

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

Pedro Henrique Araújo

**CARACTERIZAÇÃO DO ESCOAMENTO DO TÚNEL DE VENTO DE CIRCUITO
FECHADO DO LABORATÓRIO DE AERODINÂMICA EXPERIMENTAL DA
UFMG VIA FLUIDODINÂMICA COMPUTACIONAL E EXPERIMENTAÇÃO
UTILIZANDO UM MODELO EM ESCALA REAL**

Belo Horizonte
2024

Pedro Henrique Araújo

**CARACTERIZAÇÃO DO ESCOAMENTO DO TÚNEL DE VENTO DE CIRCUITO
FECHADO DO LABORATÓRIO DE AERODINÂMICA EXPERIMENTAL DA
UFMG VIA FLUIDODINÂMICA COMPUTACIONAL E EXPERIMENTAÇÃO
UTILIZANDO UM MODELO EM ESCALA REAL**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Minas Gerais como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica, área de concentração: Projetos e Sistemas.

Orientador: Guilherme Papini

Belo Horizonte
2024

Araújo, Pedro Henrique.

A663c Caracterização do escoamento do túnel de vento de circuito fechado do laboratório de aerodinâmica experimental da UFMG via fluidodinâmica computacional e experimentação utilizando um modelo em escala real [recurso eletrônico] / Pedro Henrique Araújo. - 2024.

1 recurso online (86 f. : il., color.) : pdf.

Orientador: Guilherme de Souza Papini.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.

Apêndices: f. 87-93.

Inclui bibliografia.

Exigências do sistema: Adobe Acrobat Reader.

1. Engenharia mecânica - Teses. 2. Fluidodinâmica computacional - Teses. 3. Aerodinâmica - Teses. 4. Dinâmica dos fluidos computacional - Teses. I. Papini, Guilherme de Souza. II. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. III. Título.

CDU: 621(043)



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

ESCOLA DE ENGENHARIA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

FOLHA DE APROVAÇÃO

***CARACTERIZAÇÃO DO ESCOAMENTO DO TÚNEL DE VENTO DE
CIRCUITO FECHADO DO LABORATÓRIO DE AERODINÂMICA
EXPERIMENTAL DA UFMG VIA FLUIDODINÂMICA
COMPUTACIONAL E EXPERIMENTAÇÃO UTILIZANDO UM MODELO
EM ESCALA REAL***

PEDRO HENRIQUE ARAÚJO

Dissertação submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Minas Gerais, constituída pelos Professores: Dr. Guilherme de Souza Papini (Orientador - Departamento de Engenharia Mecânica/UFMG), Dr. Joel Laguárdia Campos Reis (Departamento de Engenharia Mecânica/UFMG), Dr. Ricardo Poley Martins Ferreira (Departamento de Engenharia Mecânica/UFMG), Dr. Ricardo Luiz Utsch de Freitas Pinto (Departamento de Engenharia Mecânica/UFMG) e Dr^a Aline Amaral Quintella Abdu (Siemens Digital Industries Software/Siemens Software), como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de "**Mestre em Engenharia Mecânica**", na área de concentração de "**Projeto e Sistemas**".

Dissertação aprovada no dia 21 de março de 2024.

Por:



Documento assinado eletronicamente por **Ricardo Poley Martins Ferreira, Professor do Magistério Superior**, em 01/04/2024, às 22:38, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Guilherme de Souza Papini, Membro**, em 02/04/2024, às 23:17, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Joel Laguárdia Campos Reis, Professor do Magistério Superior**, em 06/04/2024, às 13:40, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Ricardo Luiz Utsch de Freitas Pinto, Professor do Magistério Superior**, em 16/04/2024, às 15:58, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Aline Amaral Quintella Abdu, Usuário Externo**, em 22/04/2024, às 14:02, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufmg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **3127572** e o código CRC **B03E026B**.

Referência: Processo nº 23072.216779/2024-11

SEI nº 312757

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à minha mãe, Stela, por ser um exemplo de força e determinação e ser meu alicerce. Agradeço ao Marcos, meu padrasto, por ser ponto de equilíbrio e companheiro, e à todos meus familiares e amigos, agradeço o carinho e a paciência.

Agradeço imensamente ao meu orientador, Prof. Dr. Guilherme de Souza Papini, por não medir esforços em ajudar e aconselhar, cedendo seu tempo e recursos para que esse trabalho fosse concluído.

Agradeço à Universidade Federal de Minas Gerais e ao Laboratório de Aerodinâmica Experimental pela utilização dos seus recursos.

Agradeço aos amigos do Fórmula UFMG pela ajuda na criação da geometria CAD do túnel de vento da UFMG.

Agradeço aos amigos da SIEMENS pelos ensinamentos diários, em especial ao time de mecânica dos fluidos computacional: Tiago Santiago, Aline Abdu e Henrique Monteiro.

Agradeço à SIEMENS pela infraestrutura computacional para as análises numéricas, pela disponibilidade de software e vasta documentação que é fonte de diversos dos conhecimentos aqui referenciados.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

RESUMO

O escoamento em uma seção de túnel de vento não se comporta da mesma forma que em um ambiente livre de perturbações. Portanto, a caracterização deste escoamento, bem como das interferências de paredes e das suportações nas medições aerodinâmicas é de grande importância para conferir confiabilidade ao projeto de uma aeronave, por exemplo, desde as fases iniciais de ensaios até a fase mais executiva, quanto ao desempenho, estabilidade e segurança desta aeronave. O objetivo desta pesquisa de mestrado é caracterizar o escoamento na seção de testes, quanto à turbulência na direção axial, e quanto ao espessamento da camada limite na seção de teste, caracterizando elementos de turbulência do túnel de circuito fechado, atmosférico, de baixa velocidade (V menor que 135 m/s), do tipo Göttingen. Para a caracterização virtual do escoamento foi elaborado um modelo tridimensional do campo de escoamento de ar no interior de todo o túnel de vento, em escala real, por meio do método dos volumes finitos, utilizando a abordagem de Reynolds-Averaged Navier-Stokes (RANS) com os modelos de turbulência para resolver as equações de Navier-Stokes em regime permanente, a saber: i) k-omega; ii) k-epsilon; iii) Spalart-Allmaras. Posteriormente, aplicando-se a variação temporal, foram estudados os métodos de resolução por escala, a saber: iv) Detached Eddy Simulation (DES); v) Large Eddy Simulation (LES). Para comparar os modelos teóricos em CFD com dados experimentais foram realizados ensaios variando-se as velocidades do escoamento na seção de teste e equipamentos de medição para correlação cruzada. Os resultados da comparação dos dados virtuais com os experimentais mostraram ótima correlação. O modelo em regime permanente, utilizando k- ω SST, apresentou acuracidade de 88,92% para a queda de pressão do escoamento que cruza a *honeycomb*. As análises transientes apresentaram resultados ainda melhores, com o método LES atingindo uma correspondência de 94,84% dos valores.

Palavras-chave: CFD; Aerodinâmica; Túnel de Vento; RANS; LES; DES.

ABSTRACT

The airflow in a wind tunnel section does not behave in the same way as it does in an undisturbed environment. Therefore, characterizing this flow, as well as the wall interferences and supports in aerodynamic measurements, is of great importance to ensure the reliability of the design of an aircraft, for example, from the early stages of testing to the most executive phase, regarding the performance, stability, and safety of this aircraft. This research work presents a comprehensive study of the turbulence and characteristics of the closed-circuit, atmospheric, low-speed (V less than 135 m/s) Göttingen-type wind tunnel. To characterize the flow, a three-dimensional model of the air flow field inside the entire wind tunnel was developed at full scale using the finite volume method, employing the Reynolds-Averaged Navier-Stokes (RANS) approach with turbulence models to solve the Navier-Stokes equations in a steady state, namely: i) k - ω ; ii) k - ϵ ; iii) Spalart-Allmaras. Subsequently, with a temporal variation applied, the resolution methods by scale were studied, namely: iv) Detached Eddy Simulation (DES); v) Large Eddy Simulation (LES). The main objective of this work is to assess the accuracy of virtual models, as computational processing capacity was provided by Siemens, allowing for the use of unstructured discrete grids containing up to approximately 200 million elements. To calibrate the theoretical CFD models and later correlate them, an experimental testing campaign was conducted in the mentioned wind tunnel. The aim of this master's research is to characterize the flow in the test section, especially with respect to axial turbulence and boundary layer thickness. The steady-state model, using k - ω SST, presented an accuracy of 88.92% for the pressure drop of the flow that crosses the honeycomb. The transient analyzes showed even better results, with the LES method achieving a correspondence of 94.84% of the values.

Keywords: CFD; Aerodynamics; Wind Tunnel; RANS; LES; DES.

ÍNDICE DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Túnel de vento do LAExp e seus componentes. Fonte: Elaborado pelo autor.....	25
Figura 2 - Estruturas de turbilhões (eddies) durante etapa de dissipação de energia. Fonte: Adaptado de Richardson (1922).....	29
Figura 3 – (a) Modelagem da turbulência aplicada no conceito de cascata de energia. (b) Exemplo de escoamento por métodos de modelagem ou solução. Fonte: Adaptado de Çengel e Cimbala (2013)	29
Figura 4 - Fluxo de trabalho virtual para preparação e execução das análises numéricas. Fonte: Elaborado pelo autor.	37
Figura 5 - Geometria em CAD do Túnel de Vento do LAExp da UFMG. Fonte: LaExp.....	38
Figura 6 - Domínio rotativo via MRF, relativo à região do motor. Fonte: Elaborado pelo autor.	39
Figura 7 - Domínio estacionário, relativo à região do túnel sem o motor. Fonte: Elaborado pelo autor.....	40
Figura 8 - Região da honeycomb definida no modelo computacional como um meio poroso com valores de resistência porosas e inerciais calculadas, como Apêndice 1. Fonte: Elaborado pelo autor.....	40
Figura 9 - Modelos de malha volumétrica disponíveis no Simcenter STAR-CCM+: (a) modelo de célula cartesiana, (b) modelo de célula poliédrica e (c) modelo de célula tetraédrica. Fonte: Adaptado de (SIEMENS, 2023).	41
Figura 10 - Plano cortado do domínio para visualização da malha gerada em seu nível primário de refino para: (a) modelo de células cartesianas, (b) modelo de células poliédricas e (c) modelo de células tetraédricas. Fonte: Elaborado pelo autor.	43
Figura 11 - Número de elementos por modelo de malha. Fonte: Elaborado pelo autor.	44
Figura 12 - Tamanho dos arquivos finais com solução e malha comparados para modelos diferentes de malha volumétrica. Fonte: Elaborado pelo autor.	44
Figura 13 - Comparativo de tempo de solução por modelo de malha. Fonte: Elaborado pelo autor.....	45

Figura 14 - Plano cortado para visualização da malha para: (a) seção de testes da malha cartesiana, (b) aletas da malha cartesiana, (c) seção de testes da malha poliédrica e (d) aletas da malha poliédrica. Fonte: Elaborado pelo autor.....	46
Figura 15 - Resíduos da análise para o modelo de malha cartesiana. Fonte: Elaborado pelo autor.....	47
Figura 16 - Velocidades de entrada e saída da região do motor para o modelo de malha cartesiana, refino 4. Fonte: Elaborado pelo autor.	47
Figura 17 - Resíduos da análise para o modelo de malha poliédrica. Fonte: Elaborado pelo autor.....	48
Figura 18 - Velocidades de entrada e saída da região do motor para o modelo de malha cartesiana. Fonte: Elaborado pelo autor.....	48
Figura 19 - Tamanho dos arquivos com solução por nível de refino da malha poliédrica. Fonte: Elaborado pelo autor.	50
Figura 20 - Independência de malha a partir da variação de pressão medida antes e após a honeycomb. Fonte: Elaborado pelo autor.....	50
Figura 21 - Independência de malha a partir das velocidades de entrada e saída da região do motor. Fonte: Elaborado pelo autor.....	51
Figura 22 - Tempo de solução por modelo de turbulência para o nível mais refinado de malha volumétrica, o nível 4. Fonte: Elaborado pelo autor.....	52
Figura 23 - Delta de pressão anterior e posterior à honeycomb para os modelos de turbulência k- ω SST, k- ϵ e Spallart-Almaras. Fonte: Elaborado pelo autor.....	52
Figura 24 - Resíduos das análises do túnel de vento para 3 segundos de variação temporal com os modelos RANS, DES e LES. Fonte: Elaborado pelo autor.	54
Figura 25 - Tempo de solução para 3 segundos no comparativo com os três modelos transientes: RANS k- ω SST, DES e LES. Fonte: Elaborado pelo autor.	55
Figura 26 - Variação da função de Wall Y+. Fonte: (CFD-ONLINE: Law of the wall, 2023).....	56
Figura 27 - Parâmetro Wall Y+ para (a) seção de testes e (b) aletas das curvas do túnel de vento da UFMG para os modelos transientes. Fonte: Elaborado pelo autor.	57
Figura 28 - (a) Tubo de Pitot na seção de testes e (b) Geometria em detalhe da honeycomb utilizada para orientar o escoamento em direção a seção de testes. Fonte: Elaborado pelo autor.	58

Figura 29 - Posicionamento dos pontos de aquisição de pressão e velocidades demonstrados no modelo virtual. Fonte: Elaborado pelo autor.....	58
Figura 30 - (a) Tubo de Pitot móvel de pressão estática a montante da honeycomb, demonstrado pelo Prof. Dr. Guilherme Papini, (b) Visão da seção de testes do túnel de vento do LAExp, da UFMG e (c) Interfaces de controle de velocidade e pressão. Fonte: Elaborado pelo autor.....	59
Figura 31 - Amostras coletadas de pressão por nível de velocidade estabilizado na seção de testes. Fonte: Elaborado pelo autor.....	60
Figura 32 - Comparação de velocidades no corte do Túnel de vento em modelo RANS k- ω SST estacionário para os quatro níveis de refino de malha volumétrica. Fonte: Elaborado pelo autor.....	61
Figura 33 - Comparação de pressões no corte do Túnel de vento em modelo RANS k- ω SST estacionário para os quatro níveis de refino de malha volumétrica. Fonte: Elaborado pelo autor.....	62
Figura 34 - Comparação de vorticidade no corte do Túnel de vento em modelo RANS k- ω SST estacionário para os quatro níveis de refino de malha volumétrica. Fonte: Elaborado pelo autor.....	63
Figura 35 - Queda de pressão do escoamento no motor para diferentes modelos transientes: (a) RANS k- ω , (b) DES e (c) LES. Fonte: Elaborado pelo autor.....	64
Figura 36 - Velocidades a montante e a juzante da região rotativa do motor por modelo transiente. Fonte: Elaborado pelo autor.....	65
Figura 37 - Comparação de velocidades no corte do Túnel de vento para os modelos transientes. Fonte: Elaborado pelo autor.	66
Figura 38 - Comparação de vorticidade no corte do Túnel de vento para os modelos transientes. Fonte: Elaborado pelo autor.	67
Figura 39 - Velocidade do ar na seção de testes. A linha vermelha demarca o centro da seção. Fonte: Elaborado pelo autor.....	68
Figura 40 - Progressão do espessamento de camada limite na seção de teste. A linha vermelha demarca o centro da seção. Fonte: Elaborado pelo autor.	69
Figura 41 - Progressão da energia cinética turbulenta (J/kg) na seção de testes. A linha vermelha demarca o centro da seção. Fonte: Elaborado pelo autor.	69

Figura 42 - Progressão da velocidade, vorticidade e energia cinética turbulenta na seção de testes para a frequência de rotação do motor de 17,1 Hz. Fonte: Elaborado pelo autor.	70
Figura 43 - Plano frontal com visualização da energia cinética turbulenta (J/kg): (a) túnel completo, (b) seção de teste. Fonte: Elaborado pelo autor.	71
Figura 44 - Velocidade no centro da seção de testes pela variação da frequência do motor, analisando-se os valores longitudinalmente no centro da seção de testes. A linha vermelha demarca o centro da seção. Fonte: Elaborado pelo autor.	72
Figura 45 - Energia cinética turbulenta (J/kg) pela velocidade máxima do escoamento longitudinalmente ao centro da seção de testes. A linha vermelha demarca o centro da seção. Fonte: Elaborado pelo autor.	73
Figura 46 - Camada limite da parede à esquerda do escoamento pela velocidade máxima do escoamento longitudinalmente na seção de testes. A linha vermelha demarca o centro da seção. Fonte: Elaborado pelo autor.	74
Figura 47 - Camada limite à direita do escoamento pela velocidade máxima do escoamento longitudinalmente na seção de testes. A linha vermelha demarca o centro da seção. Fonte: Elaborado pelo autor.	75
Figura 48 - Diferença percentual entre as camadas limites à direita e a esquerda da direção do escoamento na seção de testes para quatro velocidades máximas de referência. Fonte: Elaborado pelo autor.	75
Figura 49 - Vorticidade na seção de testes para as frequências de rotação do motor: i) 17,1 Hz, ii) 26,3 Hz, iii) 32,5 Hz e iv) 38,6 Hz. Fonte: Elaborado pelo autor.	76
Figura 50 - Variação dos resultados computacionais com os dados experimentais da variação de pressão à jusante e à montante da honeycomb para a variação do nível de refino da malha volumétrica poliédrica. Fonte: Elaborado pelo autor.	77
Figura 51 - Variação dos resultados computacionais com os dados experimentais da variação de pressão à jusante e à montante da honeycomb para a variação dos modelos de turbulência k- ω SST, k- ω e Spallart-Almaras. Fonte: Elaborado pelo autor.	78
Figura 52 - Queda de pressão na honeycomb para regime permanente por modelo de turbulência. Fonte: Elaborado pelo autor.	78
Figura 53 - Variação dos resultados computacionais com os dados experimentais da variação de pressão à jusante e à montante da honeycomb para os modelos transientes. Fonte: Elaborado pelo autor.	79

Figura 54 - Correlação de velocidades na seção de testes: CFD e Experimental. Fonte: Elaborado pelo autor.	80
Figura 55 - Método de definição de coeficientes de resistência inercial e viscoso via método de região porosa. Fonte: Elaborado pelo autor.	86
Figura 56 - Posição das linhas de medição de velocidade: (a) linhas horizontais; (b) linhas verticais. Fonte: Elaborado pelo autor.	87
Figura 57 - Linha de pontos horizontal com 600 pontos de aquisição de velocidade para a rotação do motor de 26,3 Hz. Fonte: Elaborado pelo autor	88
Figura 58 - Linha de pontos vertical com 600 pontos de aquisição de velocidade para a rotação do motor de 26.3 Hz. Fonte: Elaborado pelo autor	88
Figura 59 - Linha de pontos horizontal com 600 pontos de aquisição de velocidade para a rotação do motor de 32,5 Hz. Fonte: Elaborado pelo autor	89
Figura 60 - Linha de pontos vertical com 600 pontos de aquisição de velocidade para a rotação do motor de 32,5 Hz. Fonte: Elaborado pelo autor	89
Figura 61 - Tubo de pitot cedido pela empresa AERON e utilizado no ensaio. Fonte: Cedido pelo Laboratório de Aerodinâmica da UFMG.	90
Figura 62 - Posicionamento do tubo de pitot cedido pela empresa AERON na seção de teste. Fonte: Cedido pelo Laboratório de Aerodinâmica da UFMG.....	91

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Configuração de malha para o primeiro nível de refino, utilizado na comparação dos modelos de malha volumétrica. Fonte: Elaborado pelo autor.	42
Tabela 2 - Comparação de modelos de malha. Fonte: Elaborado pelo autor.	44
Tabela 3 - Refino para independência de malha poliédrica. Fonte: Elaborado pelo autor.	49
Tabela 4 - Relação da variável dP/L com a velocidade na seção de testes. Fonte: Elaborado pelo autor.	85
Tabela 5 - Relação de velocidades medidas pelo tubo de pitot cedido pela empresa AERON, o tubo de Pitot do Túnel de vento do laboratório de aerodinâmica experimental da UFMG e os valores equivalentes de temperatura e frequência de rotação do motor. Fonte: Elaborado pelo autor.	91

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	17
1.1	OBJETIVO.....	18
2	REVISÃO DE LITERATURA	20
2.1	VISÃO GERAL	20
2.2	MÉTODOS NUMÉRICOS E CORRELAÇÕES.....	21
3	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	23
3.1	TÚNEIS DE VENTO E SUAS CARACTERÍSTICAS	23
3.2	COMPONENTES DE TÚNEIS DE VENTO	24
3.3	FLUIDODINÂMICA COMPUTACIONAL	25
3.3.1	EQUAÇÕES DE CONSERVAÇÃO	25
3.3.2	TURBULÊNCIA	28
3.3.2.1	MODELAMENTO DA TURBULÊNCIA	30
3.3.2.2	MODELAMENTO DA TURBULÊNCIA POR RANS.....	30
3.3.2.2.1.1	MODELO k -E	31
3.3.2.2.1.2	MODELO k - ω	32
3.3.2.2.1.3	MODELO SPALART-ALLMARAS.....	33
3.3.2.2.2	MODELAMENTO VIA RESOLUÇÃO POR ESCALA	33
3.3.2.2.2.1	<i>LARGE EDDY SIMULATION (LES)</i>	34
3.3.2.2.2.2	<i>DETACHED EDDY SIMULATION (DES)</i>	35
4	METODOLOGIA.....	35
4.1	MATERIAIS E EQUIPAMENTOS	35
4.1.1	<i>HIGH PERFORMANCE COMPUTING (HPC)</i>	36
4.1.1.1	SOFTWARE	36
4.2	FLUXO DE TRABALHO	36
4.2.1	GEOMETRIA	38
4.2.2	GERAÇÃO DE MALHA	40
4.2.3	COMPARATIVO ENTRE MODELOS DE MALHA.....	41

4.2.4	CONVERGÊNCIA E INDEPENDÊNCIA DE MALHA.....	45
4.2.4.1	CONVERGÊNCIA DOS MODELO DE MALHA	46
4.2.4.2	INDEPENDÊNCIA DE MALHA DO MODELO POLIÉDRICO	49
4.2.5	COMPARATIVO DE MODELOS DE TURBULÊNCIA	51
4.2.6	ANÁLISE TRANSIENTE	53
4.2.6.1	<i>WALL Y+</i>	55
4.2.7	TESTES EXPERIMENTAIS	57
5	RESULTADOS.....	60
5.1	COMPORTAMENTO DO ESCOAMENTO EM REGIME ESTACIONÁRIO	60
5.2	COMPORTAMENTO DO ESCOAMENTO EM REGIME TRANSIENTE	64
5.3	CARACTERIZAÇÃO DA SEÇÃO DE TESTE.....	67
5.4	COMPARAÇÃO EXPERIMENTAL	76
5.4.1	COMPARAÇÃO COM A DIFERENÇA DE PRESSÃO	76
5.4.2	COMPARAÇÃO COM A VELOCIDADE NA SEÇÃO DE TESTES	79
6	CONCLUSÃO	81
7	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	82
8	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	83
8.1	APÊNDICE I – METODOLOGIA DE CALCULO RESISTÊNCIAS DE MEIOS POROSOS PARA MODELAGEM DA HONEYCOMB.....	85
8.2	APÊNDICE II – VELOCIDADE DO ESCOAMENTO E ESPESSAMENTO DA CAMADA LIMITE NA SEÇÃO DE TESTES.....	87
8.3	APÊNDICE III – ENSAIO DE CORRELAÇÃO DE VELOCIDADE COM FREQUENCIA DO MOTOR.....	90

1 INTRODUÇÃO

Os resultados das interações entre os escoamentos e os meios sólidos são vitais em inúmeras aplicações de engenharia. No setor de transportes, a busca por desempenho, agilidade, furtividade e eficiência energética é crítica no projeto de aeronaves. A capacidade de minimizar o consumo de combustíveis em veículos de uma forma geral é a tônica de sempre e os estudos aerodinâmicos são parte importante deste processo como um todo. Em ambientes de competição de esportes a motor, maximizando os valores das forças de *downforce*, bem como minimizando a geração de arrasto nas corridas de carros de alta velocidade, como por exemplo a Fórmula 1 e as competições de marcas. Nos esportes de alto desempenho, é cada vez mais comum ler sobre estudos envolvendo análises aerodinâmicas em corredores e ciclistas. Das variadas aplicações, há também os estudos envolvendo as interações dos ventos na camada limite atmosférica com as edificações urbanas, influenciando a segurança, a dispersão de particulados no ar atmosférico, sempre visando o bem estar e a qualidade de vida das pessoas.

Entender esses fenômenos é crucial para o desenvolvimento científico e é possível graças a uma combinação de teoria, cálculos matemáticos e experimentos. A evolução das teorias do uso da matemática nos problemas de mecânica dos fluidos evoluiu desde as civilizações antigas, no uso empírico para o desenvolvimento de arquedutos e navios, passando também pelo período moderno onde foi acelerada pela postulações de Isaac Newton nas leis do movimento e a lei da viscosidade dos escoamentos lineares. Mais recentemente, se destacam o uso dos métodos numéricos computacionais, a partir dos anos sessenta, e a sua contrapartida prática, os túneis de vento, que datam de muito antes, como o utilizado por Orville Wright, em seu laboratório em 1916, para conduzir experimentos durante o período da primeira grande guerra. O sucesso do estudo de qualquer projeto aerodinâmico será sempre a combinação dos resultados teóricos, computacionais e experimentais. Neste contexto, os túneis de vento são fundamentais no desenvolvimento e análise do desempenho de aeronaves, permitindo aos engenheiros e projetistas a compreensão do impacto de diferentes componentes e configurações. Isto se dá pela ampla possibilidade de estudo de comportamentos aerodinâmicos em diferentes condições de voo, com acesso à parâmetros como arrasto, sustentação, controles superficiais e estabilidade geral da aeronave (Anderson, 2016).

O LAExp, Laboratório de Aerodinâmica Experimental da UFMG, possui um túnel de vento de circuito fechado do tipo Gottingen, que possibilita um caminho contínuo ao escoamento. Ele atua em regime subsônico, para Reynolds até 3 milhões, visando um perfil de corda máximo de 600 mm. Nesse tipo de túnel, é possível controlar a qualidade na qual o

ar chega à seção de testes via uma série de componentes. Destes, destacam-se o motor, que gera o momento no escoamento e o impulsiona no circuito, as aletas e *honeycombs*, que guiam o escoamento nas mudanças de direção, e as telas, que buscam equalizar a velocidade transversal do escoamento (Barlow, Rae, & Pope, 1999).

1.1 Objetivo

O objetivo principal deste trabalho de mestrado é entender e caracterizar o desenvolvimento da camada limite e a turbulência axial do escoamento de ar na seção de testes do túnel de vento de circuito fechado do curso de engenharia aeroespacial da UFMG, envolvendo uma faixa operacional de referência. Para esse objetivo, será elaborado um modelo teórico 3D, em escala real, geometricamente idêntico ao real, aplicando a fluidodinâmica computacional, aqui também referida como o acrônimo da sua versão na língua inglesa, *Computational Fluid Dynamics*, CFD, e serão analisadas diferentes abordagens computacionais. Posteriormente, os resultados serão correlacionados com os valores experimentais envolvendo toda a faixa operacional, variando-se a velocidade do ar na seção de testes, controlando, portanto, a pressão dinâmica e estática, bem como a pressão barométrica do escoamento de ar na referida seção de testes. Como objetivos secundários, deseja-se entender o impacto dos componentes internos do túnel de vento em análise, como aletas, telas e colmeias, na dissipação da turbulência e na uniformização do perfil de ar, especialmente na entrada da seção de testes.

Desta forma, esta pesquisa permitirá a realização de análises que podem prever as características do escoamento do ar e suas interações com as geometrias de modelos experimentais na seção de testes e também auxiliando no próprio entendimento e evolução da estrutura do laboratório, com foco na qualidade com que o escoamento é guiado à seção de testes, e podendo futuramente permitir propostas de modificação geométrica ou paramétrica com o objetivo de minimizar a turbulência em u' , por exemplo, e permitindo a verificação antecipada de influências de parede e de suportes de sondas e equipamentos no escoamento no entorno dos modelos futuros a serem ensaiados. Com isso, também será possível propor modificações de componentes internos ao túnel, tais como inserção de novas aletas, telas e *honeycombs* visando a mitigação dos efeitos adversos comuns e conhecidos ao se analisar modelos em subescala em túneis de vento de circuito fechado.

Essa caracterização será importante para mitigar as perturbações nos escoamentos que incidem sobre os modelos de teste e que tem como origem a forma finita da seção, delimitada por paredes relativamente próximas aos modelos de teste, onde as características viscosas desaceleram o escoamento localmente (White & Corfield, 2006).

O objetivo final do trabalho é gerar conhecimento sobre as características do túnel de vento de forma geral. O trabalho visa criar os alicerces que permitirão ao laboratório conhecer mais profundamente como diversas de suas características dimensionais impactam na dinâmica do seu escoamento, permitindo gerar melhorias sem os custos elevados de criação de protótipos e testes físicos. Tais alicerces expandirão as capacidades de análise do laboratório e possibilitarão a criação de produções científicas com maior confiabilidade nos resultados.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Visão geral

O escoamento em uma seção de túnel de vento não se comporta como o mesmo em um ambiente livre de perturbações. As forças e momentos atuantes em um corpo imerso em um escoamento, independente da sua geometria ou comportamento desse escoamento, são originadas pela distribuição de pressão sobre a superfície desse corpo e a distribuição da tensão de cisalhamento. Essas pressões se alteram com a presença de paredes, aletas e a característica finita da seção, transversalmente e horizontalmente (Anderson Jr., 1995).

Fu, Uddin e Zhang (2020) afirmam que o impacto da razão de bloqueio na predição de desempenho das forças de arrasto em um veículo de passeio também deve ser considerado. O coeficiente de arrasto aumenta a medida que o efeito da razão de bloqueio se torna mais proeminente.

Bertholds, A (2012) em sua tese pontua que o seu objetivo na definição de características em um túnel de vento de circuito fechado foi obter um fluxo uniforme na seção de teste do túnel de vento, mantendo as perdas de pressão sobre o túnel as mais baixas possível. Isso foi alcançado por meio do uso de vários componentes para melhorar o fluxo, como aletas, telas, *honeycombs* e uma câmara de assentamento. As aletas foram utilizadas nos cantos, proporcionando melhoras significativas no escoamento, pois o guiam e o impede de seguir caminhos indesejados. A câmara de assentamento é utilizada para desacelerar o fluxo de ar, um processo que visa diminuir a turbulência, antes que ele seja novamente acelerado. Telas foram utilizadas para melhorar ainda mais a homogeneidade, impondo uma queda de pressão que equaliza as diferenças de velocidade do fluxo. O *honeycomb*, por sua vez, tem o papel de forçar a movimentação do escoamento em apenas uma direção. A função destes componentes é garantir que o escoamento na seção de teste seja o mais uniforme possível, sendo essa a principal meta na otimização de um projeto de túnel de vento. Outro objetivo de projeto importante é a redução das perdas de energia desse fluxo de ar, que visa minimizar o consumo energético do motor.

Uma atenção especial deve ser dada às curvas, que são partes críticas do túnel, e são regiões onde podem ocorrer perdas significativas de energia e recirculação. Para direcionar o fluxo de maneira correta pelos cantos, Bradshaw e Mehta (1979) e Barlow, Rae e Pope (1999) o uso de aletas que forçarão o fluxo em determinada direção. Essas aletas devem ter uma forma semelhante a perfis aerodinâmicos e guiar a saída do fluxo de forma a criar com o canto um ângulo de zero graus em relação às paredes circundantes.

2.2 Métodos numéricos e correlações

Sobre as definições de métodos numéricos para análise virtual do túnel, Bertholds (2012) cita que a natureza do fluxo turbulento é muito complexa devido às rápidas mudanças de velocidade em distâncias muito curtas. Portanto, com o poder de computação disponível atualmente, não é possível simular a turbulência em um fluxo resolvendo numericamente as equações de Navier-Stokes. Em vez disso, são utilizadas várias aproximações para criar modelos de turbulência que simplificam os cálculos, levando em consideração os aspectos mais importantes da turbulência. No seu estudo, o modelo de Transporte de Tensão de Cisalhamento (SST) é usado para simular a turbulência no escoamento. O modelo SST utiliza o comportamento do fluxo na camada limite para estimar a turbulência. Em alguns de seus casos, o escoamento nunca atingiu um estado estacionário devido a intensa recirculação e os resíduos não se tornaram constantes. No entanto, esses resultados ainda foram úteis, pois mostraram onde ocorreu a recirculação, mesmo que o comportamento do escoamento possa não ter sido muito próximo da realidade.

Réthoré, Sørensen, Zahle, Bechmann e Madsen (2011) reproduziram o experimento MEXICO em túnel de vento de rotores de turbinas eólicas. Foi utilizado um solver próprio de CFD desenvolvido internamente. As tensões de Reynolds são modeladas na forma das equações de Navier-Stokes utilizando a suposição de eddy-viscosity e o modelo de turbulência $k - \omega$ SST. Foram analisados 7 diferentes análises, com variações de modelos de turbina e malha, variando-se a velocidade em 3 magnitudes (10 m/s, 15 m/s e 24 m/s). Dois tipos de soluções são consideradas, a solução transiente *Detached Eddy Simulations* (DES) e a via *Reynolds Averaged Navier Stokes* (RANS). Uma diferença significativa entre ambas está na oscilação captada pelo modelo DES, com um impacto significativo no efeito da dinâmica da esteira do escoamento descolado. Essa mesma oscilação não foi observada no uso do RANS transiente, o que pode significar um amortecimento do efeito de turbulência na aplicação deste modelo.

Kalvig, Manger e Hjertager (2012) desenvolveram uma análise de turbina eólica em CFD com diferentes metodologias em relação a movimentação dos rotores e atuadores. Os resultados são comparados uns com os outros e com medições de experimentos em túnel de vento. Todos os modelos utilizam equações de turbulência de duas equações, variando-se entre os modelos $k-\epsilon$ e $k-\omega$ SST. A metodologia transiente com este último modelo mostrou resultados superiores na caracterização das velocidades na esteira da turbina eólica. As previsões de força também foram mais consistentes com os valores de medição.

Sitek e Lottes (2018) construíram um modelo computacional de um teste físico em túnel de vento de um modelo de ponte *Sedwick*, utilizando o software de volumes finitos Simcenter STAR-CCM+, com os modelos transientes (a) RANS $k - \epsilon$ e (b) LES. Para isso, variações de malha foram criadas, especialmente para correta leitura da camada limite e para garantir que o parâmetro de *Wall Y+* fosse o mais próximo possível de 1. Os testes experimentais utilizaram um modelo da escala 1:25 com variação da velocidade de entrada e ângulo de ataque da ponte. Para correlação, dois grupos de medições foram realizados. O primeiro, composto de 20 medições com velocidade de entrada de 3,30 m/s e com o ângulo de ataque variando de -10 graus até 9. O segundo, com 17 medições, possui velocidade de entrada de 5,67 m/s e o ângulo de ataque variava de -10 a 10 graus. As simulações mostraram boa correlação com os dados experimentais.

Fernandes (2019) selecionou o modelo Spalart-Allmaras, que é um modelo desenvolvido especificamente para aplicações aerodinâmicas para analisar o próprio túnel de vento do LAExp da UFMG e caracterizar a camada limite na sua seção de testes.

Ljungskog (2019) escolheu para a sua análise computacional do modelo de seção vazia do seu túnel de vento, o Simcenter STAR-CCM+ utilizando a abordagem $k - \omega$ SST (*Shear Stress Transport*) com o modelo *Improved Delayed Detached Eddy Simulation* (IDDES), com o tratamento de parede *All $y+$ wall*. Iniciou-se resolvendo o modelo em regime estacionário e posteriormente, adotado o modelo transiente para permitir o desenvolvimento do escoamento na seção. Em relação aos seus elementos de malha, Ljungskog utilizou aproximadamente 77 milhões de elementos trimados. O piso recebeu 8 elementos na camada prismática, com um crescimento anisotrópico para acompanhar o desenvolvimento do escoamento.

Fu, Uddin e Zhang (2020) em seu artigo, utilizaram como software o Simcenter STAR-CCM+. Para a análise de aerodinâmica veicular, foi aplicado o regime estacionário, obtendo-se a solução via RANS. Dois modelos de turbulência foram utilizados, o *Realizable $k-\epsilon$* (RKE) e o $k-\omega$ SST. Para a aplicação veicular, o modelo RKE obteve uma melhor correlação com os dados do túnel, com precisão superior a 97%.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 Túneis de vento e suas características

Túneis de vento de baixa velocidade são túneis com velocidades máximas na seção de teste de 135 m/s, ou 0,4 Mach. Proporcionam o uso de modelos que podem ser gerados em uma fase inicial de projeto. Incluem toda a complexidade de escoamentos reais e podem prover um grande volume de dados confiáveis. Existem basicamente dois tipos de túneis de vento. Os dois tipos são o de circuito fechado e o de circuito aberto. Há ainda uma distinção de configurações para as sessões de teste. Estas podem ser abertas, semi-abertas ou fechadas (Barlow, Rae, & Pope, 1999).

O túnel de circuito aberto consiste em um caminho direto onde o escoamento é comprimido e então passa pela seção de teste e em seguida pelos difusores, ventilador e sistema exaustor. O túnel de circuito fechado, por sua vez, recircula contidamente com o mínimo de troca de ar com o exterior possível. A escolha da melhor configuração de túnel e característica da seção de testes está intimamente ligada aos recursos disponíveis e propósito da análise.

Uma seção aberta em túnel aberto exigirá um fechamento próximo a seção de teste para prevenir que ar de fora seja sugado à ela, ao invés da entrada. Para túneis fechados, é importante barrar a seção de ventos e perturbações externas. Um problema conhecido desse tipo de seção são os problemas de flutuação que exigem ações extensivas de correção. Seções fechadas ou semi-fechadas são as mais comuns e seus comportamentos são os mais previsíveis. Idealmente, a seção de teste terá a maior seção possível. Os limitadores serão o custo envolvido em gerir testes em grandes escalas, construir e transportar grandes modelos, mudar variáveis e geometrias. Os túneis de vento para o setor automotivo utilizam-se de modelos em escala ou tamanho real para análises como a de aerodinâmica, a de resfriamento do vão motor e do sistema de frenagem e acústica induziada pelo vento. Interações do escoamento com veículos geralmente resultam em grandes regiões de separação do ar da superfície e complexa interação desse escoamento com as paredes do túnel. Entender essas interações é parte crucial para um teste bem sucedido nesse tipo de pesquisa. Os túneis de vento climáticos são utilizados para simulações de altas e baixas temperaturas para ciclos de operação variados. Podem replicar radiação solar, simular chuvas e características térmicas extremas. Já os túneis de vento de propósitos gerais, são a forma mais eficiente economicamente disponíveis. Podem ser utilizados para analisar, por exemplo, esquiadores, ciclistas, coletores solar, antenas e radares (Barlow, Rae, & Pope, 1999).

3.2 Componentes de túneis de vento

Um túnel de vento de circuito fechado para testes aerodinâmicos consiste em vários componentes principais que desempenham funções específicas. Esses componentes são projetados para criar um ambiente controlado que simule condições de fluxo semelhantes às encontradas em situações reais.

Os principais componentes podem ser vistos na Figura 1 e são listados da seguinte forma:

- (a) Seção de teste: onde o objeto ou modelo a ser estudado é posicionado. Essa seção é projetada para simular as condições específicas de interesse, como velocidade do ar, pressão e temperatura. O modelo é fixado em um suporte ajustável que permite diferentes variações angulares para análise completa das características aerodinâmicas. Este suporte está usualmente ligado à uma célula de carga para medição das forças aplicadas no modelo, em um ou mais eixos;
- (b) difusor: vai do final da seção de testes até a terceira curva do tunel. O propósito do difusor é reduzir a velocidade com a menor perda de energia possível. Menor perda de energia significa uma maior recuperação de pressão. É normalmente desejado a redução da velocidade do escoamento no menor comprimento possível sem ocorrer separação do fluxo de ar.;
- (c) curvas: guiam o escoamento no circuito fechado. Para evitar grandes perdas e manter o escoamento relativamente em linha reta, possui o que chamamos de "turning vanes", que são perfis que guiam o ar no centro das curvas. Cantos sem "turning vanes" podem apresentar perdas de até 100% da velocidade, enquanto aqueles com esses aparatos podem atingir 10% de perda ou menos. Desta perda, um terço acontece pelo atrito do escoamento com a superfície dos *turning vanes* e o restante se dá pela criação de vórtices causados pela variação de momento e interação com os perfis (Barlow, Rae, & Pope, 1999);
- (d) primeira tela: auxiliando no controle da turbulência;
- (e) motor: produzirá a rotação e aceleração do ar. Seu objetivo é o aumento de pressão para igualar as perdas de pressão relativas ao circuito;
- (f) câmara de assentamento e honeycomb: são responsáveis por diminuir a velocidade do escoamento, de forma a controlar o ar antes da sua reaceleração até a seção de testes, e juntamente a honeycomb, conseguem direcionar o fluxo de ar em uma única direção;
- (g) segunda tela: oferecem proteção, caso algum equipamento se desprenda durante uma falha, e auxiliam na uniformização do fluxo de ar.

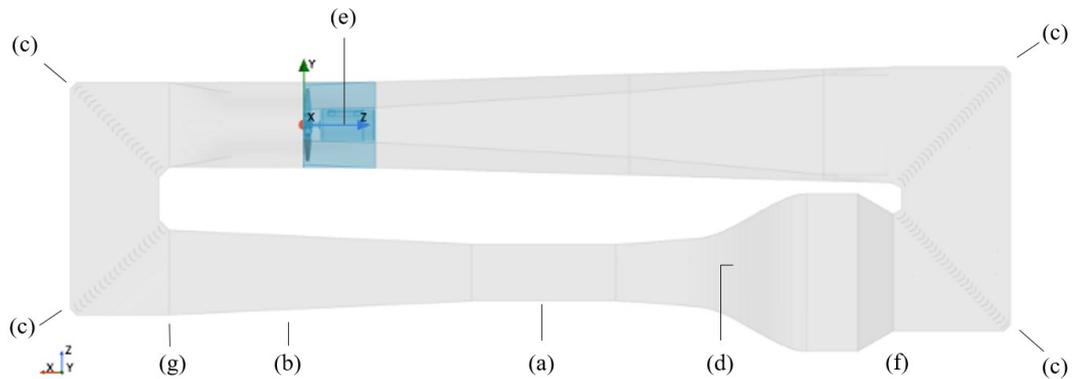


Figura 1 - Túnel de vento do LAExp e seus componentes. Fonte: Elaborado pelo autor.

3.3 Fluidodinâmica computacional

3.3.1 Equações de conservação

Em análises macroscópicas de mecânica dos escoamentos, a estrutura discreta da matéria pode ser tratada como um contínuo. Os modelos matemáticos que modelam o fenômeno são derivadas das leis fundamentais de conservação. Os princípios de conservação para escoamentos são descritos pelas equações de Navier-Stokes, que são um conjunto de equações diferenciais parciais que descrevem o movimento de escoamentos viscosos, por meio da conservação da massa, de momentum e da energia (Ferziger & Peric, 2002). As equações são da seguinte forma:

Conservação de massa:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho \cdot \mathbf{v}) = 0 \quad (1)$$

onde, ρ é densidade e \mathbf{v} denota a velocidade do contínuo.

Conservação Linear de momentum:

$$\frac{\partial(\rho \mathbf{v})}{\partial t} + \nabla(\rho \mathbf{v} \cdot \mathbf{v}) = \nabla \cdot \boldsymbol{\sigma} + \mathbf{f}_b \quad (2)$$

onde, $\boldsymbol{\sigma}$ denota a soma dos tensores normal e de cisalhamento no escoamento, $\boldsymbol{\sigma} = -p\mathbf{I} + \mathbf{T}$, p representa a pressão e \mathbf{T} denota o tensor de cisalhamento viscoso, \mathbf{f}_b denota a resultante das forças, como gravidade e resultantes centrípetas por unidade de volume.

Conservação de Energia

$$\frac{\partial(\rho E)}{\partial t} + \nabla(\rho E \mathbf{v}) = \mathbf{f}_b \cdot \mathbf{v} + \nabla \cdot (\mathbf{v} \cdot \boldsymbol{\sigma}) - \nabla \cdot \mathbf{q} + S_E \quad (3)$$

onde, \mathbf{E} denota a energia total por unidade de massa, \mathbf{q} representa o fluxo de calor e S_E denota uma fonte de energia por volume.

No método de volumes finitos, o domínio é subdividido em um número finito de volumes de controle. Para cada um desses volumes de controle, são aplicadas versões discretas da forma integral dessas equações, resultando em um conjunto de equações algébricas lineares, com o número total de variáveis desconhecidas igual ao número de elementos da malha. A transformação desses modelos matemáticos em um sistema de equações algébricas é realizada por meio da aplicação de métodos numéricos (Ferziger & Peric, 2002). Quando integramos as equações (1), (2) e (3) sobre um número finito de volumes de controle, as equações de conservação do escoamento podem ser reescritas da seguinte forma:

Equação da continuidade:

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_V \rho dV + \oint_A \rho \mathbf{v} \cdot d\mathbf{a} = \int_V s_u dV \quad (4)$$

onde, t representa o tempo, V denota volume, \mathbf{a} denota o vetor area, e s_u denota um termo fonte.

Equação de momentum:

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_V \rho dV + \oint_A \rho \mathbf{v} \cdot \mathbf{v} \cdot d\mathbf{a} = - \oint_A \rho \mathbf{I} \cdot d\mathbf{a} + \oint_A \mathbf{T} \cdot d\mathbf{a} + \int_V \mathbf{f}_b dV + \int_V s_u dV \quad (5)$$

onde, \mathbf{T} denota o tensor de cisalhamento viscoso e \mathbf{f}_b denota a resultante de forças no corpo.

Equação da energia:

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_V \rho \mathbf{E} dV + \oint_A \rho \mathbf{H} \mathbf{v} \cdot d\mathbf{a} = - \oint_A \mathbf{q} \cdot d\mathbf{a} + \oint_A \mathbf{T} \cdot \mathbf{v} \cdot d\mathbf{a} + \int_V \mathbf{f}_b \cdot \mathbf{v} dV + \int_V s_u dV \quad (6)$$

onde, \mathbf{E} denota a energia total, \mathbf{H} denota a entalpia e \mathbf{q} representa o fluxo de calor.

As técnicas de solução numérica do modelo de volumes finitos, seja por método direto ou método iterativo, não serão exploradas neste trabalho, mas podem ser encontrada em diversas

das literaturas aqui referenciada, como: (Ferziger & Peric, 2002), (Anderson Jr., 1995) e (Versteeg & Malalasekera, 2007).

Entretanto, vale ressaltar um ponto que ainda não foi citado. Há dois métodos de solução das equações pelo processo de volumes finitos, no que diz respeito a ordem em que as equações são resolvidos. São eles o solucionador acoplado e o segregado.

O solucionador acoplado, também conhecido como método totalmente implícito, resolve simultaneamente todas as equações de forma integrada. Isso significa que as equações de conservação de massa, momento e energia são resolvidas em conjunto em cada etapa de iteração. Essa abordagem permite que as interações entre as diferentes variáveis do escoamento sejam consideradas de maneira consistente, resultando em uma solução globalmente acoplada. O solver acoplado é geralmente mais preciso e eficiente em termos de convergência, mas pode exigir mais recursos computacionais.

O solucionador segregado resolve as equações integrais de conservação de massa e momento de uma forma sequencial. As equações governantes não lineares são resolvidas iterativamente uma após a outra. Geralmente, a equação de conservação de massa é resolvida primeiro, seguida pela equação de conservação de momento e, posteriormente, pela equação de conservação de energia. Nesse método, as equações são desacopladas e cada uma é resolvida independentemente, assumindo que as contribuições das outras variáveis são constantes durante a iteração. Esse método utiliza um algoritmo de acoplamento para pressão e velocidade onde a restrição da conservação de massa no campo de velocidade é resolvido por uma equação de correção baseada na pressão. Esta equação é construída com base nas equações de continuidade e de conservação de momento de tal forma que um campo de velocidade previsto condiz com a equação de continuidade, corrigindo-se a pressão. O *software* Simcenter STAR-CCM+ permite a utilização de algoritmos de acoplamento como o SIMPLE, o SIMPLEC e o PISO. De toda forma, o solucionador segregado é recomendado para escoamentos de densidade constante. Apesar de resolver escoamentos com menores níveis de compressão, não é adequado para captura de choques, números elevados de *Mach* ou *Rayleigh*.

A escolha entre o solucionador acoplado e o solucionador segregado depende da natureza do problema de fluidodinâmica em estudo, das condições de contorno, da disponibilidade de recursos computacionais e dos requisitos de precisão da solução. Ambos os métodos têm suas vantagens e limitações, e é importante selecionar o mais adequado para obter resultados confiáveis e eficientes na simulação de escoamentos.

3.3.2 Turbulência

Os escoamentos podem ser turbulentos ou laminares. Estes são suaves e as suas camadas adjacentes de fluxo deslizam umas sobre as outras de forma ordenada e de trajetórias paralelas. Esse comportamento é observado para valores relativamente baixos do número de Reynolds. Reynolds é um adimensional definido como a razão entre as forças inerciais e viscosas dentro de um escoamento com variação de velocidades internas. Subindo gradualmente o valor desse adimensional, passamos pela zona de transição, onde há algumas flutuações intermitentes do escoamento. Para valores altos de Reynolds, acima da zona de transição, os escoamentos tendem a se tornar turbulentos e as suas trajetórias são majoritariamente aleatórias. As definições a seguir são utilizadas na teoria de modelamento da turbulência:

Número de Reynolds para distância da parede:

$$Re_d = \frac{\sqrt{k}d}{\nu} \quad (7)$$

onde, k denota a energia cinética turbulenta, d representa a distância à parede e ν denota a viscosidade cinemática.

Número de Reynolds turbulento:

$$Re_t = \frac{k^2}{\nu \varepsilon} \quad (8)$$

ou

$$Re_t = \frac{k}{\nu \omega} \quad (9)$$

onde, ε denota a taxa de dissipação de energia turbulenta e ω representa a taxa específica de dissipação.

A maior parte dos escoamentos encontrados na natureza tem essa característica. A turbulência refere-se a um estado de instabilidade contínua do fluxo, exibindo flutuações irregulares de pequena escala e alta frequência tanto no espaço como no tempo. É um estado caótico e aleatório de movimento do escoamento no qual a velocidade e a pressão mudam continuamente com o tempo em regiões significativas do escoamento (Versteeg & Malalasekera, 2007).

Uma característica da turbulência é a formação de grandes turbilhões, também chamados de *eddies*, ou grandes estruturas, que transferem energia para turbilhões menores, ou pequenas estruturas, dissipando a sua energia interna por efeitos viscosos, como na Figura 2.

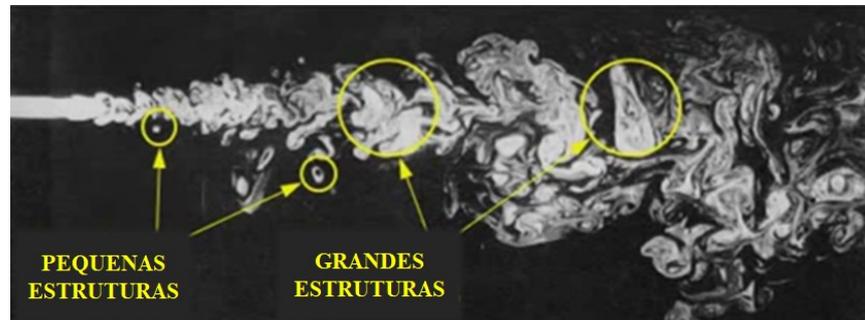


Figura 2 - Estruturas de turbilhões (*eddies*) durante etapa de dissipação de energia. Fonte: Adaptado de Richardson (1922).

Esse conceito recebe o nome de cascata de energia. A partir da capacidade computacional disponível para solução do escoamento é possível escolher o tamanho dos turbilhões da escala Kolmogorov da cascata de energia que serão modelados ou resolvidos diretamente (Çengel & Cimbala, 2013), como mostrado na Figura 3.

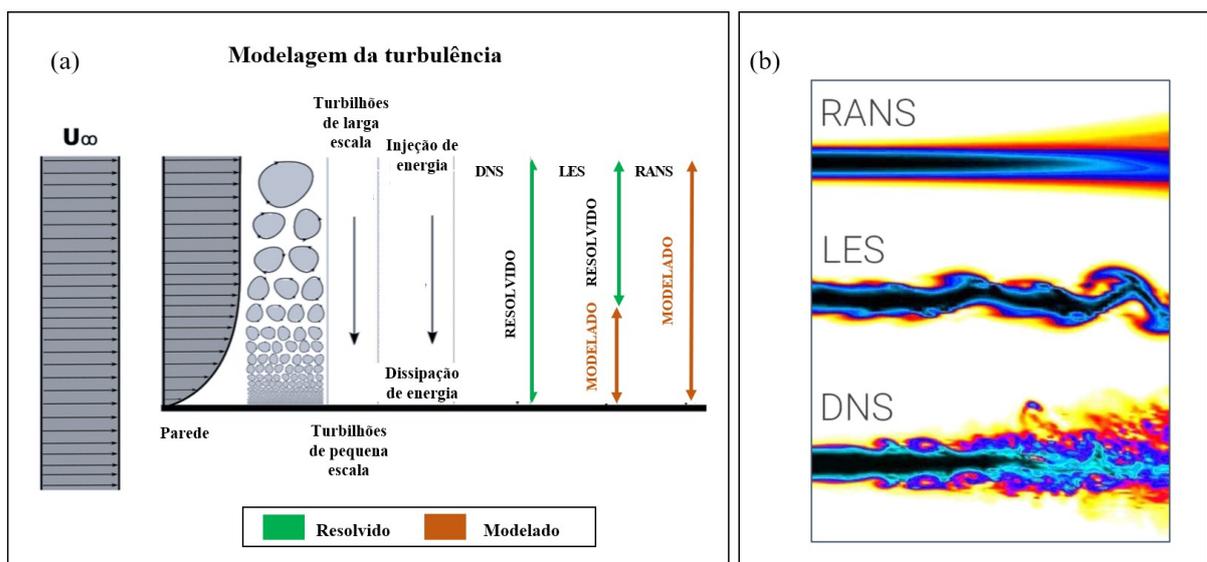


Figura 3 – (a) Modelagem da turbulência aplicada no conceito de cascata de energia. (b) Exemplo de escoamento por métodos de modelagem ou solução. Fonte: Adaptado de Çengel e Cimbala (2013)

3.3.2.1 Modelamento da turbulência

Resolver todo o espectro de turbilhões é possível pelo método de *Solução Numérica Direta (DNS)*. A solução exigirá um nível de refino elevado e uma discretização temporal com *time steps* muito baixos. Assim, o seu uso demanda um custo computacional proibitivo à análises numéricas práticas e a torna inviável em aplicações complexas. A solução é a utilização de modelos matemáticos que simplificam o fenômeno. (Hammond, 1994) apresentou três aspectos que limitam as análises computacionais em dinâmica de fluidos: velocidade de processamento, memória disponível e a complexidade dos modelos de turbulência. Os dois primeiros seguem evoluindo a uma taxa alta. (Ockendon & Ockendon, 1995) descreveram o terceiro como o maior dos problemas a ser resolvido na mecânica dos fluidos computacional.

3.3.2.2 Modelamento da turbulência por RANS

Uma forma alternativa ao DNS é o método de *Reynolds-Average Navier-Stokes (RANS)*. Segundo (Ferziger & Peric, 2002), para obter as suas equações, cada variável de solução das equações instantâneas de Navier-Stokes é decomposta no seu valor médio e adiciona-se um componente de flutuabilidade, como demonstrado na equação 10:

$$\phi = \bar{\phi} + \phi' \quad (10)$$

onde, ϕ representa os componentes de velocidade, pressão e energia.

As equações de conservação de massa, momento e energia podem então ser reescritas para os seus valores médios, da seguinte forma, respectivamente:

Conservação de massa para *Reynolds-Averaged Navier-Stokes*:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho \cdot \bar{\mathbf{v}}) = 0 \quad (17)$$

onde, ρ denota a densidade e $\bar{\mathbf{v}}$ denota a velocidade média.

Conservação linear de momento para *Reynolds-Averaged Navier-Stokes*:

$$\frac{\partial(\rho \bar{\mathbf{v}})}{\partial t} + \nabla(\rho \bar{\mathbf{v}} \cdot \bar{\mathbf{v}}) = -\nabla \cdot \bar{p}_{mod} \mathbf{I} + \nabla(\bar{\mathbf{T}} + \mathbf{T}_{RANS}) + \mathbf{f}_b \quad (18)$$

onde, $\bar{p}_{mod} = \bar{p} + \frac{2}{3} \rho k$ representa a pressão média modificada, sendo \bar{p} a pressão média e k a energia turbulenta viscosa, \mathbf{I} representa o tensor identidade, $\bar{\mathbf{T}}$ denota o tensor de cisalhamento viscoso médio, \mathbf{f}_b denota a resultante das forças.

Conservação de Energia para *Reynolds-Averaged Navier-Stokes*:

$$\frac{\partial(\rho\bar{E})}{\partial t} + \nabla(\rho\bar{E}\bar{\mathbf{v}}) = -\nabla \cdot \bar{\mathbf{p}}_{mod} \cdot \bar{\mathbf{v}} + \nabla(\bar{\mathbf{T}} + \mathbf{T}_{RANS})\bar{\mathbf{v}} - \nabla \cdot \bar{\mathbf{q}} + \mathbf{f}_b\bar{\mathbf{v}} \quad (19)$$

onde, \bar{E} denota a energia média total por unidade de massa e $\bar{\mathbf{q}}$ denota o fluxo de calor médio.

Essas equações são idênticas às suas originais, com exceção da formação de um novo termo nas equações de transporte para energia e momento, \mathbf{T}_{RANS} . Para solução deste termo, uma das abordagens mais comuns é a utilização de modelos de turbilhões viscosos.

São três os modelos de turbilhões viscosos mais usados, todos oriundos do modelo de viscosidade linear, e são eles: k- ϵ , Spalart-Allmaras e k- ω SST. Destes, todos resolvem duas equações extras de transporte para cálculos da energia cinética turbulenta e taxa de dissipação da turbulência, além das equações de Navies-Stokes, com exceção do Spalart-Allmaras, que resolve apenas uma equação de transporte para uma variável de viscosidade $\tilde{\nu}$.

3.3.2.2.1.1 Modelo k- ϵ

O modelo de turbulência k- ϵ é um modelo de turbulência de duas equações amplamente utilizado em mecânica dos fluidos computacional. Ele é projetado para resolver as complexidades dos escoamentos turbulentos resolvendo as equações de transporte para duas variáveis principais: energia cinética turbulenta, k, e taxa de dissipação turbulenta, ϵ . O modelo de turbulência K-Epsilon provou ser eficaz em uma ampla gama de escoamentos turbulentos, fornecendo informações valiosas sobre o comportamento de escoamentos complexos. Sua ampla aplicação pode ser atribuída à sua eficiência computacional e precisão razoável para muitos problemas práticos de engenharia. As suas equações adicionais de transporte são, respectivamente para k e ϵ :

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \nabla \left[\left(\boldsymbol{\mu} - \frac{\boldsymbol{\mu}_t}{\sigma_k} \right) \nabla k \right] + P_k - \rho(\epsilon - \epsilon_0) + S_k \quad (14)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \epsilon) + \nabla(\rho \epsilon \bar{\mathbf{v}}) + \nabla \left[\left(\boldsymbol{\mu} - \frac{\boldsymbol{\mu}_t}{\sigma_\epsilon} \right) \nabla \epsilon \right] + \frac{1}{T_e} C_{\epsilon 1} \cdot P_\epsilon - C_{\epsilon 2} \cdot f_2 \cdot \rho \left(\frac{\epsilon}{T_e} - \frac{\epsilon_0}{T_0} \right) + S_\epsilon \quad (15)$$

onde, \bar{v} denota a velocidade média, μ denota a viscosidade dinâmica, σ_k , σ_ε , $C_{\varepsilon 1}$ e $C_{\varepsilon 2}$ são coeficientes do modelo, P_ε e P_k são termos de produção, f_2 representa uma função de amortecimento, S_ε e S_k são termos fontes, ε_0 denota a turbulência do ambiente e T_0 denota o espaço de tempo específico.

3.3.2.2.1.2 Modelo $k-\omega$

O modelo $k-\omega$ é um modelo amplamente utilizado na resolução de equações governantes de conservação de massa, energia e momento em escoamentos turbulentos. Esse modelo inclui duas equações adicionais que descrevem as características turbulentas do escoamento. Essas equações extras estão relacionadas à energia cinética turbulenta, representada por k , e à taxa específica de dissipação de energia, representada por ω , que são usadas para determinar as propriedades viscosas dos turbilhões (Wilcox D. , 1998).

Uma das principais vantagens do modelo $k-\omega$ em relação a outros modelos de turbulência é o seu desempenho em camadas limite sujeitas a gradientes adversos de pressão. No entanto, uma desvantagem desse modelo é a sensibilidade da camada limite aos valores de dissipação de energia cinética no escoamento não perturbado, o que o torna sensível às características de contorno (Wilcox D. , 2008). Para mitigar esses efeitos, o *software* Simcenter STAR-CCM+ oferece variações do modelo $k-\omega$, como o Standard $k-\omega$ e o SST (*shear-stress transport*) $k-\omega$.

A variação do modelo SST $k-\omega$ incorpora um termo adicional de difusão cruzada não conservativa para regiões afastadas da parede. Essa abordagem torna o modelo uma combinação de $k-\varepsilon$, quando utilizado longe de qualquer parede, e $k-\omega$, na região da camada limite. O modelo adiciona também uma função de transição que é responsável por ajustar a influência do coeficiente na região próxima à parede, onde os efeitos viscosos são dominantes, e na região distante da parede, onde a turbulência é mais pronunciada. Essa abordagem permite uma transição suave e contínua entre os dois modelos, garantindo resultados precisos em diferentes regimes de escoamento (Menter, 1994).

Essa variação do modelo tem sido amplamente aplicada na indústria aeroespacial, onde escoamentos viscosos são comumente encontrados e modelos de turbulência são aplicados às camadas limite. As suas equações adicionais de transporte são, respectivamente para k e ω :

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \nabla(\rho k \bar{v}) = \nabla[(\mu + \sigma_k \cdot \mu_t) \nabla k] + P_k + \rho \beta^* f_{\beta^*} (\omega k - \omega_0 k_0) + S_k \quad (16)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \nabla(\rho \omega \bar{\mathbf{v}}) = \nabla[(\mu + \sigma_\omega \cdot \mu_t)\nabla \omega] + P_\omega + \rho \beta f_\beta (\omega^2 - \omega_0^2) + S_\omega \quad (17)$$

onde, $\bar{\mathbf{v}}$ denota a velocidade média, μ denota a viscosidade dinâmica, σ_k , σ_ω , $C_{\varepsilon 1}$ e $C_{\varepsilon 2}$ são coeficientes do modelo, P_ω e P_k são termos de produção, f_{β^*} denota um fator de modificação de cisalhamento livre, f_β denota um fator de modificação de alongamento de vórtice, S_ω e S_k são termos fontes, k_0 e ω_0 são valores de turbulência do ambiente que neutralizam a sua dissipação.

3.3.2.2.1.3 Modelo Spalart-Allmaras

O modelo de turbulência Spalart-Allmaras resolve uma equação de transporte extra para a variável modificada de difusividade $\tilde{\nu}$ para determinação da viscosidade dos turbilhões. O modelo original foi desenvolvido principalmente para a indústria aeroespacial. (Spalart & Allmaras, 1992) apresentaram resultados para escoamentos não descolados da camadas limite e fluxos com descolamentos suaves, como na interação de fluxos de ar por asas. Por sua vez, (Wilcox D. , 1998) conclui que o modelo não é adequado para aplicações envolvendo regiões de cisalhamento livre tipo jato. Também é tido como menos adequado para fluxos envolvendo recirculação complexa. A sua equação de transporte para a variável de difusividade $\tilde{\nu}$ é:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \tilde{\nu}) + \nabla(\rho \tilde{\nu} \bar{\mathbf{v}}) = \frac{1}{\sigma_{\tilde{\nu}}} \nabla[(\mu + \rho \tilde{\nu})\nabla \tilde{\nu}] + P_{\tilde{\nu}} + S_{\tilde{\nu}} \quad (18)$$

onde, $\bar{\mathbf{v}}$ denota a velocidade média, $\sigma_{\tilde{\nu}}$ representa o coeficiente do modelo, $P_{\tilde{\nu}}$ denota o termo de produção e $S_{\tilde{\nu}}$ representa o termo fonte.

3.3.2.2.2 Modelamento via resolução por escala

Como alternativa a modelagem completa da turbulência, surgiram os modelos híbridos de resolução por escala que, em contraste com os modelos RANS, resolvem as grandes escalas da turbulência e modelam os movimentos de pequena escala. Existem duas abordagens disponíveis no Simcenter STAR-CCM+: Simulação de grandes turbilhões, ou *Large Eddy Simulation* (LES) e a Simulação de turbilhões descolados, ou *Detached Eddy Simulation* (DES).

3.3.2.2.1 *Large Eddy Simulation* (LES)

A simulação de turbilhões em grandes escalas resolve as estruturas turbulentas em todo o domínio de fluxo até o limite de tamanho dos elementos de malha, onde um modelo de subdivisão aproxima o impacto dessas estruturas no campo do escoamento. Uma lógica por trás dessa técnica é que, resolvendo uma porção maior da turbulência explicitamente enquanto uma parte menor é modelada, mitiga-se as incertezas decorrentes das suposições dos modelos de turbulência. Além disso, conjectura-se que os vórtices menores exibem autossimilaridade, tornando-os mais passíveis de modelos simplificados e de aplicação universal. Para resolver as estruturas turbulentas cruciais próximas à parede, essa abordagem requer uma resolução excessivamente alta da malha na camada limite da parede - não apenas na direção normal à parede, mas também na direção do fluxo (Tucker, 2016).

Os filtros no domínio do tempo utilizados na simulação de grandes turbilhões (LES) devem aderir a uma condição causal, o que significa que sua saída depende exclusivamente das entradas do espaço de tempo atual ou de qualquer espaço de tempo anterior. Para satisfazer a causalidade, esses filtros requerem o armazenamento de muitos dados, levando a uma demanda maior de recursos de memória. Além disso, devido à sua natureza unilateral, os filtros causais inevitavelmente introduzem erros de fase (Pruett, 2008). Devido aos altos custos computacionais associados ao grande número de células, o LES é utilizado principalmente em aplicações acadêmicas ou em escoamentos com baixos números de Reynolds. As equações resolvidas por este modelo são obtidas por aplicação de filtros, ao invés da média como no RANS. Cada solução é decomposta da seguinte forma:

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

onde, ϕ representa os componentes de velocidade, pressão e energia e $\tilde{\phi}$ são os valores filtrados.

A escala no Simcenter STAR-CCM+, é determinada pelo método implícito, que utiliza a resolução da malha e é, geralmente, menos custosa computacionalmente que a versão explícita (SIEMENS, 2023). As equações de transporte filtradas ficam da seguinte forma:

Conservação de massa para *Large Eddy Simulation*:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho \cdot \tilde{\mathbf{v}}) = 0 \quad (20)$$

onde, ρ denota densidade e $\tilde{\mathbf{v}}$ denota a velocidade filtrada.

Conservação linear de momento para *Large Eddy Simulation*:

$$\frac{\partial(\rho\tilde{\mathbf{v}})}{\partial t} + \nabla(\rho\tilde{\mathbf{v}} \cdot \tilde{\mathbf{v}}) = -\nabla \cdot \tilde{p}\mathbf{I} + \nabla(\tilde{\mathbf{T}} + \mathbf{T}_{SGS}) + \mathbf{f}_b \quad (21)$$

onde, \tilde{p} denota a pressão filtrada, \mathbf{I} denota o tensor identidade, $\tilde{\mathbf{T}}$ denota o tensor de cisalhamento viscoso filtrado, \mathbf{T}_{SGS} denota o novo termo gerado pela resolução de Smagorinsky de *Sub-Grid-Scale* (SGC) e \mathbf{f}_b representa a resultante das forças.

Conservação de Energia para *Large Eddy Simulation*:

$$\frac{\partial(\rho\tilde{E})}{\partial t} + \nabla(\rho\tilde{E}\tilde{\mathbf{v}}) = -\nabla \cdot \tilde{p} \cdot \tilde{\mathbf{v}} + \nabla(\tilde{\mathbf{T}} + \mathbf{T}_{SGS})\tilde{\mathbf{v}} - \nabla \cdot \tilde{\mathbf{q}} + \mathbf{f}_b\tilde{\mathbf{v}} \quad (22)$$

onde, \tilde{E} denota a energia filtrada total por unidade de massa e $\tilde{\mathbf{q}}$ denota o fluxo de calor médio.

3.3.2.2.2 *Detached Eddy Simulation* (DES)

(Spalart, Strelets, Allmaras, & Jou, 1997) desenvolveram uma abordagem híbrida LES-RANS que resolve as estruturas turbulentas no centro do domínio e modela o escoamento nas camadas limite por meio de um modelo RANS. Dessa forma, o DES evita os requisitos de malha excessivamente custosos da abordagem LES e foca a maior capacidade computacional em zonas de maiores descolamento do escoamento com superfícies. Adicionalmente, possui algumas variações como o modelo DES de mistura elíptica, o modelo DES Spalart-Allmaras e o modelo DES SST k- ω . A formulação DES do modelo SST K-Omega é obtida modificando o termo de dissipação na equação de transporte para a energia cinética turbulenta (Menter & Kuntz, 2002).

4 METODOLOGIA

4.1 Materiais e equipamentos

Os recursos de hardware e software, apresentados a seguir, foram disponibilizados pela Siemens Indutry Software Ltda para uso no desenvolvimento das análises numéricas e desenvolvimento deste trabalho.

A máquina utilizada para pré-processamento e pós-processamento das análises numéricas, como também todo o restante do desenvolvimento deste trabalho será um Dell Precision 7530, com sistema operacional Windows 10 e processador Intel(R) Core(TM) i708850H CPU @ 2.60GHz com 6 nós e 12 processadores lógicos, com 32 GB de memória RAM física disponível.

4.1.1 *High Performance Computing* (HPC)

Para execução dos casos de análise numérica computacional, será utilizado um servidor de alta capacidade numérica localizado em Sunnyvale, nos EUA, configurado em sistema operacional Linux RedHat e operado por script SSH. Para as simulações, serão utilizados 5 nós, com 40 processadores cada, resultando em uma capacidade computacional de 200 processadores, não podendo ser superior para não impactar as demais atividades paralelas do servidor. A alta capacidade e disponibilidade de memória é primordial para a execução dos casos, em especial pelo grande número de elementos de malha e complexidade física sendo resolvida por cada espaço de tempo virtual.

4.1.1.1 Software

Como a solução das equações de Navier Stokes, que descrevem o movimento dos escoamentos em domínios fluido-viscosos, não pode ser resolvida algébricamente, é necessário uma ferramenta computacional dedicada para esse fim. O software escolhido para a análise de fluidodinâmica computacional, via volumes finitos, é o Simcenter STAR-CCM+, versão 2302, da SIEMENS. A escolha se deu pela sua grande capacidade de aliar realismo com análises multifísicas, permitindo analisar concomitantemente físicas complexas. As suas capacidades vão além dos modelos tradicionais e também incluem escoamentos monofásicos e multifásicos, dinâmica de partículas, escoamentos reativos, interação fluidos-estrutura, aeroacústica, reologia e modelagem eletrodinâmica. A ferramenta possui uma árvore de simulação bastante linear e de fácil entendimento, no qual é possível, em uma mesma interface, controlar todos os aspectos de uma análise numérica, do pré-processamento e geração de malha até a análise de resultados e pós-processamento. A sua capacidade de geração de malha automatizada com grande número de parâmetros de controle também é um diferencial importante para a qualidade final deste trabalho.

4.2 Fluxo de trabalho

A preparação do modelo de simulação levou em consideração etapas importantes para garantir que a geometria fosse representativa do túnel em escala real. Nesse aspecto, houve um cuidado significativo no dimensionamento do túnel para que o modelo gerado no computador, aqui denominado como modelo CAD, *Computer Aided Design*, fosse o mais real e completo possível. Em seguida, foram estudados diferentes métodos de criação da discretização do domínio, descrita aqui como a geração de malha volumétrica. Essa etapa é crucial para garantir

a resolução necessária para leitura dos efeitos e características do escoamento, especialmente para túneis de vento com o alto nível de turbulência e variação de momentos e vorticidade. Posteriormente, para o nível de refino onde a solução da física independe da variação do refino da malha volumétrica, buscou-se variar modelos de turbulência para o método *Reynolds Average Navier Stokes* (RANS) em regime permanente para entendimento da convergência de parâmetros físicos e das equações de conservação do momento, da energia e da massa. Entendendo o modelo mais adequado para leitura desse fenômeno, migramos a análise de regime permanente para o regime transiente da simulação, com variação temporal. Neste regime, testou-se três diferentes metodologias, sendo uma via RANS e outras duas via modelos de resolução por escala. Por fim, validou-se numericamente as análises virtuais com dados adquiridos em teste em escala real no túnel de vento fechado da UFMG, no LAExp, o Laboratório de Aerodinâmica Experimental.

O trabalho de preparação das análises virtuais até a sua correlação final seguiu o seguinte fluxo, como na Figura 4: (1) Geração e preparação da geometria, (2) Estudo comparativo de modelos dos modelos de malha volumétrica, (3) Estudo comparativo de modelos de turbulência via Reynolds Average Navier Stokes, *RANS*, (4) Independência de malha para o modelo de turbulência escolhido, (5) Análises transientes para múltiplos métodos numéricos e (6) Validação numérica. As etapas serão descritas de forma detalhada a seguir.

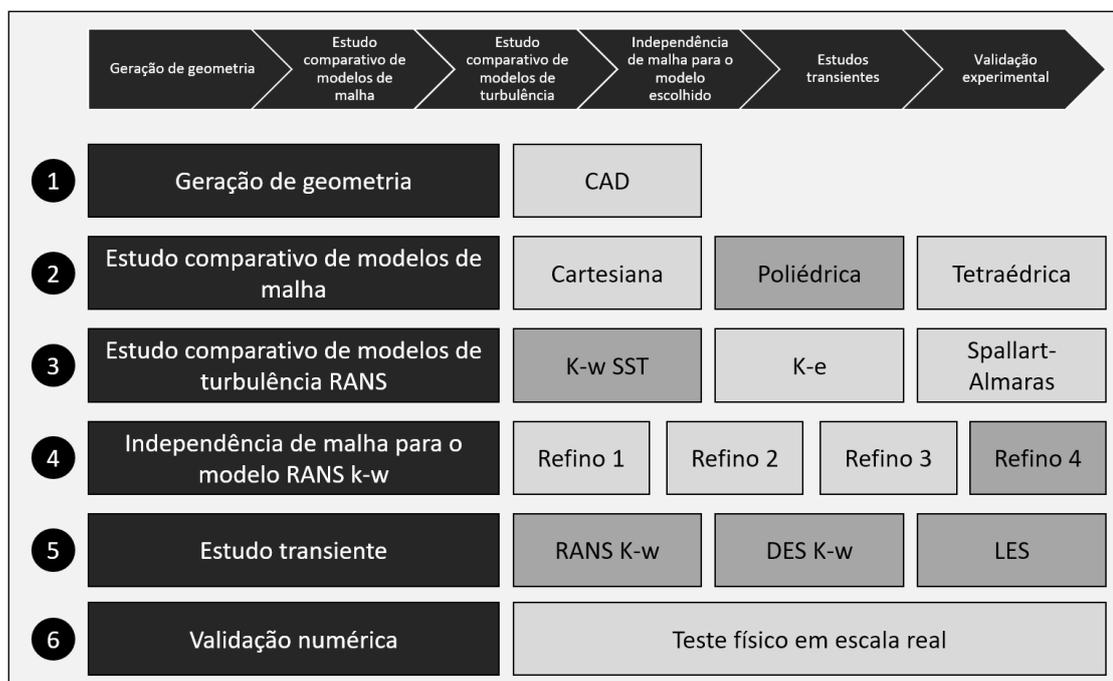


Figura 4 - Fluxo de trabalho virtual para preparação e execução das análises numéricas. Fonte: Elaborado pelo autor.

4.2.1 Geometria

Para digitalizar uma aplicação, como o escoamento em um túnel de vento de circuito fechado, como o da Universidade Federal de Minas Gerais, é necessário inicialmente ter uma geometria em *CAD* que permita gerar um domínio físico com subdivisões em um número finito de volumes de controle menores. O conjunto desses volumes é denominado de malha computacional. A geração de uma geometria em *Computer-Aided Design (CAD)* é um passo importante no processo para digitalização do túnel de vento e a capacidade de analisar o seu escoamento interno por volumes finitos. A precisão e a qualidade da geometria influenciam diretamente a acurácia e a confiabilidade dos resultados obtidos na simulação. Após a conclusão da geometria em CAD, é ainda necessário realizar verificações de qualidade para garantir que o modelo seja livre de erros durante a etapa de pré-processamento da análise fluidodinâmica. Isso inclui a verificação da continuidade da superfície, a validação das dimensões e a detecção de possíveis problemas geométricos que possam afetar a simulação.

A primeira etapa prática para a preparação de análise computacional consistiu em realizar medições nas paredes e todos os componentes internos do túnel de vento da UFMG para, posteriormente, conceber a geometria através do *software* CATIA V5, como na Figura 5. Destes componentes, foram modelados virtualmente as aletas e o motor com as suas hélices. Componentes como telas e honeycombs foram inseridos no modelo computacional como interfaces e meios porosos e neles serão aplicadas as características adquiridas experimentalmente de resistências inerciais e viscosas.

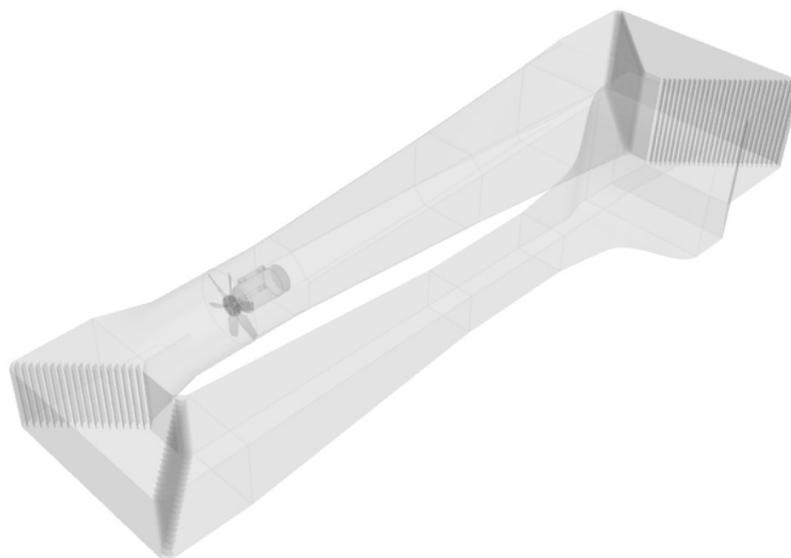


Figura 5 - Geometria em CAD do Túnel de Vento do LAExp da UFMG. Fonte: LaExp.

Uma vez que a geometria em CAD foi finalizada e verificada, ela foi exportada para o formato compatível com o *software* de simulação de mecânica dos fluidos computacional. Isso permitiu a criação do domínio físico de análise e configuração adequada da malha computacional, que é a discretização deste espaço onde a solução numérica das equações de escoamento foi aplicada.

Neste trabalho, foram gerados três domínios para a caracterização do túnel de vento da UFMG. O primeiro e maior domínio físico, estacionário, representa a maior parte da estrutura do túnel, incluindo as paredes internas, todas as curvas, aletas e a seção de testes. O segundo domínio representa a região do túnel próxima do motor subtraindo-se a sua geometria. Neste menor domínio, será aplicada uma rotação, via técnica de *moving reference frame (MRF)*, para replicar o efeito da rotação do escoamento na região próxima ao motor. No Simcenter STAR-CCM+, o *MRF* é uma forma de adição de rotação em uma região por um marco referência definido pelo usuário sem movimentação dos elementos de malha. Esta abordagem converte o movimento transiente em uma solução com média de tempo. Já os domínios de entrada e saída se conectam com a região do túnel por uma interface que permite a passagem do escoamento interno. Eles podem ser vistos nas Figura 6 e Figura 7:

Simcenter STAR-CCM+



Figura 6 - Domínio rotativo via MRF, relativo à região do motor. Fonte: Elaborado pelo autor.

Simcenter STAR-CCM+

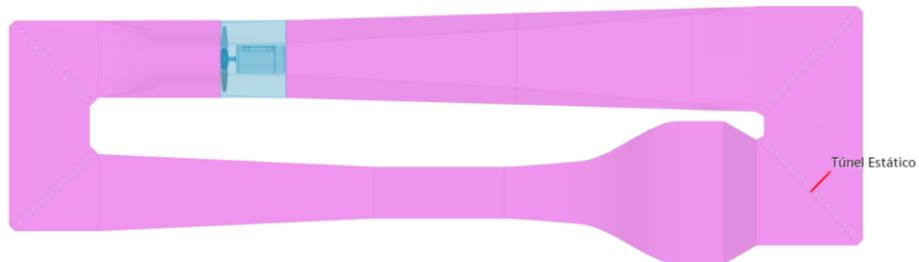


Figura 7 - Domínio estacionário, relativo à região do túnel sem o motor. Fonte: Elaborado pelo autor.

O terceiro, e último, domínio levou em consideração também a perda de carga causada pela honeycomb e tela na câmara de assentamento anterior à seção de testes. O valor da variação de pressão foi medida pela diferença de pressão adquirida por um tubo de pitot móvel anterior à honeycomb e outro fixo posterior à honeycomb. Essa medição de pressão forneceu valores importantes para correlação experimental e também forneceu os valores das resistências inercial e viscosa para definição da região como meio poroso no modelo de simulação. O cálculo está descrito no Apêndice 1. A região da honeycomb está disposta da seguinte forma, como na Figura 8.

Simcenter STAR-CCM+



Figura 8 - Região da honeycomb definida no modelo computacional como um meio poroso com valores de resistência porosas e inerciais calculadas, como Apêndice 1. Fonte: Elaborado pelo autor.

4.2.2 Geração de malha

A malha consiste em uma estrutura computacional que divide o domínio do problema em elementos discretos, permitindo a representação do escoamento de escoamentos e a solução das equações governantes. Há vários tipos de malhas e a sua escolha depende das características do

problema, da complexidade da geometria e dos requisitos de precisão e eficiência computacional. O ponto inicial para escolha da malha correta para leitura do escoamento interno ao túnel foi comparar os tipos de elementos disponíveis no *software* de volumes finitos, o Simcenter STAR-CCM+.

4.2.3 Comparativo entre modelos de malha

O Simcenter STAR-CCM+ possui um gerador automático de malha com otimizadores de qualidade de elementos para geometrias complexas e arbitrarias (SIEMENS, 2023). Os modelos volumétricos de núcleo incluem os seguintes tipos de elementos de núcleos: (a) modelo de células cartesianas, (b) modelo de células poliédricas e (c) modelo de células tetraédricas. Os elementos característicos de cada modelo estão representados na Figura 9.

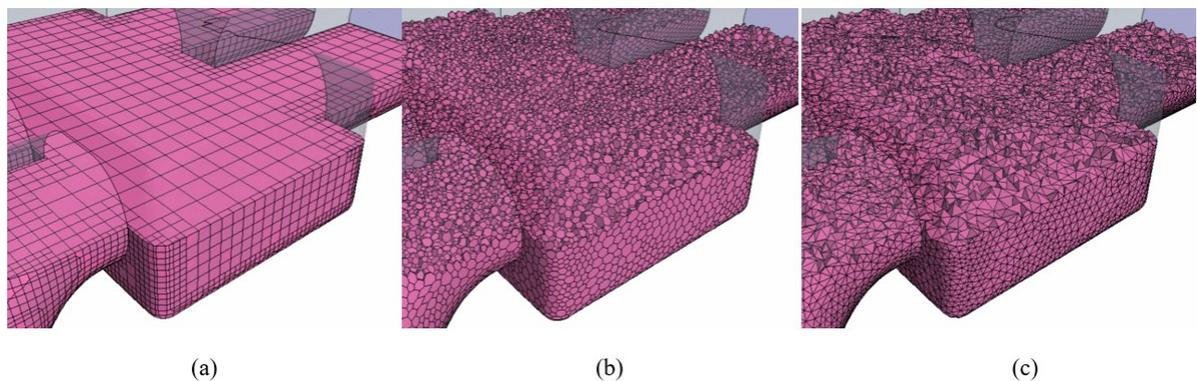


Figura 9 - Modelos de malha volumétrica disponíveis no Simcenter STAR-CCM+: (a) modelo de célula cartesiana, (b) modelo de célula poliédrica e (c) modelo de célula tetraédrica. Fonte: Adaptado de (SIEMENS, 2023).

O modelo de malha cartesiana utiliza uma malha que é construída a partir de células hexaédricas no tamanho alvo a partir do qual corta ou aparas a malha central usando a superfície de entrada inicial. A malha do modelo contém refinamento baseado no tamanho da malha da superfície local e nos controles de refinamento local. Parâmetros de crescimento podem ser usados para controlar a transição dos tamanhos das células de malha de pequeno para grande, tanto na superfície quanto no campo distante. Um tamanho de célula máximo e/ou mínimo também pode ser fornecido para controlar os limites de tamanho de célula superior e inferior (SIEMENS, 2023).

O modelo de malha poliédrica utiliza uma forma de célula poliédrica arbitrária para construir a malha central. No Simcenter STAR-CCM+, um esquema de dualização especial é usado para criar a malha poliédrica a partir de uma malha tetraédrica subjacente, que é criada

automaticamente como parte do processo. O Simcenter STAR-CCM+ calcula a contagem inicial de células desta malha tetraédrica subjacente. As células poliédricas que são criadas normalmente têm uma média de 14 faces de células (SIEMENS, 2023).

O modelo de malha tetraédrica utiliza a forma de célula tetraédrica para construir a malha central. No Simcenter STAR-CCM+, o método Delaunay é usado para construir a malha, que insere iterativamente pontos no domínio, formando tetraedros de alta qualidade no processo. A malha resultante obedece estritamente à triangulação da superfície no limite do domínio, portanto, a qualidade da malha da superfície original deve ser boa para garantir uma malha de volume de boa qualidade (SIEMENS, 2023).

Para a leitura correta dos efeitos viscosos da interação do escoamento com a parede, será utilizado também o modelo de camada prismática. O modelo de camada de prisma é usado com uma malha de volume de núcleo para gerar células prismáticas ortogonais próximas a superfícies de parede ou seus limites. Essa camada de células é necessária para melhorar a precisão da solução do escoamento próxima a parede (SIEMENS, 2023).

A configuração geral de malha para o nível inicial de refino, que será utilizado na comparação de modelos seguiu a seguinte relação de valores mostrados na Tabela 1:

Tabela 1 - Configuração de malha para o primeiro nível de refino, utilizado na comparação dos modelos de malha volumétrica. Fonte: Elaborado pelo autor.

Tamanho base dos elementos (mm)	20
Tamanho mínimo dos elementos (mm) (25% do tamanho base)	5
Número de camadas prismáticas (parede do túnel)	4
Número de camadas prismáticas (seção de teste, motor e aletas)	8
Espessura da camada limite (mm) (33% do tamanho base)	6

O tamanho base inicial escolhido foi de 20 milímetros, que é o equivalente a 0,1 % do comprimento da geometria real. O tamanho mínimo dos elementos foi definido via relação percentual com o tamanho base, com a proporção de 25%, o que equivale a um valor de 5 milímetros. Para leitura da camada limite, 4 camadas prismáticas foram geradas para as superfícies internas. Superfícies mais críticas como a seção de teste, o motor e as aletas

receberam 8 camadas. A espessura da camada limite foi definida como 6 milímetros, ou 33% do tamanho base

O foco inicial neste trabalho foi comparar as características principais dos tipos de malha, especialmente em relação à parâmetros de esforço computacional, para que posteriormente, o modelo de malha escolhido seja refinado em uma análise de sensibilidade e o modelo possa evoluir para captura correta das características do escoamento no túnel. A Tabela 2 mostra a variação do número de elementos por modelo, enquanto a *Figura 10* mostra a comparação visual da malha em um corte transversal em toda a geometria do túnel de vento da UFMG.

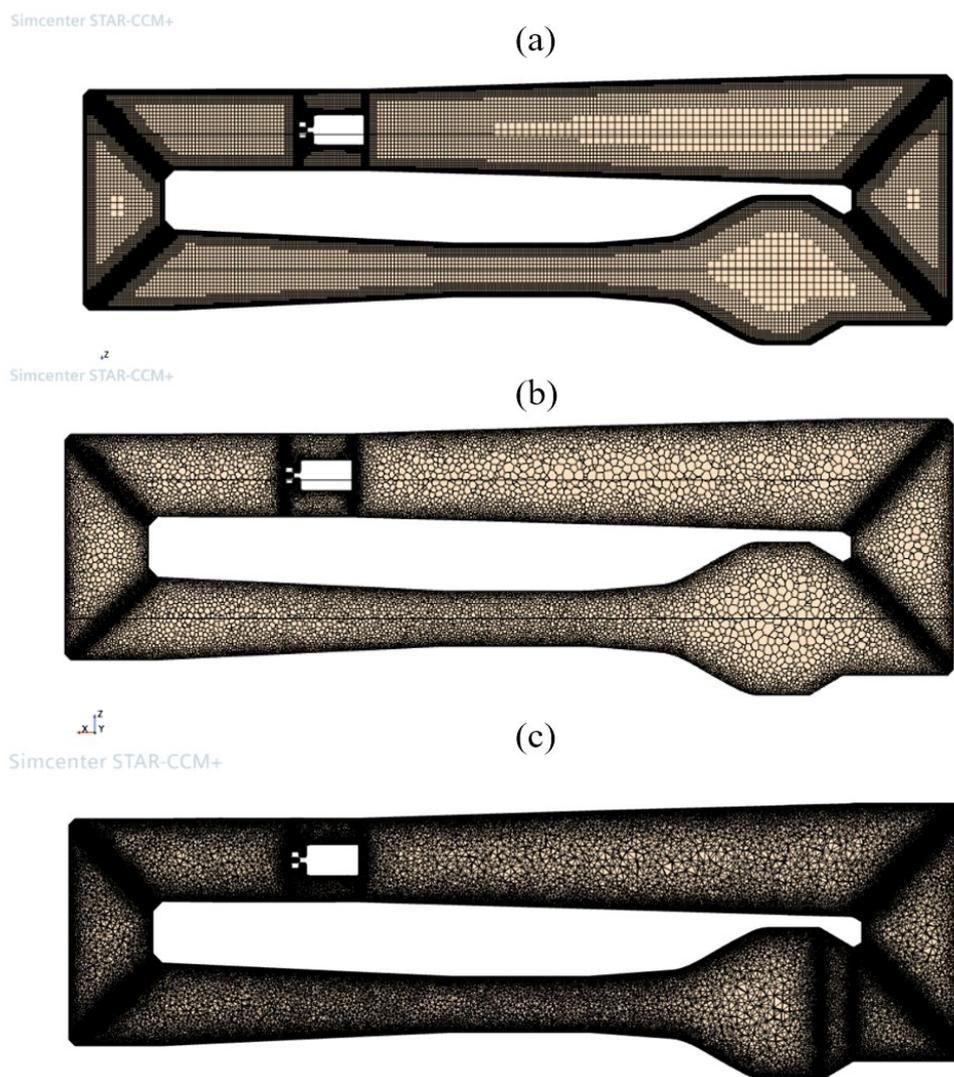


Figura 10 - Plano cortado do domínio para visualização da malha gerada em seu nível primário de refino para: (a) modelo de células cartesianas, (b) modelo de células poliédricas e (c) modelo de células tetraédricas. Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 2 - Comparação de modelos de malha. Fonte: Elaborado pelo autor.

Modelo de malha	Tamanho base dos elementos (mm)	Nº de elementos
Modelo de células cartesianas	20	16379661
Modelo de células poliédricas	20	10899560
Modelo de células tetraédricas	20	35944080

Observa-se em detalhes no gráfico da *Figura 11* uma diferença de número de elementos significativa entre o conjunto de modelos de malha cartesiana e poliédrica para o modelo de células tetraédricas. A malha tetraédrica, com o mesmo tamanho base de elementos, por suas características geométricas, necessita gerar mais elementos para discretizar o volume. Essa diferença também se reflete no tamanho dos arquivos finais gerados com solução, como visto no gráfico da *Figura 12*.

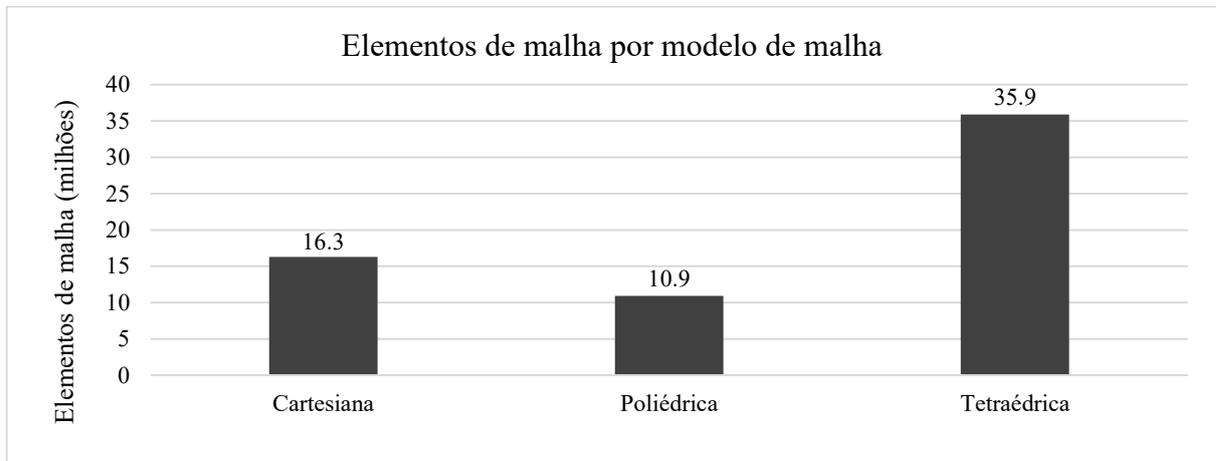


Figura 11 - Número de elementos por modelo de malha. Fonte: Elaborado pelo autor.

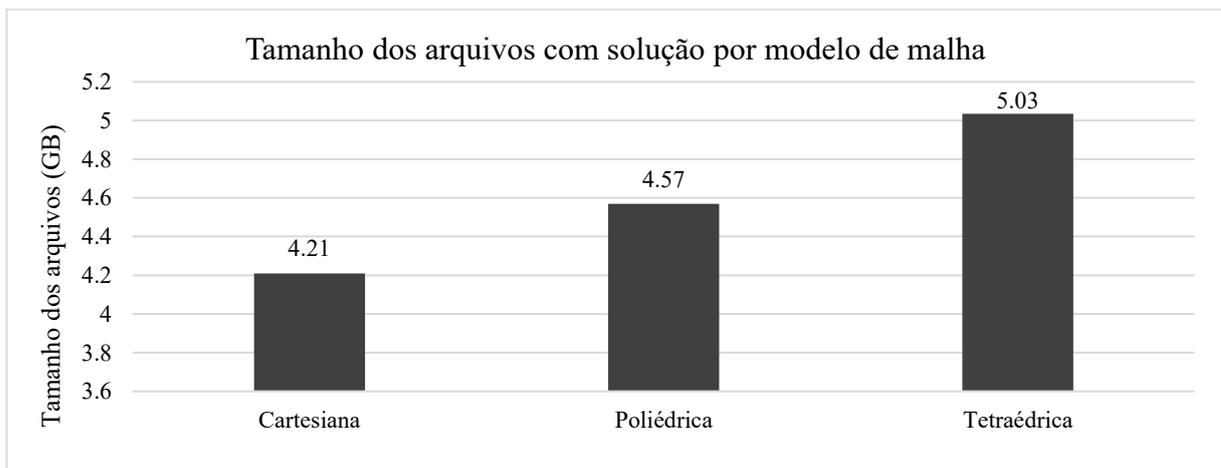


Figura 12 - Tamanho dos arquivos finais com solução e malha comparados para modelos diferentes de malha volumétrica. Fonte: Elaborado pelo autor.

Outro ponto importante desta comparação foi o tempo que o *software* levou para completar cada análise, executando os casos até um limite de 3000 iterações em regime permanente, como mostrado na *Figura 13*. Apesar da diferença, em minutos, não ser aparentemente significativa, é esperado que o número de elementos da solução final supere estes valores apresentados na Tabela 2 em mais de dez vezes, o que impactaria significativamente nos tempos finais de solução.

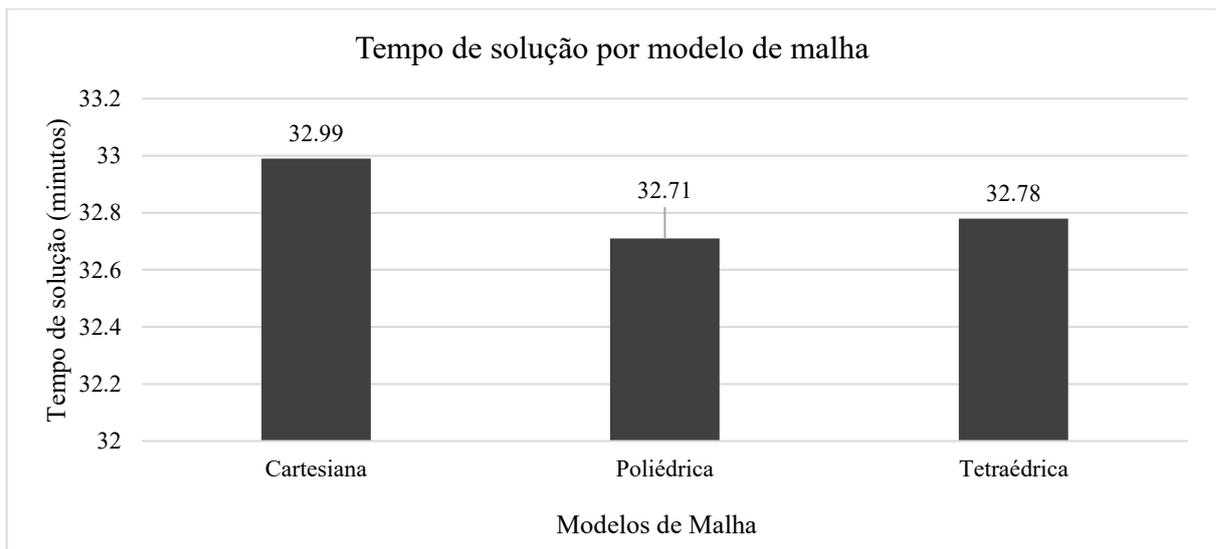


Figura 13 - Comparativo de tempo de solução por modelo de malha. Fonte: Elaborado pelo autor.

4.2.4 Convergência e independência de malha

A estabilidade numérica para este tipo de análise computacional é um ponto importante de análise. A alta energia do escoamento associada à turbulência, gera necessidades de refino especiais para as camadas limites e regiões de interação dos elementos com as aletas e motor. Essa capacidade correta de discretização do domínio está associada aos modelos físicos resolvidos naqueles espaços e as resoluções destas respostas. Neste tipo de caso resolvem-se as equações de movimento para momento em x, y e z, a equação de energia, e as equações referentes aos modelos de turbulência.

A capacidade dos elementos lerem corretamente os efeitos do escoamento na camada limite é também vital para garantir a acuracidade das análises, especialmente na seção de testes e nas aletas, zonas mais críticas para os testes experimentais e fontes de geração de vórtices e turbilhões. Para isso, parte do foco na geração da malha volumétrica foi garantir a

geração de camadas prismáticas suficientes nestas regiões, para posterior análise de parâmetros como $Wall Y^+$, para assegurar a validade do modelo. Além das próprias camadas próximas às superfícies, as regiões próximas à esses elementos também precisam de um nível de refino maior para captura dos efeitos de esteira, descolamento e variações de pressão e velocidade do escoamento antes e após a passagem por esses elementos e a sua estabilização até um ponto próximo de ser entendido como não perturbado. As malhas nas regiões da seção de teste e das aletas da primeira curva, para os modelos de malha cartesiana e poliédrica, podem ser vistos na *Figura 14*.

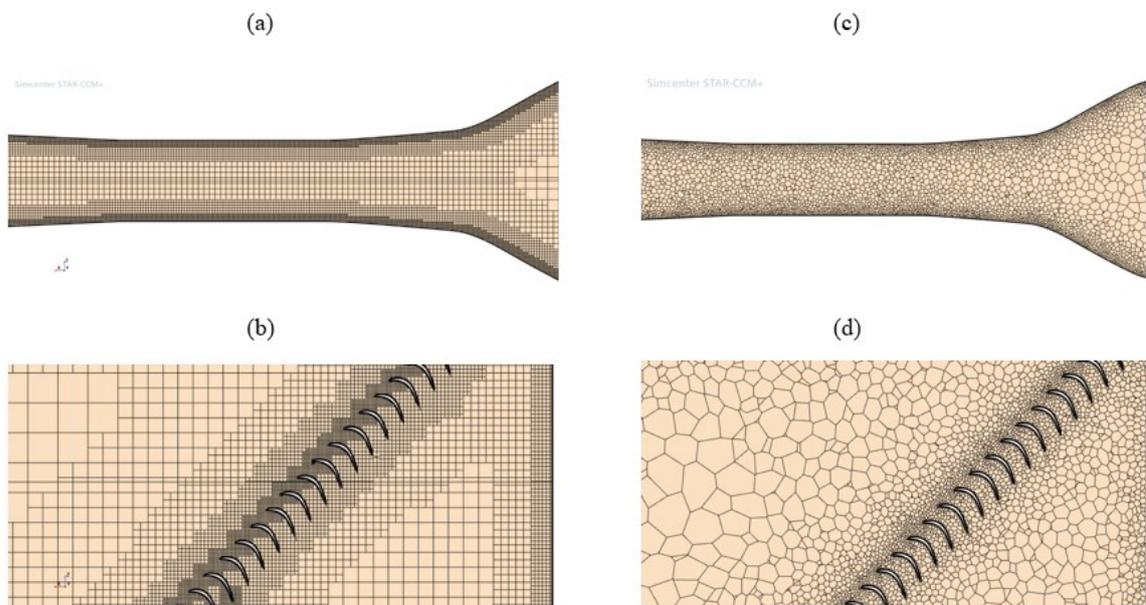


Figura 14 - Plano cortado para visualização da malha para: (a) seção de testes da malha cartesiana, (b) aletas da malha cartesiana, (c) seção de testes da malha poliédrica e (d) aletas da malha poliédrica. Fonte: Elaborado pelo autor.

4.2.4.1 Convergência dos modelo de malha

Ao resolver as equações de transporte, é necessário analisar os resíduos gerados para julgar a convergência do método numérico, em razão da solução baseada em método iterado. Os resíduos são a diferença entre o primeiro e o segundo membro das Equações 17,18 e 19, e eles nos fornecem uma dimensão da precisão do resultado. A solução é considerada convergente se os resíduos oscilarem pouco para um valor suficientemente pequeno. Em alguns casos, por baixa qualidade dos elementos de malha, erros dispersivos resultam em oscilações da solução dentro de algumas células. Essa incapacidade da malha de minimizar os resíduos pode também gerar resultados não convergentes. Os resíduos não estão necessariamente ligados à parâmetros

de engenharia como forças, pressões e vazões (SIEMENS, 2023). Para uma análise completa de convergência, é necessário também julgar o comportamento de parâmetros físicos quantitativos, como velocidade e pressão, buscando um limite assintótico concomitantemente a diminuição dos resíduos.

Analisando os resíduos gerados para os quatro níveis de refino do modelo de malha cartesiana, verifica-se uma dificuldade na convergência da equação de energia cinética do modelo de turbulência. Podemos ver na *Figura 15*, que representa o último nível de refino, uma oscilação positiva sem característica assintótica dos resíduos.

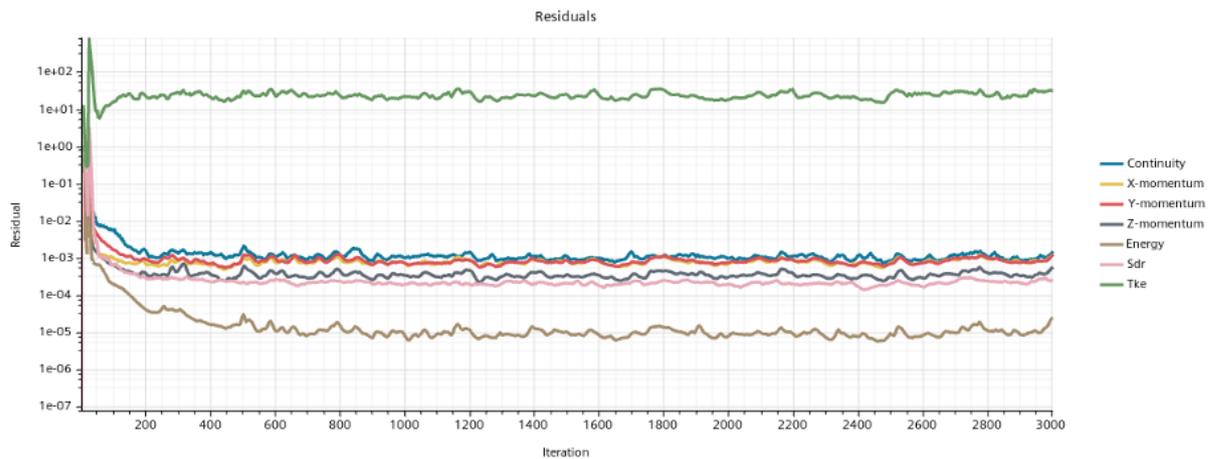


Figura 15 - Resíduos da análise para o modelo de malha cartesiana. Fonte: Elaborado pelo autor.

O efeito nos parâmetros físicos foram valores não realísticos. Nessa simulação, as velocidades de entrada e saída da região do motor foram, respectivamente, 191,13 e 206,59 metros por segundo, como podemos ver na *Figura 16*.

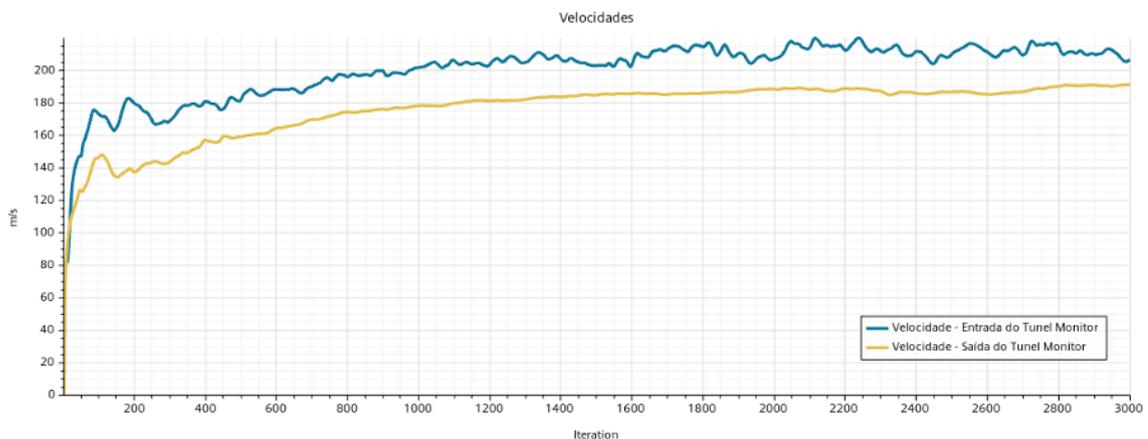


Figura 16 - Velocidades de entrada e saída da região do motor para o modelo de malha cartesiana, refino 4. Fonte: Elaborado pelo autor.

Ao analisarmos os resíduos para o modelo de malha poliédrica, observamos também um comportamento análogo. Entretanto, o valor no qual os resíduos oscilam é aproximadamente 70 vezes menor em uma comparação direta aos resíduos do modelo de malha cartesiana. A característica oscilatória residual é devido a grande variação de momento do escoamento interno do túnel e sugere a necessidade de diminuirmos mais o tamanho dos elementos ou analisarmos o caso com variação temporal. Os resíduos para o modelo de malha poliédrica podem ser vistos na Figura 17.

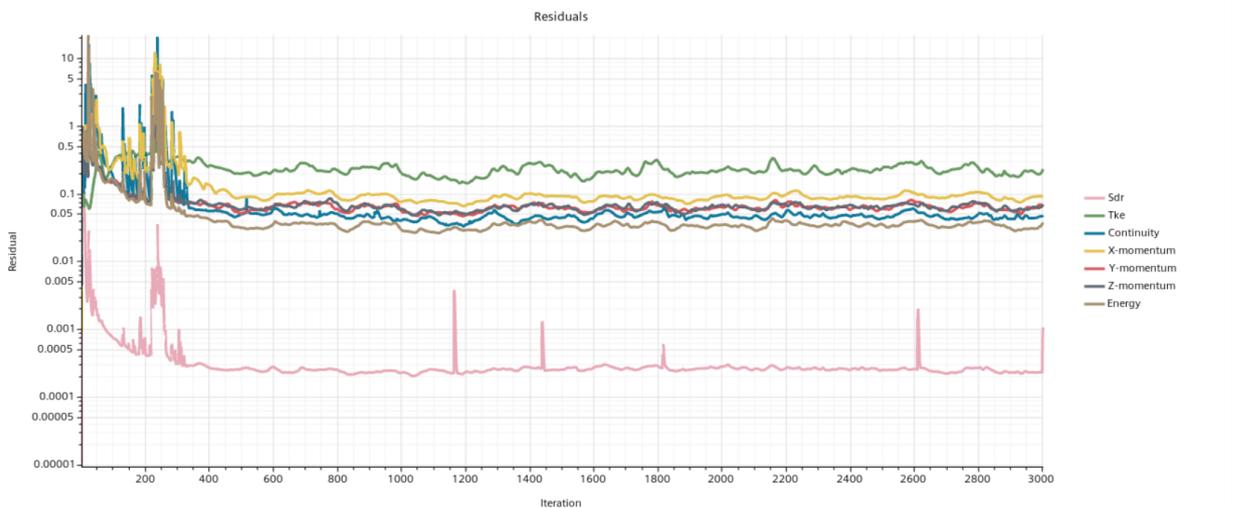


Figura 17 - Resíduos da análise para o modelo de malha poliédrica. Fonte: Elaborado pelo autor.

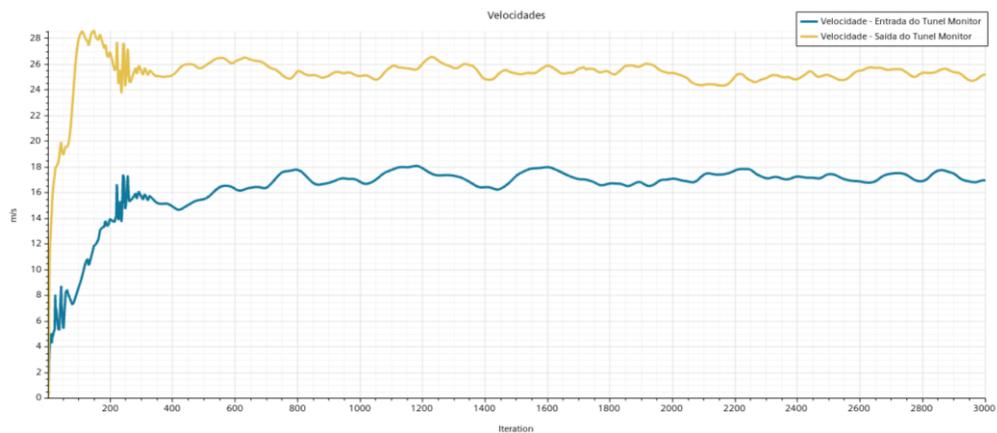


Figura 18 - Velocidades de entrada e saída da região do motor para o modelo de malha cartesiana. Fonte: Elaborado pelo autor.

O resultado para os parâmetros físicos com o modelo de malha poliédrica foram valores mais coerentes com a expectativa e com um grau oscilatório consideravelmente menor, como pode ser visto na Figura 18. Pelos parâmetros apresentados de número de elementos, tempo de

solução dos casos, aliado à melhor estabilidade de convergência dos modelos, decidiu-se seguir as análises com o modelo de malha poliédrico.

4.2.4.2 Independência de malha do modelo poliédrico

Em análises numéricas, se os elementos forem considerados muito grandes para a leitura de mudanças de velocidade e característica de resolução do escoamento, a malha é descrita como grosseira. Se a malha for muito grosseira em regiões onde o escoamento sofre grandes mudanças de direção, detalhes do seu comportamento serão perdidos, resultando em imprecisões nos resultados. Nesta etapa do projeto, buscou-se diminuir o tamanho dos elementos de malha para entender a relação de convergência numérica. Dessa forma, a Tabela 3 mostra a relação de refino para o estudo de independência de malha com o modelo de células poliédricas.

Tabela 3 - Refino para independência de malha poliédrica. Fonte: Elaborado pelo autor.

Malha	Tamanho base dos elementos (mm)	Nº de elementos
Malha 1	20	10899560
Malha 2	15	18800984
Malha 3	10	40300095
Malha 4	5	150960945

Se uma malha grosseira for escolhida, ela poderá produzir um erro substancial no resultado. Por outro lado, à medida que a malha se torna mais fina, esse erro tende a diminuir. Se o tamanho dos elementos de malha for reduzido a um ponto em que o resultado numérico se aproxime da solução real, diminuir ainda mais o tamanho do elemento não deve afetar significativamente a solução. Quando tal cenário surge, a solução é considerada independente da malha. É imperativo lutar pela independência da malha em simulações para garantir resultados confiáveis (Anderson Jr., 1995). Além do mais, um refino excessivo da malha neste ponto significa um custo computacional excessivo e desnecessário, gerando maiores tempo de solução sem uma contrapartida em acuracidade e maiores tamanhos de arquivo, que tornam a manipulação dos casos e pós-processamento difíceis. O tamanho dos arquivos crescem significativamente com o refino da malha. O nível 4 de refino, que utiliza um tamanho base de elementos de 5 milímetros gera arquivos 12,7 vezes maiores que o nível 1 de refino, que utiliza um tamanho base de 2 milímetros. Essa relação de tamanho final dos arquivos com solução pode ser vista na *Figura 19*.

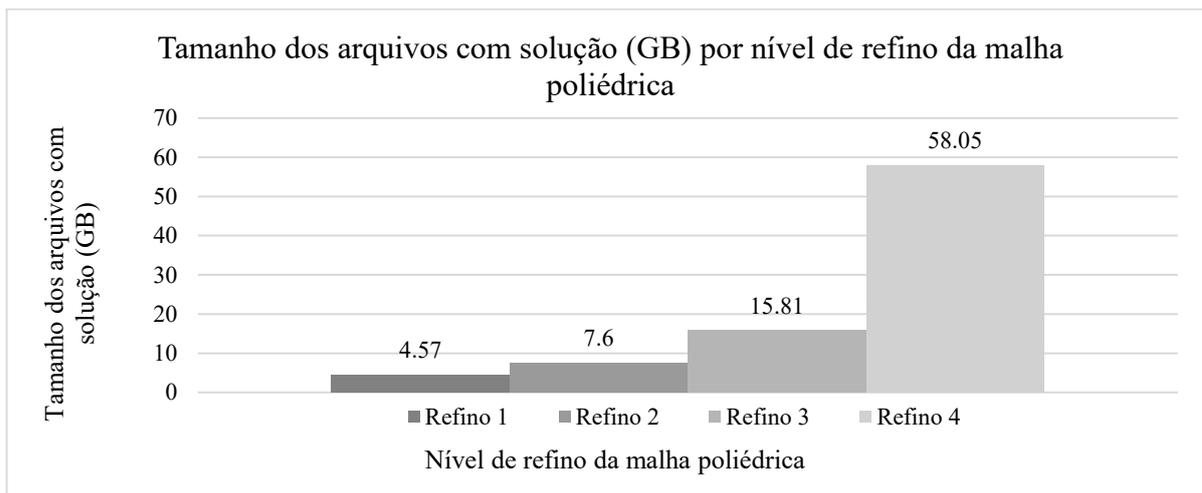


Figura 19 - Tamanho dos arquivos com solução por nível de refino da malha poliédrica. Fonte: Elaborado pelo autor.

Para alcançar a independência de malha com o modelo poliédrico, utilizou-se a tabela 2 como referência para a variação do tamanho base dos elementos de malha para o refino. Nesta etapa, foram analisados casos apenas estacionários, nos quais a única condição de geração de movimento interno para o escoamento a frequência de rotação do motor em 17,1 Hz. Este valor de frequência condiz com uma faixa de uso rotineira das experimentações. Posteriormente, outros pontos de operação também serão analisados. Para cada nível de refino, analisou-se, além dos resíduos como visto no tópico anterior, o comportamento de seguintes parâmetros físicos: (a) as velocidades de entrada e saída da região do motor e (b) a variação de pressão do escoamento ao passar pela honeycomb. As duas análises podem ser vistas nas *Figura 20* e *Figura 21*.

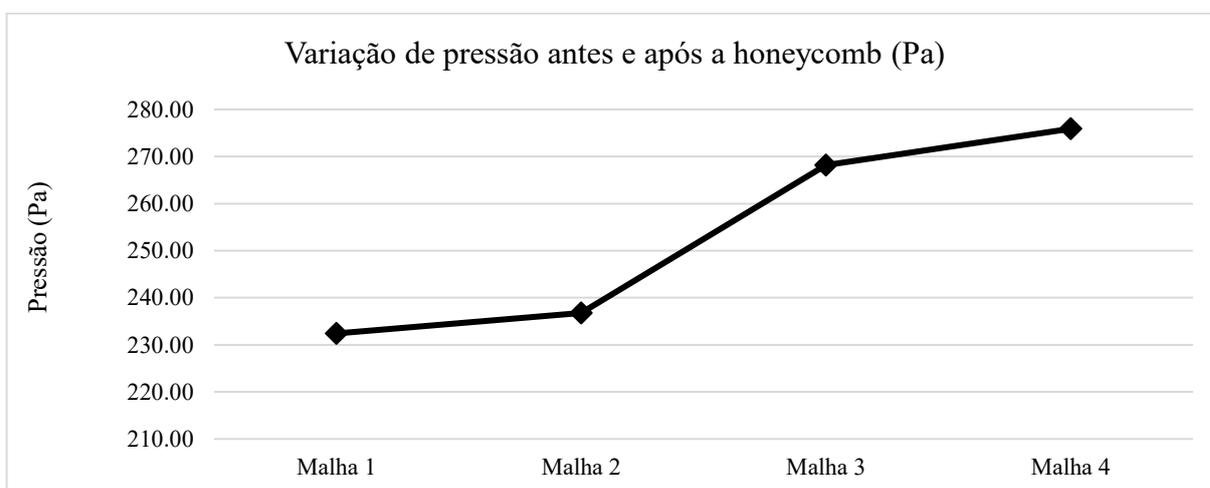


Figura 20 - Independência de malha a partir da variação de pressão medida antes e após a honeycomb. Fonte: Elaborado pelo autor.

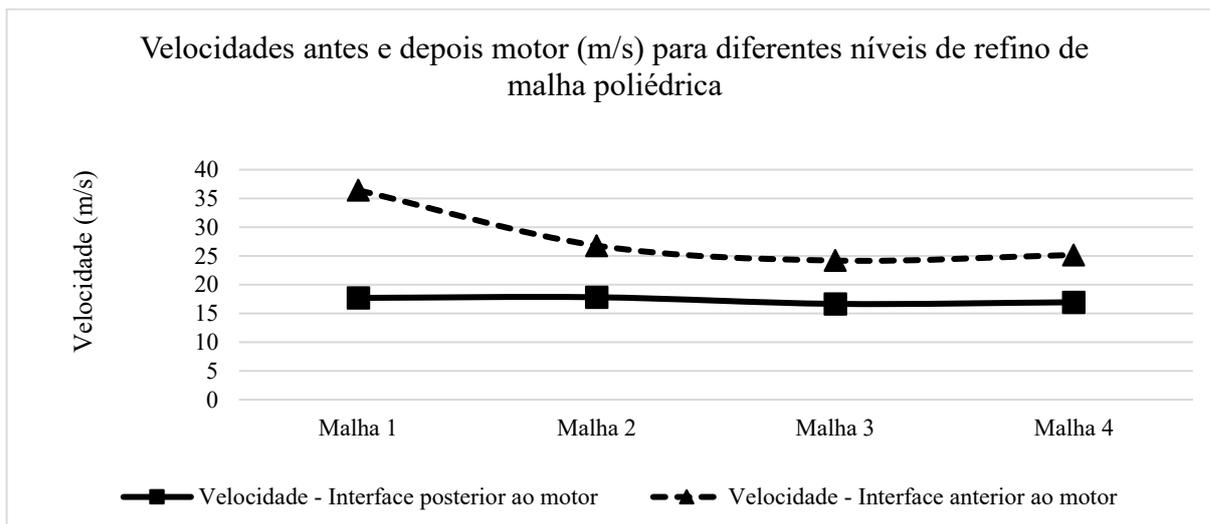


Figura 21 - Independência de malha a partir das velocidades de entrada e saída da região do motor. Fonte: Elaborado pelo autor.

Os resultados dos parâmetros em cada etapa de refino foi baseado na média das últimas 250 iterações, para que o comportamento oscilatório na variação das iterações não gerasse um impacto nos resultados. Analisando o comportamento geral dos parâmetros acima citados, fica evidente a característica convergente ao refinarmos a malha e, assim, garantimos que a malha influencie o mínimo possível nos resultados. Comparando-se, por exemplo, a velocidade média de saída do escoamento da região rotativa do motor, observa-se que a diferença do nível 1 de refino de malha para o nível 4 é de 31%. Ao compararmos com o segundo nível de refino, esta diferença cai para 6%, e em seguida, cai para 4% para o nível 3. Devido a este comportamento assintótico, decidiu-se seguir com as simulações no nível de refino 4, que já apresentam um nível suficiente de refinamento dos elementos, e focar os recursos computacionais nas análises de modelos de turbulência e análises transientes com diferentes métodos numéricos.

4.2.5 Comparativo de modelos de turbulência

Em cálculos numéricos, a ocorrência de erros de truncamento no resultado é inevitável, pois os métodos numéricos têm precisão limitada até uma certa ordem. Esses erros são amplificados por simplificações do modelo, como a própria modelagem da turbulência. Analisou-se nesta etapa, ainda em regime estacionário, o impacto das variações dos modelos de turbulência via *Reynolds Average Navier Stokes (RANS)*. Todos os modelos de turbulência

em regime permanente foram analisados com a mesma malha, com tamanho base de elementos de malha de 5 milímetros e um número total de elementos de 150960945.

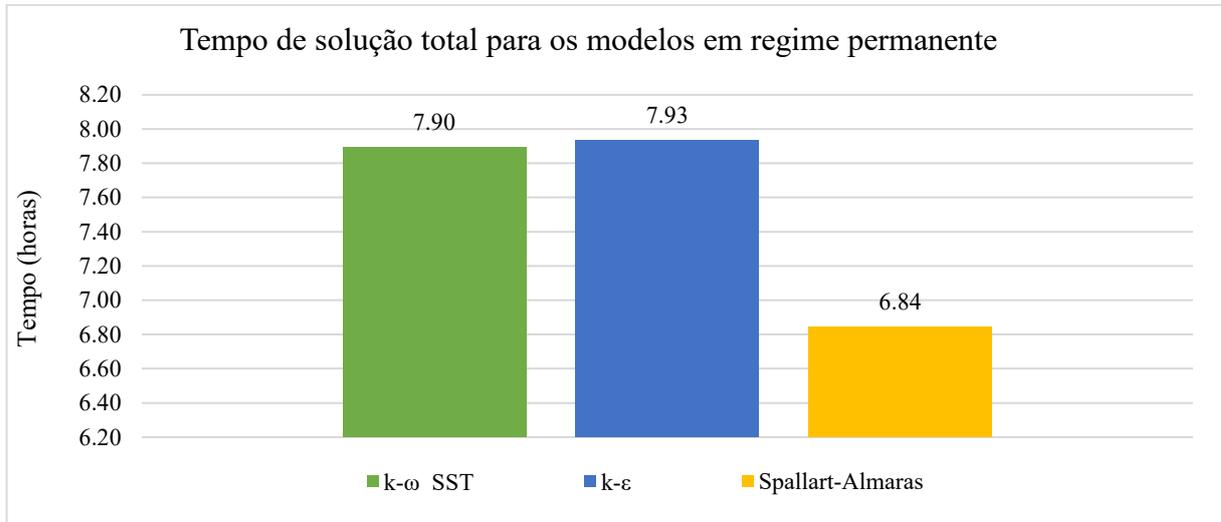


Figura 22 - Tempo de solução por modelo de turbulência para o nível mais refinado de malha volumétrica, o nível 4. Fonte: Elaborado pelo autor.

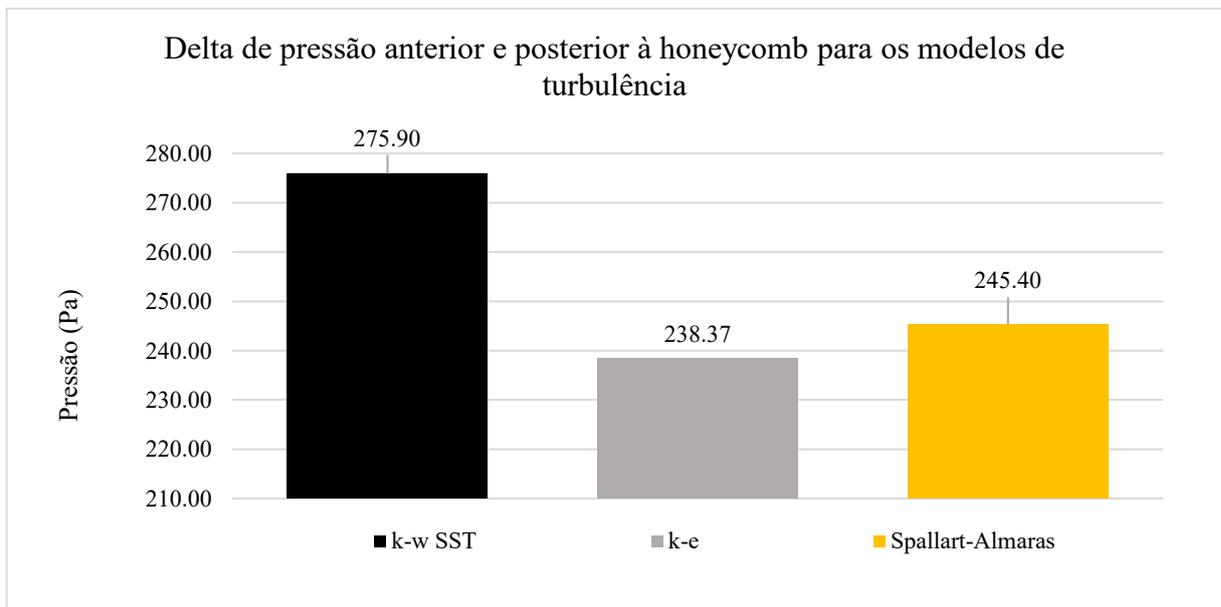


Figura 23 - Delta de pressão anterior e posterior à honeycomb para os modelos de turbulência k- ω SST, k- ϵ e Spallart-Almaras. Fonte: Elaborado pelo autor.

O tempo de solução computacional da análise utilizando o modelo Spallart-Almaras foi 13,35 % menor em comparação com o modelo k- ω SST, que por sua vez, também é 0,5 % mais rápido quando comparado ao modelo k- ϵ . A comparação pode ser vista no gráfico da *Figura*

22. Os modelos foram analisados no último nível de refino de malha volumétrica, o nível 4, e portanto não há perspectiva para um aumento de tempo de solução nos regimes permanentes. A diferença de aproximadamente 1 hora, de um total de 7 horas de solução, entre o modelo Spallart-Almaras e os modelos $k-\epsilon$ e $k-\omega$ SST é negligenciável, pois apesar dessa diferença significativa de tempo, o modelo $k-\omega$ SST se mostrou muito mais acurado na comparação com os dados adquiridos em túnel de vento e será usado assim, como base dos modelos transientes em seguida. Essa correlação com os dados medidos será mostrado na etapa de resultados, ao final deste trabalho.

4.2.6 Análise transiente

A vasta maioria dos problemas aerodinâmicos podem ser caracterizados como independentes do tempo, aplicando-se uma característica turbulenta como um termo aditivo flutuante. Apesar de soluções dessas soluções serem úteis em circunstâncias especiais, escoamentos reais são sempre transientes. Mesmo assim, em simulações, eles ainda terão características estatísticas devido às simplificações do modelo computacional. Problemas associados com a modelagem dos efeitos da turbulência são os mais difíceis de lidar. Experimentos e análises em túneis de vento com dispositivos móveis, como as hélices de um motor ou o próprio elemento sendo testado, geram também efeitos elásticos ou vibratórios que necessitam da abordagem dependente do tempo (Barlow, Rae, & Pope, 1999).

Para captar corretamente os efeitos dos turbilhões e buscar a correlação mais precisa com as medições, analisou-se também o túnel de forma transiente. A malha escolhida foi a poliédrica, com o nível 4 de refino. O objetivo é que a simulação tenha o máximo de resolução para captar as variações de leitura dos turbilhões nos modelos por escala DES e LES, e os efeitos transientes via RANS com o modelo de turbulência $k-\omega$ SST.

Nos modelos por escala, DES e LES, o cálculo direto dos turbilhões desses modelos está diretamente relacionado ao nível de refino atingido, especialmente próximo à superfícies. No modelo DES, por exemplo, quando a malha é suficientemente refinada, aplica-se o método numérico do modelo Detached Eddy Simulation (DES) e, quando não, e também quando mais afastados da superfície, os vórtices e turbilhões são modelados via RANS, de forma estatística. Todos os modelos de turbulência em regime transiente foram analisados com a mesma malha, com tamanho base de elementos de malha de 5 milímetros e um número total de elementos de 150960945.

Analisando os resíduos numéricos das três simulações para 3 segundos de variação temporal na simulação, observamos na *Figura 24* que os resultados do modelo RANS $k-\omega$ SST

e do modelo DES são, comparativamente, próximos. Isto acontece porque o modelo DES, por restrição de refino próximo à superfície está sendo resolvido na maior parte do volume do túnel como um modelo RANS. A comparação quantitativa será aprofundada na etapa de resultados, posteriormente.

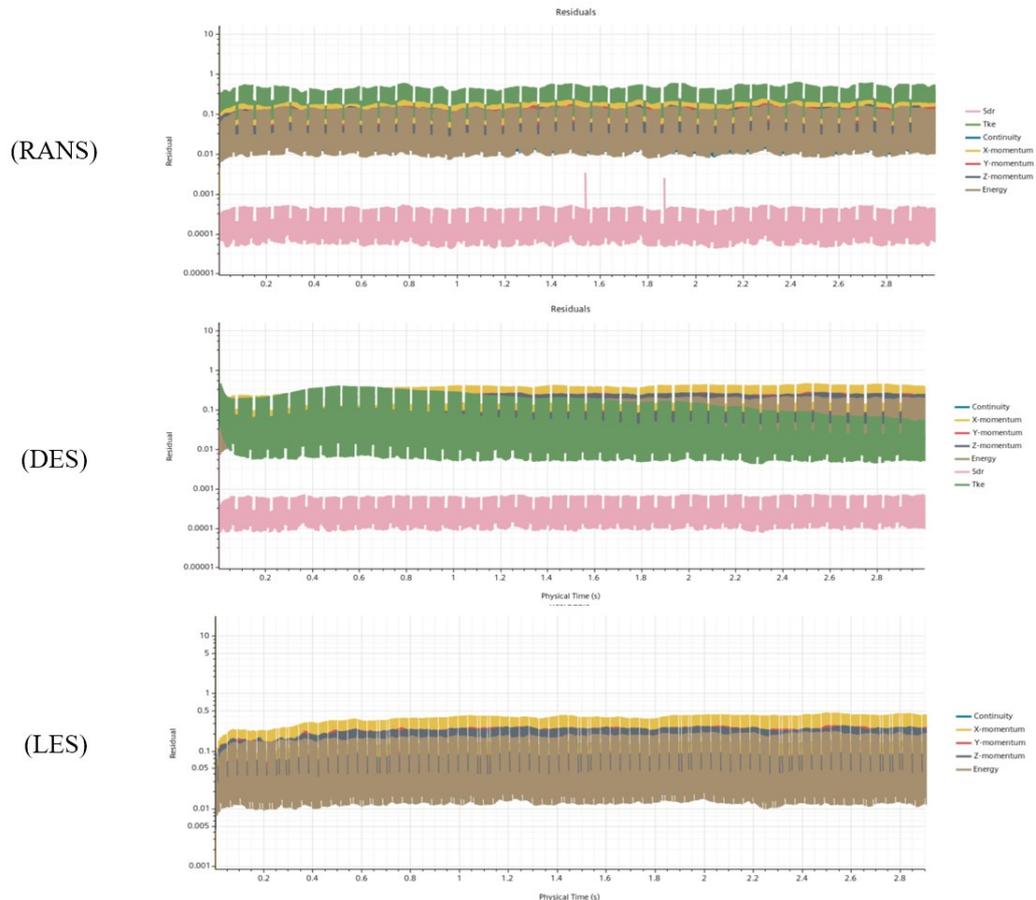


Figura 24 - Resíduos das análises do túnel de vento para 3 segundos de variação temporal com os modelos RANS, DES e LES. Fonte: Elaborado pelo autor.

Outro ponto que também chama atenção é a comparação do tempo de solução dos três modelos. Todos os modelos foram resolvidos, inicialmente, em regime permanente e depois foram executados por três segundos para essa análise inicial de parâmetros de convergência e tempo de solução. Os modelos DES e LES apresentaram aproximadamente 66 horas de cálculo. A comparação pode ser vista na *Figura 25*.

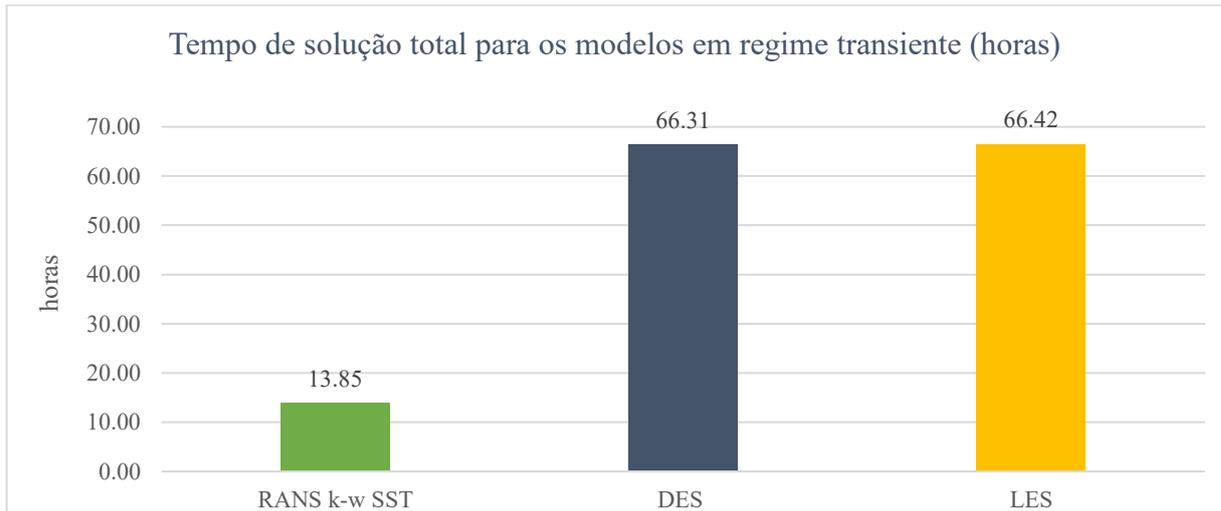


Figura 25 - Tempo de solução para 3 segundos no comparativo com os três modelos transientes: RANS k- ω SST, DES e LES. Fonte: Elaborado pelo autor.

4.2.6.1 *Wall Y+*

A qualidade de discretização de uma malha utilizada em mecânica dos fluidos computacional (CFD) está diretamente ligada à precisão dos resultados e na garantia da estabilidade numérica. Nesse contexto, uma considerável parte do estudo em fluidodinâmica computacional envolve trabalhar a discretização do domínio para correta leitura do escoamento, especialmente nas zonas de camada limite, próximas às paredes. Um parâmetro importante para analisar essa relação entre a malha e a física do modelo é denominado “parede Y^+ ” (Wall Y^+). De acordo com (Versteeg & Malalasekera, 2007), esse parâmetro adimensional relaciona a velocidade do escoamento, u_* , próxima a superfície, conforme a Equação 23, influenciada pelo atrito superficial, à distância y até a superfície mais próxima e a viscosidade cinemática ν :

$$y^+ = \frac{u_* y}{\nu} \quad (23)$$

onde u_* se define pela raiz quadrática de τ_w , tensão de cisalhamento na superfície, e ρ , densidade do escoamento, como visto na Equação 24:

$$u_* = \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}} \quad (24)$$

Para caracterização dos fenômenos de turbulência, relaciona-se a variável y^+ à velocidade adimensional, u^+ . A relação se dá de duas maneiras, de acordo com o comportamento do escoamento na camada limite analisada, como visto nas Equações 25 e 26.

$$u^+ = y^+ \quad (25)$$

$$u^+ = \frac{1}{k} \ln(y^+) + B \quad (26)$$

onde k denota a constante de Karman ($\approx 0,4$) e B denota uma constante ($\approx 5,5$).

O escoamento próximo à parede é dividido em três regiões de comportamento: (a) subcamada viscosa, onde $u^+ = y^+$; (b) região de transição; (c) região totalmente turbulenta, estimada pela lei logarítmica, onde $u^+ = \frac{1}{k} \ln(y^+) + B$.

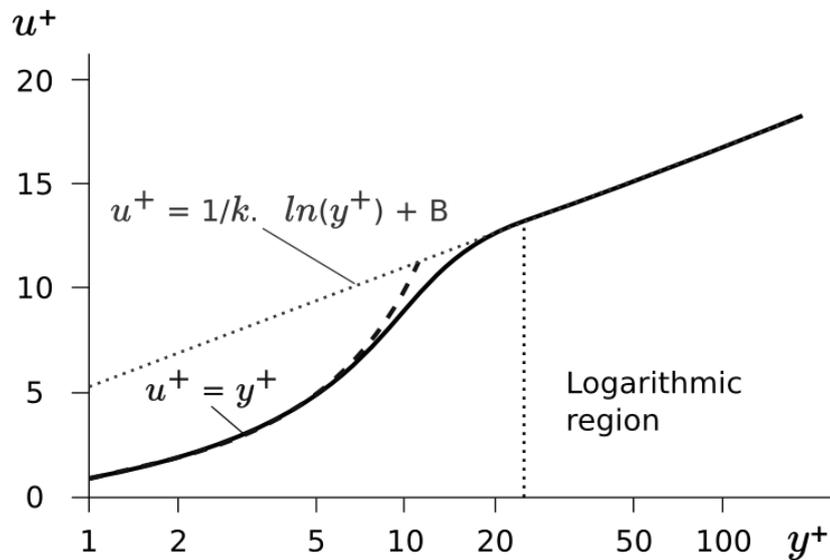


Figura 26 - Variação da função de Wall Y^+ . Fonte: (CFD-ONLINE: Law of the wall, 2023)

A *Figura 26* apresenta o significado da relação física entre os parâmetros y^+ e u^+ . Quando o valor da grandeza adimensional for relativamente pequeno, para $y^+ < 5$ aproximadamente, o escoamento estará na subcamada viscosa e a sua região possui apenas tensão viscosa $u^+ = y^+$. Quando o escoamento estiver entre $5 < y^+ < 30$ este estará na região de transição. Caso $y^+ > 30$, o escoamento estará na região logarítmica e as tensões turbulentas tornam-se predominantes. É importante ressaltar que o perfil de velocidade nessa última região não é tão previsível ou controlável quanto na subcamada viscosa. (Versteeg & Malalasekera, 2007).

Analisando este parâmetro para todos os modelos transientes, no nível de refino 4 de malha volumétrica, obtivemos valores consistentes com as melhores práticas, especialmente na seção de teste, com o escoamento já estabilizado e homogeneizado pela honeycomb. As características caóticas do escoamento a montante da honeycomb fazem com que ele esteja no limite da subcamada viscosa para as aletas. Os resultados são um bom indicativo da capacidade do modelo e das camadas prismáticas em lerem corretamente os fenômenos viscosos nessas regiões. Os resultados podem ser vistos na *Figura 27*.

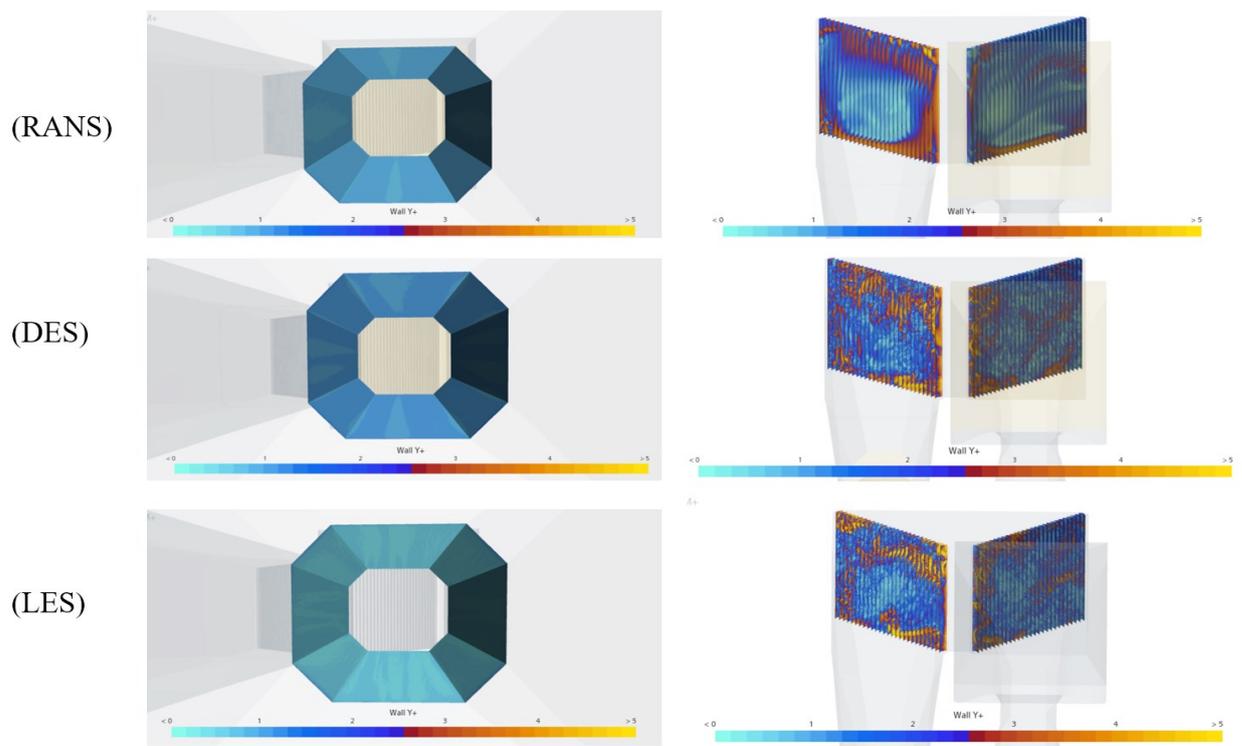


Figura 27 - Parâmetro Wall Y+ para (a) seção de testes e (b) aletas das curvas do túnel de vento da UFMG para os modelos transientes. Fonte: Elaborado pelo autor.

4.2.7 Testes experimentais

Os testes experimentais foram realizados em 26 de agosto de 2023 no Laboratório de Aerodinâmica Experimental da UFMG, o LAExp. O primeiro passo para a preparação do teste foi a limpeza e checagem das telas e honeycombs. Em seguida, preparou-se os equipamentos de teste e pontos de aquisição, adicionando um novo ponto a montante da honeycomb, para captação da variação de pressão. Este parâmetro, além de ser utilizado na correlação do experimento com o modelo virtual, também será utilizado para o cálculo das propriedades de resistência da honeycomb, como meio poroso, visto que os diâmetros internos dos tubos da honeycombs são muito pequenos para criação de geometria e geração de malha. Na Figura 28, podemos observar a seção de testes, com o tubo de pitot posicionado para aquisição da velocidade de referência e a geometria, em detalhe, da honeycomb, evidenciando a necessidade da utilização de valores adquiridos de resistências inerciais e viscosas para sua adição ao modelo numérico computacional, devido ao seu alto nível de detalhe. Cada cilindro da honeycomb possui 6 mm de diâmetro.

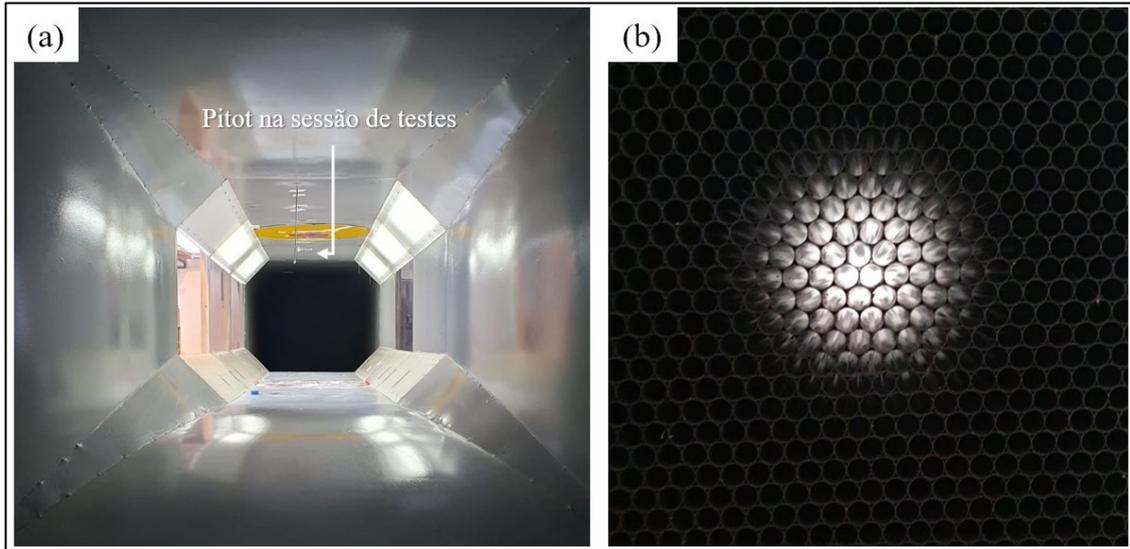


Figura 28 - (a) Tubo de Pitot na seção de testes e (b) Geometria em detalhe da honeycomb utilizada para orientar o escoamento em direção a seção de testes. Fonte: Elaborado pelo autor.

A distribuição deste e dos demais pontos de aquisição no túnel de vento se deu de acordo com a *Figura 29*. Nela, podemos observar os pontos de aquisição de pressão na seção de testes, a montante e a jusante da honeycomb, com medições por pitometria, e os pontos longitudinalmente distribuídos na seção de teste onde serão adquiridos nos modelos virtuais os parâmetros como velocidade e energia cinética turbulenta para caracterização da seção de teste.

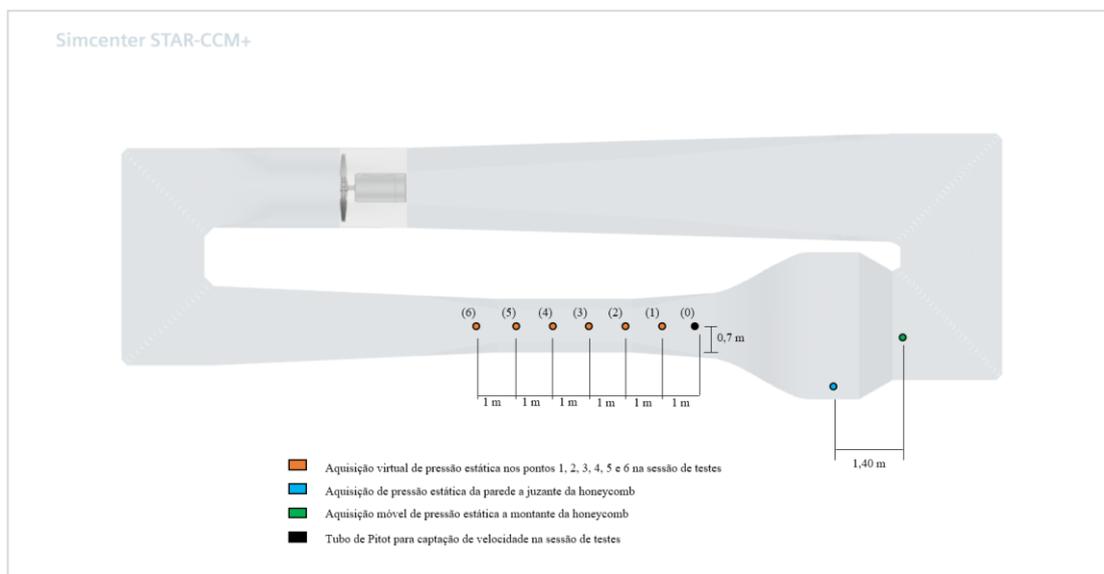


Figura 29 - Posicionamento dos pontos de aquisição de pressão e velocidades demonstrados no modelo virtual. Fonte: Elaborado pelo autor.

A *Figura 30*, mostra o tubo de pitot móvel instalado a montante da honeycomb, a seção de testes, vista do lado de fora, com detalhe a seção de testes e as interfaces de controle de velocidade e pressão do túnel de vento da UFMG.

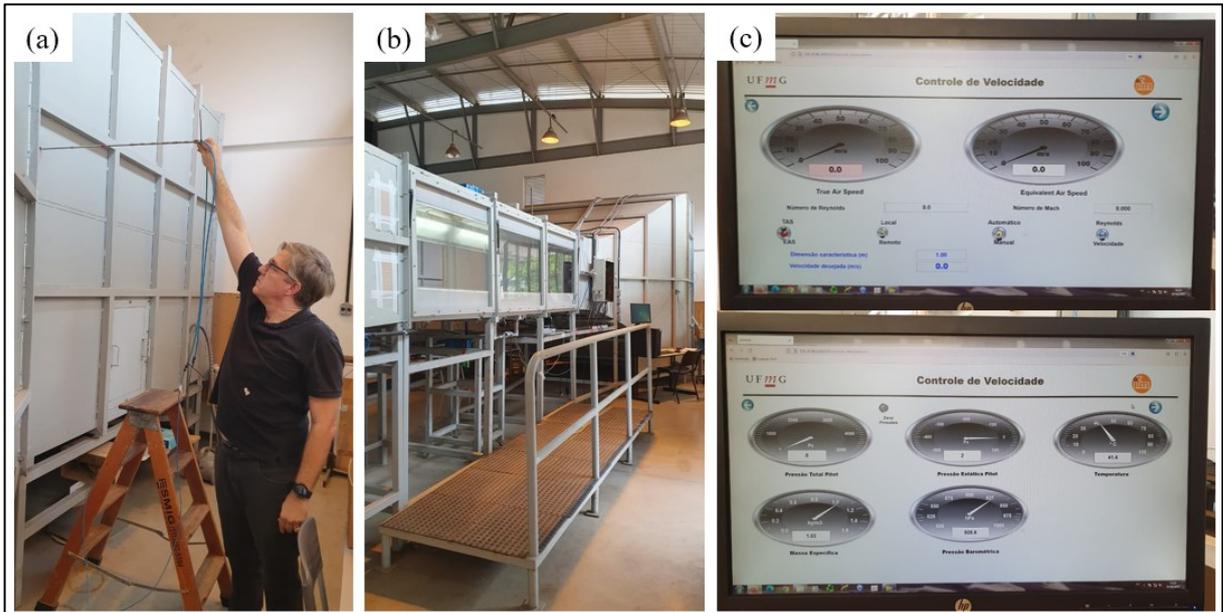


Figura 30 - (a) Tubo de Pitot móvel de pressão estática a montante da honeycomb, demonstrado pelo Prof. Dr. Guilherme Papini, (b) Visão da seção de testes do túnel de vento do LAExp, da UFMG e (c) Interfaces de controle de velocidade e pressão. Fonte: Elaborado pelo autor.

O teste de pitometria foi iniciado a uma temperatura interna do ar estabilizada em 25,1 °C, a uma pressão absoluta de 928,6 hPa, e uma densidade do ar de 1,08 kg/m³. Consistiu em aumentar progressivamente a rotação do motor, estabilizando por 20 segundos para aquisição, nas velocidades aquisitadas na seção de teste de 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70 e 80 m/s. Para cada velocidade estabilizada, variou-se a posição do tubo de Pitot móvel de aquisição de pressão estática a jusante da honeycomb, variando assim a distância da ponta de estagnação à parede do túnel em 9 posições diferentes, para melhor relação de pressão na seção transversal do túnel neste ponto. Essa relação de amostras coletadas por velocidade na seção de teste pode ser vista na *Figura 31*.

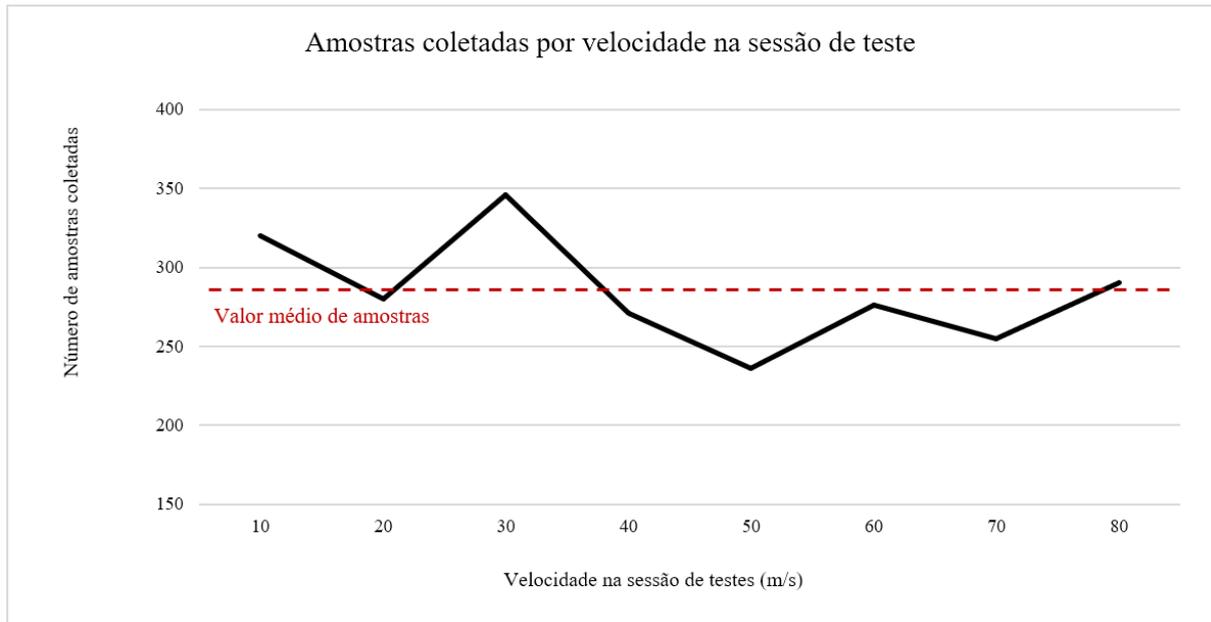


Figura 31 - Amostras coletadas de pressão por nível de velocidade estabilizado na seção de testes. Fonte: Elaborado pelo autor.

O teste teve um total de 3757 pontos de dados coletados, com uma média de 290,5 pontos coletados para cada nível de velocidade descrito. Ao final do teste, a temperatura do ar atingiu o limite de 42,3°C e a densidade do ar o valor de 1,03 kg/m³. Os resultados adquiridos experimentalmente serão discutidos na próxima etapa e correlacionados com os valores do modelo computacional.

5 RESULTADOS

5.1 Comportamento do escoamento em regime estacionário

Analisando-se inicialmente os casos estacionários, via método RANS com o modelo $k-\omega$ SST, fica evidente a importância do estudo de independência de malha ao observarmos algumas variações importantes de resultados entre os refinamentos de malha, em seus quatro graus de modificação. Pela comparação de cortes de velocidade para a solução final, os refinamentos 1 e 2 apresentam zonas de alta velocidade bem diferentes a montante do motor. Na *Figura 32*, isto fica evidente, observando o escoamento percorrer todo o caminho do túnel em sentido horário. A velocidade máxima na seção de testes e o comportamento do escoamento acelerado nas aletas entre a seção de teste e o motor também se alteram significativamente.

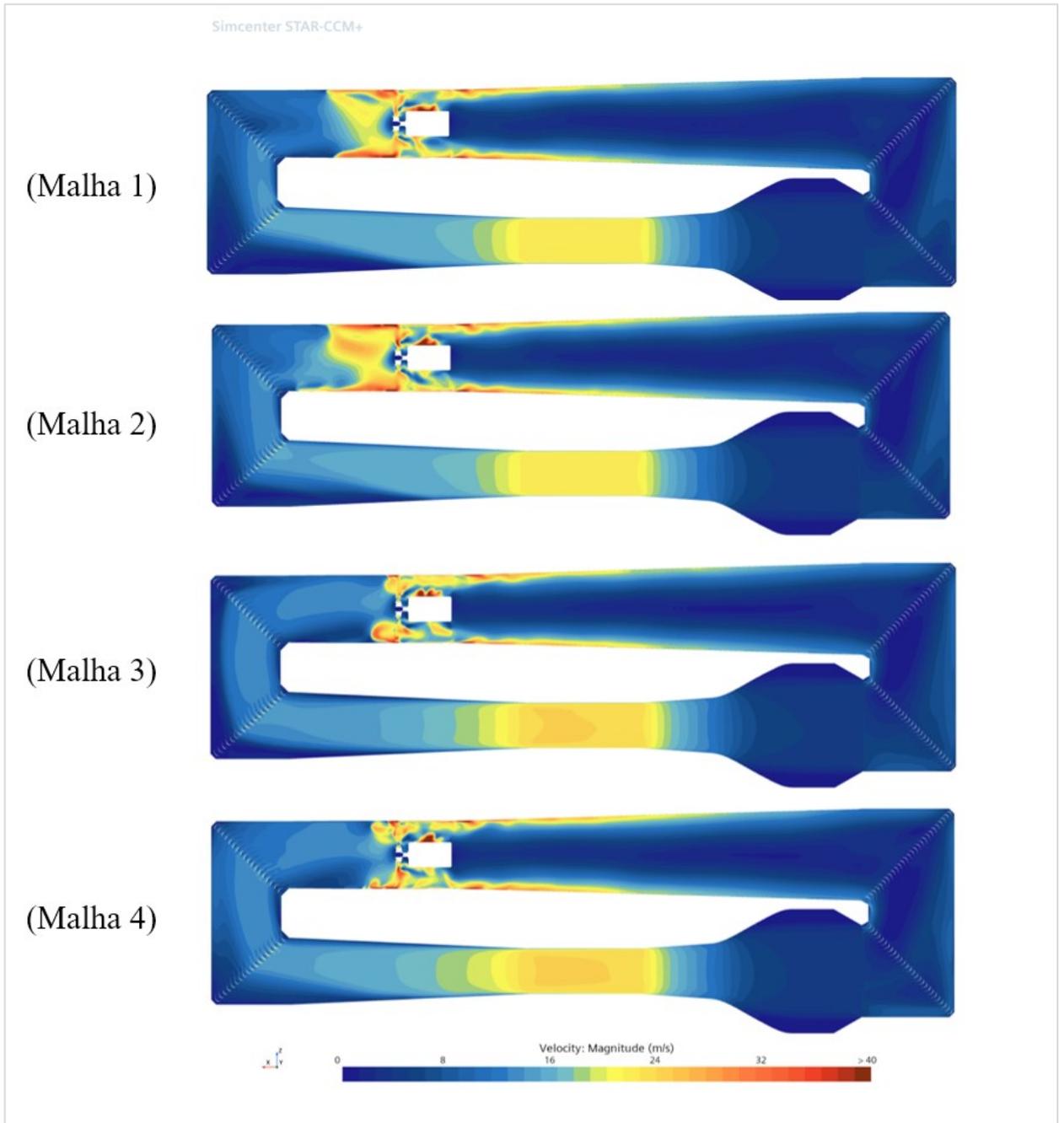


Figura 32 - Comparação de velocidades no corte do Túnel de vento em modelo RANS $k-\omega$ SST estacionário para os quatro níveis de refino de malha volumétrica. Fonte: Elaborado pelo autor.

Efeito similar ao do encontro do escoamento com a região rotativa do motor também pode ser observada na análise comparativa de pressão entre os níveis de refino analisados. A zona de baixa pressão nos níveis 1 e 2 é menor nos níveis 3 e 4. O comportamento da pressão da seção de testes também se altera significativamente, como visto na *Figura 33*.

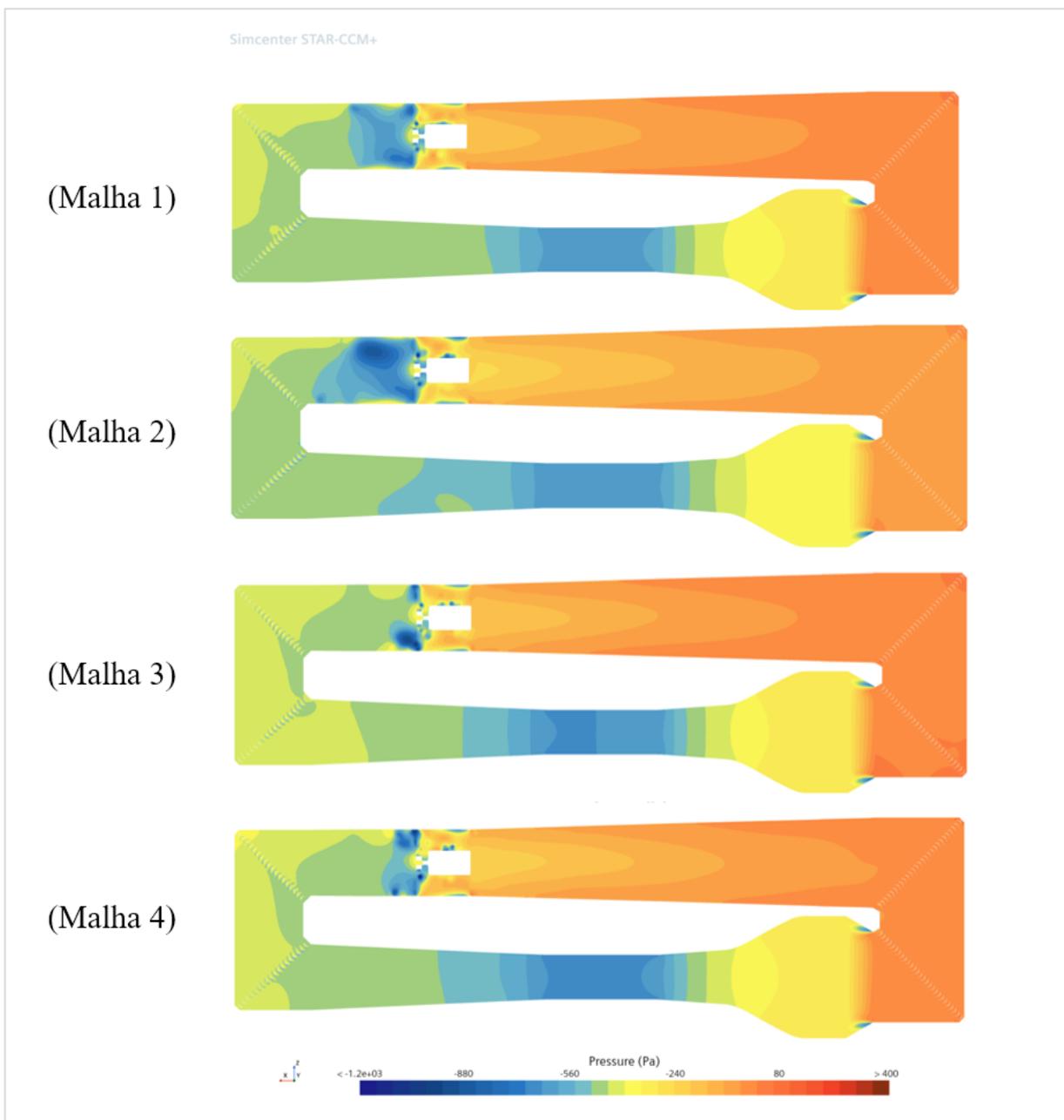


Figura 33 - Comparação de pressões no corte do Túnel de vento em modelo RANS $k-\omega$ SST estacionário para os quatro níveis de refino de malha volumétrica. Fonte: Elaborado pelo autor.

Um ponto importante para o bom funcionamento do túnel e, especialmente, da seção de testes é a indução de vórtices em regiões como a do motor e das aletas e a dissipação desses mesmos vórtices nas honeycombs e telas. Esses movimentos espirais de rotação do escoamento se formam quando há grandes variações de pressão, como demonstrado na *Figura 33*, nas magnitudes de pressão anterior e posterior ao motor. Os efeitos do refino das malhas volumétricas no parâmetro de vorticidade pode ser visto na *Figura 34*.

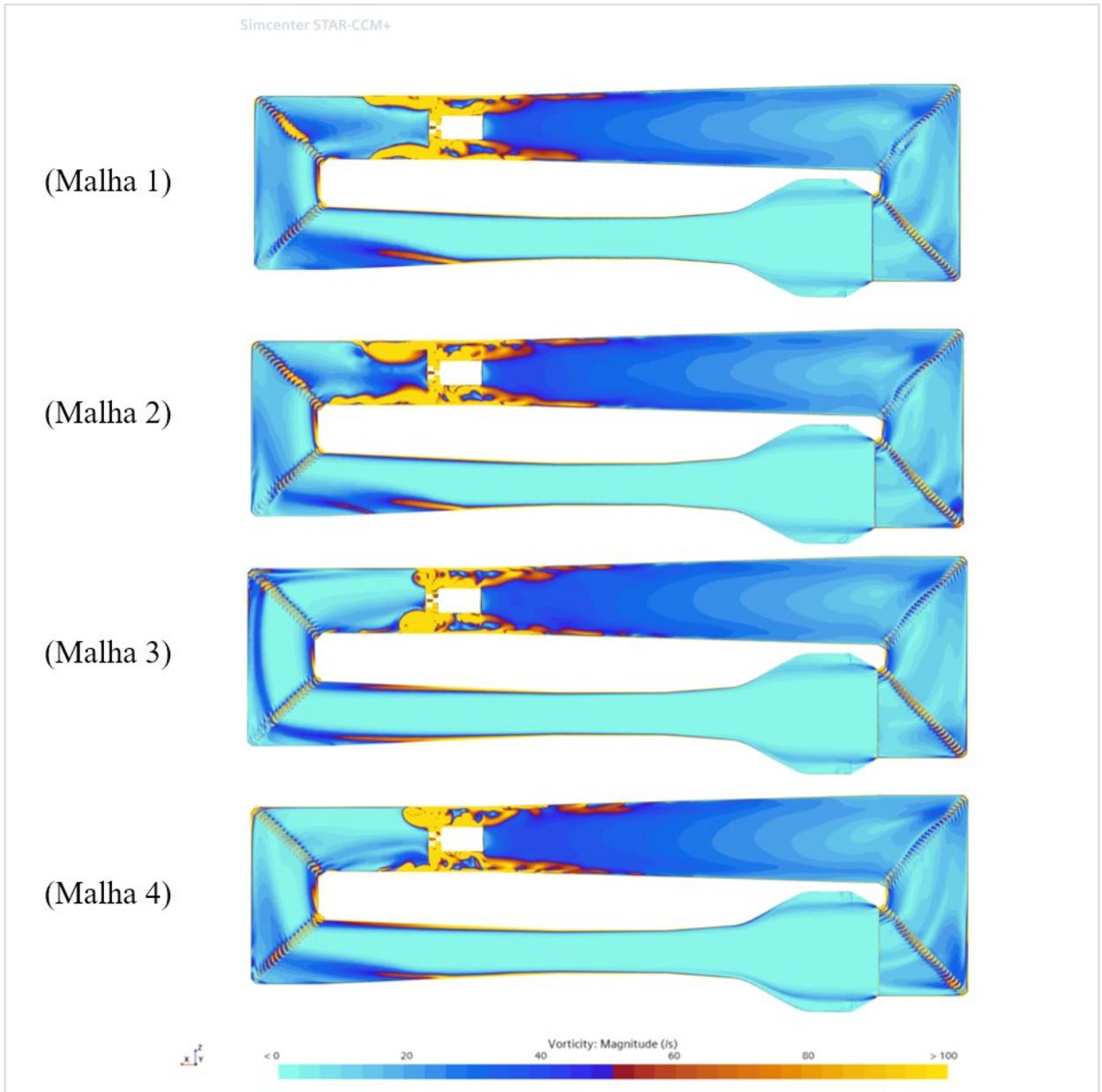


Figura 34 - Comparação de vorticidade no corte do Túnel de vento em modelo RANS $k-\omega$ SST estacionário para os quatro níveis de refino de malha volumétrica. Fonte: Elaborado pelo autor.

Na imagem, é possível observar que o refino é importante para leitura correta dos vórtices gerados nas aletas posteriores à seção de testes e nos permite diferenciar quais aletas sofrem mais com esse efeito. Fica evidente também a forte característica de geração de vórtices que a região rotativa do motor tem, como era de se esperar. Nesse contexto, a presença da *honeycomb* é crucial para a estabilização do escoamento e dissipação desses vórtices, fornecendo à seção de testes um fluxo mais homogêneo e menos perturbado.

5.2 Comportamento do escoamento em regime transiente

Ao compararmos os resultados das análises transientes, os valores numéricos da análise da queda de pressão do escoamento ao passar pela região do motor via modelo DES, é mais próximo do resultado do modelo LES, que também é um modelo que resolve a turbulência por escala, do que comparativamente ao modelo RANS $k-\omega$ SST, um modelo estatístico de turbulência, como esperado. Observa-se a diferença quantitativa de valores no gráfico da *Figura 35*.

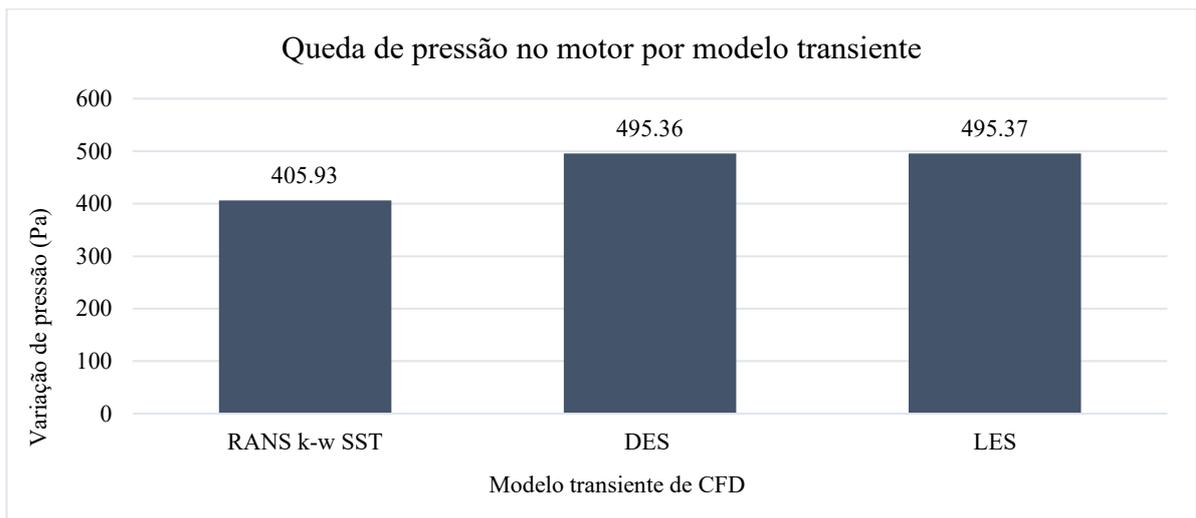


Figura 35 - Queda de pressão do escoamento no motor para diferentes modelos transientes: (a) RANS $k-\omega$, (b) DES e (c) LES. Fonte: Elaborado pelo autor.

Este efeito também pode ser observado quando comparamos as velocidades à montante e ajuzante da região rotativa do motor para os modelos transientes, como visto na *Figura 36*. A diferença entre os modelos DES e LES para o modelo RANS $k-\omega$ SST é de, aproximadamente, 6 %.

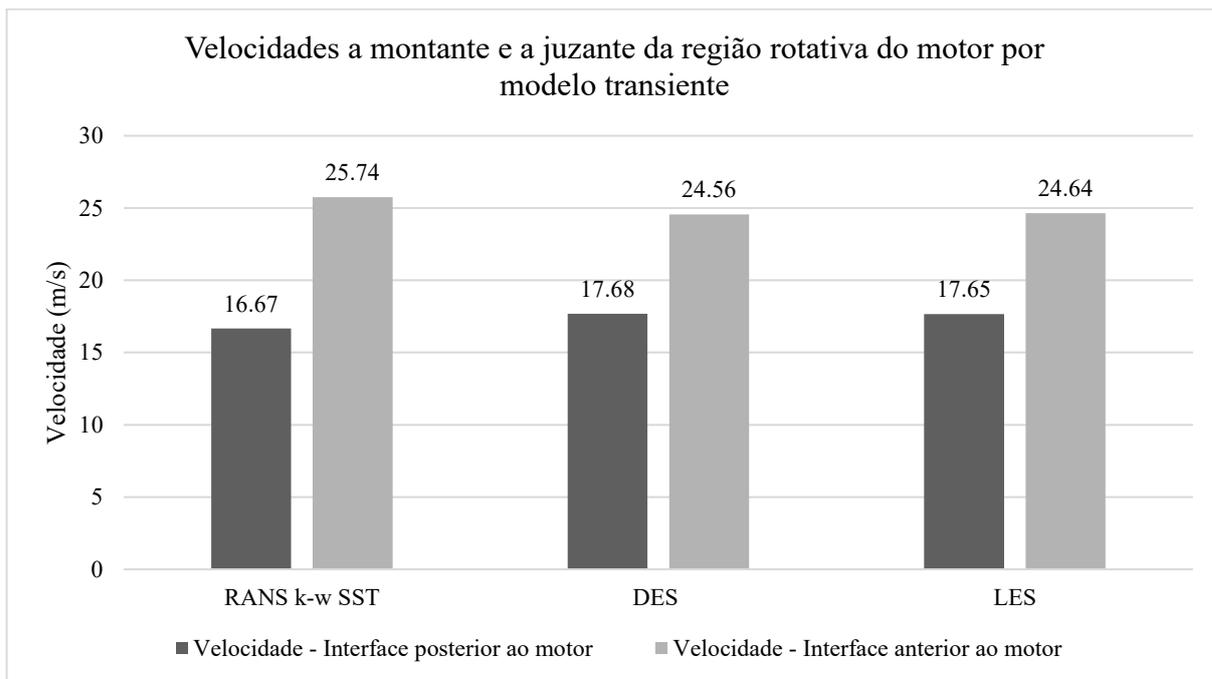


Figura 36 - Velocidades a montante e a jusante da região rotativa do motor por modelo transiente. Fonte: Elaborado pelo autor.

São para as análises transientes que os campos de parâmetros físicos se tornam mais distintos entre si, com a variação dos modelos de resolução da turbulência. Especialmente quando comparamos as velocidades, observamos uma característica muito diferente entre os comportamentos das mudanças de escala da velocidade após a passagem pelo motor e adição do momento de rotação ao momento principalmente longitudinal do escoamento. O modelo RANS k- ω SST, como é um modelo estatístico, acaba por atenuar os efeitos dos turbilhões e o resultado final é um valor médio de captura da mudança de velocidade, e por consequência, da turbulência. Outra região que merece atenção é a seção de testes. Assim como para a pressão, fica claro que o modelo RANS k- ω SST não atinge o mesmo valor máximo de velocidade que os modelos DES e LES, mostrando novamente uma característica de subestimar valores físicos, resultantes da sua atenuação da turbulência. É possível ver esses efeitos na *Figura 37*.

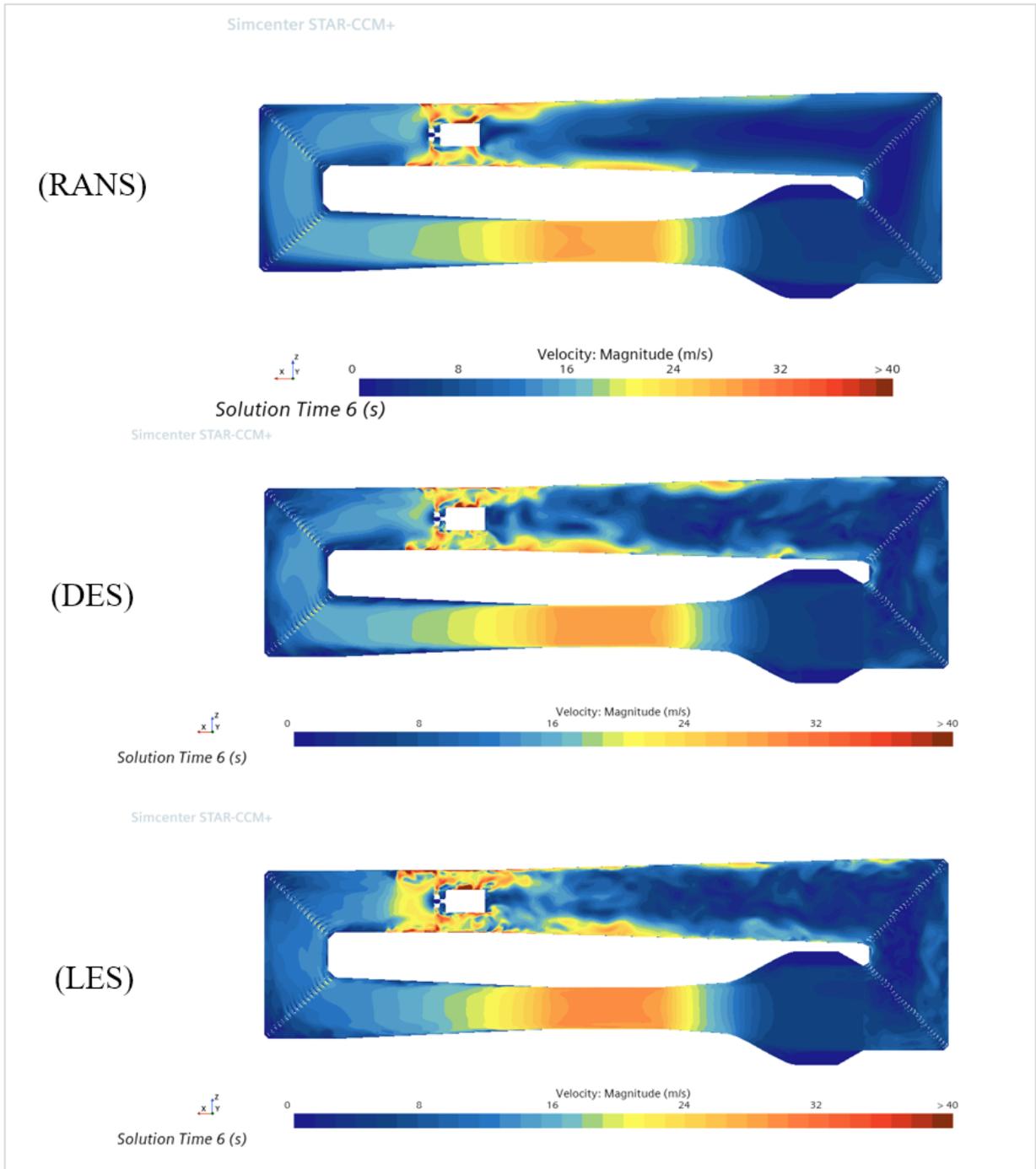


Figura 37 - Comparação de velocidades no corte do Túnel de vento para os modelos transientes. Fonte: Elaborado pelo autor.

Este efeito atenuante fica também evidente quando analisamos o parâmetro de vorticidade. Nele, analisamos puramente a energia rotativa do escoamento e as diferenças dos modelos em escala para o modelo RANS $k-\omega$ SST são significativas. O efeito da vorticidade entre o motor e a honeycomb é bastante diferente entre o modelo RANS e os por escala, como visto na *Figura 38*. Uma leitura que é importante principalmente para a caracterização da

energia da camada limite na seção de testes são os pontos de descolamento do fluxo após a passagem por essa região. Nesse sentido, os modelos DES e LES mostram uma perda de energia do fluxo e, conseqüente descolamento de forma antecipada ao modelo RANS. Este efeito é ainda mais acentuado par ao modelo LES. Também nos modelos transientes, fica evidente o efeito positivo que a honeycomb tem na diminuição dos efeitos da vorticidade e turbulência e homogeneização do escoamento e sua preparação para a seção de testes.

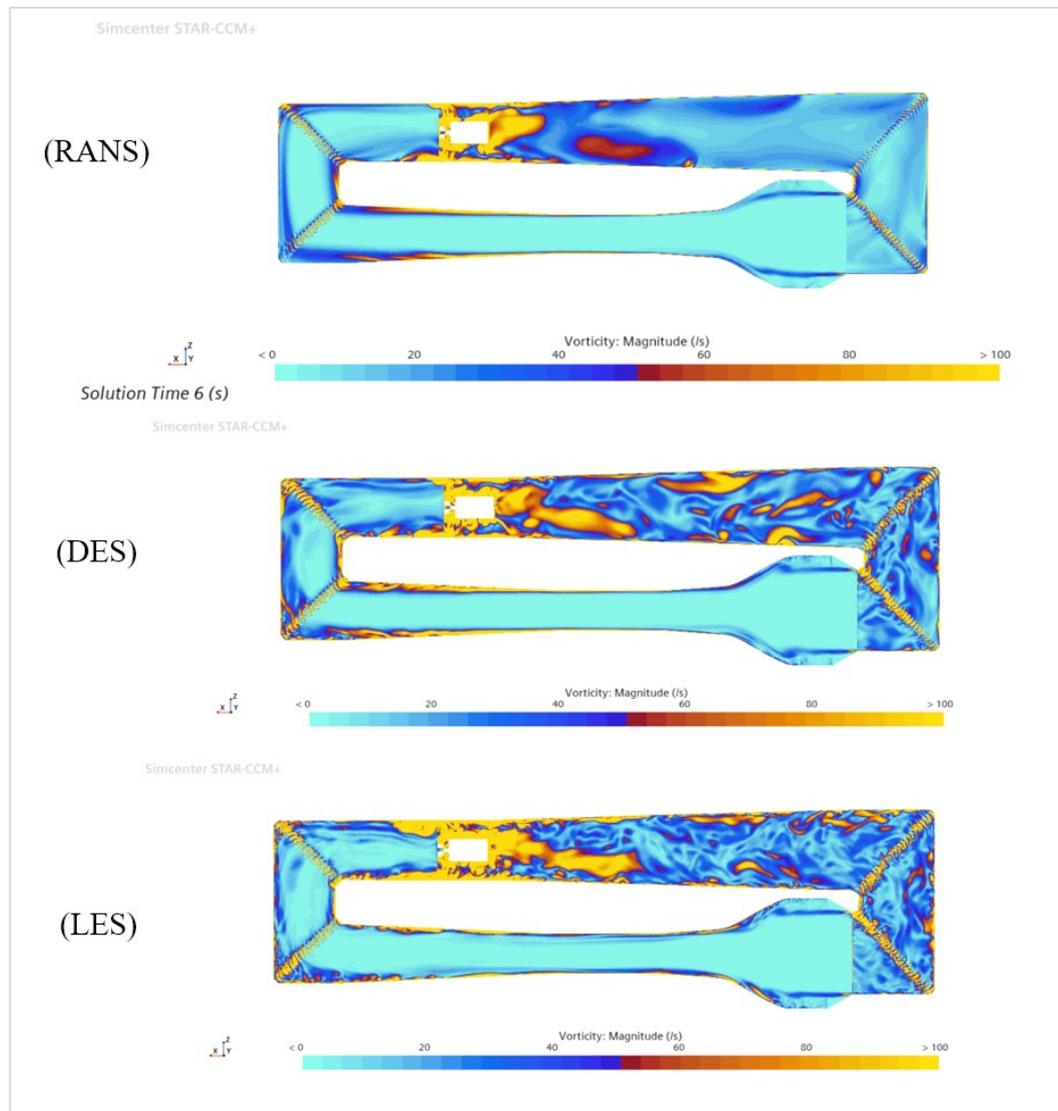


Figura 38 - Comparação de vorticidade no corte do Túnel de vento para os modelos transientes. Fonte: Elaborado pelo autor.

5.3 Caracterização da seção de teste

Utilizou-se como referência o modelo LES, com a malha de nível 4 para caracterizar o escoamento enquanto este percorre longitudinalmente a seção de teste. Para isto, foram

analisados parâmetros físicos para os pontos de aquisição de valores virtuais do modelo computacional, como mostrado na *Figura 29*, e cortes da seção nos mesmos respectivos pontos, para visualização de escalares da solução para quantificação de parâmetros. A *Figura 39* nos mostra o perfil da velocidade do escoamento ao percorrer a seção de teste para seis pontos de aferição, com a frequência de rotação do motor fixada em 17,1 Hz. O escoamento no ponto inicial está sujeito ao efeito de aceleração gerado pela geometria convergente da última seção da câmara de assentamento. O pico de velocidade é atingido no ponto de 2 m após o início da seção, com o valor máximo de 27,33 m/s. Após este pico, a velocidade declina até a velocidade de 18,17 m/s na saída da seção de teste, o que representa uma queda de 31,5% na velocidade máxima da seção.

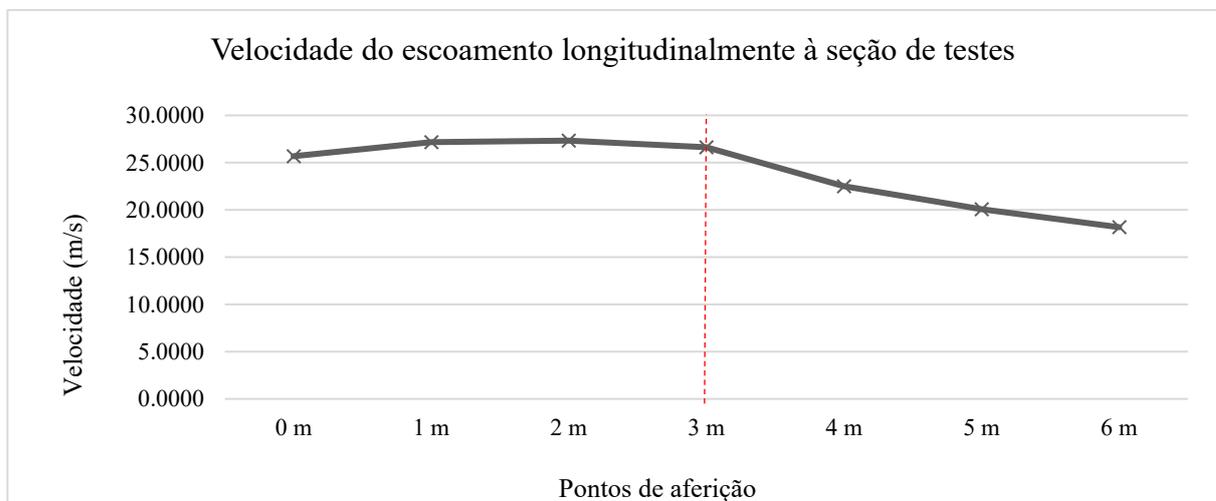


Figura 39 - Velocidade do ar na seção de testes. A linha vermelha demarca o centro da seção. Fonte: Elaborado pelo autor.

O efeito prático da desaceleração é o espessamento gradual da camada limite no decorrer da seção de teste até o seu ponto de descolamento. Na *Figura 40*, observa-se este aumento da camada limite para ambos os lados da seção. Os valores foram medidos na linha relativa ao ponto central da seção de testes, em ambos os extremos, esquerdo e direito. O comportamento para ambos os lados é similar. A maior espessura da camada limite no ponto de aferição inicial, aqui denotado pela nomenclatura de 0 m, para a sua respectiva velocidade de 25,69 m/s, equivale a 2,81 cm e está ao lado direito da direção de movimento do escoamento. Na seção relativa ao ponto de velocidade máxima, no ponto de aferição há 2 metros do ponto inicial, a camada limite apresenta de 3,79 cm. Ao final da seção de teste, há 6 metros antes do descolamento completo decorrer, a camada limite apresenta um valor final de 13,83 cm.

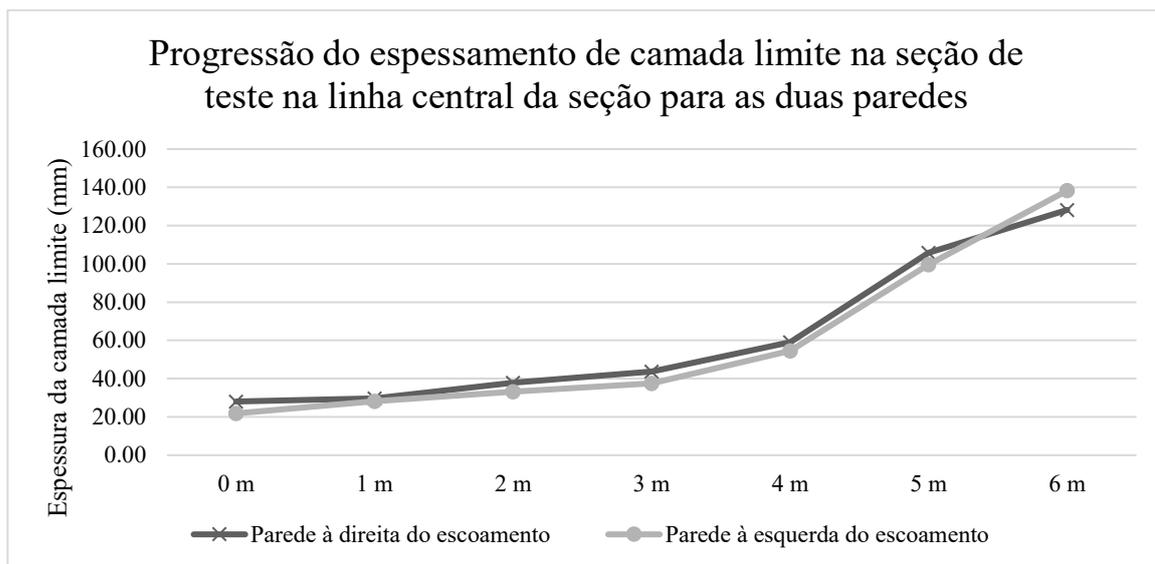


Figura 40 - Progressão do espessamento de camada limite na seção de teste. A linha vermelha demarca o centro da seção. Fonte: Elaborado pelo autor.

Esta perda de velocidade associada ao espessamento da camada limite na seção de teste fica clara quando analisamos a variação de energia do escoamento associada às perdas por dissipação turbulenta no decorrer do seu caminho por todo o comprimento da seção. A *Figura 41*, nos mostra a redução da energia cinética turbulenta nos pontos de referência. No primeiro, o valor da energia cinética turbulenta no centro da seção é 0,0085 J/kg. Há um metro, este valor já decresce para 0,0083 J/kg, e no ponto de velocidade máxima este parâmetro apresenta o valor de 0,0076 J/kg. Ao final de toda a seção, o seu valor é 0,0065 J/kg, 23,5 % abaixo do valor inicial.

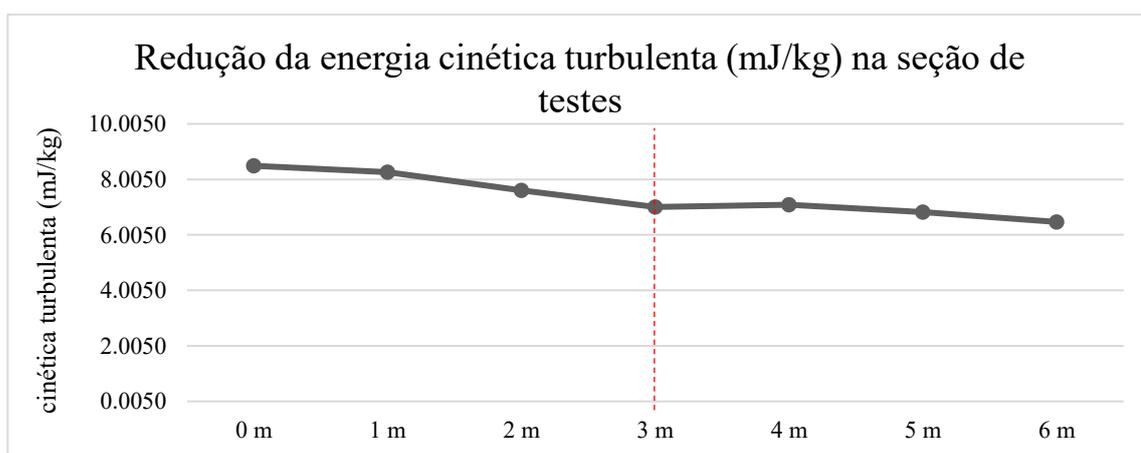


Figura 41 - Progressão da energia cinética turbulenta (J/kg) na seção de testes. A linha vermelha demarca o centro da seção. Fonte: Elaborado pelo autor.

Na *Figura 42*, é possível observar os efeitos da progressão da velocidade, da vorticidade e da energia cinética turbulenta durante a progressão do escoamento longitudinalmente na seção de teste. As maiores perdas de velocidade nos centros das faces maiores da seção, principalmente nos pontos 0 m, 1 m, 2 m e 3 m, são respectivamente também os pontos com os maiores níveis de vorticidade e energia cinética turbulenta para cada seção. Ao progredirmos no eixo de movimentação longitudinal, observa-se o espessamento da camada limite até o ponto de referência de 6 m, logo antes do descolamento acontecer. O efeito da perda de velocidade do escoamento na seção de teste e do espessamento da camada limite podem ser vistos com mais detalhes no no Apêndice 3.

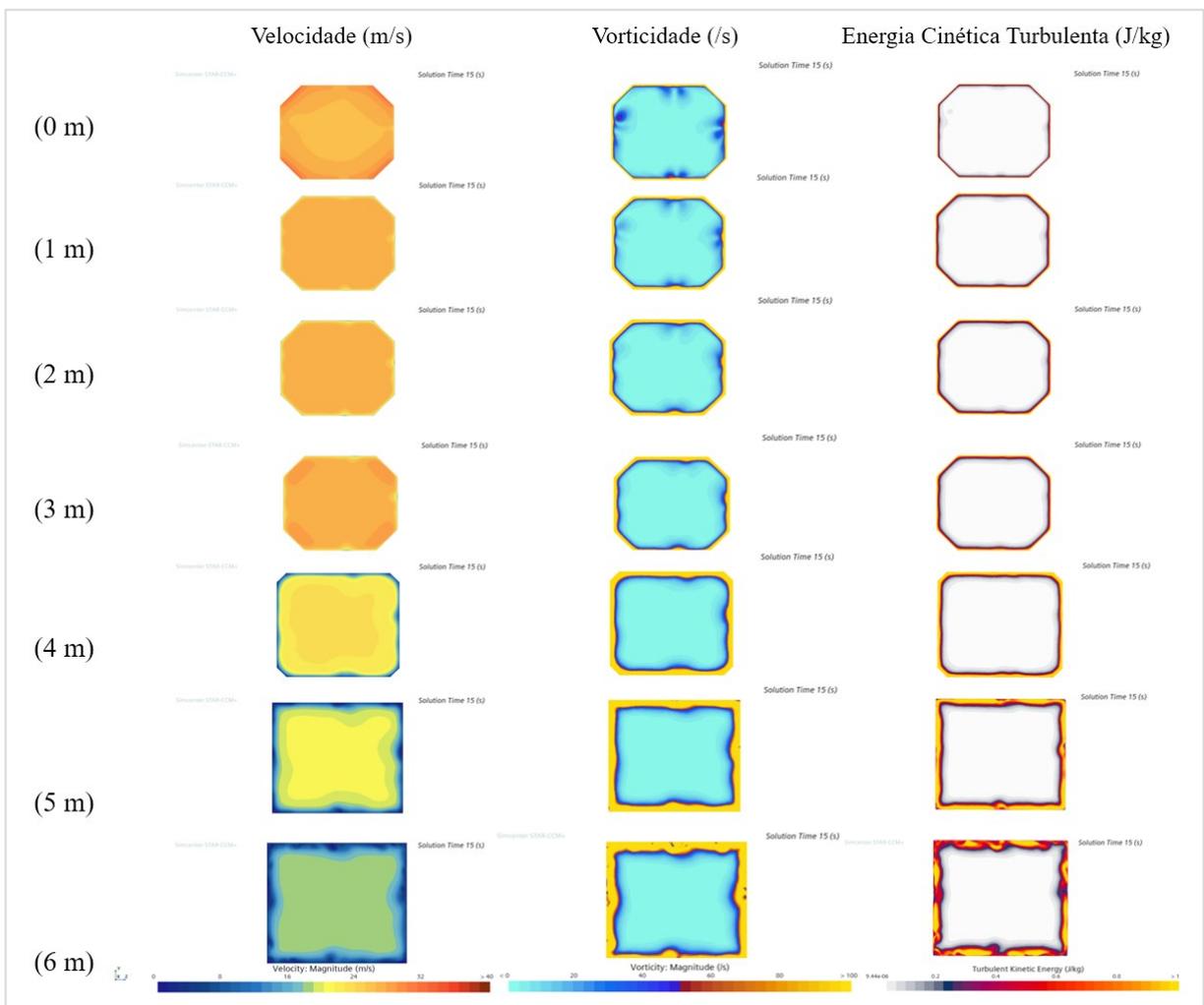


Figura 42 - Progressão da velocidade, vorticidade e energia cinética turbulenta na seção de testes para a frequência de rotação do motor de 17,1 Hz. Fonte: Elaborado pelo autor.

O efeito da perda de energia cinética durante a interação do escoamento ao percorrer a seção é evidenciado na Figura 43, onde é possível visualizar este escalar no plano frontal para o túnel completo e para a seção de teste, separadamente. Observa-se o alto nível de turbulência gerada pelo motor inicialmente. As aletas das curvas 1 e 2 dissipam uma parte desta energia, guiando o escoamento à honeycomb, que por sua vez, dissipa essa turbulência e direciona o escoamento ao bocal de entrada da seção de testes. Neste ponto, o ar é acelerado e observamos sua característica pouco turbulenta na região efetiva da seção de testes. Ao avançar, a perda de velocidade gera o aumento da camada limite e, conseqüentemente, descolamento após a seção.

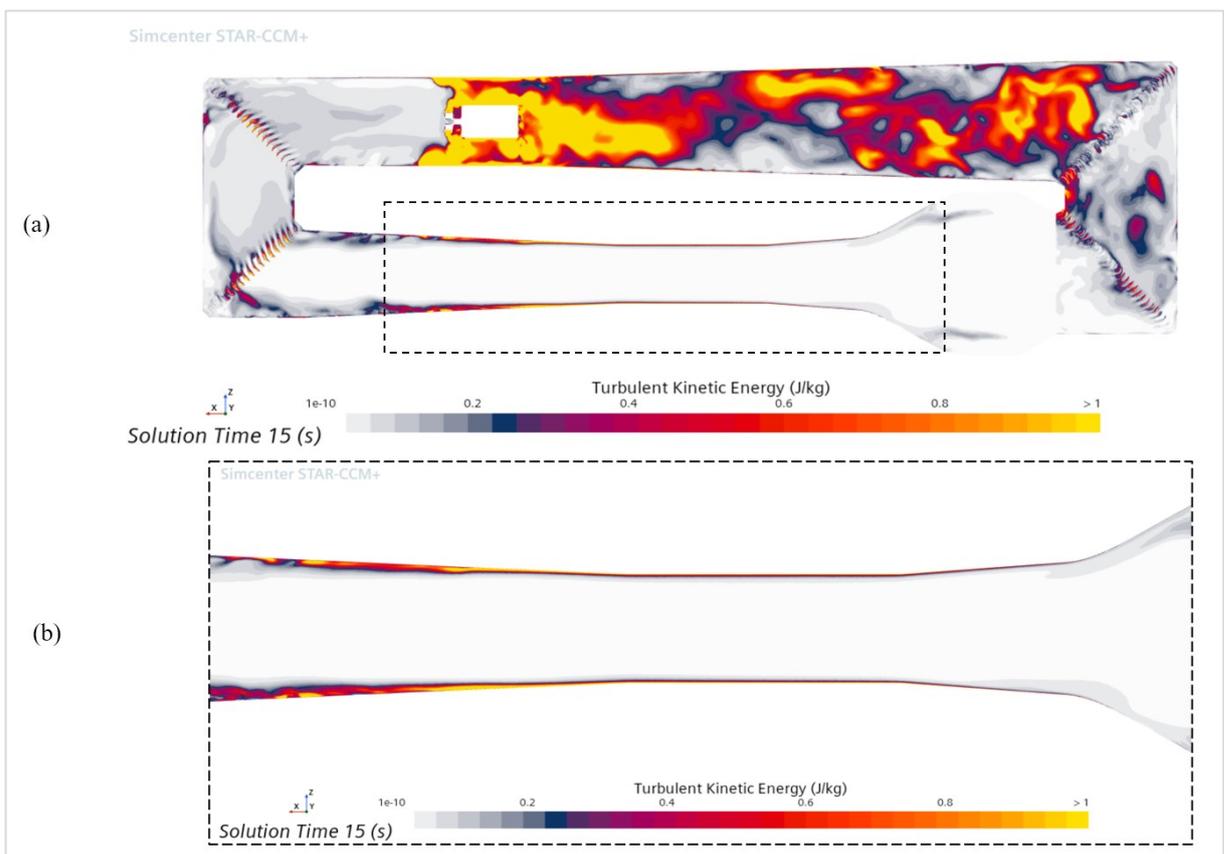


Figura 43 - Plano frontal com visualização da energia cinética turbulenta (J/kg): (a) túnel completo, (b) seção de teste. Fonte: Elaborado pelo autor.

Para entender esse comportamento do espessamento de camada limite nas paredes da seção de teste, variou-se a frequência de rotação do motor para três níveis adicionais, sendo eles: (i) 17,1 Hz, (ii) 26,3 Hz, (iii) 32,5 Hz e (iv) 38,6 Hz. As escolhas das frequências se deu com a referência ao teste executado no laboratório com um pitot TVCF. Este teste está descrito no Apêndice 3. Cada caso foi executado utilizando a metodologia LES, com dois segundos adicionais de solução. A Figura 44 mostra a variação da velocidade do escoamento ao percorrer

a seção de testes nos sete pontos de referência mostrados anteriormente na *Figura 29*. No ponto inicial, o ar é acelerado em direção à zona de testes devido a efeito convergente proporcionado pela geometria da câmara de assentamento. Entre as distâncias de 1 m e 2 m do ponto inicial, o escoamento atinge a sua velocidade máxima e começa a sua desaceleração por perda de energia e efeitos dissipativos causados pela interação dos turbilhões com a parede e com eles próprios. Para a frequência de rotação do motor de 38,6 Hz, o escoamento perde 34,17 % da sua velocidade em 4 metros de deslocamento.

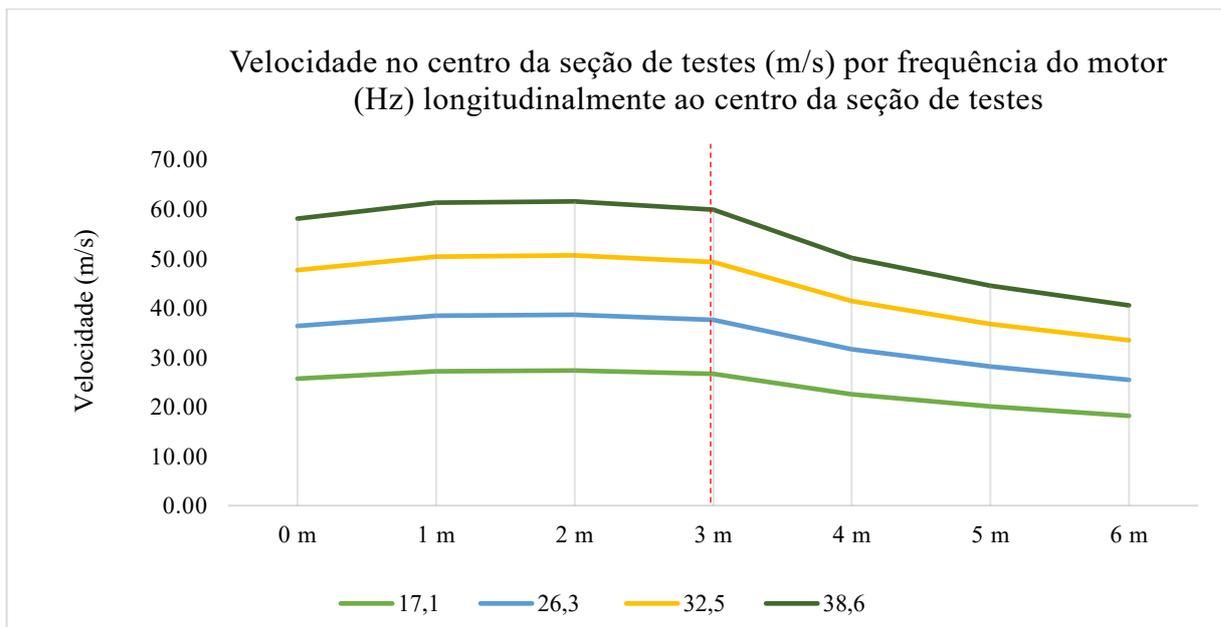


Figura 44 - Velocidade no centro da seção de testes pela variação da frequência do motor, analisando-se os valores longitudinalmente no centro da seção de testes. A linha vermelha demarca o centro da seção. Fonte: Elaborado pelo autor.

Essa perda energética acentuada fica evidente ao observar o comportamento da energia cinética turbulenta para essa frequência. Esta relação está evidenciada na *Figura 45*, onde observa-se que o aumento da frequência eleva a energia turbulenta de forma não linear.

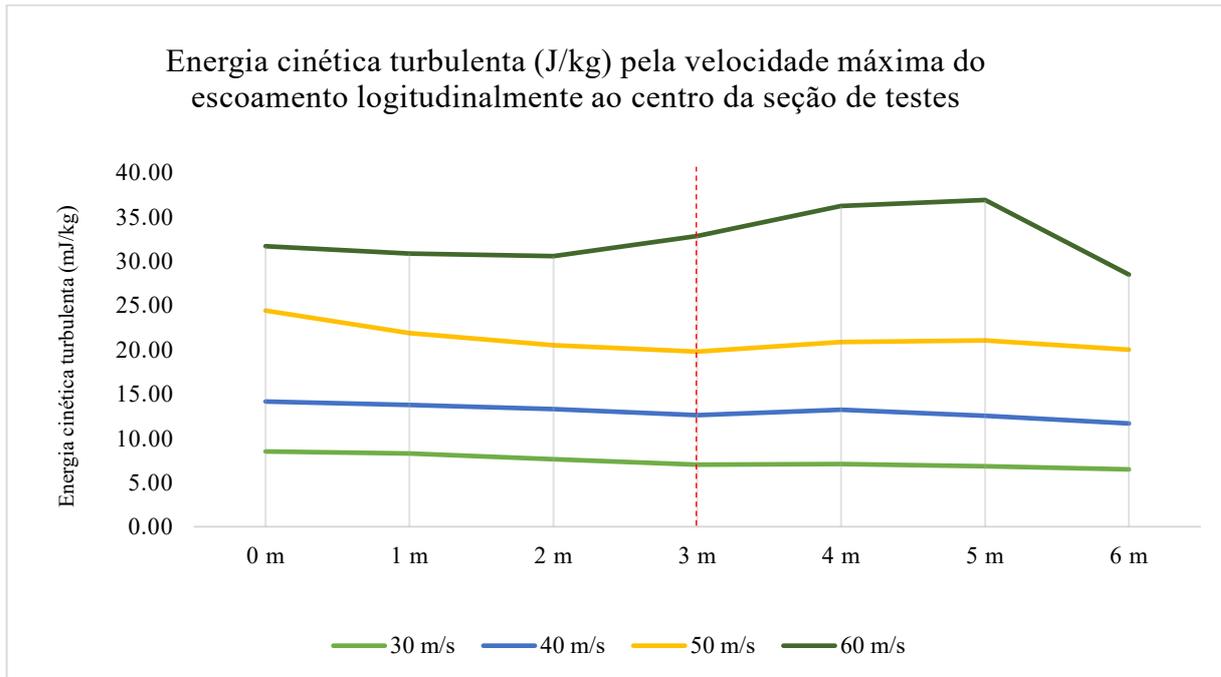


Figura 45 - Energia cinética turbulenta (J/kg) pela velocidade máxima do escoamento longitudinalmente ao centro da seção de testes. A linha vermelha demarca o centro da seção. Fonte: Elaborado pelo autor.

Essa perda longitudinal de energia, e conseqüentemente de velocidade, do escoamento gera o espessamento da camada limite. Os valores de camada limite no modelo virtual foram obtidos gerando-se linhas horizontais e verticais perpendiculares cruzando o centro da seção de testes posicionais em todos os pontos de aquisição virtuais da *Figura 29*. Nas *Figuras 46 e 47* serão demonstrados os valores para as linhas horizontais aquisitados da parede até o ponto onde a velocidade do escoamento é 99% da velocidade não perturbada. Os valores para as linhas verticais podem ser vistos no *Apêndice II*. Nota-se, ao observar a parede à esquerda da direção de movimento do escoamento na *Figura 46*, o aumento da camada limite com a variação da velocidade máxima atingida na seção de testes. Acima de 40 m/s, há uma certa estabilização dos valores com alternância entre as espessuras em relação às velocidades analisadas.

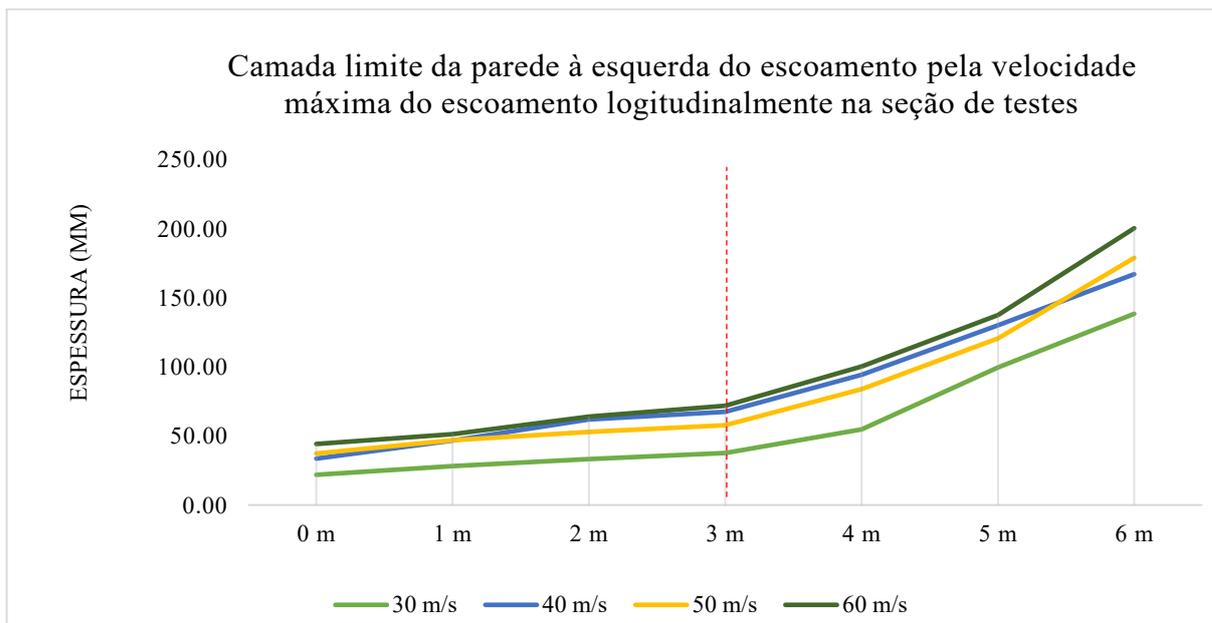


Figura 46 - Camada limite da parede à esquerda do escoamento pela velocidade máxima do escoamento longitudinalmente na seção de testes. A linha vermelha demarca o centro da seção. Fonte: Elaborado pelo autor.

A *Figura 47*, por sua vez, mostra a mesma relação de progressão do espessamento da camada limite, porém com foco na parede à direita da direção de movimento do escoamento. Nesse sentido, observa-se que, especialmente para velocidades maiores como visto na referência à velocidade máxima de 60 m/s, o efeito inercial do escoamento na circulação do túnel de vento fechado da UFMG se torna mais evidente e há uma diferença de 225% entre os espessamentos. A diferença percentual entre as camadas limites das duas paredes para as quatro velocidades máximas de referência pode ser vista na *Figura 48*.

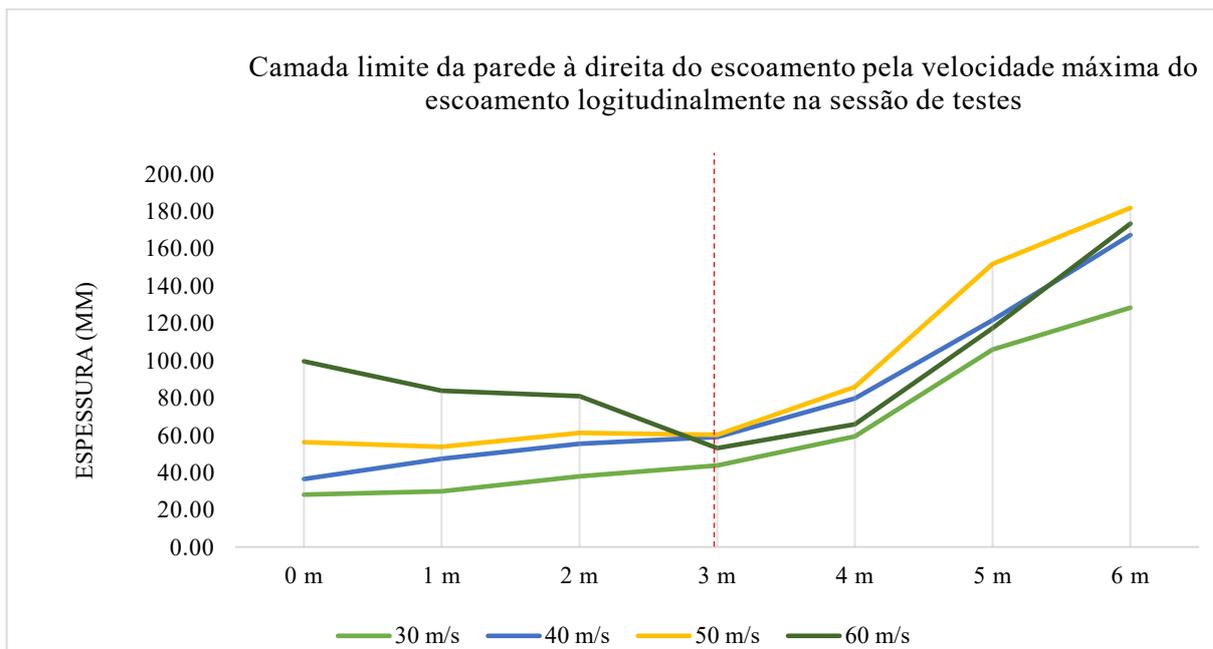


Figura 47 - Camada limite à direita do escoamento pela velocidade máxima do escoamento longitudinalmente na seção de testes. A linha vermelha demarca o centro da seção. Fonte: Elaborado pelo autor.

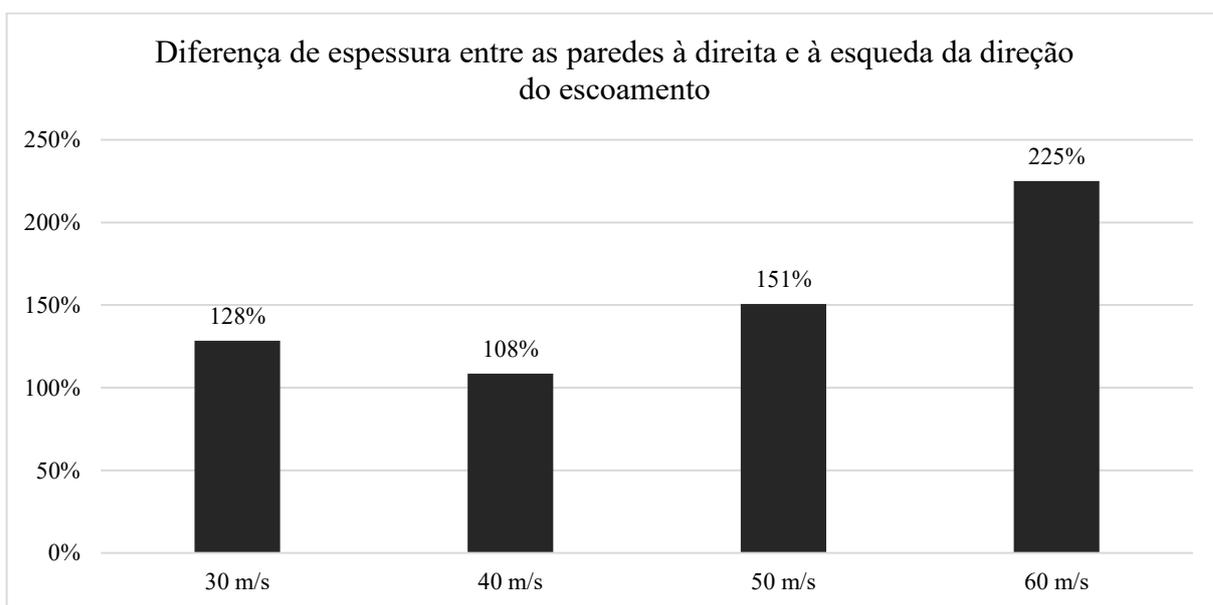


Figura 48 - Diferença percentual entre as camadas limites à direita e a esquerda da direção do escoamento na seção de testes para quatro velocidades máximas de referência. Fonte: Elaborado pelo autor.

Os efeitos visuais dessa diferença de espessura das camadas limites é observado na *Figura 49*. Nela, é possível analisar também que a zona próxima à parede na câmara de assentamento apresenta geração de vórtices, influenciando no grau de turbulência que o

escoamento se insere na seção de testes na região próxima a parede. Outro ponto importante da análise, é o espessamento da camada limite no final da seção de testes com o aumento da velocidade do escoamento.

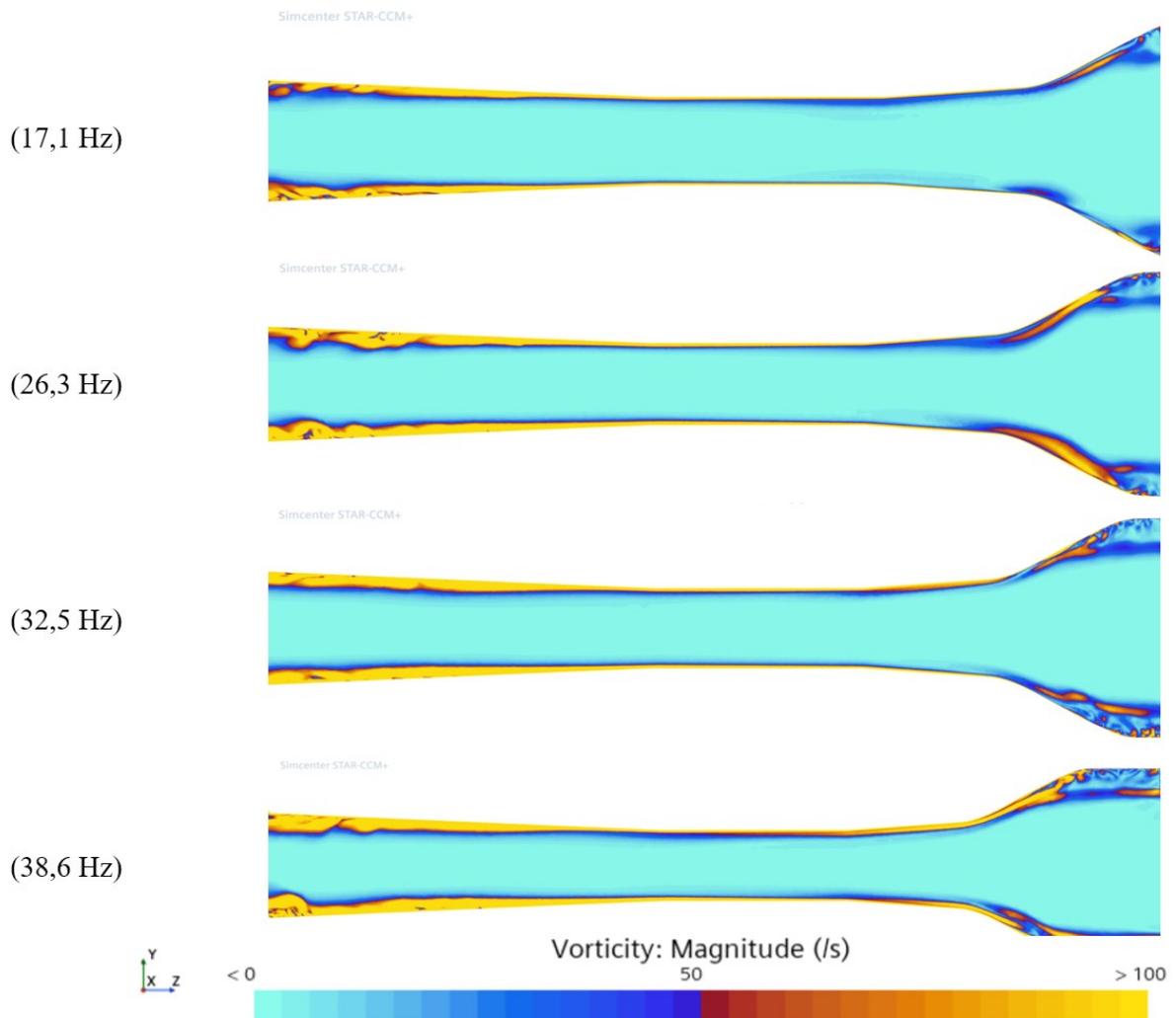


Figura 49 - Vorticidade na seção de testes para as frequências de rotação do motor: i) 17,1 Hz, ii) 26,3 Hz, iii) 32,5 Hz e iv) 38,6 Hz. Fonte: Elaborado pelo autor.

5.4 Comparação experimental

5.4.1 Comparação com a diferença de pressão

O estudo de independência de malha já abordado na seção 4.2.4.2 pode agora ser finalizado correlacionando os valores numéricos de variação de pressão a montante e a jusante da honeycomb do modelo virtual com os valores adquiridos no teste em laboratório. A variação percentual deste dado analisado computacionalmente para a nível de refino de malha número 1 foi de 17,57 % em relação ao dado experimental. A malha refinada número 2 apresentou piora

neste resultado, aumentando a variação para 22,99 % em relação ao coletado experimentalmente, indicando ainda o alto nível de erros percentuais dos modelos para níveis mais grosseiros de malha. Em relação à malha refinada número 3, já houve uma melhora expressiva, com um erro de 14,28 % em relação aos valores medidos experimentalmente. Por fim, a malha refinada número 4 apresentou um erro de 11,08 % em relação aos dados experimentais, portanto, mostrando-se mais confiável do ponto de vista numérico. Esta comparação pode ser vista na Figura 50. Com uma diminuição singela da margem de erro e aumento significativo de tempo de solução e tamanho dos casos, decidiu-se variar os modelos de turbulência e de regime de tempo no prosseguimento do estudo.

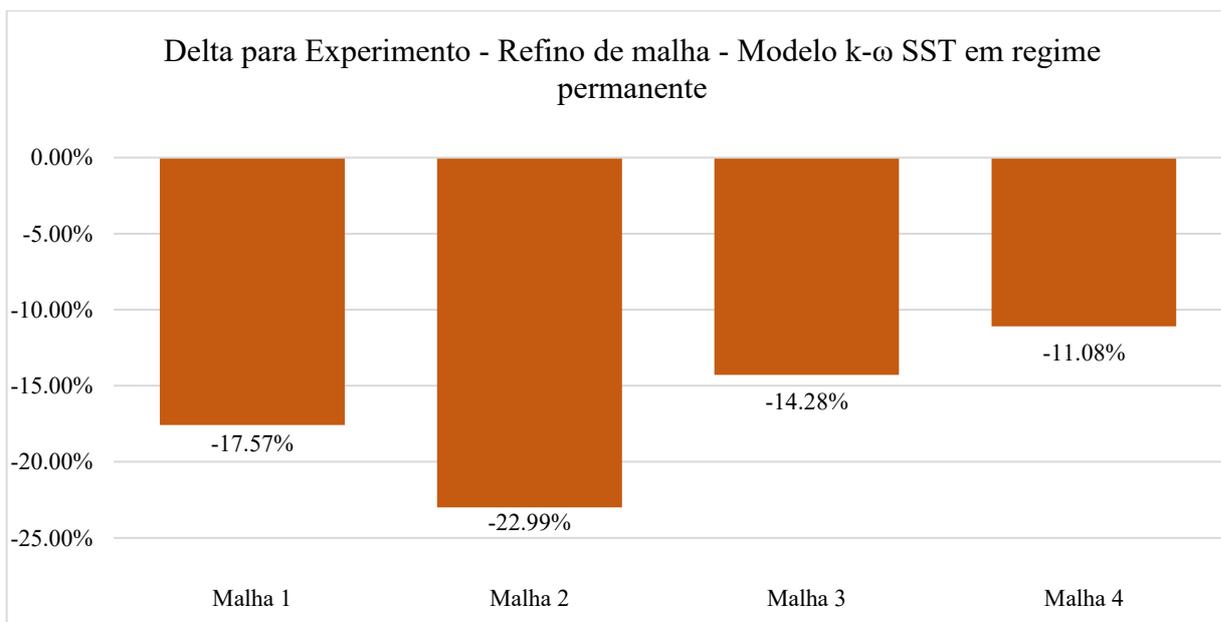


Figura 50 - Variação dos resultados computacionais com os dados experimentais da variação de pressão à jusante e à montante da honeycomb para a variação do nível de refino da malha volumétrica poliédrica. Fonte: Elaborado pelo autor.

Considerando a malha refinada número 4, variando-se os modelos de turbulência já descritos na seção 4.2.5, nota-se pela Figura 51 que os modelos k- ϵ e Spallart-Almaras mostraram-se inferiores em termos de exatidão dos resultados em relação ao modelo k- ω SST. O modelo k- ϵ apresentou o maior erro percentual em relação aos dados medidos experimentalmente, com uma variação de 28,57 %. Por sua vez, o modelo Spallart-Almaras apresentou um erro percentual de 24,89 % em relação aos dados medidos. Por fim, o modelo k- ω SST, por sua vez, mostrou boa correlação, considerando uma solução no estado permanente do escoamento analisado, com erro percentual de 11,08 %.

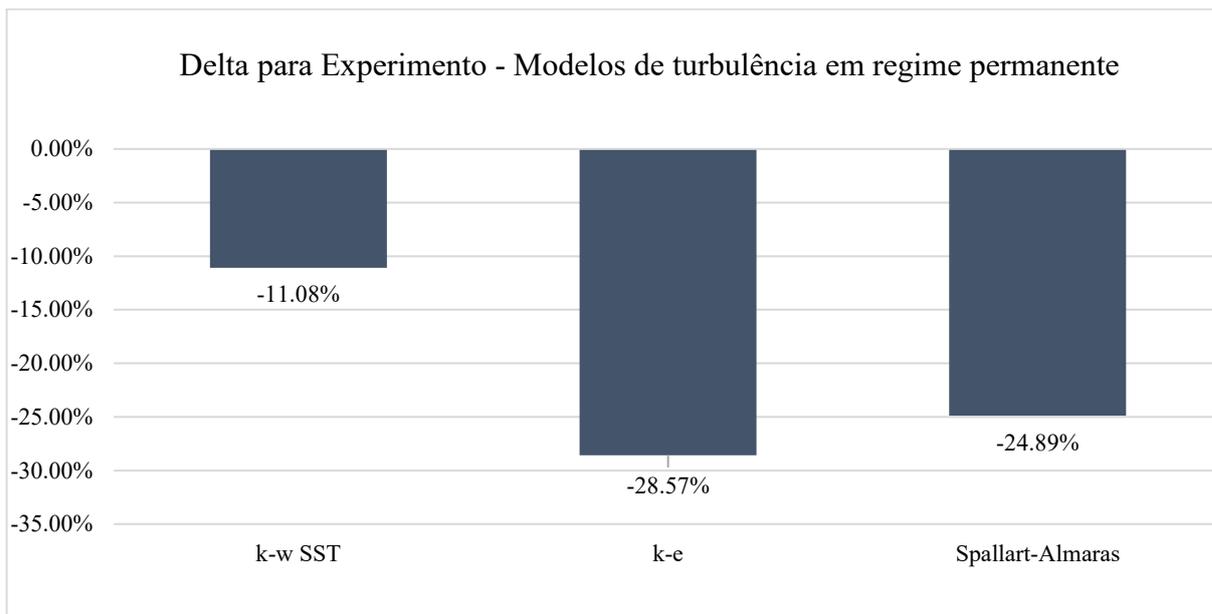


Figura 51 - Variação dos resultados computacionais com os dados experimentais da variação de pressão à jusante e à montante da honeycomb para a variação dos modelos de turbulência k- ω SST, k- ω e Spallart-Almaras. Fonte: Elaborado pelo autor.

Se compararmos os valores de variação de pressão obtidos pela passagem do escoamento pela honeycomb no modelo virtual com os valores obtidos em ensaio, por modelo de turbulência, fica claro a melhor correlação que o modelo k- ω SST oferece. Isto pode ser visto na Figura 52.

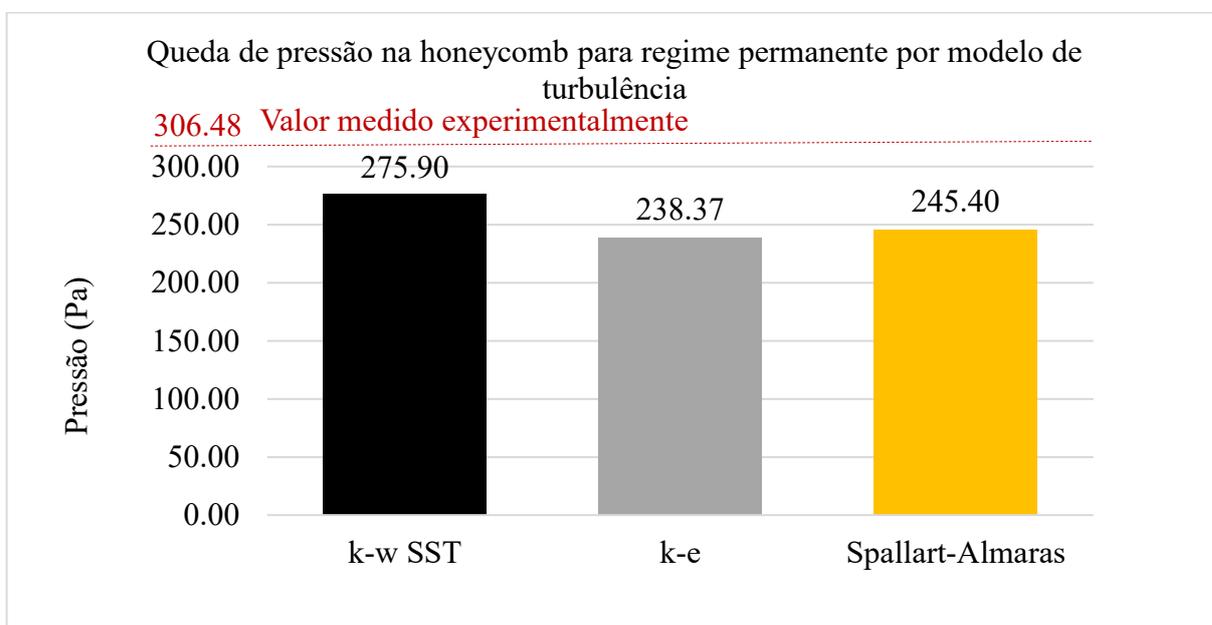


Figura 52 - Queda de pressão na honeycomb para regime permanente por modelo de turbulência. Fonte: Elaborado pelo autor.

Considerando o estado transiente na análise, o erro percentual dos resultados teóricos em relação aos dados coletados experimentalmente diminui consideravelmente, como pode ser visto pela Figura 533. Cabe salientar que os valores teóricos absolutos mostraram-se menores que os valores experimentais, porém mais próximos destes quando comparados aos resultados teóricos obtidos pelos modelos em regime permanente. Sendo assim, os erros percentuais teóricos utilizando as abordagens RANS e modelo de turbulência $k-\omega$ SST, DES e o modelo LES foram 10,94 %, 5,23 % e 5,16 %, respectivamente, abaixo dos valores experimentais.

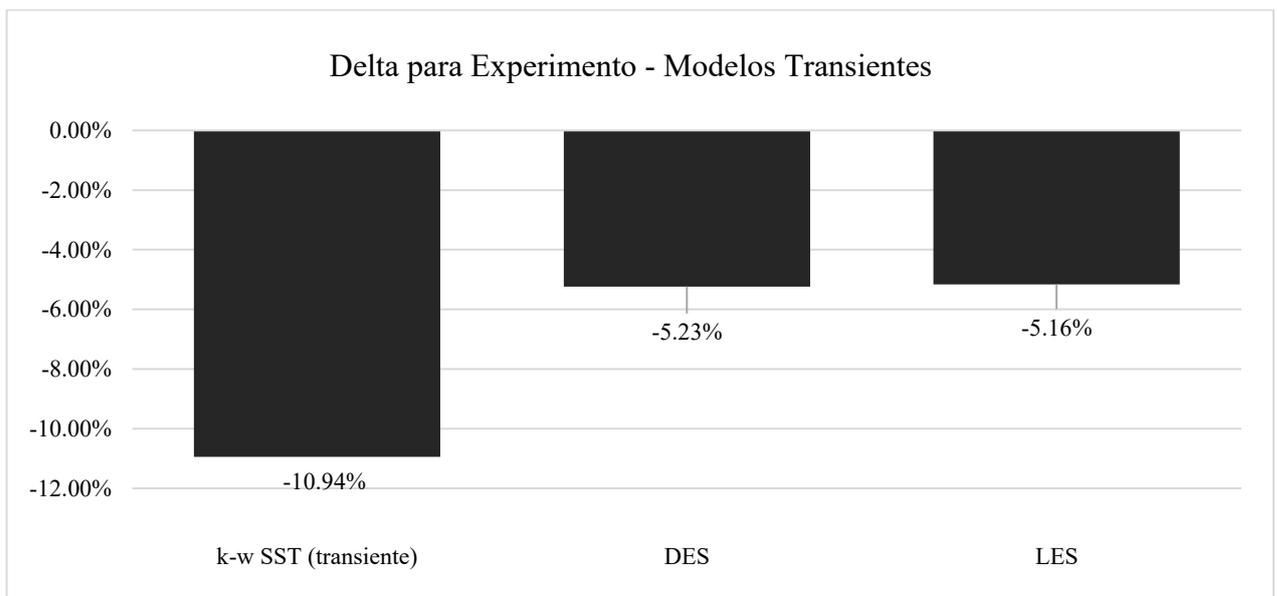


Figura 53 - Variação dos resultados computacionais com os dados experimentais da variação de pressão à jusante e à montante da honeycomb para os modelos transientes. Fonte: Elaborado pelo autor.

5.4.2 Comparação com a velocidade na seção de testes

Um segundo ensaio foi realizado, e é descrito no Apêndice II, com objetivo de medir as velocidades na seção de teste por dois sensores, um tubo de pitot do Laboratório de Aerodinâmica Experimental da UFMG e um tubo de Pitot cedido pela empresa AERON. Esses valores experimentais foram comparados aos adquiridos pelas análises numéricas com metodologia LES para as quatro frequências de rotação do motor, como visto anteriormente para a variação de velocidade da Figura 44. Pode-se inferir pela Figura 54 que o comportamento do crescimento de velocidade com o também aumento da frequência de rotação do motor segue um parâmetro linear para os três casos. A maior diferença comparativa dos valores da análise numérica para as medições se explicam pelas próprias simplificações que tais modelos exigem

para que sejam viáveis computacionalmente. Ainda assim, a metodologia virtual mostrou boa aderência na leitura de um fenômeno com tamanha complexidade.

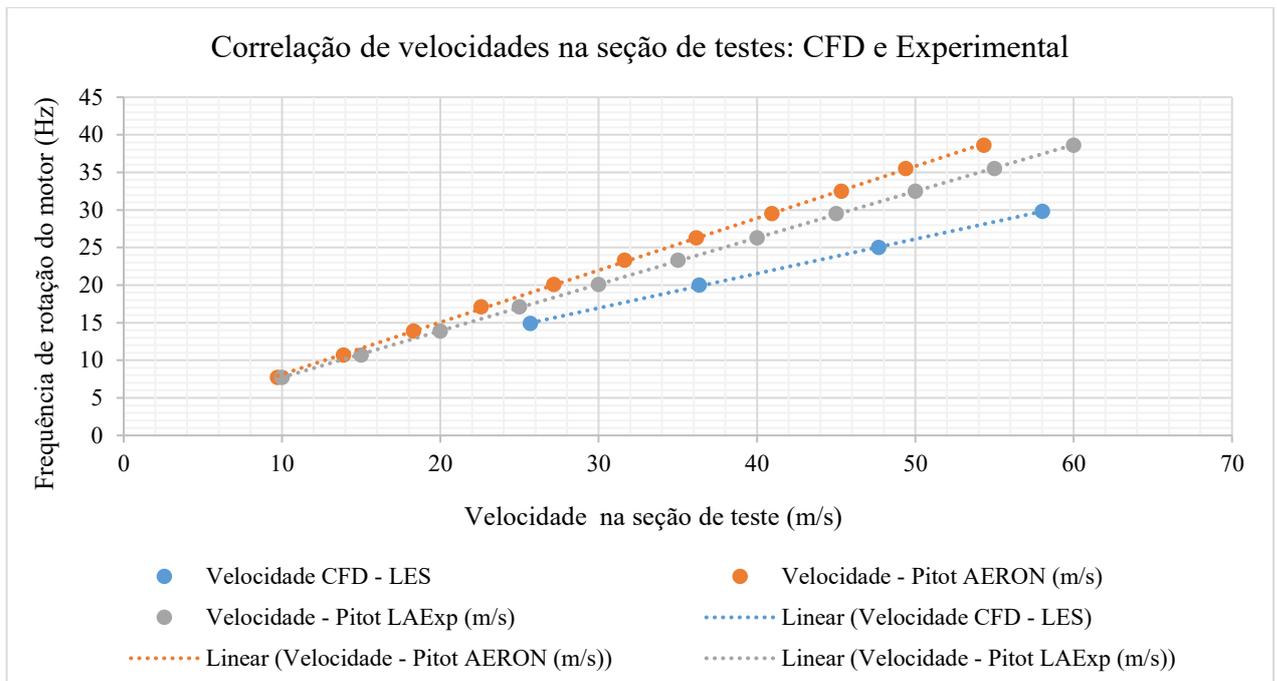


Figura 54 - Correlação de velocidades na seção de testes: CFD e Experimental.
Fonte: Elaborado pelo autor.

6 CONCLUSÃO

- O estudo da independência de malha, variando-se o tamanho dos elementos da malha poliédrica, foi importante para a confiança nos resultados permanentes e transientes, e não descarta a utilização dos níveis de refino iniciais. A importância desse tipo de análise comparativa é quantificar a magnitude dos erros dos níveis mais grosseiros de malha em comparação com os valores experimentais de forma que seja possível utilizá-los em estudos com capacidade computacional ou de tempo limitada.
- Ao compararmos os modelos de turbulência via RANS, o modelo $k-\omega$ SST se mostrou consideravelmente mais confiável. Este comportamento era esperado pela melhor característica de leitura de parede e regiões próximas às superfícies, quando comparado aos modelos $k-\epsilon$ e Spallart-Almaras. Essa tendência também é reforçada nos guias técnicos de utilização das malhas volumétricas no material base do *Simcenter STAR-CCM+*.
- Para os modelos transientes da análise fluidodinâmica do túnel de vento da UFMG, apesar dos valores em magnitude do modelo RANS $k-\omega$ SST serem mais próximos dos valores experimentais e uma boa escolha para testes comparativos em modelos no túnel, a sua baixa capacidade de prever os vórtices e os reais efeitos de variação de momento do escoamento e pontos de descolamento o tornam menos efetivo para um estudo mais aprofundado das características de comportamento do fluxo de ar.
- O modelo LES apresentou os melhores resultados para a comparação de variação de pressão à montante e à jusante da honeycomb, com uma diferença de apenas 5,16 % para os valores medidos.
- Os modelos de resolução da turbulência por escala, DES e LES, apesar de apresentarem valores suficientemente próximos dos valores medidos, podem ainda apresentar resultados mais precisos com um refino subsequente dos elementos de malha, visto que a resolução dos turbilhões nesses modelos é limitada ao tamanho dos elementos de malha e do modelo de subdivisão que capta as estruturas dos vórtices no escoamento. Este efeito pode ser observado teóricamente na Figura 3.

7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Utilização de outros métodos para aquisições de dados experimentais, como PIV, para correlação numérica da formação da camada limite.
- Sugere-se adquirir experimentalmente a queda de pressão à montante e a juzante do motor e ventilador para comparação com os dados virtuais.
- Para os casos de LES, sugere-se analisar mais variações de velocidade de rotação do motor para correlação de dados dos valores da simulação de velocidade na seção de teste nos extremos de velocidade.
- Sugere-se incluir tubos de pitot nos modelos de CAD para que as análises computacionais sejam ainda mais acuradas.
- Sugere-se analisar a adição de um objeto na seção de testes, tanto virtualmente quanto experimentalmente, para entendimento de razões de bloqueio e efeitos de vorticidade utilizando o modelo LES.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Anderson Jr., J. D. (1995). *Computational Fluid Dynamics - The basics with applications*. Singapore: McGraw-Hill, Internation Edition.
- Anderson, J. D. (2016). *Introduction to Flight, 8th edition*. USA: McGraw-Hill.
- Barlow, J. B., Rae, W. H., & Pope, A. (1999). *Low-speed Wind Tunnel Testing*. New York NY, USA: John Wiley & Sons, Inc.
- Bertholds, A. (2012). *CFD Simulation of the New University of Sydney Boundary Layer Wind Tunnel*. Uppsala: Department of Engineering Sciences, Uppsala Universitet.
- Bradshaw, P., & Mehta, R. (November 1979). Technical Notes - Design rules for small low speed wind tunnels. *The Aeronautical Journal of the Royal Aeronautical Society*, 443-449.
- Çengel, Y., & Cimbala, H. (2013). *Fluid Mechanics: Fundamentals and Applications*. Third edition. McGraw-Hill Education.
- CFD-ONLINE: Law of the wall*. (28 de Julho de 2023). Fonte: CFD-Online: https://www.cfd-online.com/Wiki/Law_of_the_wall
- Fernandes, M. C. (2019). *Caracterização da camada limite da seção de teste do túnel de vento da UFMG*. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia, Departamento de Engenharia Mecânica.
- Ferziger, J., & Peric, M. (2002). *Computational Methods for Fluid Dynamics*". 3rd rev. ed., Springer-Verlag, Berlin.
- Fu, C., Uddin, M., & Zhang, C. (11 de June de 2020). Computational Analyses of the Effects of Wind Tunnel Ground Simulation and Blockage Ratio on the Aerodynamics Prediction of Flow over a Passenger Vehicle. *MDPI*.
- Hammond, D. (1994). AIAA Conference on Multidisciplinary Optimization. Panama City, FL.
- Jungman, J. (2020). *Eine experimentell validierte Methodik zur numerischen Simulation and Analyse des aerodynamischen und fahrdynamischen Verhaltens von Personenkraftwagen bei realitätsnaher, querdynamischer Farhzeuganregung*. Darmstadt: Technische Universität Darmstadt.
- Kalvig, S., Manger, E., & Hjertager, B. (2012). Comparing different CFD wind turbine modelling approaches. *Journal of Physics*.
- Ljungskog, E. (2019). *Evaluation and modeling of the flow in a slotted wall wind tunnel*. Gotemburgo, Suécia: Department of Mechanics and Maritime Sciences, Division of Vehicle Engineering and Autonomous Systems, Chalmers University of Technology.

- Menter, F. (1994). Two-equation eddy-viscosity turbulence modeling for engineering applications. *AIAA Journal*, 1598-1605.
- Menter, F., & Kuntz, M. (2002). *Adaptation of Eddy Viscosity Turbulence Models to Unsteady Separated Flows Behind Vehicles*, in *The Aerodynamics of Heavy Vehicles: Trucks, Buses and Trains*. Asilomar, CA: Springer.
- Ockendon, H., & Ockendon, J. (1995). *Viscous Flow*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Pruett, C. (2008). Temporal large-eddy simulation: theory and implementation. *Theor. Comput. Fluid Dyn*, 22, 275–304.
- Réthoré, P.-E., Sørensen, N., Zahle, F., Bechmann, A., & Madsen, H. (2011). CFD Simulations of the Mexico Wind. In *Proceedings European Wind Energy Association (EWEA)*.
- Richardson, L. F. (1922). *Weather Prediction by Numerical Process*. Cambridge Univ. Press.
- SIEMENS. (2023). Fonte: Simcenter STAR-CCM+ 2302 - User Guide: https://docs.sw.siemens.com/documentation/external/PL20230227496873265/en-US/userManual/starccmp_userguide_html/STARCCMP/index.html
- Sitek, M., & Lottes, S. (2018). CFD Simulations of Wind Tunnel Tests on Deer Isle - Sedgwick Bridge Model. *Argonne National Laboratory, U.S Department of Energy (DOE)*.
- Spalart, P., & Allmaras, S. (1992). *A one-equation turbulence model for aerodynamic flows*. AIAA-92-0439.
- Spalart, P., Strelets, W., Allmaras, S., & Jou, W.-H. (1997). Comments on the feasibility of LES for wings, and on a hybrid RANS/LES approach. *1st AFOSR Int. Conf. on DNS/LES Aug, 4-8 1997*.
- Tucker, P. (2016). *Advanced Computational Fluid Dynamics*. Cambridge University Press.
- Versteeg, H., & Malalasekera, W. (2007). *An Introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method* (2nd edition ed.). London: Pearson Education Ltd.
- White, F., & Corfield, I. (2006). *Viscous Fluid Flow*. New York: Vol. 3, McGraw-Hill.
- Wilcox, D. (1998). *Turbulence Modeling for CFD*. 2nd edition, DCW Industries.
- Wilcox, D. (2008). Formulation of the k- ω turbulence model revisited. *AIAA Journal*, 2823-2838.

APÊNDICES

8.1 APÊNDICE I – METODOLOGIA DE CALCULO RESISTÊNCIAS DE MEIOS POROSOS PARA MODELAGEM DA HONEYCOMB

A definição da *honeycomb* como um meio poroso que oferece resistência ao deslocamento do escoamento no modelo virtual se dá via coleta de dados experimentais para definição dessa resistência no modelo real. A metodologia do teste compreende variar a velocidade do túnel para que seja possível calcular e medir a pressão a montante e a jusante da honeycomb e, posteriormente, dividi-la pela distância entre os dois pontos de aquisição. Para calcular os coeficientes de porosidade, um ajuste de curva de regressão deve ser feito em alguns dados experimentais para a região modelada. Depois de ter esses dados, você pode produzir um gráfico da velocidade do escoamento versus a queda de pressão estática (delta P). (SIEMENS, 2023). A relação de amostras coletadas de pressão para cada um dos dois pontos pela velocidade pode ser visto na Tabela 4.

Tabela 4 - Amostras coletadas para metodologia de cálculo de meios porosos. Fonte: Elaborado pelo autor.

Velocidade	10	20	30	40	50	60	70	80	Média
Amostras	340	320	280	346	271	236	276	255	290.5

Para cada uma dessas velocidades, a variação de pressão é dividida pela distância entre os pontos de coleta, criando a variável $\frac{dP}{L}$. A relação deste nova variável com a velocidade pode ser vista na Tabela 5.

Tabela 5 - Relação da variável dP/L com a velocidade na seção de testes. Fonte: Elaborado pelo autor.

Velocidade (m/s)	dP (Pa)	L (m)	dP/L
10	47.68271	2.8	17.02954
20	198.3316	2.8	70.8327
30	444.1165	2.8	158.613
40	767.6003	2.8	274.143
50	1142.686	2.8	408.1022
60	1581.185	2.8	564.709
70	2055.276	2.8	734.027
80	2541.428	2.8	907.6528

Esses valores da velocidade e da $\frac{dP}{L}$ geram então a curva de regressão mostrada no gráfico contido na *Figura 55*.

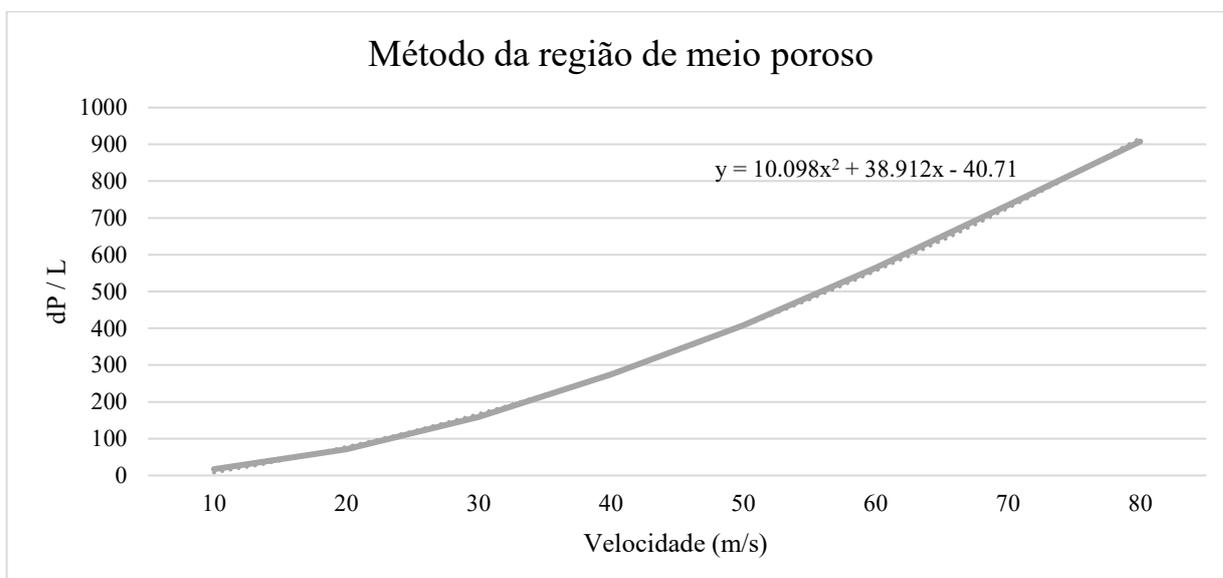


Figura 55 - Método de definição de coeficientes de resistência inercial e viscoso via método de região porosa. Fonte: Elaborado pelo autor.

Essa interpolação fornece uma equação de segundo grau equivalente, no qual $y = f(x) = ax^2 + bx + c = 0$. Com os coeficientes a e b, pode-se usar a relação com a seguinte Equação 23.

$$\frac{\partial d}{L} = -(P_i |v| + P_v)v \quad (23)$$

onde L é a distância dos pontos de medição equilamente comprimento do meio poroso, P_i é Resistência Inercial Porosa e P_v é a Resistência Viscosa Porosa. Esta relação nos dá os valores de resistência inercial e viscosa no eixo principal de movimento do ar ao atravessar o meio porosos.

Para os valores de resistência dos eixos secundários, usa-se valores de no mínimo uma ordem acima de magnitude dos valores do eixo principal, para criar resistência ao movimento do escoamento.

8.2 APÊNDICE II – VELOCIDADE DO ESCOAMENTO E ESPESSAMENTO DA CAMADA LIMITE NA SEÇÃO DE TESTES

Para análise da desaceleração do escoamento no decorrer da seção de teste, foram criadas linhas perpendiculares cruzando o ponto central da seção, tanto no eixo vertical quanto no horizontal, em todos os seis pontos de aquisição de dados virtuais referenciados na Figura 29. Essas linhas contem 600 pontos de aquisição de velocidade. Com os pontos, formaram-se perfis de velocidade para permitir o entendimento da perturbação da velocidade entre o centro da seção de testes e a região próxima à parede. As posições das linhas podem ser vistas na Figura 56.

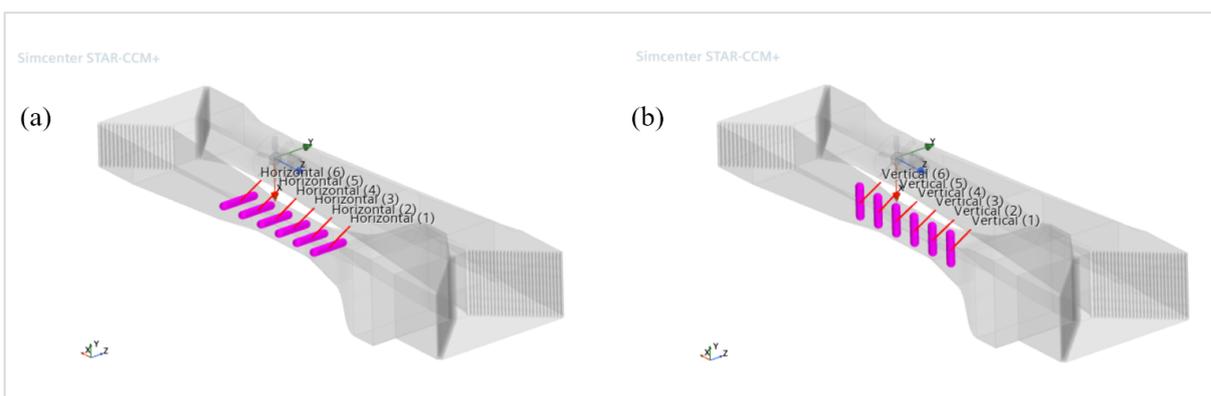


Figura 56 - Posição das linhas de medição de velocidade: (a) linhas horizontais; (b) linhas verticais. Fonte: Elaborado pelo autor.

Abaixo estão os resultados para as duas frequências de rotação do motor intermediárias analisadas neste trabalho, de 26,3 Hz nas Figuras 57 e 58, e 32,5 Hz nas Figuras 59 e 60.

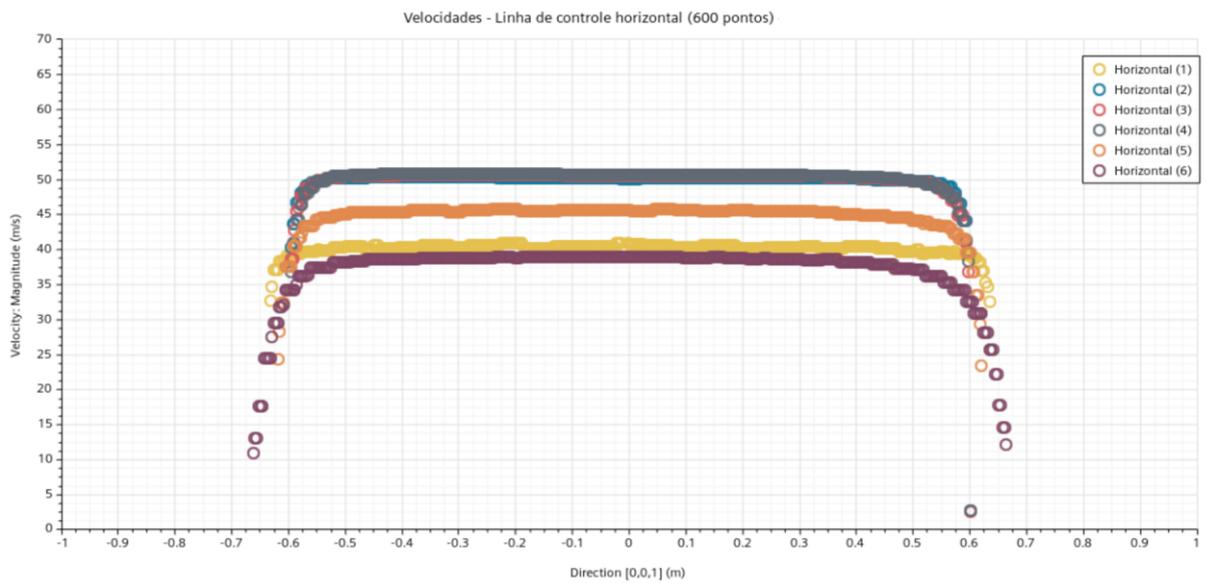


Figura 57 - Linha de pontos horizontal com 600 pontos de aquisição de velocidade para a rotação do motor de 26,3 Hz. Fonte: Elaborado pelo autor

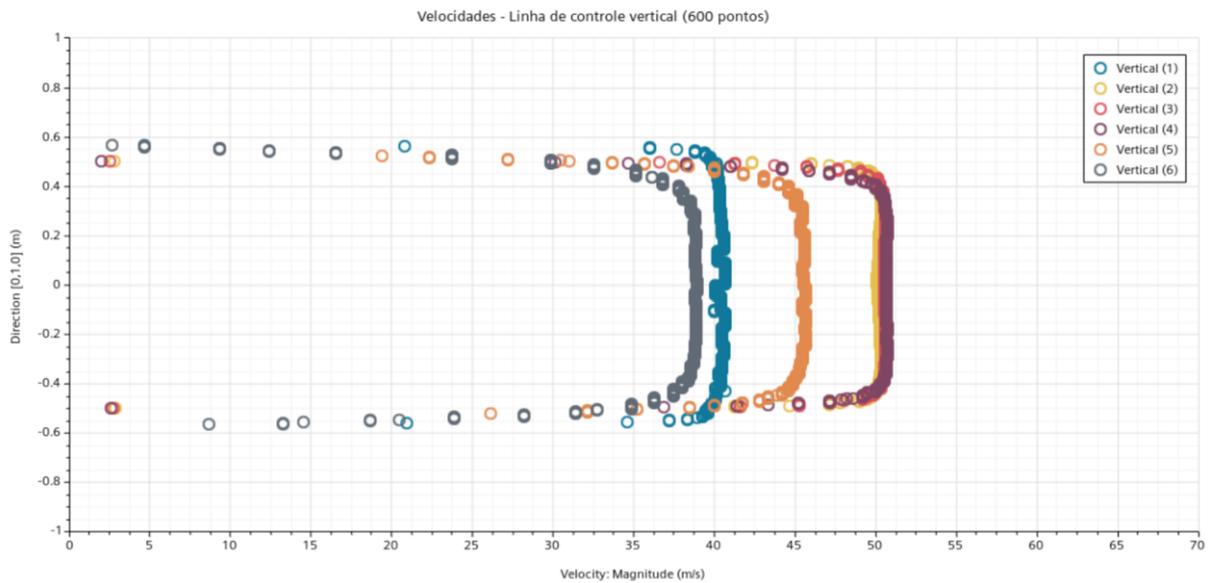


Figura 58 - Linha de pontos vertical com 600 pontos de aquisição de velocidade para a rotação do motor de 26.3 Hz. Fonte: Elaborado pelo autor

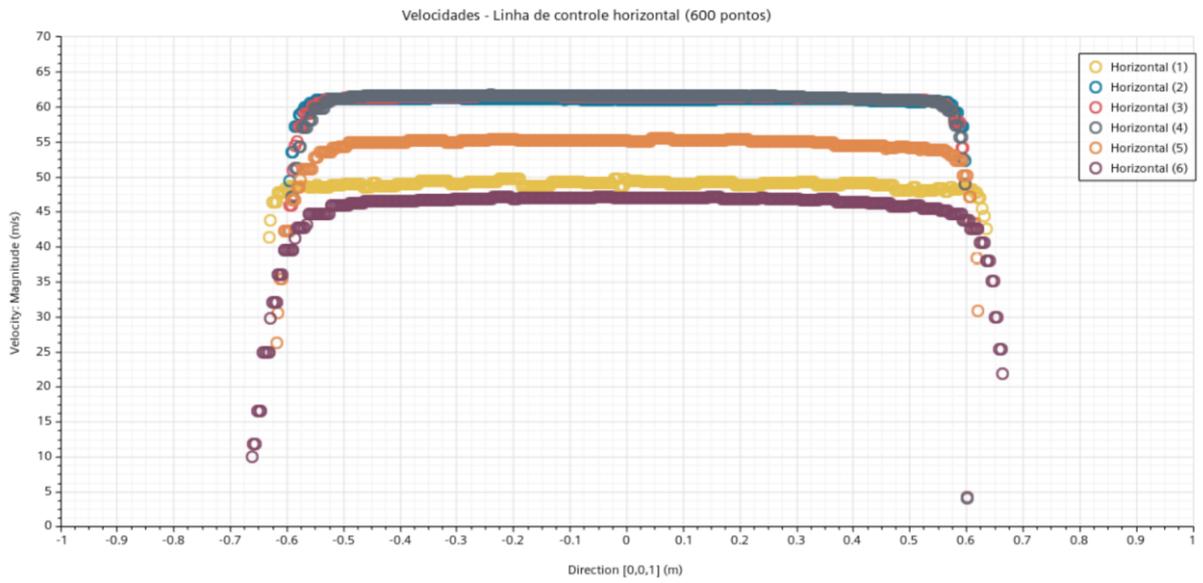


Figura 59 - Linha de pontos horizontal com 600 pontos de aquisição de velocidade para a rotação do motor de 32,5 Hz. Fonte: Elaborado pelo autor

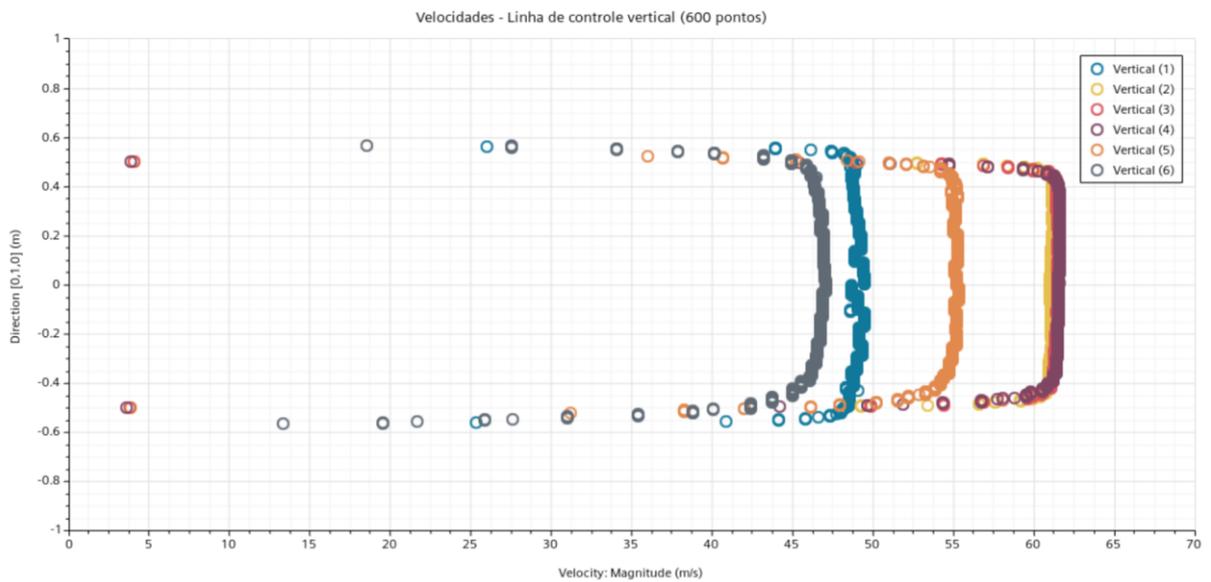


Figura 60 - Linha de pontos vertical com 600 pontos de aquisição de velocidade para a rotação do motor de 32,5 Hz. Fonte: Elaborado pelo autor

8.3 APÊNDICE III – ENSAIO DE CORRELAÇÃO DE VELOCIDADE COM FREQUENCIA DO MOTOR

Para correlação dos valores de velocidade e frequência do motor realizou-se um ensaio específico no Laboratório de Aerodinâmica da UFMG. A sua metodologia se baseou no aumento gradual da frequência de rotação do motor, com acompanhamento no inversor de frequência, e medição da velocidade na seção de testes com o sensor em baixa do próprio tunel e também com o tubo de pitot cedido pela empresa AERON. Este tubo de pitot é o mesmo utilizado nas aeronaves da Lilium® e é reconhecido pelo seu alto grau de precisão. O teste se iniciou com a pressão absoluta de 931,9 hPa, temperatura inicial de 23,7 °C e densidade do ar de 1,09 kg/m³.



Figura 61 - Tubo de pitot cedido pela empresa AERON e utilizado no ensaio. Fonte: Cedido pelo Laboratório de Aerodinâmica da UFMG.

Ao final do teste, comparou-se onze frequências de rotação com as suas respectivas velocidades nas duas sondas. A temperatura variou 5,3 °C durante o teste e a densidade do ar ao final do teste era de 1,08 kg/m³.



Figura 62 - Posicionamento do tubo de pitot cedido pela empresa AERON na seção de teste. Fonte: Cedido pelo Laboratório de Aerodinâmica da UFMG

Tabela 6 - Relação de velocidades medidas pelo tubo de pitot cedido pela empresa AERON, o tubo de Pitot do Túnel de vento do laboratório de aerodinâmica experimental da UFMG e os valores equivalentes de temperatura e frequência de rotação do motor. Fonte: Elaborado pelo autor.

Velocidade - Pitot TVCF (m/s)	Velocidade - Pitot (Aeron) (nós)	Velocidade - Pitot (Aeron) (m/s)	Temperatura (°C)	Frequencia (Hz)	RPM
10.00	18.90	9.72	23.70	7.70	462
15.00	27.00	13.89	23.70	10.70	642
20.00	35.60	18.31	23.80	13.90	834
25.00	43.90	22.58	23.90	17.10	1026
30.00	52.80	27.16	24.10	20.10	1206
35.00	61.50	31.64	24.50	23.30	1398
40.00	70.30	36.17	25.00	26.30	1578
45.00	79.60	40.95	25.80	29.50	1770
50.00	88.10	45.32	26.00	32.50	1950
55.00	96.00	49.39	27.70	35.50	2130
60.00	105.60	54.33	29.00	38.60	2316