal. Contudo, esta última não apresentou valores significativos em pelo menos 95% dos testes efetuados e desta forma não serão apresentados juntos dos demais dados, só serão apresentados de forma pontual quando a situação convir.

A Figura 49 apresenta o primeiro conjunto de dados coletados junto ao túnel de vento, utilizando a posição esquerda. Pode-se observar para este caso 3 conjuntos de dados, sendo os “Resultado 2”, referente ao segundo protótipo testado construído em PLA, “Resultado 3”, referente ao terceiro protótipo testado também construído em PLA e “Resultado 4”, referente ao último modelo testado agora construído em ABS, além da média entre estes.

Como pode-se perceber também, não foram coletados dados na primeira gama de testes e isso se deve ao fato que durante estes, ao efetuar a coleta dos dados da posição posterior, o protótipo rompeu e se despedaçou ao atingir as hélices do exaustor no fim do túnel.

Além disso, o quarto experimento remete a última versão impressa, esta que teve necessidade de ser fabricada em ABS, visto que não havia até aquele momento, material disponível para uma nova impressão em PLA como foram as 3 primeiras versões.

Quanto aos dados é possível perceber que duas de suas curvas se intersectam e estão abaixo da média e o “Resultado 2” que deu origem a uma curva mais acentuada.

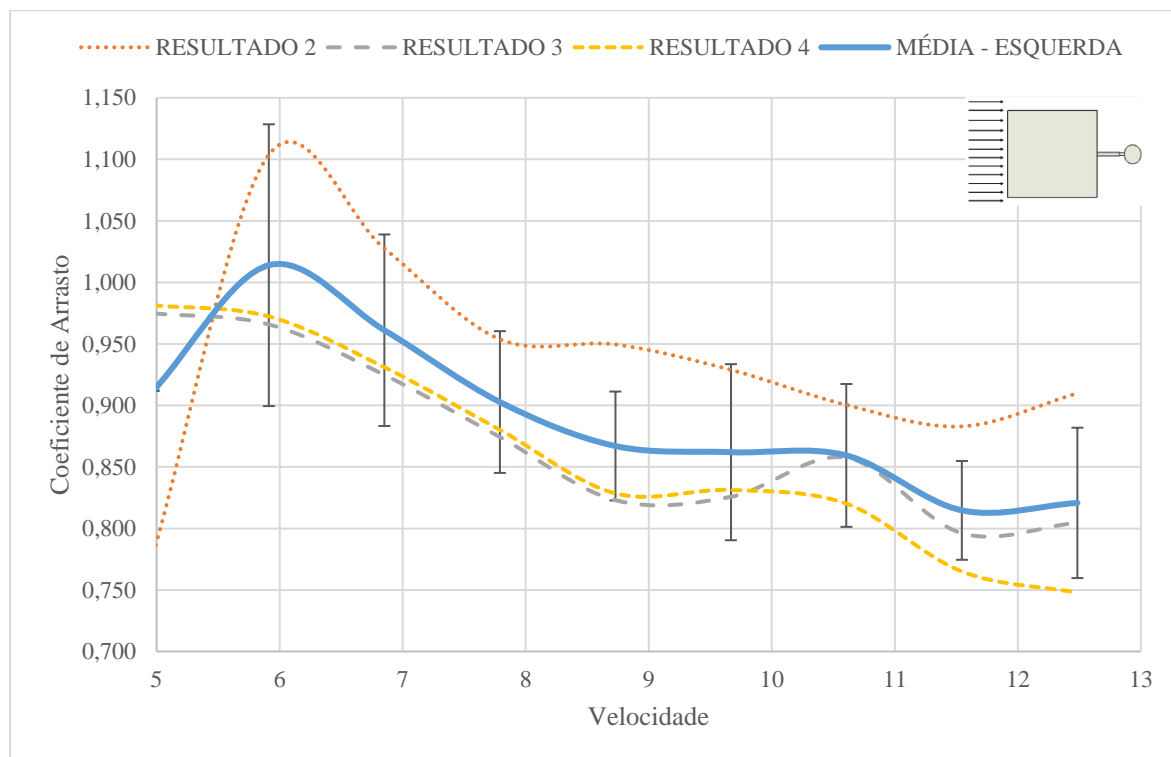


Figura 49. Coeficiente de arrasto para a posição esquerda, autoria própria.

Por fim, pode-se perceber ainda a média entre os experimentos que se manteve próxima ao “Resultado 3”, convergindo a um valor final médio de 0,8904.

Quanto a Figura 50, este apresenta os dados da posição posterior, onde neste caso há a presença dos 4 resultados como citado anteriormente, contudo neste percebe-se uma grande diferença entre os dados do primeiro experimento para com os 3 subsequentes, havendo momentos em que a diferença entre os resultados foi de até 60% entre os dados das curvas inferiores para com a mais alta, sendo assim optou-se por desconsiderar estes dados discrepantes para a média, visto que ao colocar estes a curva final para a média seria consideravelmente mais elevada.

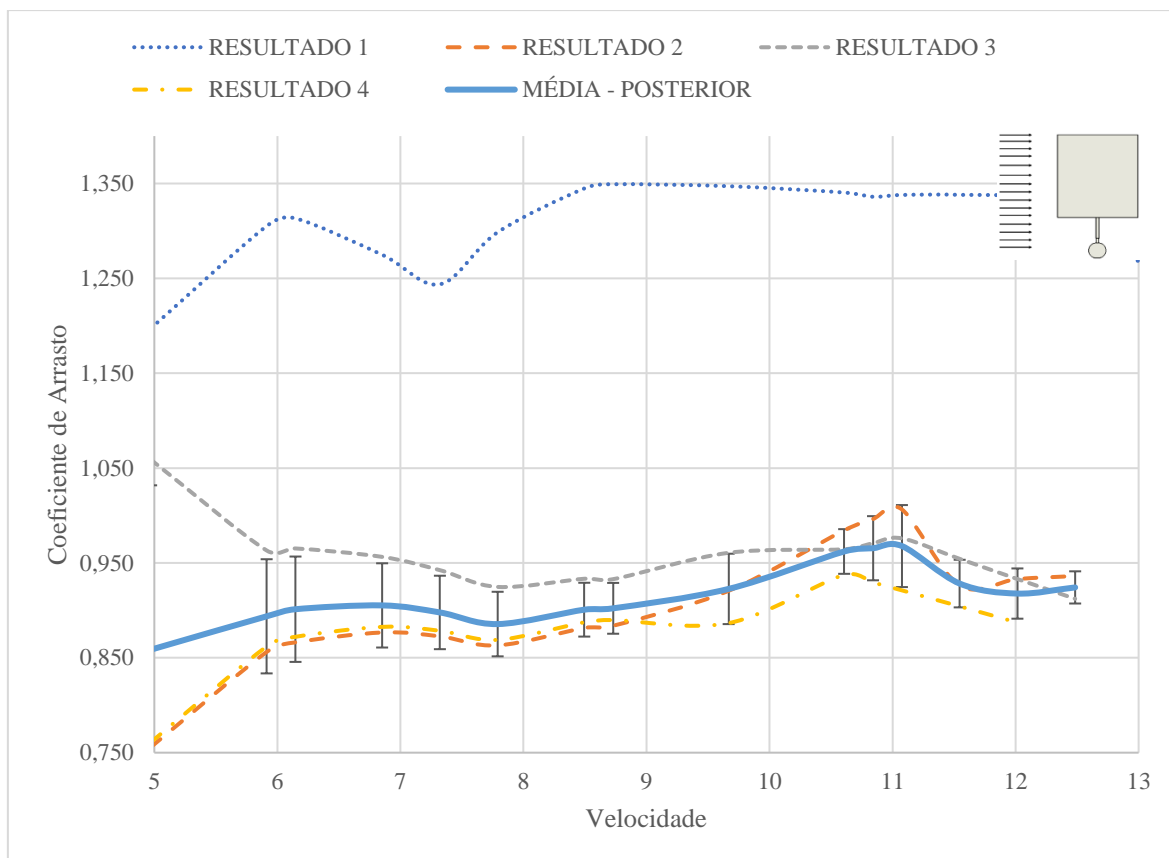


Figura 50. Coeficiente de arrasto para a posição posterior, autoria própria.

Os demais dados apresentaram uma tendência semelhante que produziu uma curva média situada entre os 3 últimos experimentos, com um valor médio final de 0,9147.

Vale ressaltar que neste mais uma vez foi obtido valores no experimento 4 o qual contou com uma versão com material diferente dos demais, além disso é possível perceber que o primeiro conjunto de dados, nomeadamente “Resultado 1”, apresenta dados até velocidades mais elevadas, velocidade esta que foi posteriormente reduzida graças ao incidente onde o objeto de estudo se partiu em sua base e acabou sendo destruído ao passar pelas hastes do exaustor presente no túnel de vento, exatamente neste teste posterior.

A Figura 51 apresenta o terceiro conjunto de dados que é referente a posição direita, neste observa-se uma tendência onde os 4 resultados diferentes dos casos anteriores apresentam-se convergindo e desta maneira tendendo a um valor médio de 0,7265.

Assim como os dois casos anteriores, o “Resultado 4” também diz respeito ao protótipo feito em ABS. Também é importante ressaltar que diferente da posição posterior, neste não houve discrepância que fosse suficiente para que houvesse a necessidade de desconsiderar algum dos dados obtidos e sendo assim todos foram mantidos.

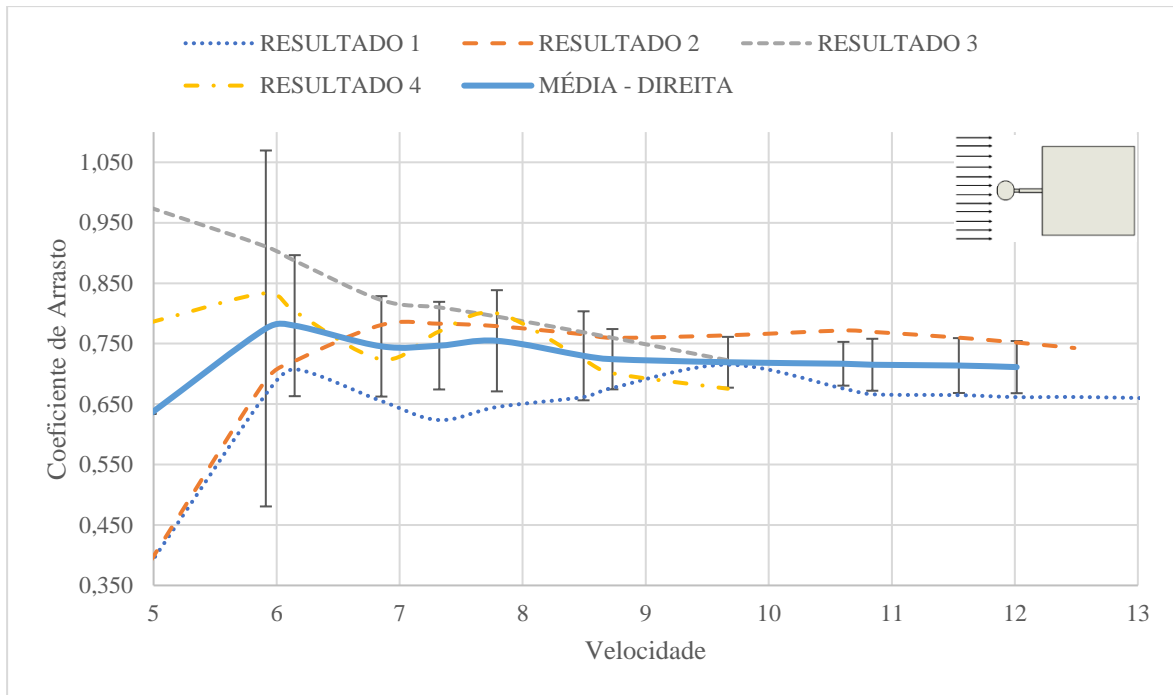


Figura 51. Coeficiente de arrasto para a posição direita, autoria própria.

Por fim, a Figura 52, utilizando a posição frontal. Neste se pode observar quatro conjunto de testes, onde os três primeiros foram efetuados sobre condições aproximadamente similares com variação de 1 a 3°C entre os experimentos os quais tiveram impacto na densidade do ar no cálculo final.

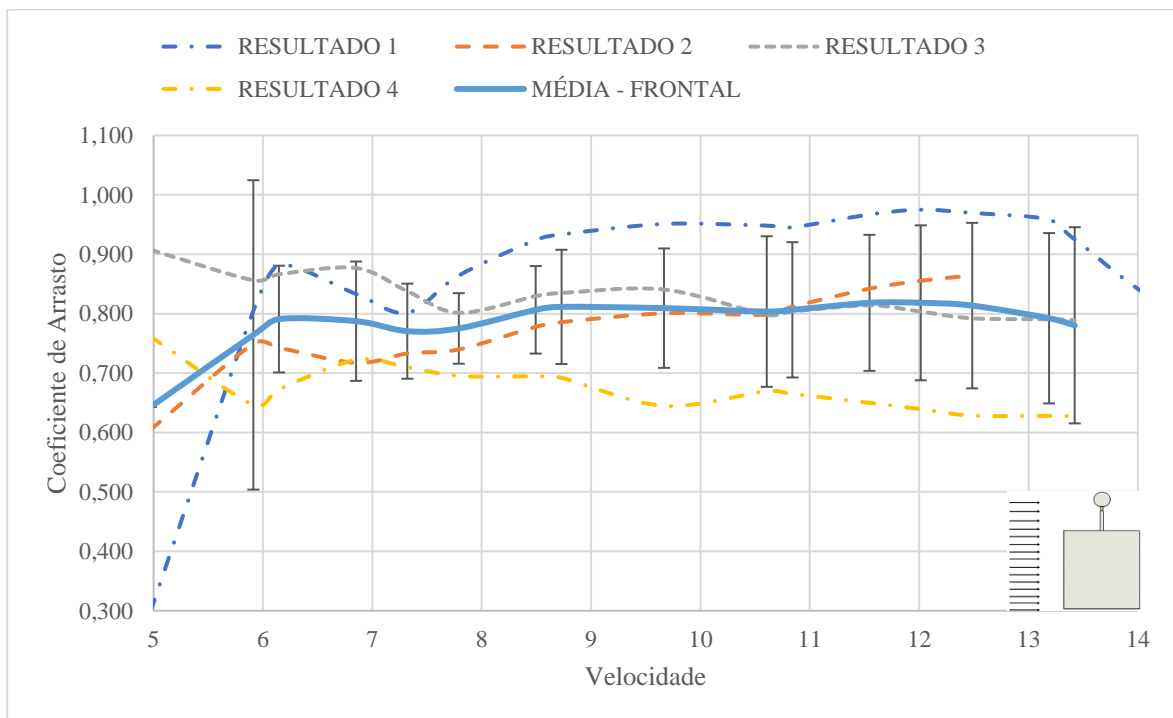


Figura 52. Coeficiente de arrasto para a posição frontal, autoria própria.

Pode-se perceber ainda a média entre os experimentos que se manteve sempre entre os resultados 2 e 3 os quais apresentaram valores mais próximos, convergindo a um valor final médio de 0,7951.

Além destes resultados, é possível perceber mais alguns dados importantes, pois como visualizado na Tabela 8 e como era de se imaginar, as áreas projetadas frontais e posterior tem o mesmo valor e desta maneira, se esperaria que os valores para o coeficiente de arrasto fossem os mesmos, pois bem, isso não foi encontrado, esta mesma lógica se aplica aos lados direito e esquerdo, que também apresentaram um valor final diferente entre ambos.

Tabela 17. Valores finais médios para cada posição, autoria própria.

	Esquerda	Direita	Frontal	Posterior
Coefficiente de Arrasto	0,8904	0,7265	0,7951	0,9147

É possível perceber uma clara diferença, onde na configuração esquerda o coeficiente de arrasto foi 22% superior a direita, enquanto diferença entre a frontal e a posterior foi de 15%. Pode-se perceber também esta diferença no desenvolvimento do coeficiente de arrasto quando se analisa a Figura 53 onde estão demonstradas as 4 curvas do crescimento médio em cada configuração de teste.

São várias as causas que podem ser elencadas para esta diferença entre os valores das análises. A primeira e mais óbvia trata da leitura dos dados, isto tando devido a ser um dispositivo analógico de baixa resolução utilizado para media a força, bem como da precisão que este é capaz de medir, onde só é possível determinar até a segunda casa decimal, sujeito assim a avaliação do operador, contudo claro, este fator sozinho não seria capaz de produzir uma diferença desta magnitude.

Outro fator que implica diretamente é a área projetada na posição de interesse, ou seja, ao submeter um escoamento com velocidades elevadas a estrutura acaba se “deformando” no sentido do escoamento, o que faz com que a área total projetada seja ligeiramente maior do que a utilizada para os cálculos analíticos, induzindo então um percentual de erro no valor final obtido.

Ainda no que tange o comportamento da estrutura quando submetido ao escoamento, como o suporte utilizado possui uma trava mecânica, há possibilidade de pequenas

diferenças e possíveis movimentações da estrutura quando submetido aos testes e assim os resultados podem divergir ligeiramente, além das impressões apresentarem possivelmente valores ligeiramente distintos, o que logicamente irá implicar em maiores ou menores valores para a área projetada.

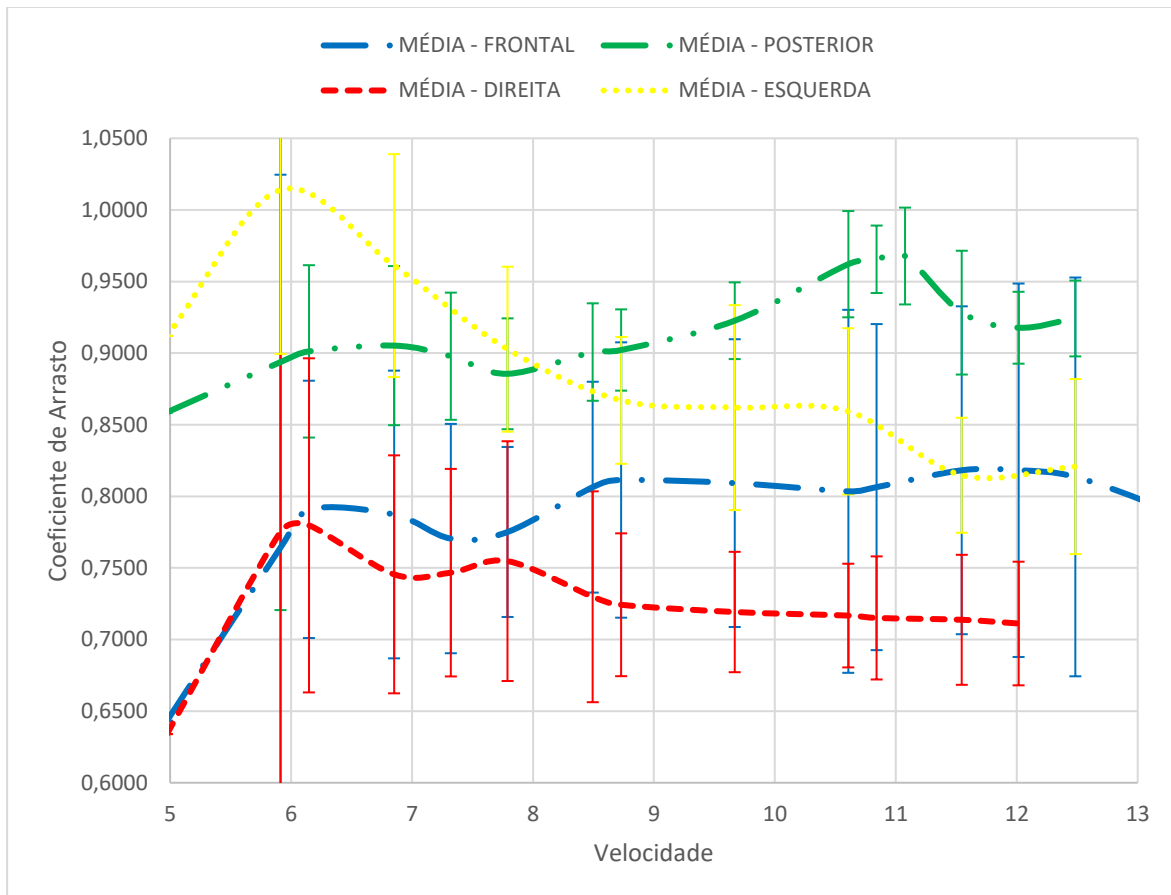


Figura 53. Coeficiente de arrasto médio em função da velocidade para cada configuração de teste, autoria própria.

Por último há mais dois fatores que ocorreram nos testes e impactam também nos valores das forças registradas, ambas são oriundas das turbulências geradas pelo modelo. Isto foi observado em dois momentos, o primeiro que ao registrar os valores da força, ocorriam oscilações, ou seja, a haste não se mantinha estática, especialmente em valores mais elevados de velocidade, de modo que em certos momentos era difícil ler este valor pois a estrutura estava oscilando.

Outra questão percebida foi quanto a forças transversais. Para valores altos de velocidade, os mesmos onde a estrutura oscilava na direção longitudinal ao escoamento, ocorreram forças transversais mesmo que de baixa intensidade, estas podem também representar a presença de turbulências posteriormente a estrutura ser submetida ao

escoamento, excitando a mesma em frequências próximas das suas frequências fundamentais e gerando assim a percepção errônea de um valor na força longitudinal.

Estes diversos fatores quando juntos podem sim estar gerando valores médios distintos entre os experimentos. Contudo mesmo que isto ocorra, dado os resultados obtidos, ainda podem ser considerados bons resultados inclusive em concordância com os dados posteriores para as simulações.

4.2 Simulações de Escoamento

No que tange as simulações, objetivou-se replicar de forma mais fidedigna o cenário encontrado nas situações reais e desta maneira, as configurações utilizadas foram as apresentadas anteriormente no item 3.4.3 .

A Figura 54 apresenta os dados para o escoamento na configuração esquerda. Neste foi utilizado o componente em sua configuração normal, com todos os elementos em sua escala natural. Foram analisados os dois *solvers* disponíveis no *software* comercial ANSYS®, CFX e Fluent, e para cada um destes utilizou-se de duas teorias de turbulência.

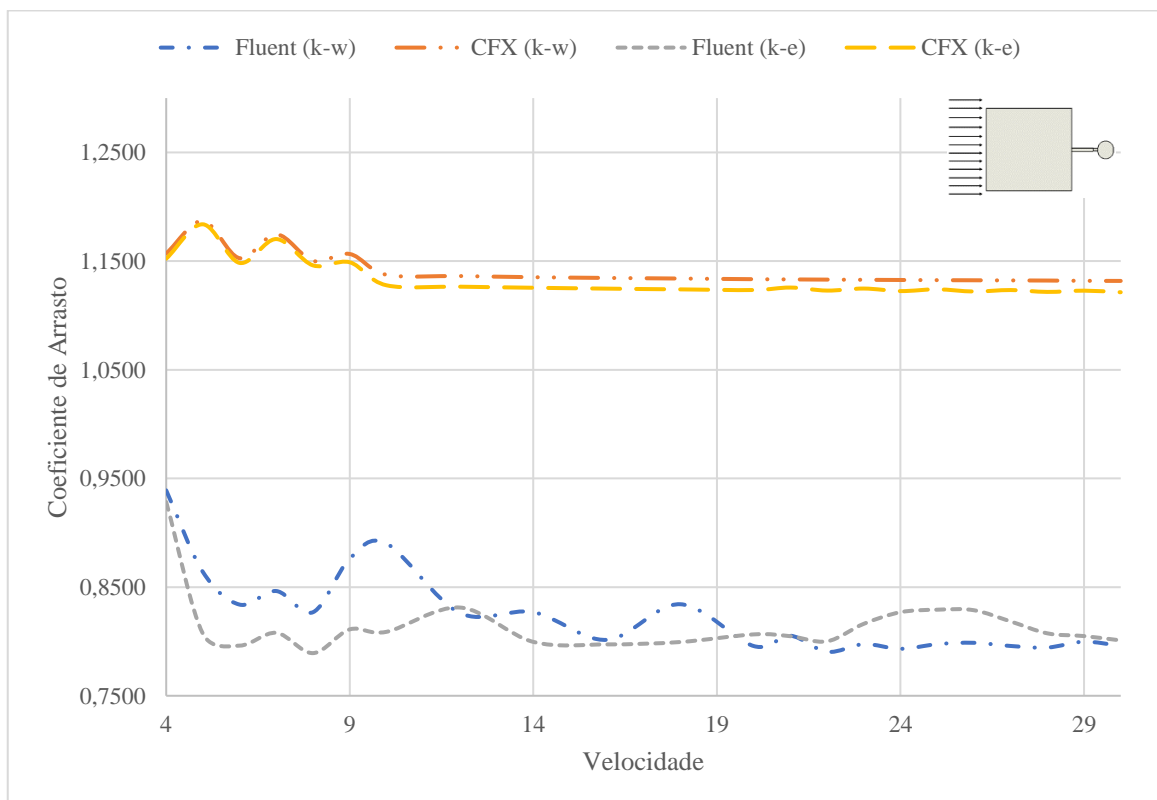


Figura 54. Coeficiente de arrasto em função da velocidade do escoamento para a posição esquerda, autoria própria.

A primeira situação mostra comportamentos diferentes nas 4 situações de análise. Primeiramente todas as curvas partem do número de Reynolds a partir de 301.418,43, tem-se que o escoamento se apresenta já de início em uma zona de transição, o que ajuda a explicar o modo oscilante dos dados nesta faixa, para que naturalmente estabilizem ao passo que o escoamento turbulento está plenamente desenvolvido, chegando a um valor máximo para Reynolds de 2.260.638,21.

Nota-se também, que a curva que representa os dados para o Fluent na configuração $k - \omega$ apresenta uma menor convergência, levemente diferente dos demais, apresentando uma grande oscilação especialmente nos primeiros 10 m/s até obter um valor médio próximo de 0,8241.

Para além disso, os resultados obtidos com o CFX na teoria de turbulência $k - \omega$ são em média 38% superior aos mesmos quando analisados no Fluent, ao passo que com a segunda teoria se percebe uma diferença de 39% entre estes mesmos *solvers*.

A Figura 55 apresenta os dados referentes a posição posterior e assim como ocorreu no caso anterior, o *solver* Fluent na teoria $k - \omega$ apresentou novamente uma característica oscilante na primeira parte do escoamento, posteriormente estabilizando em torno de um valor médio de 0,8677, numa faixa do número de Reynolds partindo de 421.243,02 até 3.159.322,63 enquanto que as outras três análises convergiram mais facilmente.

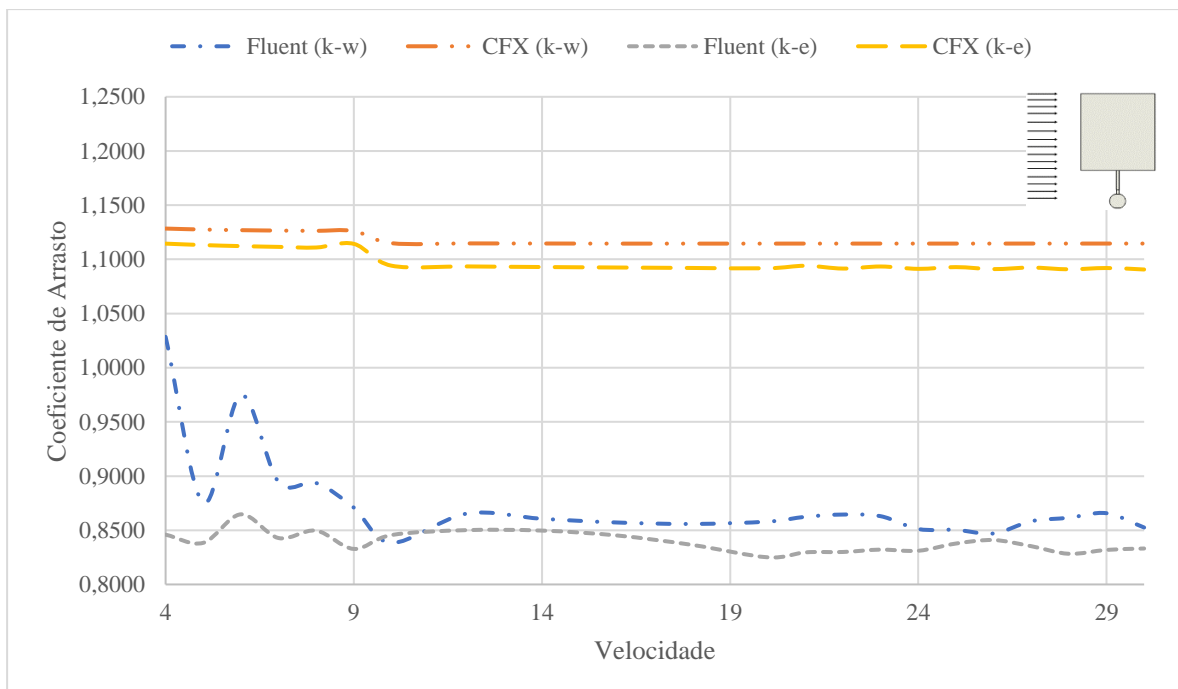


Figura 55. Coeficiente de arrasto em função da velocidade do escoamento para a posição posterior, autoria própria.

Quanto a análise comparativa destes dados, o CFX apresentou resultados em média 29% superiores ao Fluent na teoria $k - \omega$, enquanto que na teoria $k - \varepsilon$ esta mesma comparação apresentou novamente valores superiores em cerca de 31%.

Estão dispostos na Figura 56 os dados para o coeficiente de arrasto na posição direita. Diferente dos dois casos anteriores, este apresentou dados convergindo em todo o desenvolvimento das curvas nas quatro análises efetuadas.

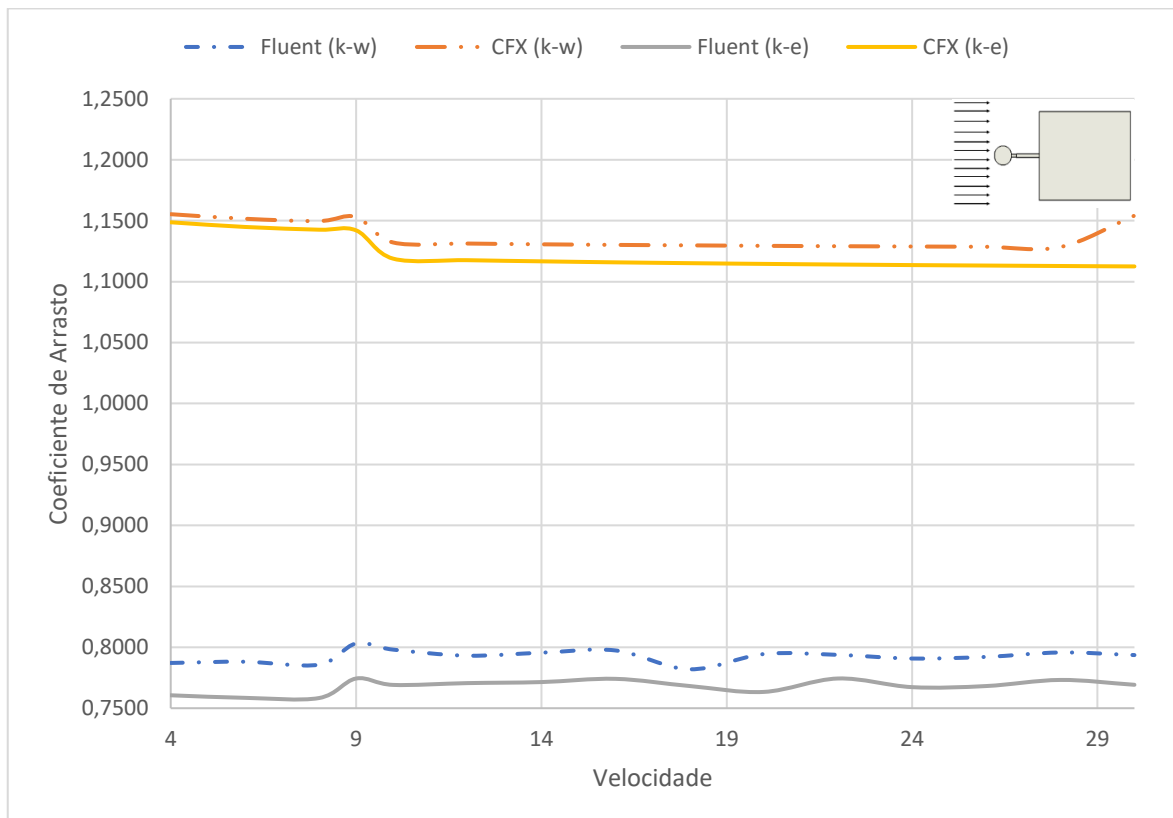


Figura 56. Coeficiente de arrasto em função da velocidade do escoamento para a posição direita, autoria própria.

Mais uma vez como nos dois casos precedentes, mais uma vez o *solver* Fluent apresentou valores médios mais próximos dos obtidos em túnel de vento, porém desta vez os resultados apresentaram uma prevalência para a teoria $k - \varepsilon$, enquanto que a segunda teoria analisada não apresentou os mesmos problemas oscilatórios verificados anteriormente.

Quanto a comparação entre os casos de análise, mais uma vez o CFX apresentou um valor médio 43% superior quando a análise é para a $k - \omega$, enquanto que na comparação com a segunda teoria de turbulência a diferença entre os mesmos *solvers* apresenta valores 46% superiores novamente no CFX.

A última posição de análise individual apresenta os dados para o escoamento na configuração frontal. Assim como as três análises anteriores, foram utilizadas os mesmos dois *solvers*, CFX e Fluent, contudo inclui-se para além das duas teorias de analisada já citadas, uma terceira via que se apresenta com uma híbrida entre as duas, nomeadamente SST.

A faixa do escoamento analisada, partindo de 4 [m/s] até 30 [m/s] apresenta um número de Reynolds correspondente de 421.243 até um valor de 3.159.322, isto demonstra que para uma estrutura real, em quase toda a faixa de escoamento, um regime turbulento se estabelece, sendo uma pequena parcela inicial na faixa de transição.

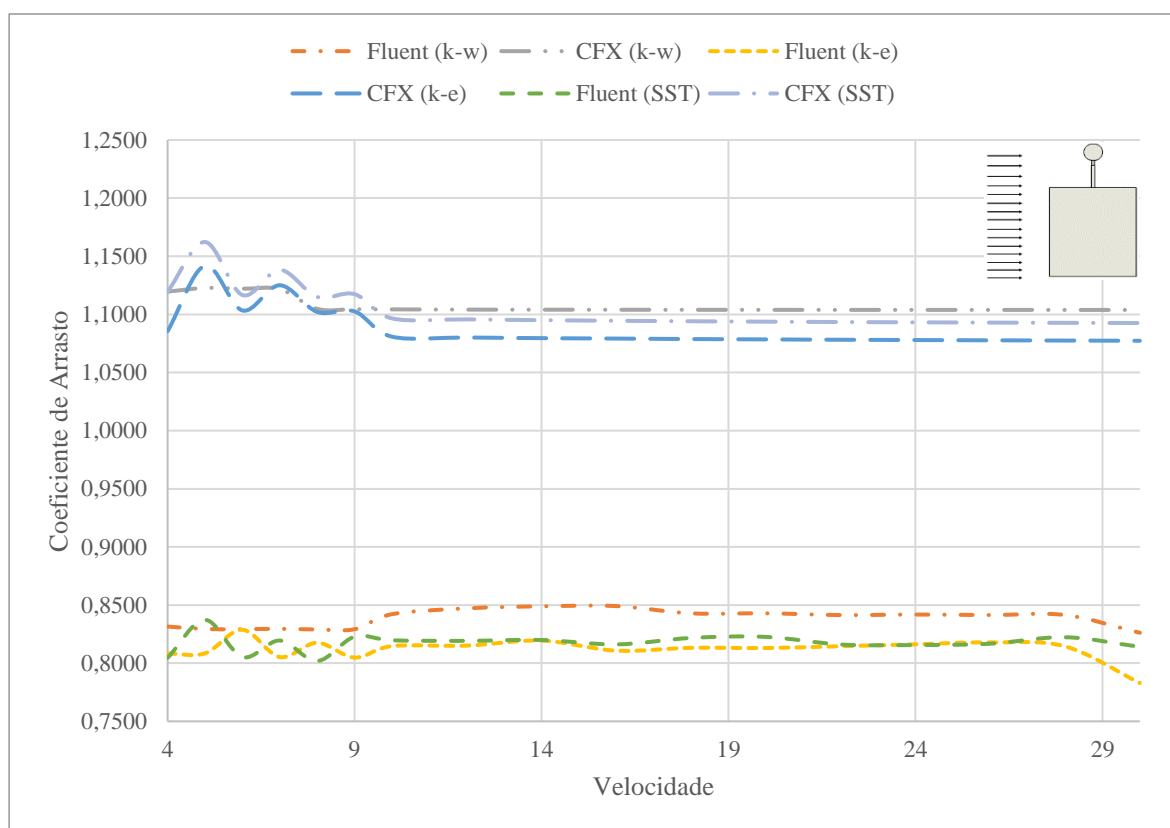


Figura 57. Coeficiente de arrasto em função da velocidade do escoamento para a posição frontal, autoria própria.

Nesta análise, assim como ocorreu na posição direita, os dados se mantiveram estáveis e convergindo para um valor médio sem grandes alterações, contudo é percebido novamente uma diferença grande entre os resultados dos *solvers*, para o presente caso a diferença média entre os resultados é de 32% quando com a teoria de turbulência $k - \omega$, 34% quando com a teoria $k - \varepsilon$ e 35% quando com a teoria de turbulência SST, sendo neste caso os resultados do *solver* Fluent mais próximos aos resultados obtidos no túnel de vento.

4.3 Análise dos Resíduos

Todos os resultados anteriormente apresentados levam como base simulações construídas com o objetivo de buscar dados convergindo abaixo de um valor base de 10^{-5} , seja para *solver* Fluent como para o CFX e isto em ambas as teorias.

Sendo assim, abaixo segue imagens comparativas que demonstram como evoluíram e se comportaram os resíduos para todas as equações solucionadas pelas simulações, nomeadamente *continuity*, k (energia cinética), ómega (ou épsilon quando esta for a teoria utilizada na solução), velocidade em x, y e z.

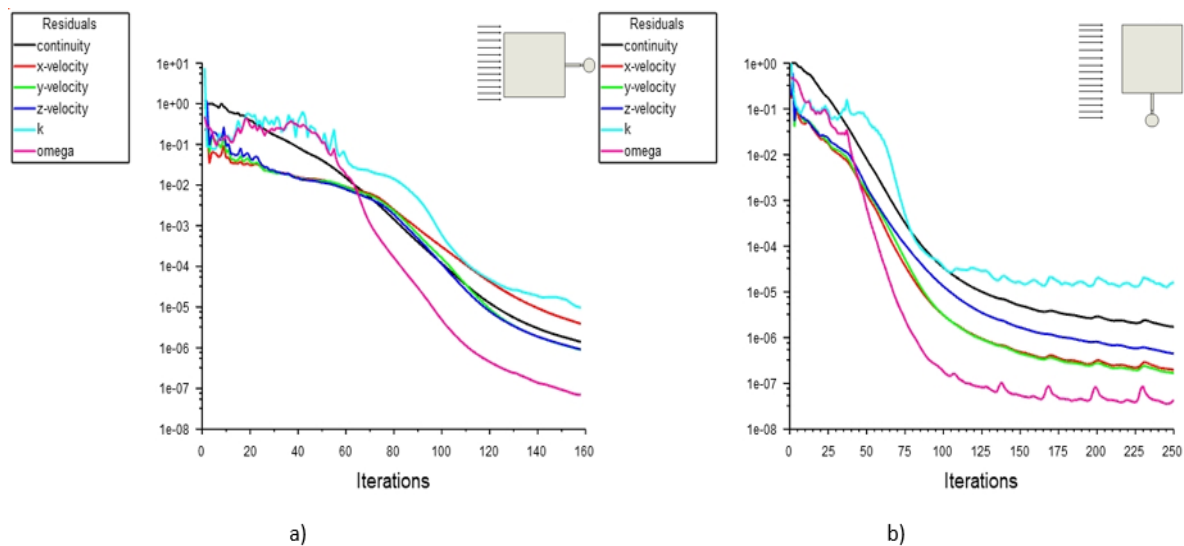


Figura 58. Resíduos obtidos nas soluções para o *solver* Fluent com a teoria de turbulência $k - \omega$: a) esquerda; b) traseira. [45].

Para o primeiro caso, no Fluent com a teoria $k - \omega$, é apresentado na Figura 58 e Figura 59 a evolução do comportamento dos resíduos das simulações de cada uma das configurações. Para buscar a convergência utilizou-se de um valor de 250 interações e como pode-se ver, a configuração esquerda foi única capaz de obter a convergência em todos os critérios dentro deste número, os demais avançaram a solução até o limite máximo e mesmo assim a convergência em todos os fatores não foi obtida.

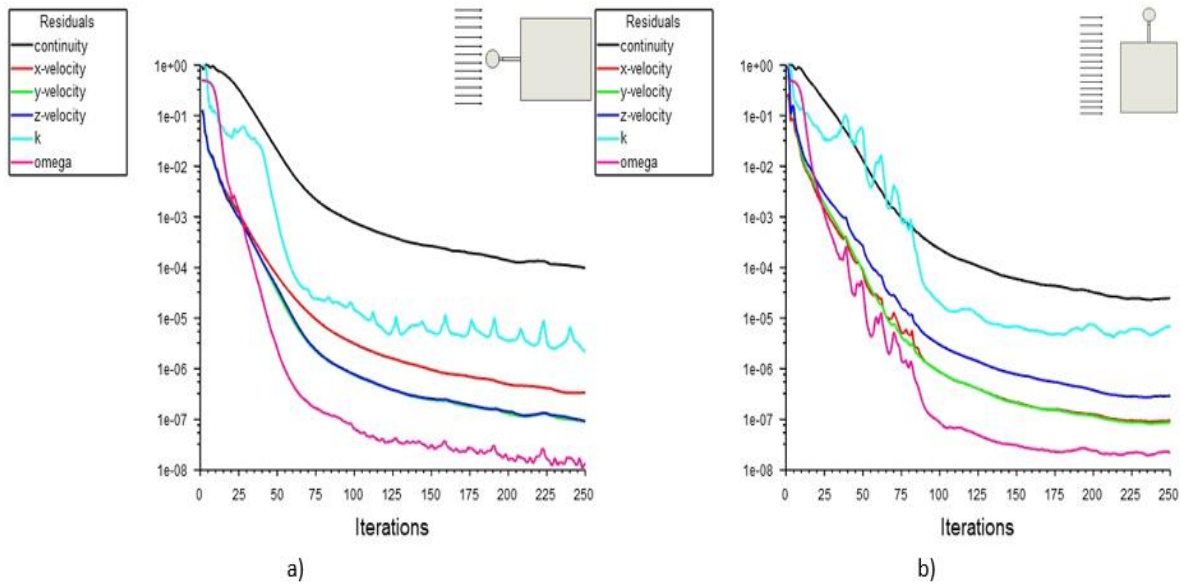


Figura 59. Resíduos obtidos nas soluções para o *solver* Fluent com a teoria de turbulência $k - \omega$: a) direita; b) frontal. [45].

O segundo caso, da Figura 60 e Figura 61, apresenta os dados comparativos também para o Fluent agora na teoria $k - \epsilon$ onde nesta vez todos os casos apresentaram a convergência em todas as variáveis abaixo do valor de interesse em número menor de interações menor do que o limite estipulado.

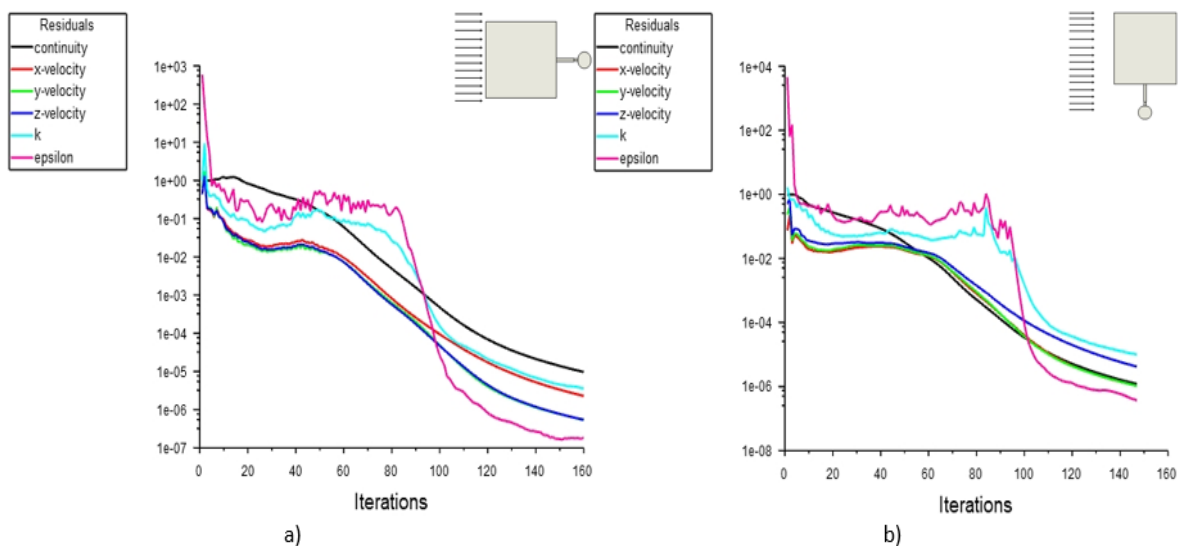


Figura 60. Resíduos obtidos nas soluções para o *solver* Fluent com a teoria de turbulência $k - \epsilon$: a) esquerda; b) traseira, [45].

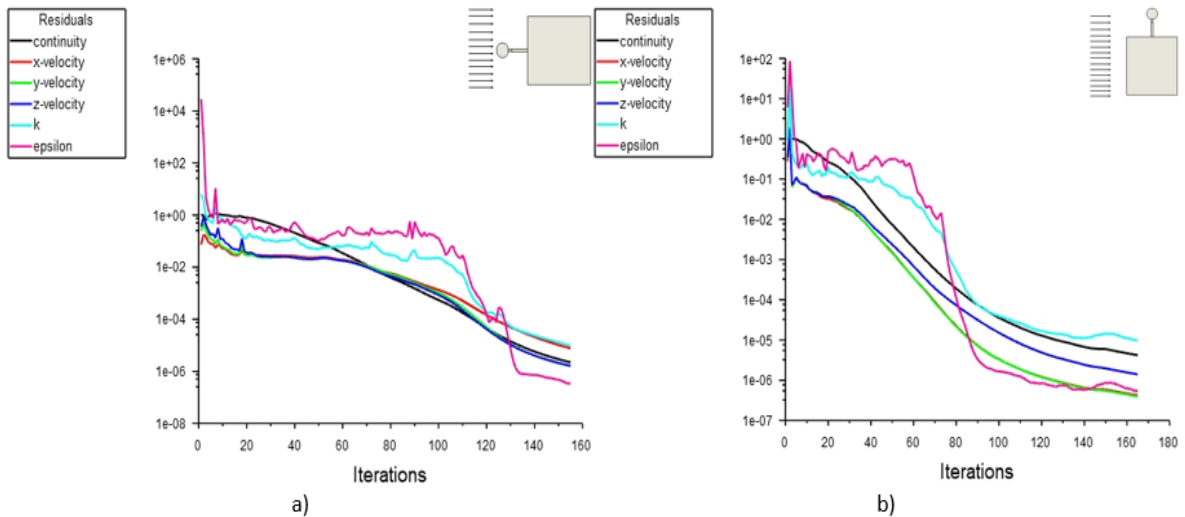


Figura 61. Resíduos obtidos nas soluções para o *solver* Fluent com a teoria de turbulência $k - \epsilon$: a) direita; b) frontal, [45].

As Figura 62 e Figura 63 por sua vez apresenta a primeira comparação entre dados de resíduos oriundos do CFX para a teoria $k - \omega$ e assim como a comparação anterior, todas as variáveis apresentaram convergência abaixo do fator estipulado dentro do número de interações máximo. Contudo, é interessante ressaltar que, diferente do caso anterior, a variável “k”, energia cinética, foi a que apresentou maior dificuldade em obter a convergência nestas análises.

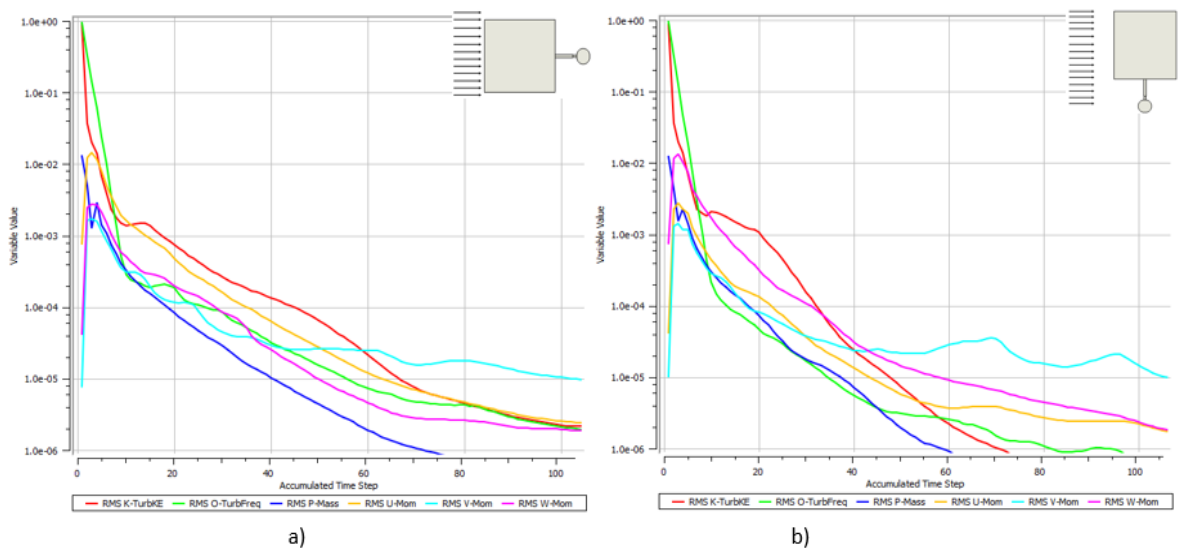


Figura 62. Resíduos obtidos nas soluções para o *solver* CFX com a teoria de turbulência $k - \omega$: a) esquerda; b) traseira, [45].

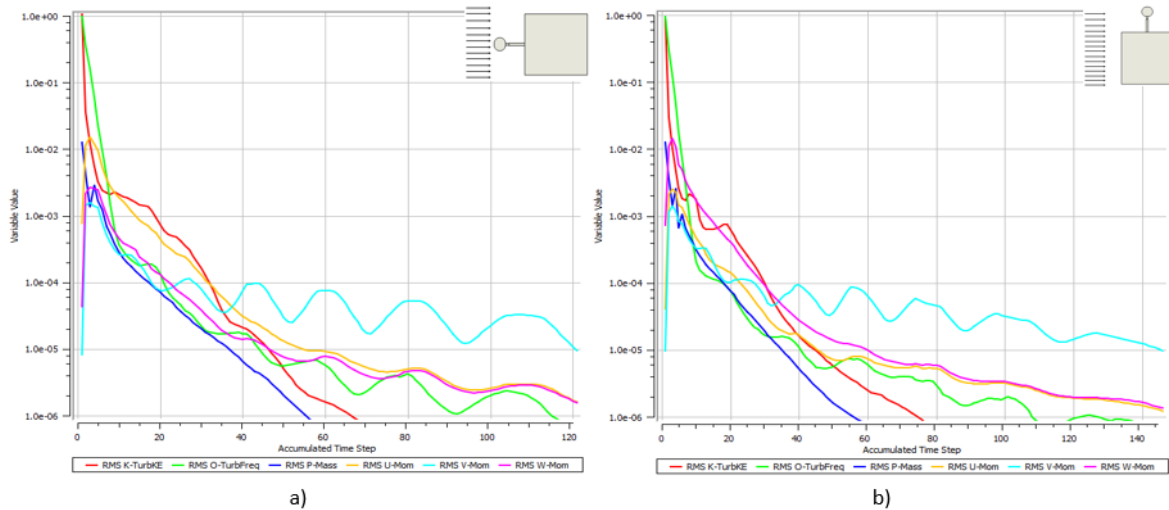


Figura 63. Resíduos obtidos nas soluções para o *solver* CFX com a teoria de turbulência $k - \omega$: a) direita; b) frontal, [45].

Finalmente, a Figura 64 e Figura 65 apresenta os dados também para o CFX, mas para a segunda teoria analisada e apesar de o comportamento não ser idêntico, a convergência ocorreu dentro do esperado apresentando uma maior velocidade na ocorrência desta do que nos casos analisados anteriormente.

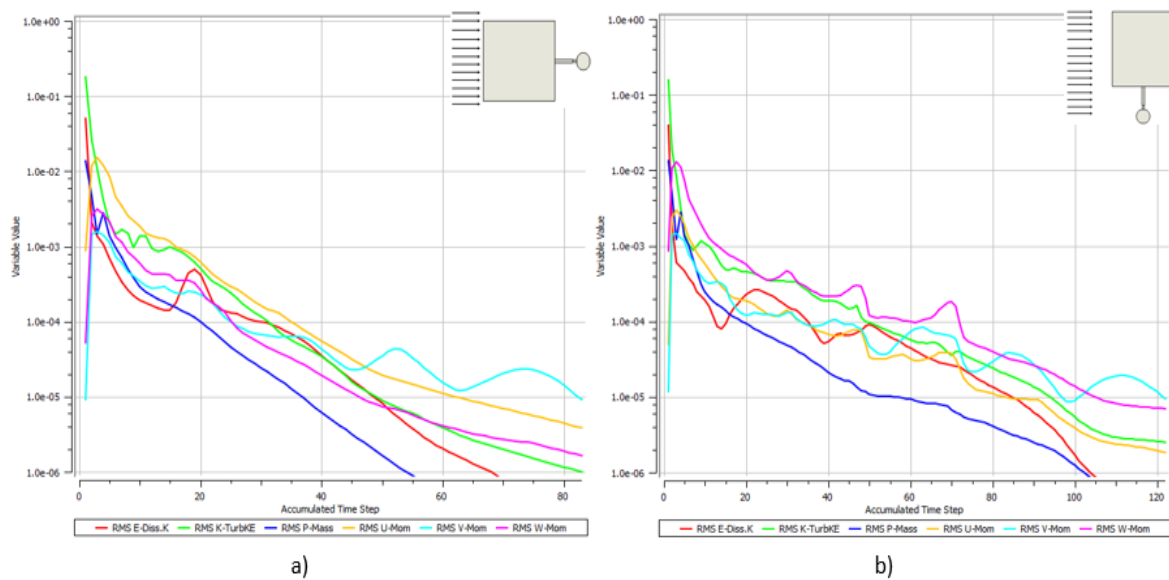


Figura 64. Resíduos obtidos nas soluções para o *solver* CFX com a teoria de turbulência $k - \epsilon$: a) esquerda; b) traseira, [45].

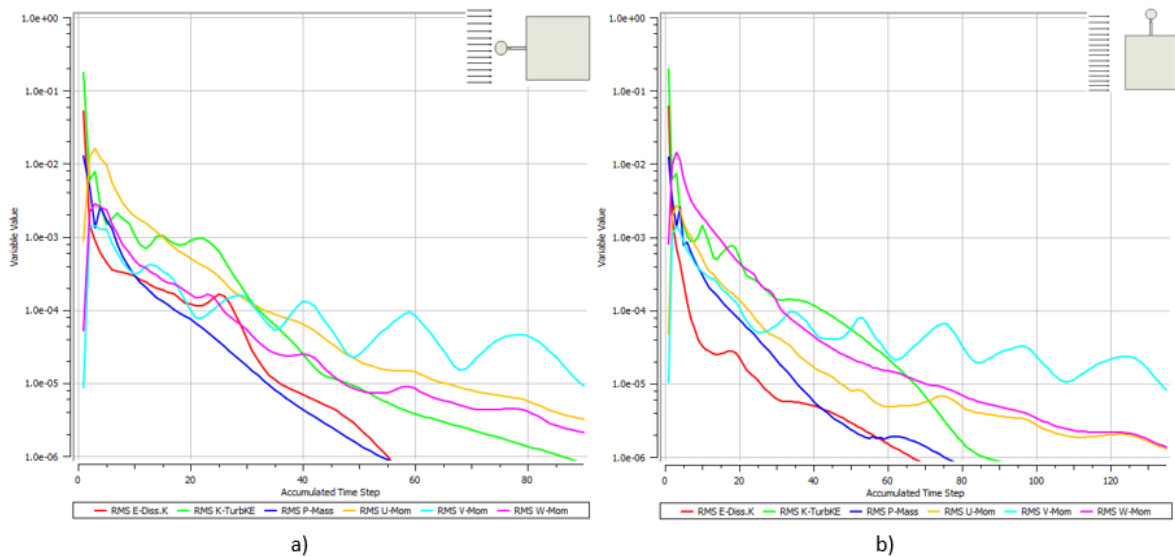


Figura 65. Resíduos obtidos nas soluções para o *solver* CFX com a teoria de turbulência $k - \varepsilon$: a) direita; b) frontal, [45].

4.4 Análise Comparativa

Para além das comparações anteriormente apresentadas, pode-se verificar também o comportamento da evolução do coeficiente de arrasto experimental quando apresentado junto dos dados obtidos através das simulações.

Para tal, além de somente os analisar visualmente, buscou-se construir e apresentar o desvio padrão ponto a ponto dos dados coletados, estes que estarão disponíveis no anexo A5.

Como as simulações foram construídas com dados desde 4 [m/s] até 30 [m/s] e os dados experimentais, como citado anteriormente, não puderam ser coletados em uma faixa tão ampla, todas as comparações serão dadas dentro da faixa dos dados experimentais.

Na Figura 66 é apresentada a primeira série de dados comparativos, dados para a configuração esquerda. Nesta vê-se que entre 5 e 8 [m/s] nenhum caso apresenta-se dentro dos limites do desvio padrão, mas já se pode perceber uma tendência onde para o caso do *solver* Fluent agora com a teoria $k - \omega$ os dados passam a se aproximar dos previstos nesta análise que por fim acaba se mostrando com um valor médio final muito próximo do percebido nos experimentos, algo que também ocorre para a teoria $k - \varepsilon$ mas muito mais tardiamente, a partir dos 10 [m/s].

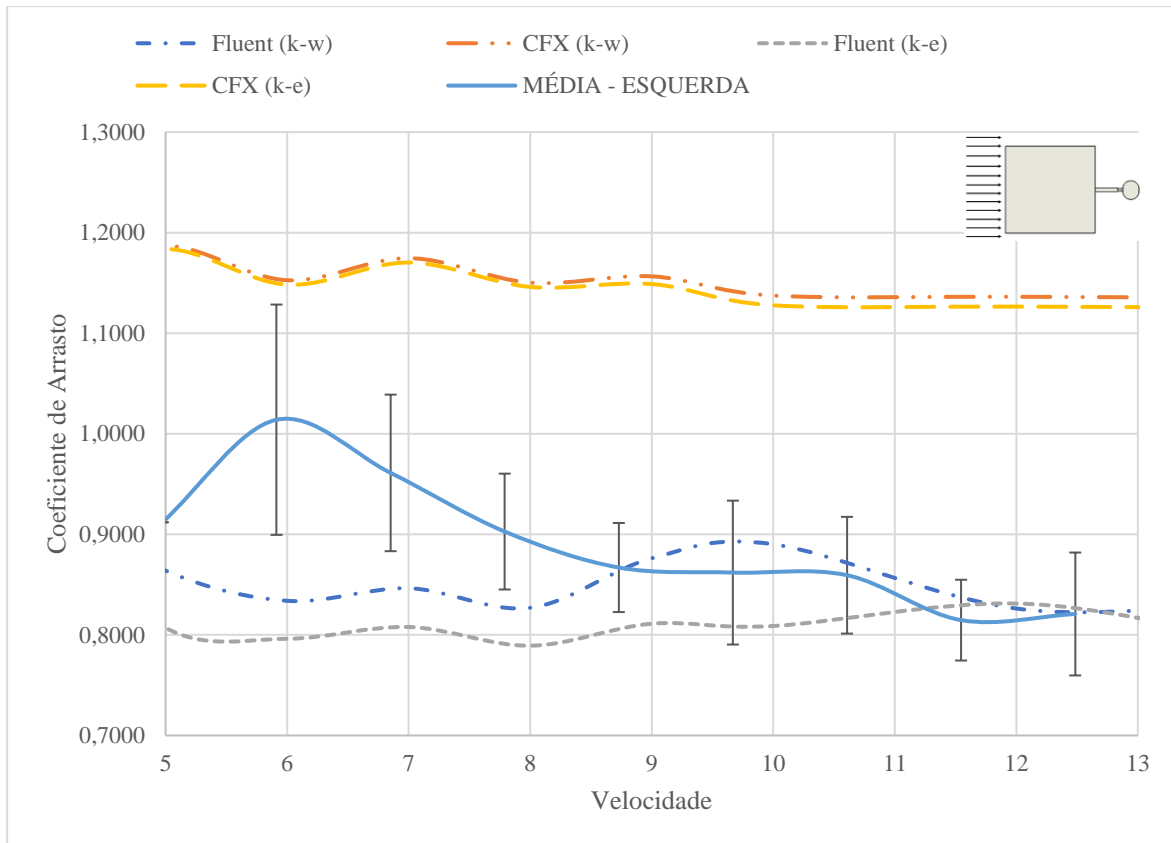


Figura 66. Comparação entre os dados experimentais e numéricos na configuração esquerda, autoria própria.

Quanto ao CFX, em ambas as análises não ocorreram em nenhum momento os dados convergirem dentro do desvio padrão percebido experimentalmente e desta maneira devem ser desconsiderados.

A Tabela 18 apresenta os dados médios obtidos nas simulações, nela é possível perceber numericamente a larga diferença entre os dados em cada caso analisado, também é possível perceber que dado os valores médios obtidos, o Fluent se aproximou em ambas as teorias do valor real, com uma vantagem para a teoria $k - \omega$, ao passo que o CFX se distanciou substancialmente destes.

Tabela 18. Valor final médio para esquerda para cada solver utilizando cada teoria de turbulência analisada, autoria própria.

	Fluent ($k - \omega$)	CFX ($k - \omega$)	Fluent ($k - \epsilon$)	CFX ($k - \epsilon$)
Coeficiente de arrasto	0,8241	1,1415	0,8146	1,1333
Comparação com o valor experimental	92,55 %	128,20 %	91,48 %	127,28 %

Na segunda situação de análise, presente na Figura 67, tem-se novamente a comparação dos resultados, agora para a configuração posterior a qual apresentou um comportamento muito semelhante a esquerda. Contudo, dado que os desvios padrões neste caso apresentaram valores maiores, em velocidades menores, 5 [m/s] e 8,5 [m/s] as curvas para o Fluent $k - \varepsilon$ e $k - \omega$ respectivamente convergiram para valores dentro do previsto na análise experimental, com uma leve vantagem para a primeira que esteve dentro da faixa prevista em toda a faixa de comparação.

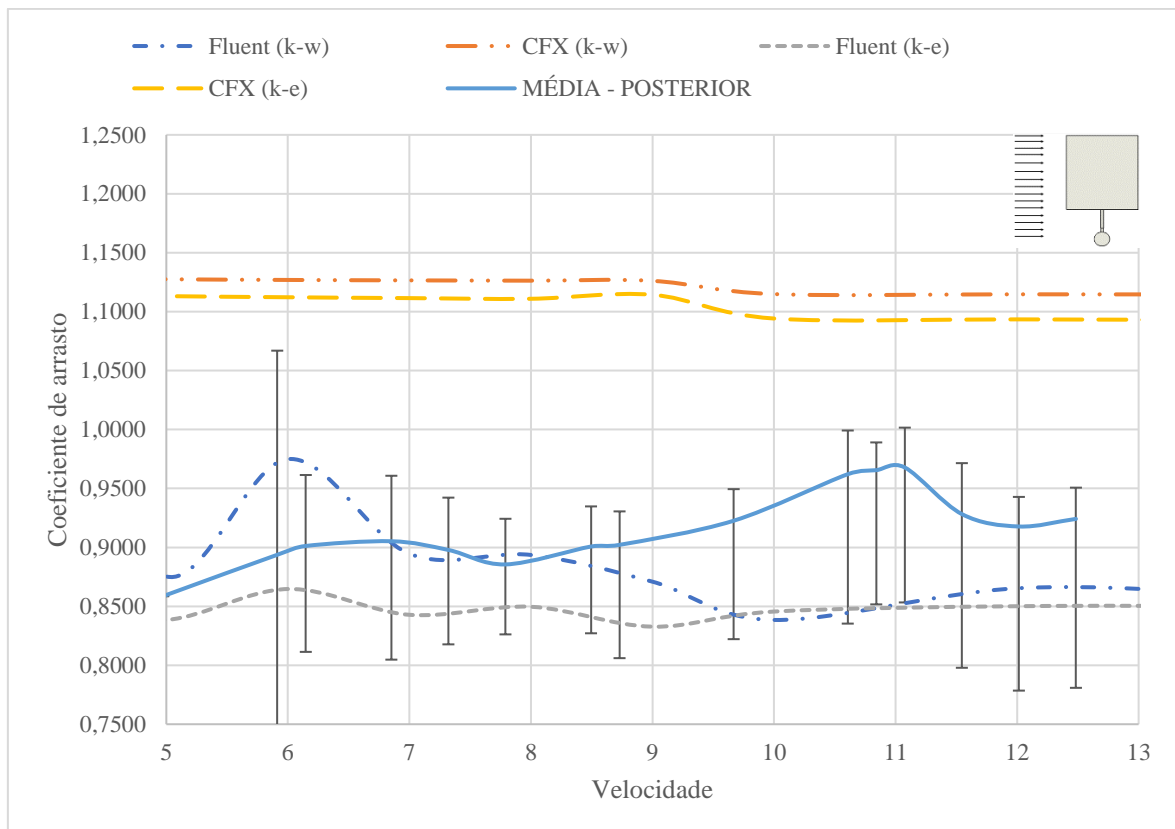


Figura 67. Comparação entre os dados experimentais e numéricos na configuração posterior, autoria própria.

Enquanto isso, novamente o CFX não apresentou nenhuma faixa de dados próxima da prevista experimentalmente e mais uma vez devem ser desconsiderados.

Nesta situação e como pode ser verificado na Tabela 19, mais uma vez os resultados obtidos na análise do Fluent se mostraram mais precisos, em especial quando analisado o caso da teoria $k - \omega$.

Tabela 19. Valor final médio para posterior para cada *solver* utilizando cada teoria de turbulência analisada, autoria própria.

	Fluent ($k - \omega$)	CFX ($k - \omega$)	Fluent ($k - \epsilon$)	CFX ($k - \epsilon$)
Coefficiente de arrasto	0,8677	1,1175	0,8386	1,0971
Comparação com o valor experimental	94,86 %	122,17 %	91,68 %	119,94 %

A terceira análise comparativa diz respeito a configuração direita a qual diferente das duas anteriores, apresentou em todos as análises dados que convergiram de forma homogênea.

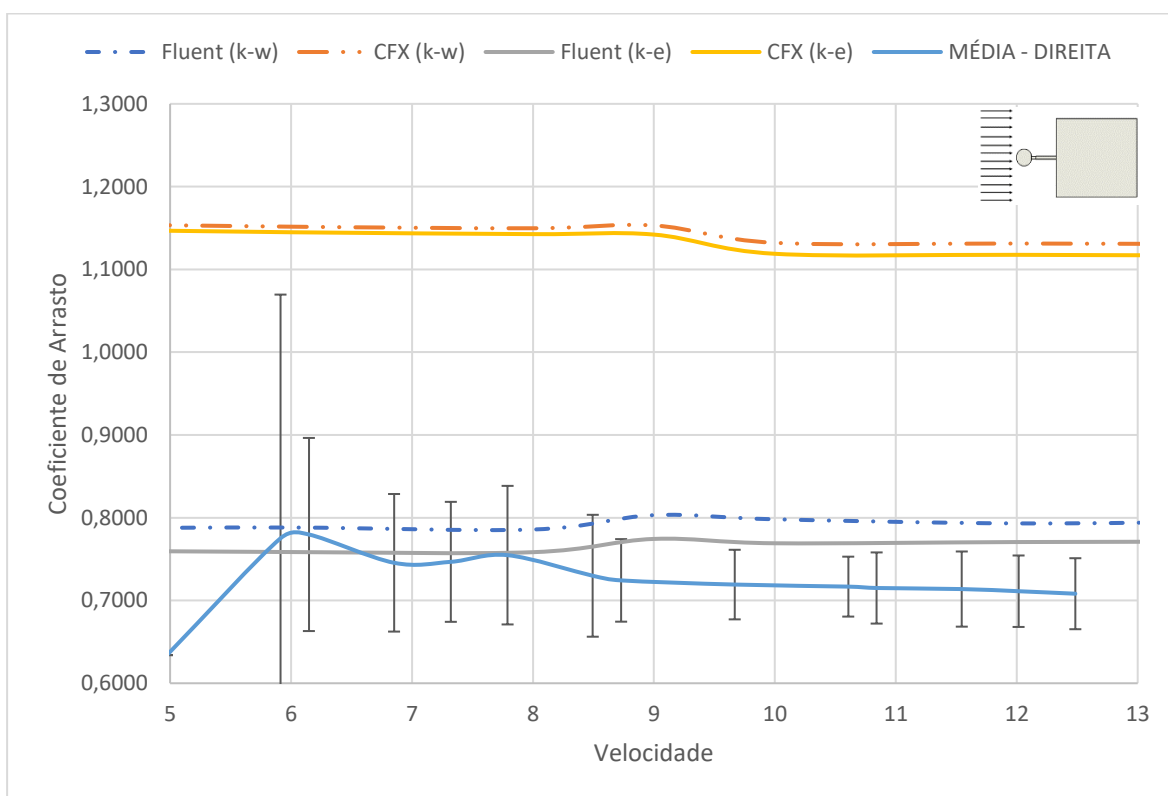


Figura 68. Comparação entre os dados experimentais e numéricos na configuração direita, autoria própria.

Isto posto e tomando a curva do comportamento experimental, é possível perceber assim como nos anteriores que o Fluent mais uma vez apresentou uma melhor capacidade de representar a situação real, para ambas as teorias, ao passo que o CFX não apresentou valores dentro do desvio padrão para qualquer que seja a faixa analisada.

Contudo, estes valores passaram a divergir acima de 8,5 m/s de modo que mesmo que estejam essencialmente perto (9,32% e 5,92% receptivamente), ambos divergem do desvio padrão percebido experimentalmente.

A Tabela 20 apresenta os dados comparativos para com os dados experimentais e mais uma vez fica evidente a grande diferença que os resultados do CFX apresentou em relação aos previstos com também uma leve vantagem quando analisado com a teoria $k - \varepsilon$.

Tabela 20. Valor final médio para direita para cada *solver* utilizando cada teoria de turbulência analisada, autoria própria.

	Fluent ($k - \omega$)	CFX ($k - \omega$)	Fluent ($k - \varepsilon$)	CFX ($k - \varepsilon$)
Coeficiente de arrasto	0,7927	1,1375	0,7681	1,1229
Comparação com o valor experimental	109,32 %	156,87 %	105,92%	154,86 %

Na última etapa de comparação buscou-se a análise entre os dados frontais. Para tal, assim como percebido anteriormente na configuração direita, os dados apresentaram uma maior estabilidade no seu desenvolvimento, sem grandes oscilações.

Nesta etapa mais uma vez o Fluent mostrou maior qualidade e confiabilidade nos dados obtidos, apresentando assim dados em toda a faixa analisada dentro do limite do desvio padrão, para as 3 teorias de turbulência analisadas.

Este último experimento é visivelmente vantajoso para análise do fato de que, dado o componente e o escoamento, percebe-se que a teoria de turbulência $k - \varepsilon$ no Fluent apresentou em geral resultados mais consistentes, sendo assim uma melhor opção para representar o escoamento no caso analisado neste trabalho, o que levanta o questionamento da possibilidade de os efeitos da turbulência na camada limite e adjacente a esta terem pouco impacto a altas velocidades, visto que os resultados da teoria SST convergem para valores próximos da teoria $k - \varepsilon$ nas mesmas velocidades analisadas.

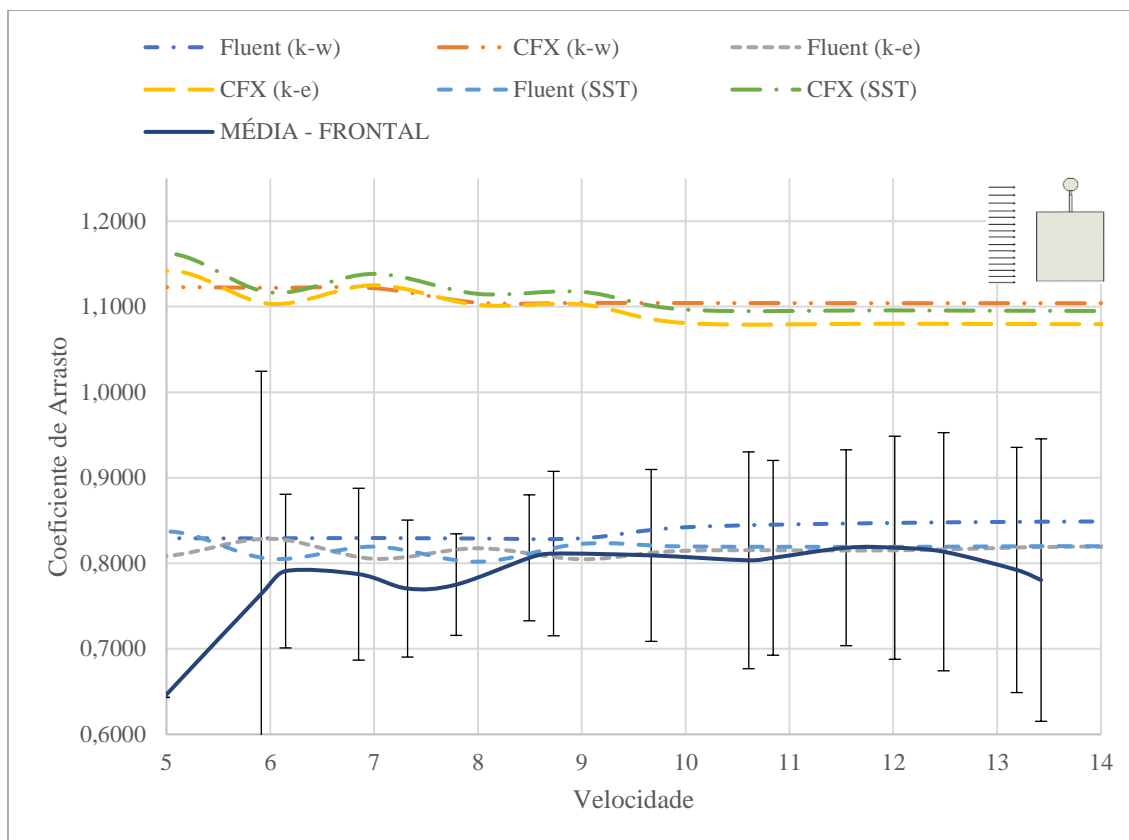


Figura 69. Comparação entre os dados experimentais e numéricos na configuração frontal, autoria própria.

Pode-se perceber na Tabela 21 que os resultados para o *solver* Fluent se aproximaram mais dos resultados obtidos no túnel de vento quando utilizado qualquer uma das teorias de turbulência, mas apresenta valores ainda mais próximos para o caso $k - \epsilon$.

Tabela 21. Valor final médio frontal para cada solver utilizando cada teoria de turbulência analisada, autoria própria.

	Fluent ($k - \omega$)	CFX ($k - \omega$)	Fluent ($k - \epsilon$)	CFX ($k - \epsilon$)	Fluent (SST)	CFX (SST)
Coeficiente de arrasto	0,8388	1,1082	0,8139	1,0898	0,8174	1,1061
Comparação com o valor experimental	105,5%	139,4%	102,4%	137,06%	102,8%	139,11%

Analisando aa Figura 70 e Figura 71 é possível perceber a clara diferença no comportamento do escoamento analisado nos dois *solvers*, no CFX a faixa de alta pressão a frente da coluna é consideravelmente maior, ao passo logo após desta se estende por um

espaço maior a zona de baixa pressão, o que dá origem aos valores maiores do coeficiente de arrasto percebidos nos gráficos anteriormente apresentados. Isto se repete também com a velocidade.

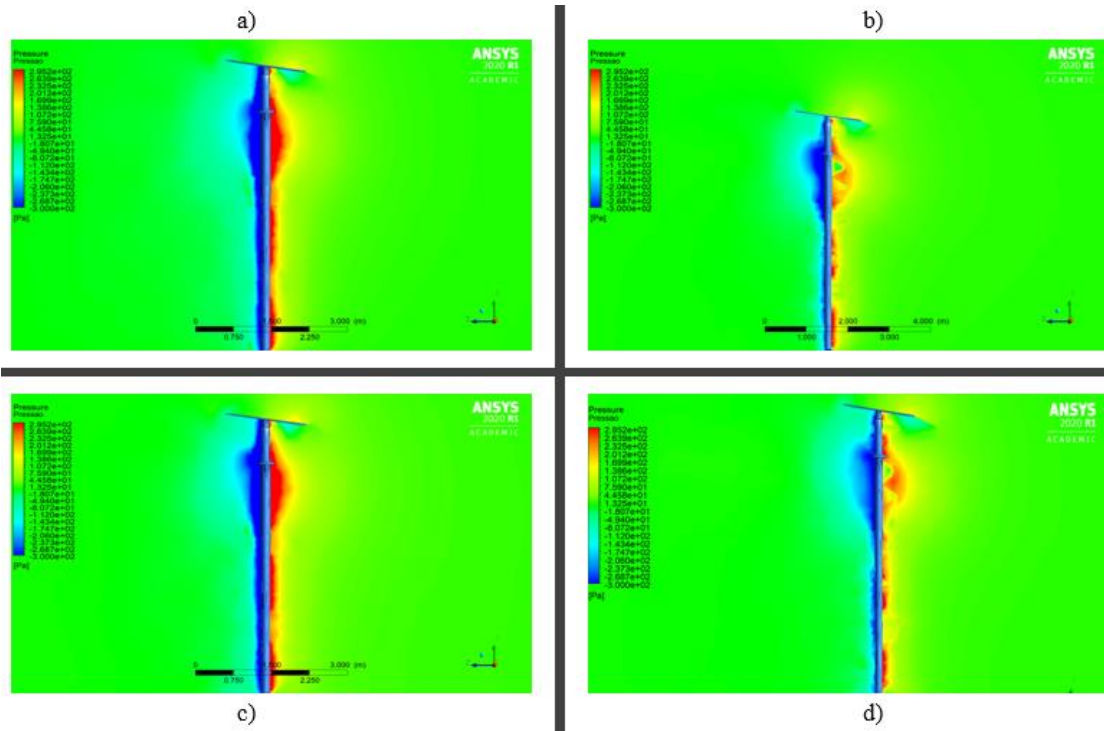


Figura 70. Distribuição de pressão sobre a coluna na configuração frontal: a) CFX($k - \omega$); b) Fluent($k - \omega$); c) CFX($k - \epsilon$); d) Fluent($k - \epsilon$) [45].

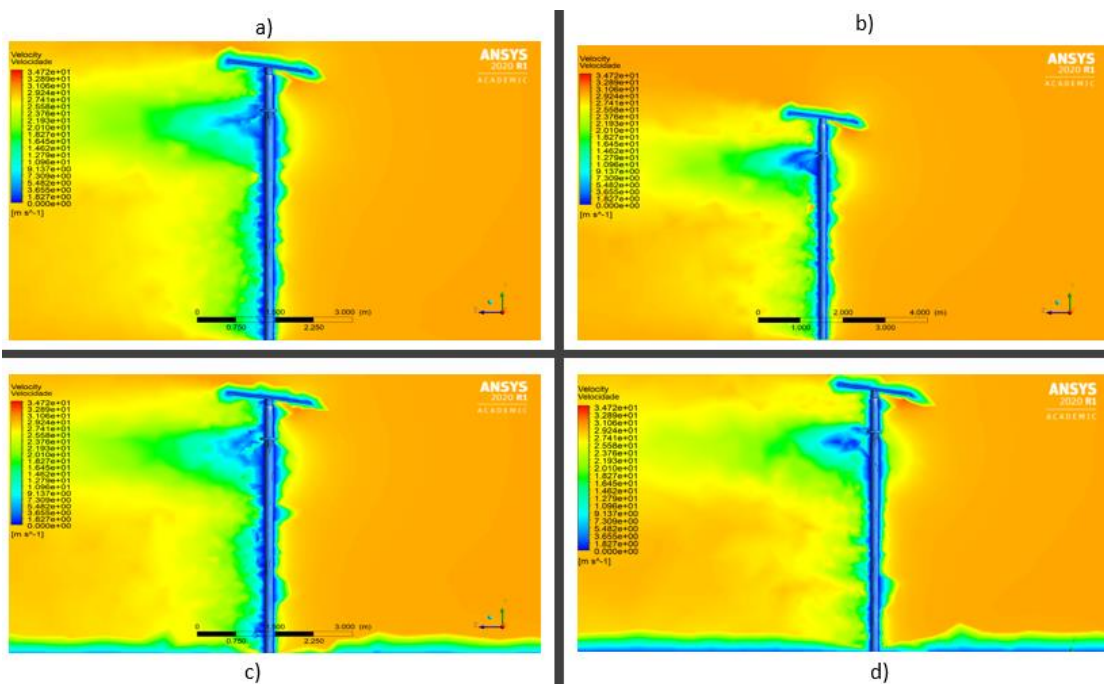


Figura 71. Distribuição da velocidade sobre a coluna e seus arredores na configuração frontal: a) CFX($k - \omega$); b) Fluent($k - \omega$); c) CFX($k - \epsilon$); d) Fluent($k - \epsilon$) [45].

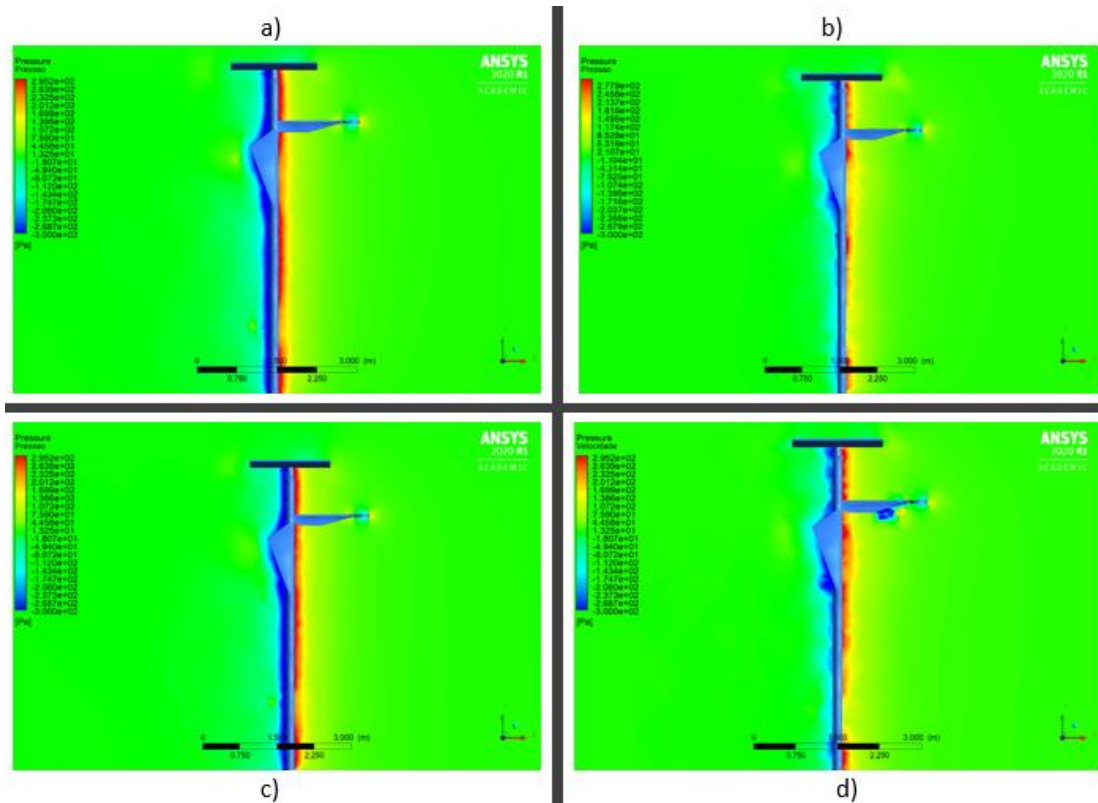


Figura 72. Distribuição de pressão sobre a coluna na configuração direita: a) CFX($k - \omega$); b) Fluent($k - \omega$); c) CFX($k - \epsilon$); d) Fluent($k - \epsilon$) [45].

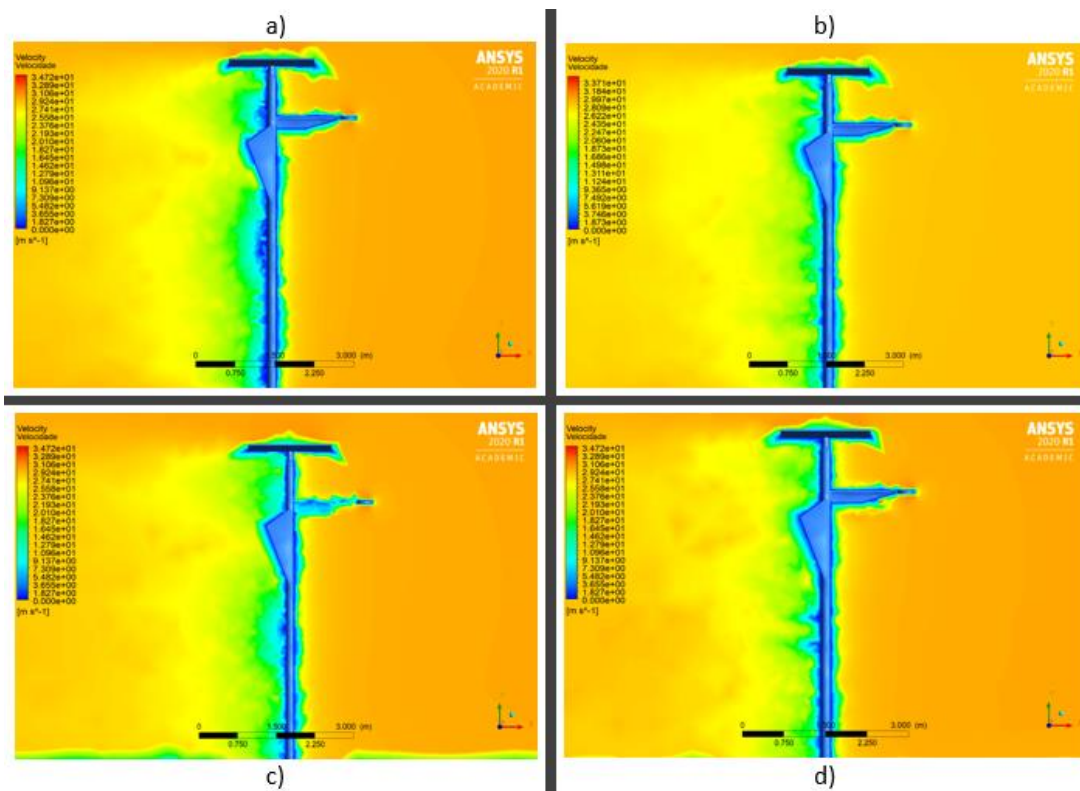


Figura 73. Distribuição da velocidade sobre a coluna e seus arredores na configuração direita: a) CFX($k - \omega$); b) Fluent($k - \omega$); c) CFX($k - \epsilon$); d) Fluent($k - \epsilon$) [45].

Na configuração direita, conforme Figura 72 e Figura 73, o mesmo se repete. É perceptível também a diferença na suavidade no tratamento do escoamento próximo a parede, de modo que qualquer um dos *solvers* apresentam dificuldade em representar de forma fidedigna o comportamento e a delimitação das zonas de alta e baixa pressão que formam as recirculações no escoamento, quando munidos da teoria $k - \varepsilon$.

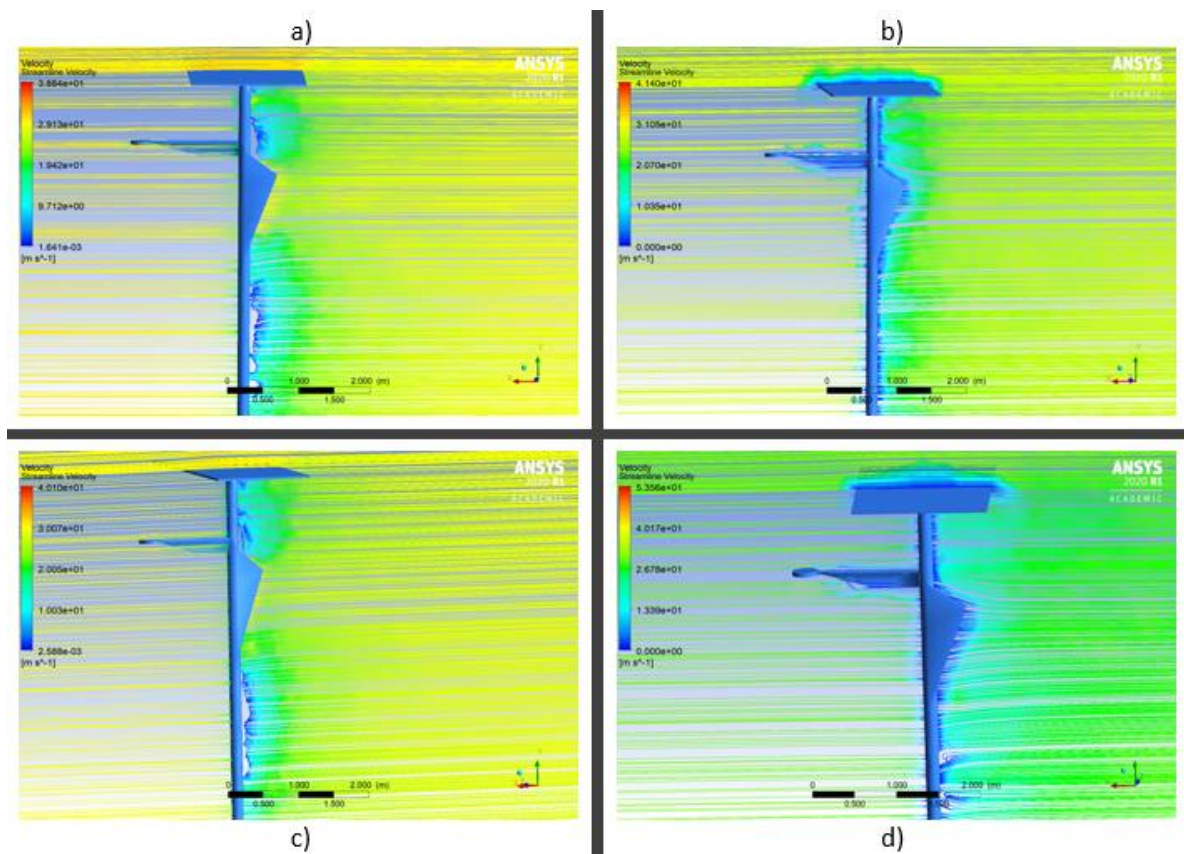


Figura 74. Linhas de fluxo sobre a coluna para a configuração direita: a) CFX($k - \omega$); b) Fluent($k - \omega$); c) CFX($k - \varepsilon$); d) Fluent($k - \varepsilon$) [45].

Por fim, as Figura 74 e Figura 75 apresentam as linhas fluxo sobre a coluna nas configurações direita e frontal respectivamente. Nestes casos, para além do que já foi comentado, se percebe que as zonas de recirculação são pequenas e próximas a estrutura o que pode explicar o fato de mesmo que a teoria $k - \varepsilon$ apresente pouca capacidade de representar as zonas presentes, ainda pode com facilidade representar o restante do escoamento e possibilitar que os resultados numéricos tenham uma convergência mais rápida ou com maior qualidade em um menor número de interações, este inclusive, que pode ser o

fato preponderante para explicar os dados oscilatórios quando utilizado o *solver* Fluent e a teoria $k - \omega$.

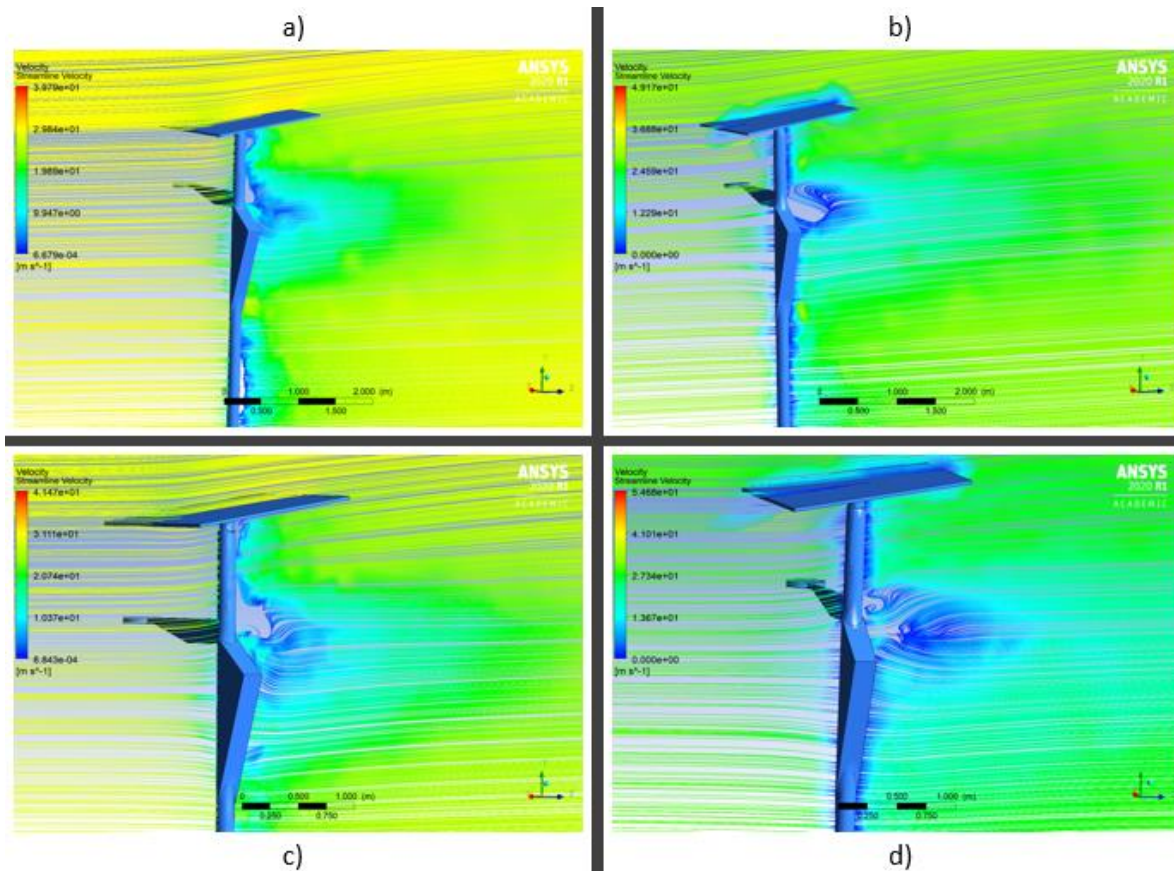


Figura 75. Linhas de fluxo sobre a coluna para a configuração frontal: a) CFX($k - \omega$); b) Fluent($k - \omega$); c) CFX($k - \epsilon$); d) Fluent($k - \epsilon$) [45].

Outro ponto a ser evidenciado, é um comportamento oscilatório do coeficiente de arrasto na primeira parte da análise, o que pode representar o fato de esta faixa representar a região de transição de um escoamento laminar a turbulento o que necessariamente impacta na distribuição e comportamento da camada limite sobre o modelo

Capítulo 5: CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS

A mecânica dos fluídos é o estudo da interação entre as partículas que os compreendem bem como a interação destes com corpos sólidos externos, para que posteriormente esta análise sirva para prever um comportamento sobre outra situação qualquer, através de diversas grandezas e propriedades como a força de arrasto, objeto de estudo do presente trabalho.

Em síntese, dado o objetivo geral de determinar o coeficiente de arrasto de uma coluna autónoma solar através de análises experimentais com captação de dados em túnel de vento e posterior validação como contraponto, em análises numéricas com o *software* ANSYS®, foram utilizadas quatro diferentes configurações que consistiram na rotação do objeto em torno do seu centro e uma série de velocidades para garantir o não vício nos dados obtidos, e dado que as áreas planificadas eram iguais para a frontal e posterior, bem como para esquerda e direita, e dada os dados médios e seus respectivos desvios padrões da Figura 53, os resultados convergem para valores plenamente aceitáveis.

Além dos dados experimentais, os cenários simulados em CFD tem como base a situação real e para tal buscou-se respeitar as limitações do *software* e ainda assim produzir um ambiente mais próximo do encontrado na instalação de uma coluna em seu tamanho normal.

É possível ainda afirmar que o trabalho obteve êxito, pois o nível de erro encontrado entre os resultados é baixo e aceitável. Tanto os dados experimentais apresentaram uma tendência de convergência, como as simulações tiveram resultados condizentes com os valores reais obtidos com a coluna em tamanho reduzido, possibilitando assim validar e confirmar os valores como os mais próximos dos presentes em uma estrutura real.

Neste cenário, é possível estabelecer o Fluent como o mais apropriado para obtenção de análises numéricas de escoamento e que pode com boa exatidão substituir análises

experimentais utilizando túneis de vento em projetos futuros, especialmente quando utilizando a teoria de turbulência $k - \omega$.

Se o caso de análise for um objeto com um formato esguio ou delgado como o do presente estudo, pode-se utilizar a teoria $k - \varepsilon$ como uma boa opção com baixo custo computacional. Contudo se o objetivo for analisar algo mais complexo e que produza maiores distúrbios no escoamento, uma teoria mais robusta como a $k - \omega$ ou ainda a versão híbrida SST podem ser empregadas, tomando o devido cuidado de estabelecer uma malha no domínio que seja capaz de descrever o escoamento.

Em tempo, a Tabela 22 apresenta os valores finais obtidos para cada uma das configurações, sendo estes uma mescla dos valores médios obtidos em cada configuração no *software* Fluent e os dados experimentais.

Tabela 22. Valores médios finais para o coeficiente de arrasto, autoria própria.

	Esquerda	Posterior	Direita	Frontal
Coefficiente de Arrasto	0,8430	0,9267	0,7624	0,8156

Porém, alguns pontos apresentaram-se como incertezas, como a oscilação nos dados obtidos com a teoria $k - \omega$ no Fluent. Este resultado pode ter sido afetado pelo fato da convergência utilizada pelo Fluent não ter sido atingida em todas as variáveis para 3 das 4 configurações utilizadas, especialmente nos casos onde os dados apresentaram uma oscilação mais acentuada, mesmo mantendo um número elevado de interações para a solução, caso que não ocorreu com as outras análises efetuadas.

Uma possível solução neste caso passaria por um maior refinamento da malha no domínio fluído nestes casos onde os dados apresentaram tal comportamento, permitindo assim uma convergência mais rápida com o mesmo nível de resíduos, todavia como o *software* não permitia tão refinamento na versão utilizada para o presente trabalho, tal situação ficará para uma possível nova abordagem em futuros trabalhos.

Quanto as oscilações nos dados obtidos experimentalmente, estes levam em conta os erros humanos e desta maneira, estão sujeitos a valores ligeiramente divergentes em certos pontos, como por exemplo a própria precisão do equipamento ser baixa com somente duas casas decimais, impossibilitando perceber pequenas variações na força, ou ainda o fato de

não haver um segundo sistema de medição instalado, tal como um manômetro, que possibilite estabelecer um contra ponto acerca da queda de pressão no escoamento e assim avaliar se a tomada dos dados está acurada.

Outro ponto que acaba impactando é o conceito principal de obter os dados a partir de uma estrutura reduzida, que por sinal teve de possuir ligeiras alterações para com a sua versão original, bem como não apresenta a mesma rigidez, isto ficou ainda mais claro nos dados coletados para o último protótipo que foi concebido em ABS, pois como já ocorria com o PLA, a estrutura se deforma e desta maneira muda sua área transversal especialmente a altas velocidades, alterando o modo como o escoamento atinge esta e por sua vez afeta os resultados das forças transferidas ao equipamento de medição, além dos recorrentes problemas de vibração que o escoamento causa na estrutura fazendo com que em certos momentos os valores para a força longitudinal sejam maiores e em outro menores, causando o efeito oscilatório verificado nas figuras.

Além de todos os pontos anteriormente citados, pode-se perceber que apesar de a configuração direita apresentar uma área planificada igual a da esquerda, o que também ocorre com a configuração frontal e posterior, os valores médios para o coeficiente são ligeiramente diferentes. Uma possível explicação se dá pelo fato de o fluxo de ar ao percorrer a estrutura, ter um comportamento distinto, visto que como por exemplo no lado direito, o escoamento encontra uma perturbação muito antes de chegar a parte do painel e do poste oriundo da estrutura de iluminação que esta projetada para a frente, fazendo com o que o escoamento que encontre estes outros componentes já alterado.

Estas diferenças no escoamento, apesar de não terem impacto nos valores de cálculo do coeficiente, certamente tem impacto em como o escoamento é percebido na estrutura, induzindo a cargas ligeiramente distintas, o que se intensifica em altas velocidades onde as cargas são necessariamente mais elevadas.

Levando em consideração o aspeto abrangente que compõem a ciência como um todo e mais especificamente a engenharia, focada na mecânica das estruturas e dos fluídos a qual este trabalho faz parte, são diversos os possíveis caminhos para onde os estudos podem seguir.

Algumas das possíveis linhas de estudo que poderiam se desenvolver tomando como base os resultados aqui obtidos são o desenvolvimento de análises acopladas fluído-estrutura de duas vias utilizando o *software* ANSYS®.

Outros casos que podem potencialmente ser abordados são o aprofundamento do presente trabalho, como a construção de novas versões reduzidas em PLA ou outro polímero mais resistente, ou até mesmo uma versão em metal, para a análise modal desta e futura comparação com a original para posteriormente se estabelecer através de simulações e análises em túnel de vento, um estudo a cerca da vida útil em fadiga do equipamento quanto sujeito a ventos como os presentes na região de Bragança, Portugal.

Para além dos resultados aqui obtidos, pode-se se estabelecer um estudo a cerca da possibilidade de implementação de uma segunda forma de validação dos dados obtidos no túnel de vento, com o acoplamento de um sistema de medição para a diferença de pressão ou ainda a modificação do sistema de medição já instalado, para reduzir o ruído nos dados devido a vibração através de um sistema de amortecimento.

Referências

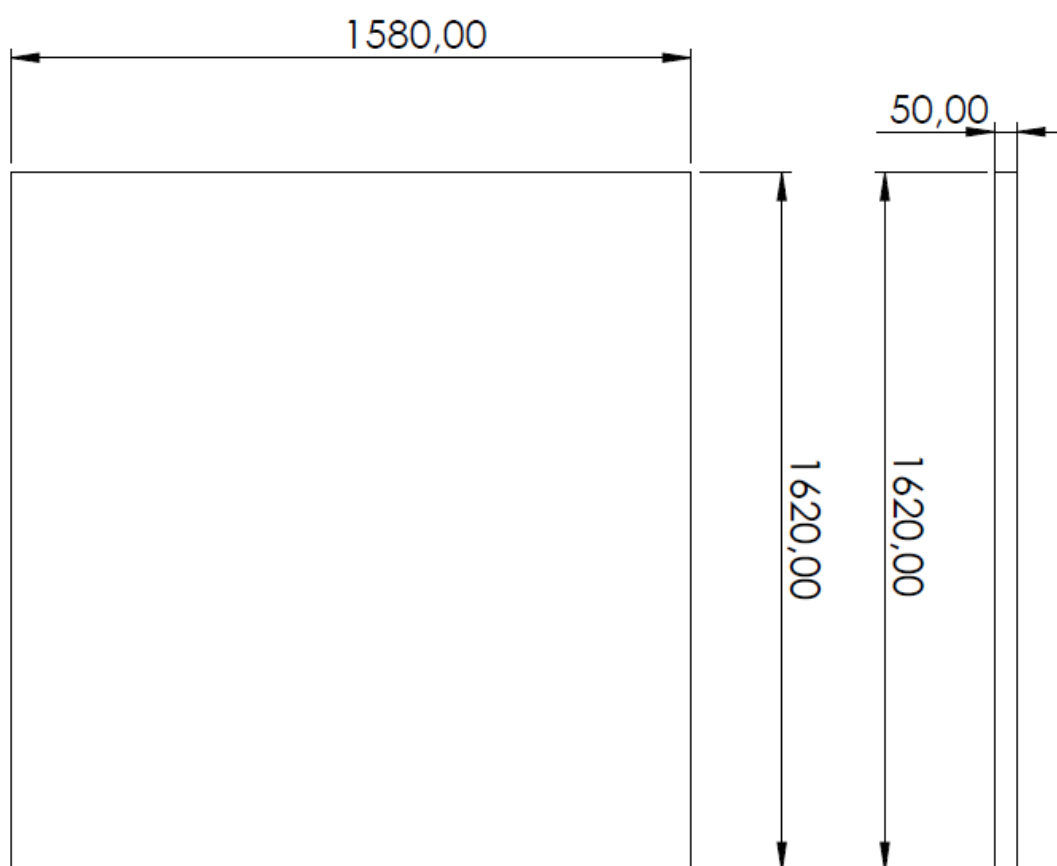
1. VILLALVA, M.G., *Energia Solar Fotovoltaica: Conceitos e Aplicações*. 2015, São Paulo, Brasil: Saraiva.
2. Luque, A. and S. Hegedus, *Handbook of Photovoltaic Science and Engineering*. 2003, Camberley, Inglaterra: Wiley.
3. Robertson, A.P., J.D. Holmes, and B.W. Smith, *Verification of closed-form solutions of fatigue life under along-wind loading*. *Engineering Structures*, 2004. **26**(10): p. 1381-1387.
4. Energéticas, V.S. *Iluminação Pública*. 2020 [cited 2020 Jan. 2]; Available from: http://www.valled.pt/_pdf/PT_Valled_IluminacaoPublica.pdf.
5. Energéticas, V.S. *Valled*. 2020 [cited 2020 Jan. 2]; Available from: <http://www.valled.pt/pt-pt/valled>.
6. Gaiato, J.M.C., *Projeto de Colunas de Iluminação Autônoma Solares*. 2017, Instituto Politécnico de Bragança: Bragança, Portugal.
7. Fox, R.W., et al., *Introdução a Mecânica dos Fluidos*. 2014, São Paulo, Brasil: LTC.
8. Fortuna, A.d.O., *Técnicas Computacionais para Dinâmica dos Fluidos: Conceitos Básicos e Aplicações*. 2012, São Paulo, Brasil: EDUSP.
9. Paidoussis, M.P., *Fluid-Structure Interactions: Slender Structures and Axial Flow*. 2014, Cambridge, Massachusetts: Academic Press.
10. Çengel, Y.A. and J.M. Cimbala, *Mecânica dos Fluidos Fundamentos e Aplicações*. 2012, Porto Alegre, Brasil: AMGH Editora Ltda.
11. Bazilevs, Y., K. Takizawa, and T.E. Tezduyar, *Computational Fluid-Structure Interaction*. 2013, New Jersey, EUA: John Wiley & Sons.
12. Andretta, E.R.Z., *Estudo numérico de problemas acoplados envolvendo a resposta dinâmica das estruturas*. 2017, Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná: Pato Branco.
13. Lima, R.C., S.S. Mansur, and J.B. Campos-Silva, *arge Eddy Simulation of Turbulent Incompressible Fluid Flows by a Nine-Node Control Volume-Finite Element Method*. *ENGENHARIA TÉRMICA*, 2005. **4**(2°): p. 173-180.
14. Rapp, B.E., *Microfluidics: Modelling, Mechanics and Mathematics*. 2017, Amsterdam, Netherlands: Elsevier.
15. Campregher, R., et al., *Computations of the flow past a still sphere at moderate reynolds numbers using an immersed boundary method*. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 2009. **31**(4): p. 344-352.

16. Prandtl, L. *Fluid Motion with Very Small Friction (in German)*. in *Proceedings of the Third International Congress on Mathematics*. 1904. Heidelberg.
17. Blasius, H., *The Boundary Layers in Fluids with Little Friction (in German)*. "Zeitschrift für Mathematik und Physik", 1908. **56**(1): p. 1-37.
18. Schlichting, H., *Boundary-layer theory*. 1979, New York: McGraw-Hill.
19. Hinze, J.O., *Turbulence: An Introduction to Its Mechanism and Theory*. 1959, Nova York: McGraw-Hill Book Company.
20. Costa-Ferreira, N.A., *Efeito do Vento em Edifícios Altos - Aplicação a um caso concreto*. 2008, FEUP: Porto, Portugal.
21. Blessmann, J., *Intervalo de Tempo para Cálculo da Velocidade Básica do Vento*. 1988, Porto Alegre, Brasil: UFRGS.
22. Loredou-Souza, A.M., et al., *Coefficientes de arrasto aerodinâmico em estruturas treliçadas de linhas de transmissão*, in *XXXII Jornadas Sulamericanas de Engenharia Estrutural*. 2006: Campinas, Brasil.
23. Houghton, E.L., E. Lewis, and N.B. Carruthers, *Wind forces on buildings and structures : an introduction*. 1976, London, England: Edward Arnold.
24. Simiu, E. and R.H. Scanlan, *Wind effects on structures : fundamentals and applications to design*. 1996, New York, USA: John Wiley.
25. Oke, T.R., *Boundary Layer Climates*. 2002, Londres, Reino Unido: Routledge.
26. Holmes, J.D., *Wind Loading of Structures*. 2001, Boca Raton, Florida, EUA: CRC Press.
27. Milone, G., *Estatística: geral e aplicada*. 2004, São Paulo, Brasil: Cengage Learning.
28. Britannica, T.E.o.E. *Encyclopaedia Britannica - Wind Tunnel*. 2018 Jun 07; Available from: <https://www.britannica.com/technology/wind-tunnel>.
29. Administration, N.A.a.S. *What Are Wind Tunnels?* 2017 [cited 2020 Mar. 12]; Available from: <https://www.nasa.gov/audience/forstudents/k-4/stories/nasa-knows/what-are-wind-tunnels-k4.html>.
30. Aynsley, R.M., B.J. Vickery, and W.H. Melbourne, *Architectural aerodynamics*. 1977, Londres: Applied Science Publishers.
31. Larosea, G.L. and N. Franck, *Early wind engineering experiments in Denmark*. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 1997. **72**(1): p. 493-499.
32. Volpato, N., *Prototipagem rápida: tecnologias e aplicações*. 2007, São Paulo: Blucher.
33. Volpato, N.e.a., *Manufatura aditiva: tecnologias e aplicações da impressão 3D*. 2017, São Paulo: Edgar Blucher Ltda.
34. Standardization, I.-I.O.f., *ISO/ASTM 52900:2015 - Additive manufacturing — General principles — Terminology*. 2015, ISO Central Secretariat: Geneva.
35. Kai, C.C., L.K. Fai, and L.C. Sing, *Rapid Prototyping: Principles and Applications*. 2003, Singapore: World Scientific Pub Co.
36. Moreira, R., *Conceiving a non-contact Measurement System for the Polymer Temperature at the Nozzle Exit of a FDM 3D Printer*, in *Master's Degree*. 2016, Universidade do Porto: Porto. p. 9-10.

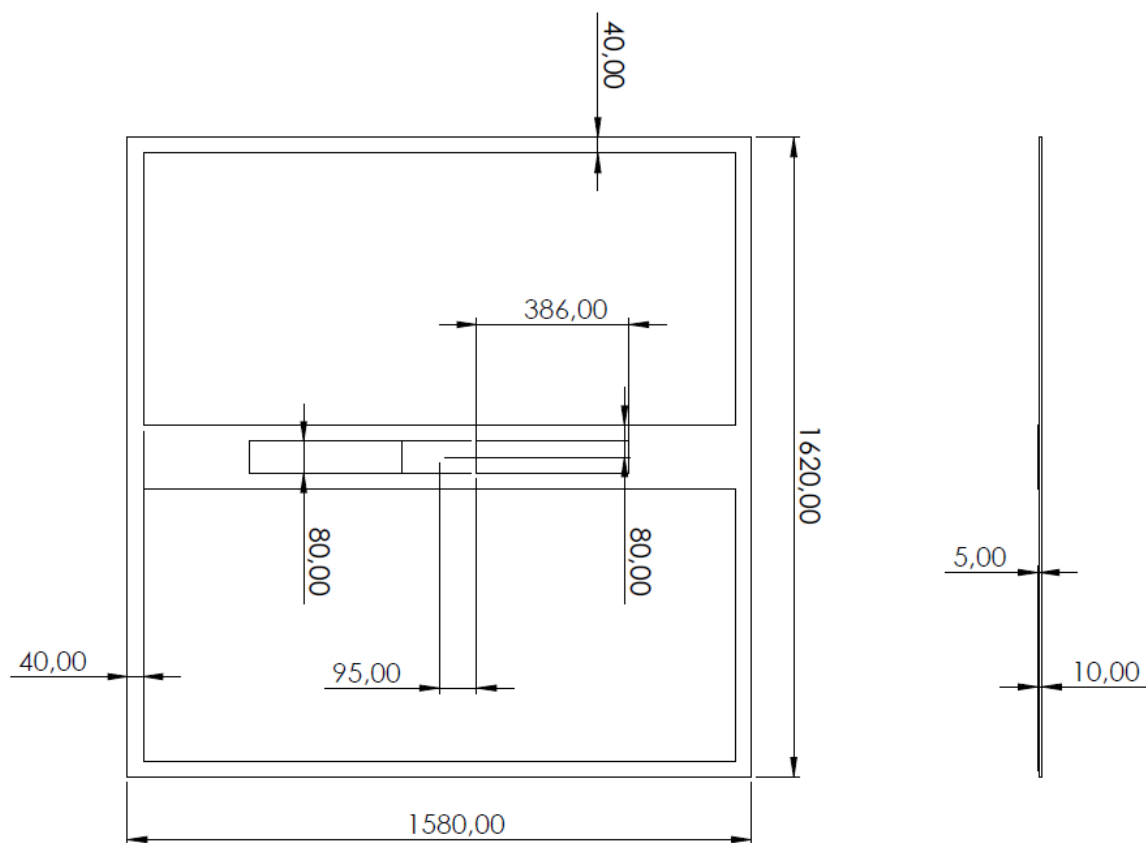
-
37. Ltd, S. *Find Materials and Filaments for 3D Printing*. [Online] 2019 [cited 2020 Mar. 12].
 38. Turner, M.J., et al., *Stiffness and Deflection Analysis of Complex Structures*. Journal of the Aeronautical Sciences, 1956. **23**(9): p. 805-823.
 39. Ribeiro, R.S. and J.L.A. Ferreira, *Análise dinâmica em modelo reduzido de uma estrutura com dois pavimentos*. Revista Iberoamericana de Ingeniería Mecánica, 2007. **11**(1): p. 47-58.
 40. Soriano, H.L., *Elementos Finitos - Formulação e Aplicação na Estática e Dinâmica das Estruturas*. 2009, Rio de Janeiro: Editora Ciência Moderna.
 41. ANSYS, I. *Lecture 7: Turbulence Modeling*. Introduction to Ansys Fluent 2014 [cited 2020 Apr. 10]; Available from: https://www.researchgate.net/profile/Panayampilly_Abdul_Samad/post/y_plus_range_for_turbulent_models/attachment/59d6393c79197b8077996735/AS%3A400990483304449%401472614989133/download/Fluent-Intro_15.0_L07_Turbulence.pdf.
 42. S.A., D.S., *3D CAD Design Software SOLIDWORKS*. 2019-2020 SP2 Student Edition: Vélizy-Villacoublay, França.
 43. Ultimaker. *Ultimaker 3: Complex 3D prints made easy*. 2020 [cited 2020 Feb. 07]; Available from: <https://ultimaker.com/3d-printers/ultimaker-3>.
 44. UK, C. *RoboxDual by CEL – A Dual Material 3D printer - CEL UK*. 2020 [cited 2020 Apr. 10]; Available from: <https://www.cel-uk.com/shop/roboxdual/>.
 45. ANSYS, I. *ANSYS Workbench*. 2020; R1:[Academic Student].

Anexos

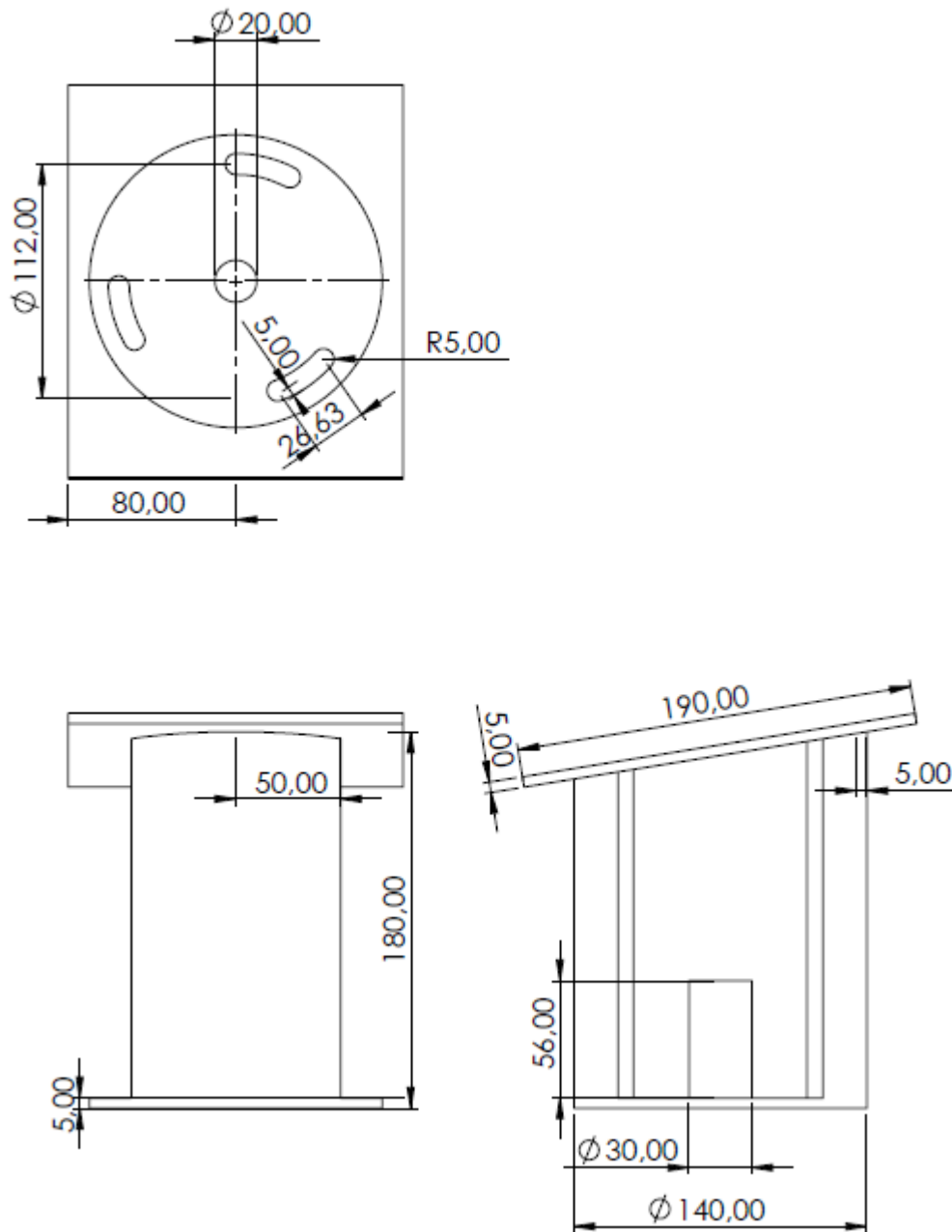
A1. Desenhos técnicos dos componentes estruturais



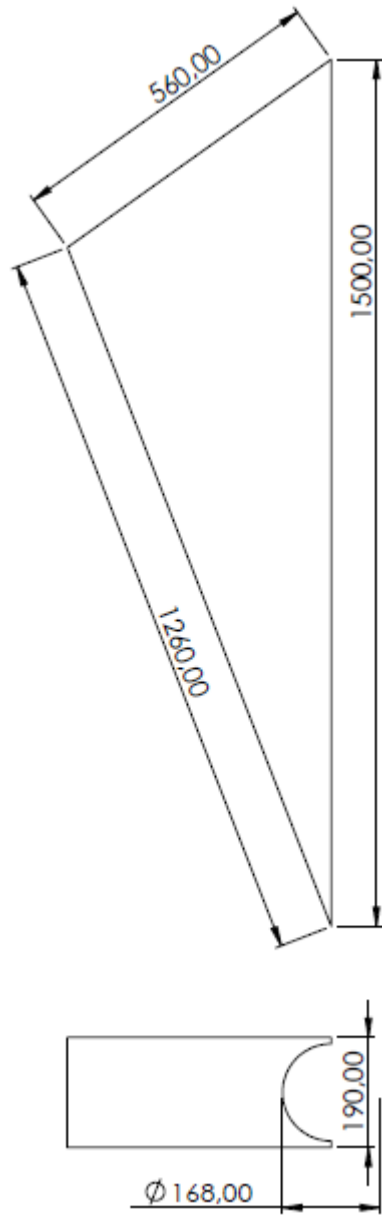
Desenho 1. Medidas da placa de captação.



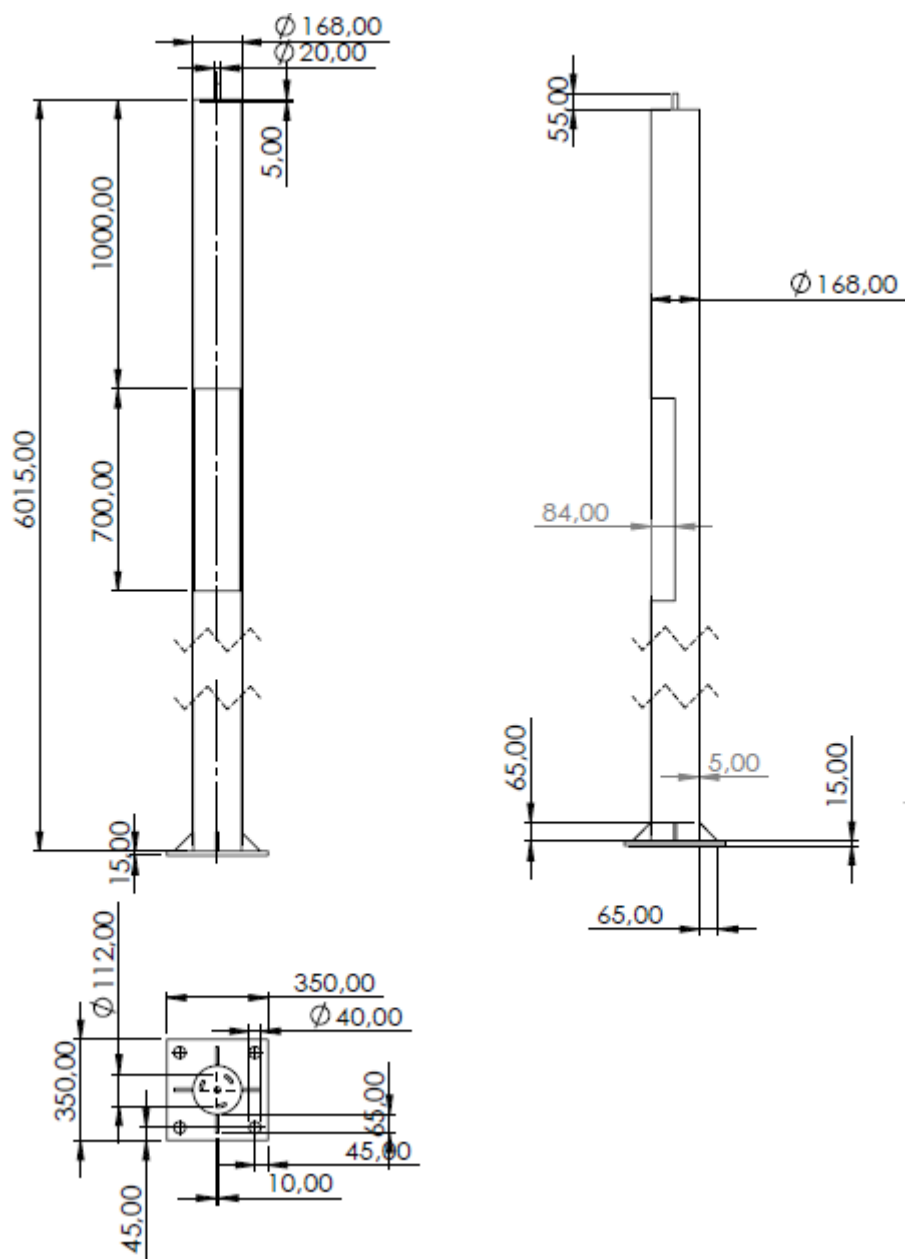
Desenho 2. Suporte de placa de captação



Desenho 3. Apoio de ligação entre a placa e o poste.

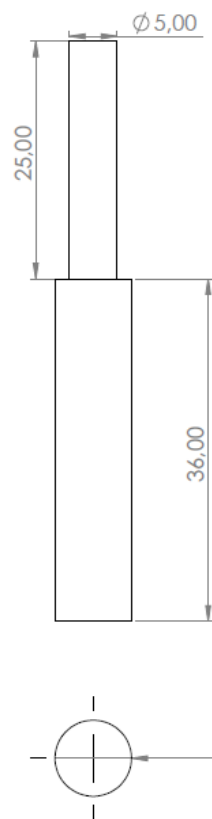


Desenho 6. Suporte para baterias.

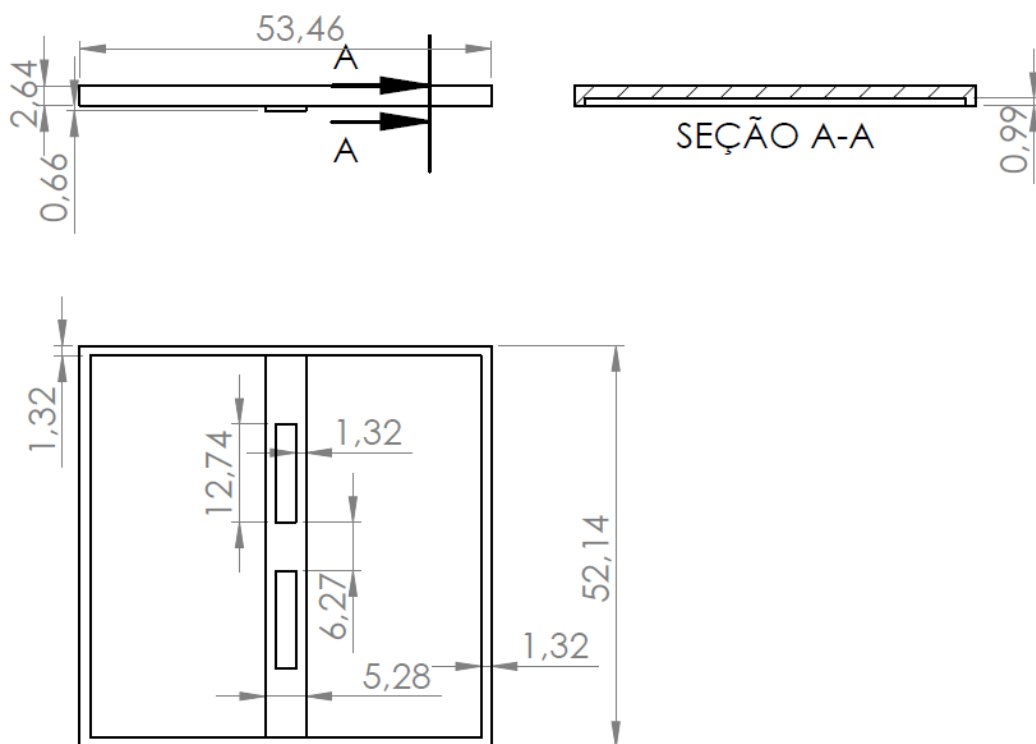


Desenho 7. Poste.

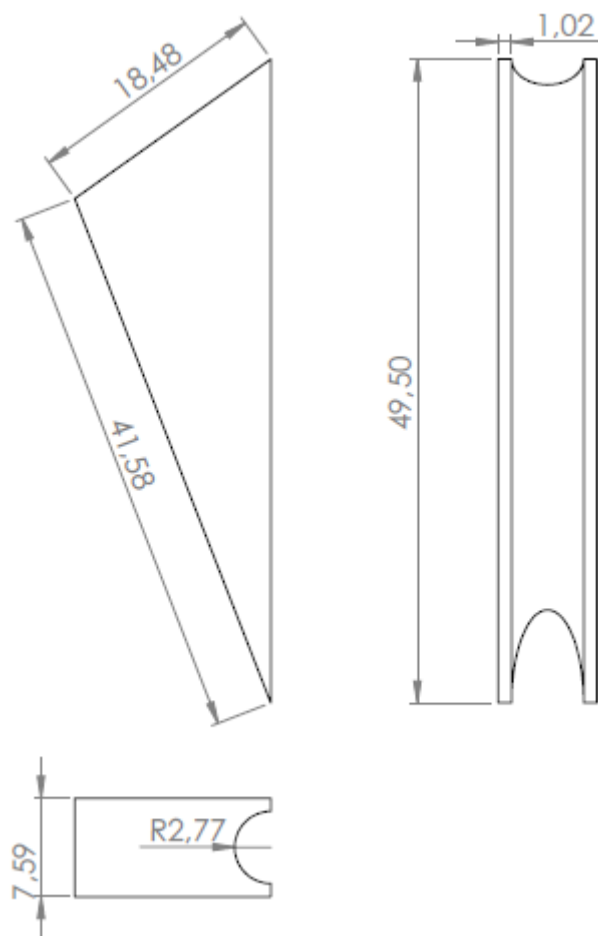
A2. Desenhos técnicos dos componentes estruturais em escala reduzida



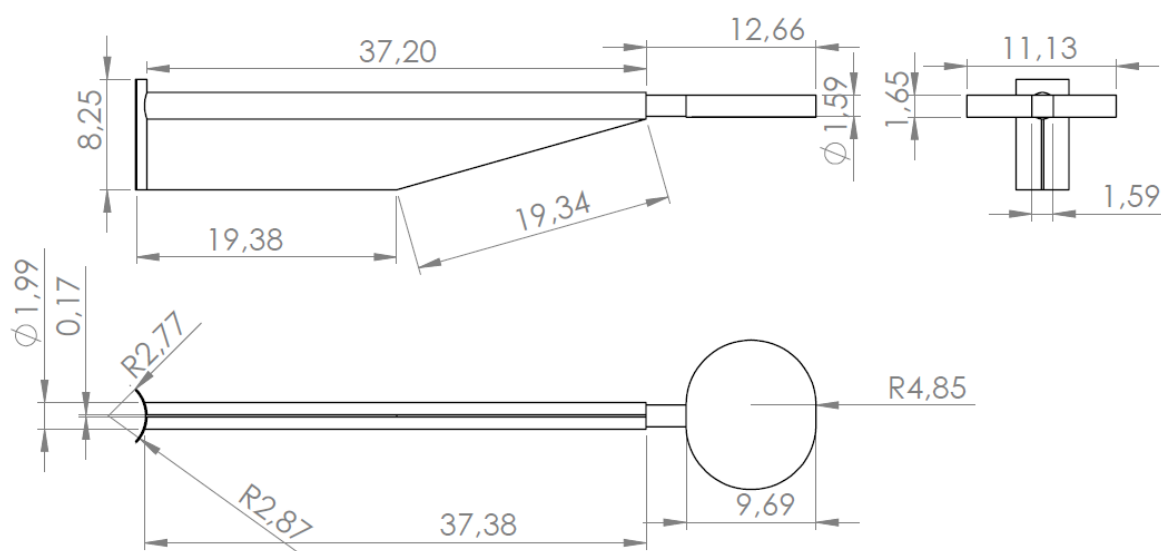
Desenho 8. Suporte para acoplamento ao túnel de vento.



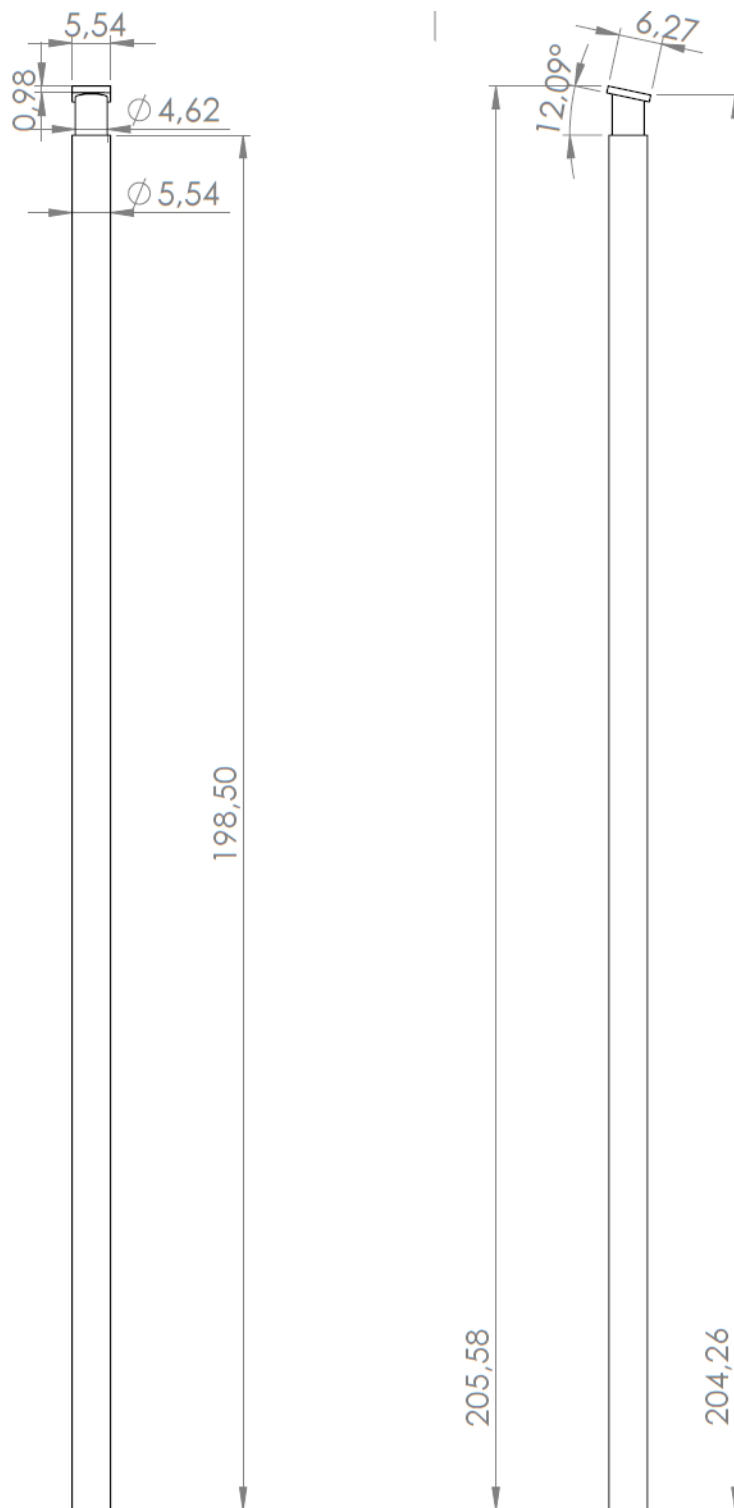
Desenho 9. Placa e suporte unidos.



Desenho 10. Suporte de baterias.



Desenho 11. Haste para luminária.



Desenho 12. Poste com suporte de acoplamento a placa.

A3. Resultados para primeira camada de células na camada limite

Configuração lateral, esquerda e direita:

v [m/s]	ρ [kg/m ³]	Reynolds	C_f	τ_w	U_t	y [mm] ($k - \varepsilon$)	y [mm] ($k - \omega$)
1	1,2043	108.995,06	0,00570	0,00343	0,05339	5627,28279	187,57609
2	1,2043	217.990,11	0,00496	0,01195	0,09963	3015,58618	100,51954
3	1,2043	326.985,17	0,00458	0,02480	0,14351	2093,58024	69,78601
4	1,2043	435.980,23	0,00432	0,04163	0,18591	1616,01262	53,86709
5	1,2043	544.975,28	0,00413	0,06220	0,22726	1321,98259	44,06609
6	1,2043	653.970,34	0,00398	0,08636	0,26779	1121,92187	37,39740
7	1,2043	762.965,40	0,00386	0,11398	0,30764	976,58602	32,55287
8	1,2043	871.960,45	0,00376	0,14495	0,34693	865,99972	28,86666
9	1,2043	980.955,51	0,00367	0,17918	0,38572	778,89781	25,96326
10	1,2043	1.089.950,56	0,00360	0,21660	0,42409	708,43293	23,61443
11	1,2043	1.198.945,62	0,00353	0,25714	0,46207	650,19754	21,67325
12	1,2043	1.307.940,68	0,00347	0,30074	0,49971	601,22304	20,04077
13	1,2043	1.416.935,73	0,00341	0,34734	0,53704	559,43512	18,64784
14	1,2043	1.525.930,79	0,00336	0,39691	0,57408	523,33949	17,44465
15	1,2043	1.634.925,85	0,00332	0,44939	0,61086	491,83180	16,39439
16	1,2043	1.743.920,90	0,00327	0,50475	0,64739	464,07776	15,46926
17	1,2043	1.852.915,96	0,00323	0,56295	0,68369	439,43507	14,64784
18	1,2043	1.961.911,02	0,00320	0,62395	0,71979	417,40100	13,91337
19	1,2043	2.070.906,07	0,00316	0,68773	0,75568	397,57631	13,25254
20	1,2043	2.179.901,13	0,00313	0,75425	0,79138	379,63981	12,65466
21	1,2043	2.288.896,19	0,00310	0,82349	0,82691	363,33010	12,11100
22	1,2043	2.397.891,24	0,00307	0,89541	0,86226	348,43224	11,61441
23	1,2043	2.506.886,30	0,00305	0,97000	0,89746	334,76781	11,15893
24	1,2043	2.615.881,36	0,00302	1,04723	0,93250	322,18745	10,73958
25	1,2043	2.724.876,41	0,00299	1,12708	0,96740	310,56516	10,35217
26	1,2043	2.833.871,47	0,00297	1,20952	1,00215	299,79386	9,99313
27	1,2043	2.942.866,52	0,00295	1,29454	1,03678	289,78196	9,65940
28	1,2043	3.051.861,58	0,00293	1,38212	1,07127	280,45069	9,34836
29	1,2043	3.160.856,64	0,00291	1,47224	1,10565	271,73185	9,05773
30	1,2043	3.269.851,69	0,00289	1,56488	1,13990	263,56614	8,78554

Configuração frontal ou posterior:

v [m/s]	ρ [kg/m ³]	Reynolds	C_f	τ_w	U_t	y [mm] ($k - \varepsilon$)	y [mm] ($k - \omega$)
1	1,2043	105.310,75	0,00574	0,00346	0,05357	5607,96549	186,93218
2	1,2043	210.621,51	0,00500	0,01204	0,09997	3005,23430	100,17448
3	1,2043	315.932,26	0,00461	0,02497	0,14400	2086,39341	69,54645
4	1,2043	421.243,02	0,00435	0,04191	0,18655	1610,46518	53,68217
5	1,2043	526.553,77	0,00416	0,06263	0,22805	1317,44450	43,91482
6	1,2043	631.864,53	0,00401	0,08696	0,26871	1118,07055	37,26902
7	1,2043	737.175,28	0,00389	0,11477	0,30870	973,23361	32,44112
8	1,2043	842.486,04	0,00379	0,14595	0,34812	863,02692	28,76756
9	1,2043	947.796,79	0,00370	0,18042	0,38705	776,22401	25,87413
10	1,2043	1.053.107,54	0,00362	0,21810	0,42555	706,00103	23,53337
11	1,2043	1.158.418,30	0,00355	0,25891	0,46367	647,96555	21,59885
12	1,2043	1.263.729,05	0,00349	0,30281	0,50144	599,15917	19,97197
13	1,2043	1.369.039,81	0,00344	0,34974	0,53889	557,51469	18,58382
14	1,2043	1.474.350,56	0,00339	0,39965	0,57606	521,54298	17,38477
15	1,2043	1.579.661,32	0,00334	0,45249	0,61296	490,14345	16,33811
16	1,2043	1.684.972,07	0,00330	0,50823	0,64962	462,48468	15,41616
17	1,2043	1.790.282,83	0,00326	0,56683	0,68605	437,92658	14,59755
18	1,2043	1.895.593,58	0,00322	0,62826	0,72227	415,96815	13,86560
19	1,2043	2.000.904,33	0,00319	0,69248	0,75828	396,21151	13,20705
20	1,2043	2.106.215,09	0,00315	0,75946	0,79411	378,33658	12,61122
21	1,2043	2.211.525,84	0,00312	0,82917	0,82975	362,08286	12,06943
22	1,2043	2.316.836,60	0,00309	0,90159	0,86523	347,23614	11,57454
23	1,2043	2.422.147,35	0,00307	0,97669	0,90055	333,61862	11,12062
24	1,2043	2.527.458,11	0,00304	1,05446	0,93571	321,08145	10,70271
25	1,2043	2.632.768,86	0,00302	1,13485	0,97073	309,49905	10,31664
26	1,2043	2.738.079,62	0,00299	1,21787	1,00561	298,76473	9,95882
27	1,2043	2.843.390,37	0,00297	1,30348	1,04035	288,78720	9,62624
28	1,2043	2.948.701,12	0,00295	1,39166	1,07496	279,48796	9,31627
29	1,2043	3.054.011,88	0,00293	1,48240	1,10946	270,79905	9,02663
30	1,2043	3.159.322,63	0,00291	1,57567	1,14383	262,66137	8,75538

Configuração considerando o diâmetro do poste:

v [m/s]	ρ [kg/m ³]	Reynolds	C_f	τ_w	U_t	y [mm] ($k - \varepsilon$)	y [mm] ($k - \omega$)
1	1,2043	11.303,19	0,00897	0,00540	0,06697	4486,19521	149,53984
2	1,2043	22.606,38	0,00781	0,01881	0,12497	2404,09248	80,13642
3	1,2043	33.909,57	0,00720	0,03902	0,18001	1669,04881	55,63496
4	1,2043	45.212,76	0,00680	0,06550	0,23320	1288,32126	42,94404
5	1,2043	56.515,96	0,00650	0,09787	0,28507	1053,91397	35,13047
6	1,2043	67.819,15	0,00627	0,13589	0,33590	894,42111	29,81404
7	1,2043	79.122,34	0,00608	0,17934	0,38589	778,55613	25,95187
8	1,2043	90.425,53	0,00592	0,22807	0,43517	690,39427	23,01314
9	1,2043	101.728,72	0,00578	0,28193	0,48383	620,95469	20,69849
10	1,2043	113.031,91	0,00566	0,34080	0,53196	564,77851	18,82595
11	1,2043	124.335,10	0,00555	0,40458	0,57961	518,35197	17,27840
12	1,2043	135.638,29	0,00546	0,47318	0,62682	479,30841	15,97695
13	1,2043	146.941,48	0,00537	0,54651	0,67364	445,99414	14,86647
14	1,2043	158.244,67	0,00529	0,62450	0,72010	417,21790	13,90726
15	1,2043	169.547,87	0,00522	0,70708	0,76623	392,09927	13,06998
16	1,2043	180.851,06	0,00515	0,79418	0,81206	369,97313	12,33244
17	1,2043	192.154,25	0,00509	0,88575	0,85760	350,32743	11,67758
18	1,2043	203.457,44	0,00503	0,98173	0,90287	332,76138	11,09205
19	1,2043	214.760,63	0,00498	1,08208	0,94789	316,95669	10,56522
20	1,2043	226.063,82	0,00493	1,18674	0,99267	302,65731	10,08858
21	1,2043	237.367,01	0,00488	1,29568	1,03723	289,65485	9,65516
22	1,2043	248.670,20	0,00483	1,40885	1,08158	277,77794	9,25926
23	1,2043	259.973,39	0,00479	1,52620	1,12573	266,88435	8,89615
24	1,2043	271.276,58	0,00475	1,64772	1,16969	256,85501	8,56183
25	1,2043	282.579,78	0,00471	1,77335	1,21346	247,58946	8,25298
26	1,2043	293.882,97	0,00468	1,90307	1,25706	239,00234	7,96674
27	1,2043	305.186,16	0,00464	2,03684	1,30049	231,02064	7,70069
28	1,2043	316.489,35	0,00461	2,17464	1,34376	223,58154	7,45272
29	1,2043	327.792,54	0,00457	2,31643	1,38687	216,63068	7,22102
30	1,2043	339.095,73	0,00454	2,46219	1,42984	210,12080	7,00403

A4. Resultados para a espessura da camada limite

Espessura da camada limite para o túnel de vento sem obstrução:

v [m/s]	ρ [kg/m ³]	Reynolds	Espessura para solução exata de Blausius [cm]	Espessura para perfil polinomial aproximado [cm]	Espessura para escoamento turbulento [cm]
1	1,2043	20.184,27	1,40774	1,54289	2,10436
2	1,2043	40.368,54	0,99542	1,09099	1,83195
3	1,2043	60.552,81	0,81276	0,89079	1,68926
4	1,2043	80.737,08	0,70387	0,77144	1,59481
5	1,2043	100.921,35	0,62956	0,69000	1,52520
6	1,2043	121.105,62	0,57471	0,62988	1,47059
7	1,2043	141.289,89	0,53208	0,58316	1,42594
8	1,2043	161.474,16	0,49771	0,54549	1,38836
9	1,2043	181.658,43	0,46925	0,51430	1,35604
10	1,2043	201.842,70	0,44517	0,48790	1,32776
11	1,2043	222.026,97	0,42445	0,46520	1,30269
12	1,2043	242.211,24	0,40638	0,44539	1,28022
13	1,2043	262.395,51	0,39044	0,42792	1,25989
14	1,2043	282.579,78	0,37624	0,41235	1,24135
15	1,2043	302.764,05	0,36348	0,39837	1,22434
16	1,2043	322.948,32	0,35194	0,38572	1,20864
17	1,2043	343.132,59	0,34143	0,37420	1,19407
18	1,2043	363.316,85	0,33181	0,36366	1,18050
19	1,2043	383.501,12	0,32296	0,35396	1,16780
20	1,2043	403.685,39	0,31478	0,34500	1,15589
21	1,2043	423.869,66	0,30719	0,33669	1,14466
22	1,2043	444.053,93	0,30013	0,32894	1,13406
23	1,2043	464.238,20	0,29353	0,32171	1,12402
24	1,2043	484.422,47	0,28735	0,31494	1,11450
25	1,2043	504.606,74	0,28155	0,30858	1,10543
26	1,2043	524.791,01	0,27608	0,30258	1,09680
27	1,2043	544.975,28	0,27092	0,29693	1,08855
28	1,2043	565.159,55	0,26604	0,29158	1,08066
29	1,2043	585.343,82	0,26141	0,28651	1,07310
30	1,2043	605.528,09	0,25702	0,28169	1,06585

A5. Resultados simulação

Resultados de simulação para ambos os *solvers* na configuração frontal:

v [m/s]	Reynolds	F [N] Fluent ($k - \omega$)	C_D	F [N] CFX ($k - \omega$)	C_D	F [N] Fluent ($k - \epsilon$)	C_D	F [N] CFX ($k - \epsilon$)	C_D
4	421.243,02	15,382	0,8315	20,7105	1,1196	14,9533	0,8084	20,0801	1,0855
5	526.553,77	23,9731	0,8294	32,451	1,1227	23,3681	0,8085	33,002	1,1418
6	631.864,53	34,5137	0,8292	46,7013	1,1220	34,4948	0,8288	45,9239	1,1034
7	737.175,28	46,9975	0,8296	63,5441	1,1217	45,6215	0,8053	63,7367	1,1251
8	842.486,04	61,3401	0,8290	81,7425	1,1047	60,4971	0,8176	81,5495	1,1021
9	947.796,79	77,6558	0,8292	103,433	1,1045	75,3727	0,8048	103,25475	1,1026
10	1.053.107,54	97,3668	0,8422	127,675	1,1043	94,190	0,8147	124,960	1,0808
12	1.263.729,05	141,045	0,8472	183,82	1,1041	135,710	0,8151	179,826	1,0801
14	1.474.350,56	192,372	0,8489	250,184	1,1040	185,693	0,8195	244,638	1,0796
16	1.684.972,07	251,313	0,8491	326,752	1,1040	239,978	0,8108	319,416	1,0792
18	1.895.593,58	315,745	0,8429	413,527	1,1039	304,638	0,8132	404,117	1,0788
20	2.106.215,09	389,816	0,8429	510,511	1,1039	376,013	0,8131	498,757	1,0785
22	2.316.836,60	470,828	0,8414	617,706	1,1039	455,839	0,8146	603,335	1,0782
24	2.527.458,11	560,626	0,8418	735,113	1,1039	543,585	0,8163	717,848	1,0779
26	2.738.079,62	657,612	0,8414	862,73	1,1039	639,234	0,8179	842,296	1,0777
28	2.948.701,12	762,688	0,8414	1000,55	1,1038	738,256	0,8145	976,676	1,0775
30	3.159.322,63	876,148	0,8420	1148,58	1,1038	846,510	0,8135	1120,990	1,0773
		MÉDIA	0,8378	MÉDIA	1,1082	MÉDIA	0,8121	MÉDIA	1,0898

v [m/s]	Reynolds	F [N] Fluent (SST)	C_D	F [N] CFX (SST)	C_D
4	421.243,02	14,8856	0,8047	20,7105	1,1196
5	526.553,77	24,20075	0,8373	33,59415	1,1623
6	631.864,53	33,5159	0,8053	46,4778	1,1167
7	737.175,28	46,42495	0,8195	64,49065	1,1384
8	842.486,04	59,334	0,8019	82,5035	1,1150
9	947.796,79	77,0534	0,8228	104,64225	1,1174
10	1.053.107,54	94,7728	0,8197	126,781	1,0966
12	1.263.729,05	136,393	0,8192	182,42	1,0957
14	1.474.350,56	185,811	0,8200	248,142	1,0950
16	1.684.972,07	241,574	0,8162	323,948	1,0945
18	1.895.593,58	307,82	0,8217	409,838	1,0941
20	2.106.215,09	380,432	0,8226	505,809	1,0937
22	2.316.836,60	456,653	0,8161	611,861	1,0934
24	2.527.458,11	543,172	0,8156	727,992	1,0932
26	2.738.079,62	638,351	0,8168	854,202	1,0929
28	2.948.701,12	745,392	0,8223	990,49	1,0927
30	3.159.322,63	847,111	0,8141	1136,86	1,0926
		MÉDIA	0,8174	MÉDIA	1,1061

Resultados de simulação para ambos os *solvers* na configuração esquerda:

v [m/s]	Reynolds	F [N] Fluent ($k - \omega$)	C_D	F [N] CFX ($k - \omega$)	C_D	F [N] Fluent ($k - \epsilon$)	C_D	F [N] CFX ($k - \epsilon$)	C_D
4	301.418,43	10,1329	0,9390	12,4858	1,1571	10,0173	0,9283	12,4335	1,1522
5	376.773,03	14,56578	0,8639	20,01345	1,1870	13,60758	0,8071	19,96055	1,1839
6	452.127,64	20,2465	0,8339	27,9864	1,1527	19,3301	0,7962	27,8806	1,1483
7	527.482,25	27,97	0,8464	38,8171	1,1746	26,6987	0,8079	38,67405	1,1703
8	602.836,86	35,6935	0,8269	49,6478	1,1502	34,0673	0,7893	49,4675	1,1461
9	678.191,46	47,8633	0,8762	63,179	1,1565	44,30885	0,8111	62,7622	1,1489
10	753.546,07	60,0331	0,8901	76,7102	1,1374	54,5504	0,8088	76,0569	1,1277
12	904.255,28	80,2405	0,8262	110,351	1,1363	80,7251	0,8312	109,4	1,1265
14	1.054.964,50	109,3073	0,8269	150,057	1,1352	105,696	0,7996	148,774	1,1255
16	1.205.673,71	138,374	0,8015	195,876	1,1345	137,653	0,7973	194,176	1,1247
18	1.356.382,92	182,297	0,8343	247,785	1,1340	174,696	0,7995	245,605	1,1240
20	1.507.092,14	214,68	0,7958	305,746	1,1334	217,569	0,8065	303,057	1,1234
21	1.582.446,75	239,501	0,8053	337,025	1,1332	239,3705	0,8048	334,7945	1,1257
22	1.657.801,35	258,013	0,7904	369,823	1,1330	261,172	0,8001	366,532	1,1229
23	1.733.155,96	284,526	0,7975	404,145	1,1328	291,1995	0,8162	401,2795	1,1248
24	1.808.510,57	308,136	0,7932	439,989	1,1326	321,227	0,8269	436,027	1,1224
25	1.883.865,17	336,1505	0,7975	477,357	1,1325	349,524	0,8292	473,7845	1,1240
26	1.959.219,78	364,165	0,7988	516,248	1,1323	377,821	0,8287	511,542	1,1220
27	2.034.574,39	391,272	0,7958	556,662	1,1322	402,384	0,8184	552,308	1,1234
28	2.109.928,99	420,032	0,7944	598,597	1,1321	426,947	0,8075	593,074	1,1217
29	2.185.283,60	453,604	0,7997	641,983	1,1319	456,5505	0,8049	636,8485	1,1228
30	2.260.638,21	483,148	0,7960	686,956	1,1318	486,154	0,8009	680,623	1,1213
		MÉDIA	0,8241	MÉDIA	1,1415	MÉDIA	0,8146	MÉDIA	1,1333

Resultados de simulação para ambos os *solvers* na configuração direita:

v [m/s]	Reynolds	F [N] Fluent ($k - \omega$)	C_D	F [N] CFX ($k - \omega$)	C_D	F [N] Fluent ($k - \epsilon$)	C_D	F [N] CFX ($k - \epsilon$)	C_D
4	301.418,43	8,49379	0,7871	12,4668	1,1553	8,20769	0,7606	12,3954	1,1487
6	452.127,64	19,1354	0,7881	27,9601	1,1516	18,4164	0,7585	27,7963	1,1449
8	602.836,86	33,9149	0,7857	49,6242	1,1497	32,7324	0,7583	49,3184	1,1426
9	678.191,46	43,87	0,8031	62,98885	1,1530	42,30205	0,7744	62,3884	1,1421
10	753.546,07	53,8251	0,7981	76,3535	1,1321	51,8717	0,7691	75,4584	1,1189
12	904.255,28	77,0255	0,7931	109,864	1,1313	74,8375	0,7706	108,538	1,1176
14	1.054.964,50	105,16	0,7955	149,454	1,1306	101,975	0,7714	147,607	1,1167
16	1.205.673,71	137,672	0,7974	195,122	1,1301	133,649	0,7741	192,651	1,1158
18	1.356.382,92	170,868	0,7820	246,866	1,1298	167,862	0,7682	243,674	1,1151
20	1.507.092,14	214,315	0,7944	304,667	1,1294	205,932	0,7634	300,671	1,1145
22	1.657.801,35	259,106	0,7938	368,553	1,1291	252,771	0,7744	363,644	1,1140
24	1.808.510,57	307,184	0,7908	438,512	1,1288	298,064	0,7673	432,588	1,1136
26	1.959.219,78	361,131	0,7921	514,543	1,1286	350,222	0,7682	507,514	1,1132
28	2.109.928,99	420,737	0,7957	596,642	1,1284	408,832	0,7732	588,4	1,1128
30	2.260.638,21	481,701	0,7936	700,538	1,1541	466,898	0,7692	675,253	1,1125
		MÉDIA	0,7927	MÉDIA	1,1375	MÉDIA	0,7681	MÉDIA	1,1229

Resultados de simulação para ambos os *solvers* na configuração posterior:

v [m/s]	Reynolds	F [N] Fluent ($k - \omega$)	C_D	F [N] CFX ($k - \omega$)	C_D	F [N] Fluent ($k - \epsilon$)	C_D	F [N] CFX ($k - \epsilon$)	C_D
4	421.243,02	19,0253	1,0285	20,8735	1,1284	15,6484	0,8459	20,6164	1,1145
5	526.553,77	25,3015	0,8754	32,5885	1,1275	24,2328	0,8384	32,1746	1,1132
6	631.864,53	40,5778	0,9749	46,9038	1,1269	35,99	0,8647	46,2917	1,1122
7	737.175,28	50,682	0,8946	63,8201	1,1265	47,7472	0,8428	62,9674	1,1115
8	842.486,04	66,1216	0,8936	83,3386	1,1263	62,86775	0,8496	82,2017	1,1109
9	947.796,79	81,5612	0,8709	105,46	1,1261	77,9883	0,8328	104,3524	1,1143
10	1.053.107,54	96,937	0,8384	128,901	1,1149	97,7614	0,8456	126,503	1,0942
12	1.263.729,05	144,065	0,8653	185,585	1,1147	141,531	0,8501	182,046	1,0935
14	1.474.350,56	195,015	0,8606	252,577	1,1146	192,546	0,8497	247,66	1,0929
16	1.684.972,07	253,696	0,8572	329,872	1,1145	250,152	0,8452	323,341	1,0925
18	1.895.593,58	320,583	0,8558	417,493	1,1145	313,325	0,8364	409,077	1,0921
20	2.106.215,09	396,784	0,8580	515,427	1,1145	381,544	0,8250	504,894	1,0918
21	2.211.525,84	439,711	0,8624	568,26	1,1145	422,9835	0,8296	557,8285	1,0941
22	2.316.836,60	483,7495	0,8645	623,67	1,1145	464,423	0,8300	610,763	1,0915
23	2.422.147,35	527,788	0,8630	681,658	1,1145	508,9375	0,8321	668,727	1,0934
24	2.527.458,11	566,812	0,8511	742,225	1,1145	553,452	0,8311	726,691	1,0912
25	2.632.768,86	614,499	0,8504	805,369	1,1145	605,3505	0,8377	789,6845	1,0928
26	2.738.079,62	662,018	0,8470	871,089	1,1146	657,249	0,8409	852,678	1,0910
27	2.843.390,37	723,44	0,8583	939,388	1,1146	704,0105	0,8353	920,7	1,0924
28	2.948.701,12	780,898	0,8615	1010,26	1,1146	750,772	0,8283	988,722	1,0908
29	3.054.011,88	841,752	0,8657	1083,72	1,1146	808,85	0,8319	1061,771	1,0920
30	3.159.322,63	887,074	0,8525	1159,75	1,1146	866,928	0,8332	1134,82	1,0906
		MÉDIA	0,8677	MÉDIA	1,1175	MÉDIA	0,8386	MÉDIA	1,0971

A6. Resultados experimentais

Resultado na configuração frontal:

v [m/s]	RESULTADO 1		RESULTADO 2		RESULTADO 3		RESULTADO 4	
	$F[N]$	C_D	$F[N]$	C_D	$F[N]$	C_D	$F[N]$	C_D
4,974	0,010	0,299	0,020	0,605	0,030	0,907	0,025	0,761
5,9128	0,038	0,805	0,035	0,749	0,040	0,856	0,030	0,646
6,1475	0,045	0,882	0,038	0,743	0,044	0,866	0,034	0,673
6,8516	0,053	0,833	0,045	0,717	0,055	0,877	0,045	0,722
7,321	0,058	0,802	0,053	0,733	0,060	0,838	0,051	0,710
7,7904	0,071	0,864	0,060	0,740	0,065	0,801	0,056	0,695
8,4945	0,090	0,924	0,075	0,778	0,080	0,830	0,067	0,694
8,7292	0,096	0,933	0,080	0,786	0,085	0,835	0,070	0,692
9,668	0,120	0,951	0,100	0,801	0,105	0,841	0,080	0,645
10,6068	0,144	0,948	0,120	0,798	0,120	0,798	0,100	0,670
10,8415	0,150	0,945	0,128	0,812	0,126	0,804	0,104	0,665
11,5456	0,174	0,967	0,150	0,842	0,145	0,814	0,115	0,650
12,015	0,190	0,975	0,165	0,855	0,155	0,803	0,123	0,639
12,4844	0,204	0,969	0,180	0,864	0,165	0,792	0,130	0,628
13,1885	0,225	0,958			0,184	0,791	0,145	0,628
13,4232	0,225	0,925			0,190	0,789	0,150	0,627
14,362	0,225	0,808						
15,5355	0,265	0,813						
16,709	0,305	0,809						
	Média:	0,895	Média:	0,786	Média:	0,828	Média:	0,672

Resultado na configuração posterior:

	RESULTADO 1		RESULTADO 2		RESULTADO 3		RESULTADO 4	
v [m/s]	$F[N]$	C_D	$F[N]$	C_D	$F[N]$	C_D	$F[N]$	C_D
4,974	0,040	1,198	0,025	0,756	0,035	1,059	0,025	0,761
5,9128	0,062	1,305	0,040	0,856	0,045	0,963	0,040	0,862
6,1475	0,067	1,313	0,044	0,866	0,049	0,965	0,044	0,872
6,8516	0,081	1,275	0,055	0,877	0,060	0,956	0,055	0,883
7,321	0,090	1,244	0,063	0,873	0,068	0,942	0,063	0,878
7,7904	0,106	1,299	0,070	0,863	0,075	0,925	0,070	0,869
8,4945	0,131	1,345	0,085	0,881	0,090	0,933	0,085	0,887
8,7292	0,139	1,349	0,090	0,884	0,095	0,933	0,090	0,890
9,668	0,170	1,347	0,115	0,921	0,120	0,961	0,110	0,887
10,6068	0,204	1,340	0,148	0,984	0,145	0,964	0,140	0,937
10,8415	0,212	1,336	0,157	0,996	0,153	0,971	0,145	0,929
11,0762	0,222	1,338	0,165	1,006	0,160	0,976	0,150	0,921
11,5456	0,241	1,338	0,165	0,926	0,170	0,954	0,160	0,904
12,015	0,260	1,334	0,180	0,933	0,180	0,933	0,170	0,887
12,4844	0,274	1,302	0,195	0,936	0,190	0,912		
13,1885	0,295	1,256						
14,362	0,330	1,185						
	Média:	1,300	Média:	0,904	Média:	0,957	Média:	0,883

Resultado na configuração direita:

v [m/s]	RESULTADO 1		RESULTADO 2		RESULTADO 3		RESULTADO 4	
	$F[N]$	C_D	$F[N]$	C_D	$F[N]$	C_D	$F[N]$	C_D
4,974	0,010	0,386	0,010	0,390	0,025	0,975	0,020	0,785
5,9128	0,024	0,666	0,025	0,690	0,033	0,911	0,030	0,833
6,1475	0,028	0,708	0,028	0,721	0,035	0,887	0,031	0,803
6,8516	0,032	0,655	0,038	0,781	0,040	0,822	0,035	0,724
7,321	0,035	0,624	0,044	0,783	0,045	0,810	0,043	0,770
7,7904	0,041	0,645	0,049	0,779	0,050	0,795	0,050	0,800
8,4945	0,050	0,662	0,057	0,765	0,058	0,769	0,054	0,723
8,7292	0,054	0,677	0,060	0,760	0,060	0,760	0,055	0,701
9,668	0,070	0,715	0,074	0,764	0,070	0,722	0,065	0,675
10,6068	0,080	0,676	0,090	0,772	0,085	0,729	0,080	0,691
10,8415	0,082	0,666	0,094	0,769	0,089	0,733	0,084	0,692
11,5456	0,093	0,665	0,105	0,760	0,102	0,738	0,095	0,692
12,015	0,100	0,662	0,113	0,752	0,111	0,742	0,103	0,690
12,4844	0,108	0,662	0,120	0,743	0,120	0,743	0,110	0,685
13,1885	0,120	0,659						
14,362	0,140	0,648						
15,5355	0,160	0,633						
16,709	0,185	0,633						
	Média:	0,647	Média:	0,731	Média:	0,795	Média:	0,733

Resultado na configuração esquerda:

	RESULTADO		RESULTADO		RESULTADO	
	2		3		4	
v [m/s]	$F[N]$	C_D	$F[N]$	C_D	$F[N]$	C_D
4,974	0,020	0,780	0,025	0,975	0,025	0,981
5,9128	0,040	1,104	0,035	0,966	0,035	0,972
6,8516	0,050	1,028	0,045	0,925	0,045	0,931
7,7904	0,060	0,954	0,055	0,874	0,055	0,880
8,7292	0,075	0,950	0,065	0,823	0,065	0,829
9,668	0,090	0,929	0,080	0,826	0,080	0,831
10,6068	0,105	0,900	0,100	0,858	0,095	0,820
11,5456	0,122	0,883	0,110	0,796	0,105	0,765
12,4844	0,147	0,910	0,130	0,805	0,120	0,748
	Média:	0,937	Média:	0,872	Média:	0,862