

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

MARINA CAMBA FERNANDES

**ELABORAÇÃO DE MODELOS SEMI-EMPÍRICOS DE CORREÇÃO DE EFEITOS
DE INTERFERÊNCIA DE PAREDE PARA O ARRASTO DE CORPOS ROMBUDOS
PARA A SEÇÃO DE TESTES DO TÚNEL DE VENTO DE CIRCUITO FECHADO
DA UFMG**

Belo Horizonte
2024

MARINA CAMBA FERNANDES

**ELABORAÇÃO DE MODELOS SEMI-EMPÍRICOS DE CORREÇÃO DE EFEITOS
DE INTERFERÊNCIA DE PAREDE PARA O ARRASTO DE CORPOS ROMBUDOS
PARA A SEÇÃO DE TESTES DO TÚNEL DE VENTO DE CIRCUITO FECHADO
DA UFMG**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Minas Gerais, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

ORIENTADOR: Prof. Dr. Guilherme de Souza Papini

Belo Horizonte
2024

F363e

Fernandes, Marina Camba.

Elaboração de modelos semi-empíricos de correção de efeitos de interferência de parede para o arrasto de corpos rombudos para a seção de testes do túnel de vento de circuito fechado da UFMG [recurso eletrônico] / Marina Camba Fernandes. – 2024.

1 recurso online (76 f. : il., color.) : pdf.

Orientador: Guilherme de Souza Papini.

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

Bibliografia: f. 74-76.

1. Engenharia mecânica – Teses. 2. Aerodinâmica – Teses. 3. Pressão de parede (Aerodinâmica) – Teses. 4. Túneis aerodinâmicos – 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

ELABORAÇÃO DE MODELOS SEMI-EMPÍRICOS DE CORREÇÃO DE EFEITOS DE INTERFERÊNCIA DE PAREDE PARA O ARRASTO DE CORPOS ROMBUDOS PARA A SEÇÃO DE TESTES DO TÚNEL DE VENTO DE CIRCUITO FECHADO DA UFMG

MARINA CAMBA FERNANDES

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. Eduardo Bauzer Medeiros (Departamento de Engenharia Mecânica/UFMG) e Dr. Joel Laguardia Campos Reis (Departamento de Engenharia Mecânica/UFMG), 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 19 de junho de 2024.



Documento assinado eletronicamente por **Guilherme de Souza Papini, Professor do Magistério Superior**, em 03/07/2024, às 22:10, 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 Laguardia Campos Reis, Professor do Magistério Superior**, em 07/07/2024, às 16:51, 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 **Eduardo Bauzer Medeiros, Professor do Magistério Superior**, em 09/07/2024, às 04:12, 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 **3301766** e o código CRC **3ECFCCEE**.

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais, Antônio Carlos e Sueli, por nunca medirem esforços para que eu pudesse ter a formação que sempre sonhei, mesmo que isso significasse renunciarem a suas próprias vontades. Agradeço aos meus irmãos Roberta, Bianca e Daniel pelo carinho, companheirismo e compreensão, sem eles eu jamais teria chegado até aqui.

Agradeço ao Prof. Dr. Guilherme Papini pela oportunidade e confiança, desde a graduação quando trabalhamos juntos no trabalho de conclusão de curso, e espero continuar trabalhando em futuras oportunidades. Ao Prof. Dr. Eduardo Bauzer por toda a ajuda, inclusive prática, na realização deste trabalho. A todos os funcionários do Laboratório de Aerodinâmica Experimental da UFMG que mantém o ambiente de trabalho seguro e utilizável.

À minha namorada Ana Clara, minha companheira de todos os momentos, pelo conforto nos momentos de lazer e pela ajuda prática em várias situações, inclusive na realização de experimentos. Aos meus sogros Maria Aparecida e Roberto e meu cunhado Ivan por toda a ajuda no dia a dia e por me receberem em sua casa em vários momentos me poupando tempo e energia para que pudesse concluir meu trabalho.

Aos meus amigos Rita, Rodrigo, Daniel, Alice, Bruno, Maria Clara, Marcus Vinícius, Max, Letícia, Marcelo e Maryana, sempre presentes em todos os momentos e sempre dispostos a ajudar em qualquer situação. Aos meus sobrinhos e afilhados Luísa, Cecília e Bernardo por serem a alegria da minha vida.

Aos membros da Fênix Estudos Astronáuticos, com quem tive o prazer de dividir o laboratório e que sempre estiveram dispostos a ajudar com o que fosse preciso. Aos membros da Uai Sô, Fly pela ajuda nos experimentos incluindo o empréstimo dos equipamentos: célula de carga e calibrador, sem os quais seria impossível realizar os ensaios.

Ao programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Minas Gerais pela oportunidade de realizar o Mestrado. O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

Não há conquista na minha vida que eu tenha realizado sozinha, e não há alegria maior que as dividir com as pessoas incríveis que eu encontrei pelo caminho.

RESUMO

Para que experimentos e ensaios realizados em túneis de vento sejam confiáveis é fundamental conhecer os efeitos de interferência de parede no escoamento de ar na seção de testes com e sem modelos instalados, como por exemplo, o bloqueio sólido, o bloqueio de esteira, a flutuabilidade e outros, nos perfis (2D) ou modelos de aeronaves em subescala (3D), bem como de corpos rombudos como esferas, veículos automotores e outros. Desta forma, esta pesquisa tem como objetivo principal elaborar modelos de correção de efeitos de interferência de parede específicos para corpos rombudos, envolvendo o escoamento de ar na seção de teste do túnel de vento de circuito fechado do Laboratório de Aerodinâmica Experimental do curso de Engenharia Aeroespacial da Universidade Federal de Minas Gerais. Desta forma, para que o objetivo principal fosse alcançado tornou-se necessário a caracterização do escoamento na seção de testes seguindo uma norma internacional de calibração de túneis de vento subsônicos atmosféricos, bem como a utilização de resultados teóricos obtidos em pesquisas anteriores envolvendo este mesmo túnel de vento. Com isso foram utilizados tubos de Pitot, juntamente com os transdutores ScaniValves para a aquisição de dados de pressão total e estática em várias posições ao longo de toda a seção de testes e na seção de “descanso” do escoamento, bem como as respectivas temperaturas total e estática, entre outros parâmetros. Sendo assim, a partir dos dados adquiridos experimentalmente foram elaborados modelos semiempíricos de correção de efeitos de interferência de parede para o arrasto de corpos rombudos. Por fim, os modelos semiempíricos propostos foram validados a partir de testes realizados tanto neste trabalho, bem como por meio de dados obtidos em trabalhos teóricos e experimentais de pesquisa anteriores e correlatas a este trabalho. O principal resultado obtido mostra que em geral os efeitos de parede na seção de testes para o túnel de vento de circuito fechado da UFMG contribuem pouco para os resultados, equivalendo a menos de 5% do valor do resultado bruto. Concluiu-se que apesar dos efeitos de flutuabilidade horizontal, bloqueios sólido e de esteira apresentarem pouca influência nos resultados obtidos, a aplicação das correções propostas tende a aproximá-los dos valores esperados, ou seja, diminuindo a incerteza de medição.

Palavras-chave: túnel de vento, aerodinâmica, testes aerodinâmicos, efeitos de parede, bloqueio sólido, bloqueio de esteira, flutuabilidade horizontal, CFD, calibração.

ABSTRACT

For experiments and tests carried out in wind tunnels to be reliable, it is essential to understand the effects of wall interference on airflow in the test section with and without aeronautical models, such as solid blockage, wake blockage, buoyancy, and others, in profiles (2D) or scaled-down aircraft models (3D) as well as bluff bodies such as spheres, automotive vehicles, and others. Thus, this research aims to develop specific wall interference correction models for bluff bodies, involving airflow in the test section of the closed-circuit wind tunnel at the Experimental Aerodynamics Laboratory of the Aerospace Engineering course at the Federal University of Minas Gerais. To achieve the main objective, it became necessary to characterize the flow in the test section following an international standard for calibration of subsonic atmospheric wind tunnels, as well as to use theoretical results obtained in previous research involving the same wind tunnel. Pitot tubes, along with ScaniValves transducers, were used for acquiring total and static pressure data at various positions along the entire test section and in the flow "rest" section, as well as the respective total and static temperatures, among other parameters. Thus, empirical correction models for wall interference effects on the drag of bluff bodies were developed from experimentally acquired data. Finally, the proposed empirical models were validated through tests conducted in this work, as well as using data obtained from previous research. The main result obtained indicates that, in general, wall effects for the closed-circuit wind tunnel at UFMG contribute little to the results, amounting to less than 5% of the raw result value. It was concluded that despite the horizontal buoyancy effects and solid and wake blockages showing little influence on the obtained results, the application of the proposed corrections tends to bring them closer to the expected values.

Key-words: wind tunnels, aerodynamics, aerodynamic testing, wall effects, solid blockage, wake blockage, horizontal buoyancy, CFD, calibration.

ÍNDICE DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Tempo de teste em túnel de vento de novas aeronaves em fase de desenvolvimento em função do tipo e ano da aeronave.	14
Figura 2 – Camada limite.	22
Figura 3 – Espessura de deslocamento.	23
Figura 4 - Efeito do Número de Reynolds no coeficiente de arrasto de esferas lisas.	26
Figura 5 - Túnel de vento de circuito fechado.	29
Figura 6 – Espessamento da camada limite na seção de testes.	30
Figura 7 – Confinamento da expansão do ar.	31
Figura 8 – Fator de forma tridimensional para flutuabilidade horizontal.	33
Figura 9 – Bloqueio sólido.	34
Figura 10 – Bloqueio de esteira.	34
Figura 11 - Efeitos dos bloqueios sólido e de esteira nos campos de velocidade e pressão do escoamento.	35
Figura 12 - Fluxograma dos ensaios realizados	40
Figura 13 – Túnel de vento de circuito fechado da UFMG.	41
Figura 14 - (a) seção de testes com o painel do sistema de controle de velocidade; (b) painel de controle de velocidade aberto e transdutores ScaniValves para aquisição de pressões	42
Figura 15 – Seção transversal da seção de testes do TVCF.	42
Figura 16 – Tubo de Pitot.	43
Figura 17 – Transdutores <i>ScaniValves</i>	44
Figura 18 – Bancada de arrasto para a bola de bilhar.	45
Figura 19 – Calibrador para a célula de carga	45
Figura 20 – Sensor de temperatura do TVCF.	46
Figura 21 – Experimento 1: Perfil de velocidade na entrada da seção de testes.	48
Figura 22 – Experimento 2: Gradiente de pressão estática longitudinal.	49
Figura 23 – Experimento 3: Arrasto em uma esfera.	49
Figura 24 – Montagem do experimento de Oliveira.	50
Figura 25 - Velocidade x Altura na entrada da seção de testes.	55
Figura 26 - Pressão estática versus velocidade.	57
Figura 27 - Gradiente de pressão estática longitudinal.	57
Figura 28 - Gradiente de pressão estática longitudinal por velocidade.	58
Figura 29 – Gradiente de velocidade longitudinal.	59
Figura 30 – Espessura de deslocamento da camada limite na seção de testes.	60
Figura 31 – Fator de correção para flutuabilidade horizontal para a esfera de 54mm.	63
Figura 32 - Aproximação de Morrison	64
Figura 33 – Arrasto bruto e corrigido para a esfera de 54mm no TVCF.	65
Figura 34 – Esfera e <i>trip wires</i> utilizados por Oliveira (2019).	66
Figura 35 - Fator de correção para flutuabilidade horizontal para a esfera de 150mm.	67
Figura 36 - Arrasto bruto e corrigido para a esfera de 150 mm no TVCF.	68

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Especificações da célula de carga.	44
Tabela 2 - Velocidades para diferentes alturas na entrada da seção de testes.	55
Tabela 3 - Velocidade x Altura na entrada da seção de testes.	56
Tabela 4 - Gradiente de pressão estática longitudinal.	58
Tabela 5 - Gradiente de pressão estática longitudinal por velocidade.	59
Tabela 6 - Gradiente de velocidade local.	60
Tabela 7 - Espessura de deslocamento da camada limite na seção de testes.	61
Tabela 8 - Fator de correção para flutuabilidade horizontal para a esfera lisa de 54mm.	62
Tabela 9 - Fator de correção para bloqueio sólido e de esteira para a esfera de 54mm.	64
Tabela 10 - Arrasto bruto e corrigido para a esfera de 54mm no TVCF.	65
Tabela 11 - Fator de correção para flutuabilidade horizontal para a esfera de 150mm.	67
Tabela 12 - Fator de correção para bloqueio sólido e de esteira para a esfera de 150mm.	67
Tabela 13 - Arrasto bruto e corrigido para a esfera de 150mm no TVCF.	68
Tabela 14 - Correções de efeitos de parede para o TVCF.	71

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AGARD	<i>Advisory Group for Aeronautical Research and Development</i>
AIAA	<i>American Institute of Aeronautics and Astronautics</i>
CEFET	Centro Federal de Educação Tecnológica
CEMIG	Companhia Energética de Minas Gerais
CFD	<i>Computational Fluid Dynamics</i>
DNS	<i>Direct Numerical Simulation</i>
INMETRO	Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia
LaExp	Laboratório de Aerodinâmica Experimental
LES	<i>Large Eddy Simulation</i>
NACA	<i>National Advisory Committee for Aeronautics</i>
NASA	<i>National Aeronautics and Space Administration</i>
RANS	<i>Reynolds Average Navier-Stokes</i>
TVCF	Túnel de Vento de Circuito Fechado
UFMG	Universidade Federal de Minas Gerais
UFJF	Universidade Federal de Juiz e de Fora
UFSJ	Universidade Federal de São João Del Rey

LISTA DE SÍMBOLOS

a	Aceleração
A	Área característica
AR	Alongamento do corpo
B	Largura do jato
c	Velocidade do som no ar
C	Área da seção transversal da seção de testes
C_D	Coefficiente de arrasto
C_{DB}	Coefficiente de arrasto corrigido para bloqueio
C_{DF}	Correção de arrasto para flutuabilidade horizontal
C_{DU}	Coefficiente de arrasto não corrigido
D	Força de arrasto
E_t	Energia total por unidade de massa
f	Força por unidade de volume
F	Força
Fr	Número de Froude
g	Aceleração da gravidade
l	Comprimento característico
k	Constante para o formato particular do corpo
K	Energia cinética turbulenta
m	Massa
M	Número de Mach
\dot{M}	Vazão mássica
\vec{n}	Projeção do vetor normal à superfície
p	Pressão estática

p_0	Pressão de estagnação
p_t	Pressão total
q	Pressão dinâmica na ausência de modelo
q_c	Pressão dinâmica corrigida
Re	Número de Reynolds
s	Posição
S	Área do modelo
t	Tempo, espessura máxima do modelo
T	Temperatura estática
u	Componente da velocidade na direção x
U_c	Velocidade corrigida
u_{cD}	Incerteza associada ao coeficiente de arrasto
u_p	Incerteza associada à pressão estática
$u_{p_{atm}}$	Incerteza associada à pressão atmosférica
u_{p_T}	Incerteza associada à pressão total
u_q	Incerteza associada à pressão dinâmica
u_T	Incerteza associada à temperatura
u_V	Incerteza associada à velocidade
u_δ	Incerteza associada à espessura de deslocamento
U_∞	Velocidade do escoamento não perturbado na direção x
V	Velocidade
δ	Espessura da camada limite
δ_{ij}	Delta de Kronecker
δ^*	Espessura de deslocamento da camada limite
θ	Espessura de momento da camada limite, constante de bloqueio
κ	Constante de von Kármán

λ	Coefficiente de viscosidade secundário
λ_2	Fator de forma bidimensional
λ_3	Fator de forma tridimensional
μ	Viscosidade
v	Componente da velocidade na direção y
\vec{v}	Vetor velocidade
ρ	Densidade do fluido
ρ_∞	Densidade do fluido não perturbado
$\bar{\sigma}$	Tensor de tensão viscosa
τ_{ij}	Tensão na direção j em uma face normal ao eixo i .
w	Componente da velocidade na direção z

SUMÁRIO

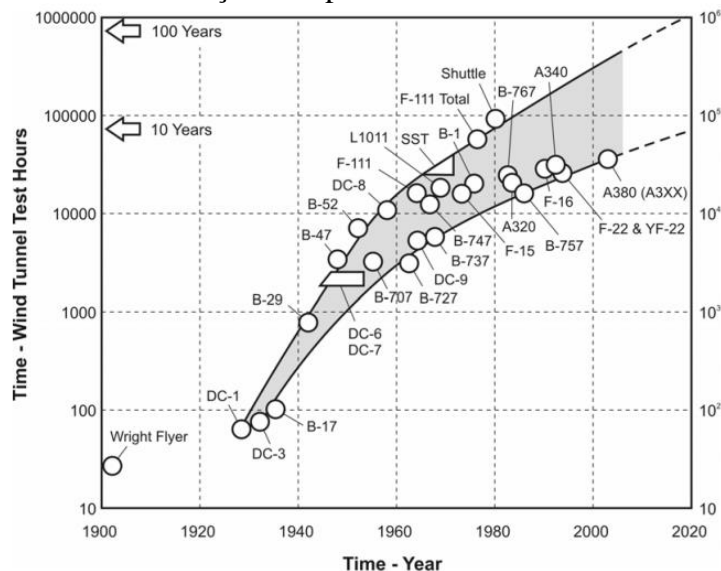
1. INTRODUÇÃO.....	14
1.1. Objetivo	16
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
2.1. Fundamentação teórica	17
2.1.1. Conceitos fundamentais.....	17
2.1.2. Equações fundamentais	18
2.1.4. Pressões de estagnação, estática, dinâmica e total.....	20
2.1.5. Camada limite.....	21
2.1.6. Espessuras características da camada limite.....	22
2.1.7. Força de Arrasto	24
2.2. Túneis de Vento	26
2.2.1. Princípio de Funcionamento.....	26
2.2.2. Parâmetros de similaridade.....	27
2.2.3. Classificação.....	28
2.2.4. Efeitos de Parede	30
2.3. Correções para os efeitos de parede.....	32
2.3.1. Flutuabilidade horizontal.....	32
2.3.2. Bloqueio sólido e bloqueio de esteira.....	33
2.3.3. Outras correções	37
2.4. Análise metrológica	37
3. METODOLOGIA.....	40
3.1. Instrumentação.....	41
3.1.1. Túnel de vento de circuito fechado do laboratório	41
3.1.2. Tubos de Pitot utilizados	43
3.1.3. Transdutores de pressão utilizados	44
3.1.4. Bancada para medição de arrasto	44
3.1.5. Sistema de calibração para a célula de carga.....	45
3.1.6. Aquisição e tratamento de dados	46
3.2. Calibração do Túnel de Vento	46
3.3. Campanha de Testes	47
3.3.1. Perfil de velocidade na entrada da seção de testes	47

3.3.2. Gradiente de pressão estática longitudinal	48
3.3.3. Arrasto em esfera lisa de 54mm de diâmetro	49
3.3.4. Arrasto em esfera de 150mm de diâmetro.....	50
3.4. Simulação CFD.....	51
3.5. Incertezas de Medição.....	51
3.5.1. Incerteza na medição dos parâmetros do escoamento	51
3.5.1. Incerteza na espessura de deslocamento da camada limite	53
3.5.2. Incerteza no coeficiente de arrasto	54
4. ANÁLISE DE RESULTADOS.....	55
4.1. Perfil de velocidade na entrada da seção de testes.....	55
4.2. Gradiente de pressão estática longitudinal.....	56
4.2.1. Resultado experimental	56
4.2.2. Espessura de deslocamento da camada limite	59
4.3. Correções de parede.....	61
4.3.1. Flutuabilidade Horizontal	61
4.3.2. Bloqueio sólido e bloqueio de esteira.....	62
4.4. Arrasto corrigido.....	62
4.4.1. Esfera lisa	62
4.4.2. Esfera de 150mm de diâmetro	66
5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	72
5.1. Conclusões	72
5.2. Recomendações	73
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	74

1.INTRODUÇÃO

Os túneis de vento são equipamentos importantíssimos para o estudo aerodinâmico, aeroelástico, aeroacústico, entre outros, durante o desenvolvimento de uma nova aeronave. Segundo Rasuo (2006), a importância da experimentação em túnel de vento pode ser percebida a partir de uma análise comparativa do tempo gasto em ensaios aerodinâmicos realizados ao longo do desenvolvimento de determinadas aeronaves, como mostrado pela Figura 1.

Figura 1 - Tempo de teste em túnel de vento de novas aeronaves em fase de desenvolvimento em função do tipo e ano da aeronave.



Fonte: Rasuo (2006).

Por exemplo, na Figura 1, do tempo total de desenvolvimento da aeronave A380, praticamente 08 anos foram ocupados utilizando-se ensaios de seus modelos em túneis de vento. O que embasa a afirmação de que os túneis de vento irão permanecer ainda por muito tempo como sendo imprescindíveis no desenvolvimento aeroespacial, tendo em vista a tendência da linha tracejada na referida figura.

O próprio túnel de vento de circuito fechado do Laboratório de Aerodinâmica Experimental da UFMG é utilizado em diversos estudos e campanhas, tanto por equipes acadêmicas de foguetemodélismo (Fênix Estudos Astronáuticos), projeto de satélites (CZAR Aerospace) e aeromodelismo (Uai Sô, Fly!) quanto por empresas de inovação tecnológica como a Aeron.

O LAExp também recebe com frequência discentes de outras universidades para a realização de campanhas de testes, como a Universidade Federal de São João Del Rey (UFSJ), Universidade Federal de Juiz e de Fora (UFJF) e o Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (CEFET-MG).

Em relação à produção acadêmica, a estrutura do TVCF foi utilizada em artigos científicos como Oliveira (2019) e Fernandes (2023), trabalhos de conclusão de curso como Palhares (2016) e Fernandes (2019), e dissertações de mestrado como Palhares (2019) e Araújo (2024), entre outros.

Na indústria, pode-se destacar três instalações desse tipo se destacam pela grande gama de ensaios possíveis e pelo alto nível complexidade dos testes que podem ser realizados nelas.

Na Ásia o túnel de vento hipersônico chinês JF-12 é um dos mais avançados do mundo, projetado para testar veículos a velocidades de Mach 5 a Mach 9. Inaugurado em 2012, o JF-12 tem sido crucial para o desenvolvimento de aeronaves hipersônicas e tecnologias de reentrada atmosférica.

Na Europa, o túnel de vento de grande escala da ONERA em Modane, França, é outro exemplo notável. Este túnel de vento, um dos maiores do mundo, permite testes de modelos em escala real em uma ampla gama de velocidades, de subsônicas a transônicas (LU e MARREN, 2002). A instalação é equipada com avançados sistemas de medição e visualização de escoamento, proporcionando dados de alta precisão que são essenciais para o desenvolvimento de aeronaves e veículos espaciais.

Nos Estados Unidos, o túnel de vento transônico da NASA, localizado no Centro de Pesquisa Langley, é um exemplo significativo de infraestrutura de testes aerodinâmicos. Este túnel permite testes a velocidades transônicas fundamentais para o desenvolvimento de aeronaves comerciais e militares (NASA, 2024).

Mas, nenhum equipamento, por mais moderno que seja, é absoluto nos dados gerados. Assim, a seguir serão pontuados alguns problemas que contribuem para o aumento da incerteza, por exemplo, das correções de efeito de interferência de parede no escoamento de ar nas seções de teste dos túneis de vento.

Os problemas mais gerais que contribuem para a imprecisão na definição das correções de efeito de interferência de parede no escoamento de ar nas seções de um túnel de vento podem ser organizados em quatro grupos (RASUO, 2006), a saber:

1. Não linearidade da equação de referência na condição de escoamento supercrítico, pois este apresenta propriedades intermediárias entre um fluxo laminar e turbulento, dificultando o modelamento da camada limite;
2. Não linearidade das condições de contorno para o escoamento atravessado proveniente de paredes ventiladas, assim como a dificuldade de modelá-los ou medi-los;

3. Características geométricas do túnel de vento (comprimento finito das paredes ventiladas), a entrada do difusor e a presença da esteira em função da estrutura da instrumentação, bem como do próprio modelo;
4. Desenvolvimento de camada limite nas paredes da seção de testes dos túneis de vento, o que produz desvios no escoamento enclausurado em relação às condições de escoamento ao ar livre.

Os dois primeiros problemas citados acima são característicos de túneis de vento de alta velocidade, onde o escoamento consegue atingir o estado supercrítico e as paredes ventiladas são mais utilizadas, para possibilitar um maior controle sobre o fluxo e o desenvolvimento da camada limite.

Os efeitos de interferência de parede e efeitos de número de Reynolds também foram identificados como duas fontes primárias de falta de confiabilidade dos resultados de testes em túnel de vento, de acordo com o *Fluid Dynamics Panel Specialists' Meeting*, com o objetivo: *Wall Interference in Wind Tunnels*, realizado em Londres, 19- 20 de maio de 1982.

1.1. Objetivo

Esta pesquisa tem como objetivo principal elaborar modelos de correção de efeitos de interferência de parede na seção de teste do túnel de vento de circuito fechado do LAExp da Universidade Federal de Minas Gerais, mais especificamente envolvendo a medição de arrasto de corpos rombudos. A validação destes modelos de correção de interferência de parede deu-se de forma experimental e teórica. No caso da validação teórica foram utilizados os resultados obtidos em pesquisas anteriores a esta, para a mesma seção de testes. Os dados teóricos foram obtidos segundo Munson et. al (1990).

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Fundamentação teórica

2.1.1. Conceitos fundamentais

A definição de fluido apresentada em Fox (2016) é: “uma substância que se deforma continuamente sob a aplicação de uma tensão de cisalhamento (tangencial), não importando o quão pequeno seja seu valor”. Pode-se também partir do princípio inverso, segundo Krause (2005), que define fluidos como corpos que não apresentam tensões tangenciais quando estão em repouso.

A partir dessas definições, corpos nos estados físicos líquido e gasoso se enquadram como fluidos. Esses corpos são estudados a partir da consideração do contínuo, ou seja, para um fluido em movimento, não são estudados o movimento singular dos seus átomos ou moléculas, mas o escoamento é visto como um meio contínuo que consiste em pequenos elementos volumétricos cujo tamanho é muito maior do que distâncias intermoleculares, desconsiderando concentrações químicas, segundo Fox (2006).

Por causa da consideração do contínuo, considera-se que cada propriedade de um fluido (densidade, temperatura, pressão, velocidade, etc.) tem um valor definido para cada ponto no espaço. Conseqüentemente, cada uma dessas propriedades pode ser tratada como função contínua da posição e do tempo, ou seja, essas propriedades podem ser definidas através de campos escalares ou vetoriais (WHITE, 2006). Se η representa qualquer propriedade do fluido, então:

$$\eta = \eta(x, y, z, t) \quad (1)$$

Se as propriedades em cada ponto de um campo de escoamento não variam com o tempo, diz-se que este escoamento está em regime permanente, caso contrário, ele está em regime transiente. A definição matemática de um escoamento em regime permanente é:

$$\frac{d\eta}{dt} = 0 \quad (2)$$

onde,

$$\eta = \eta(x, y, z) \quad (3)$$

Existem também outras características de extrema relevância para o estudo de um escoamento de forma a classificá-lo, além do regime em que se encontra, como: compressível ou incompressível e invíscido ou viscoso.

O conceito de compressibilidade está diretamente ligado à variação significativa da densidade do fluido em escoamento. Se a variação da densidade do fluido é insignificante no campo de escoamento, então esse escoamento é denominado como incompressível, caso contrário, ele é considerado compressível, embora nada seja incompressível, de fato. Portanto, na natureza todo escoamento é a rigor, compressível, entretanto escoamentos de baixa velocidade, abaixo de 180 m/s, podem ser modelados como incompressíveis, sem significativa perda de precisão em sua resolução (ANDERSON, 1984).

Outra propriedade importante é a viscosidade do fluido. A viscosidade de um fluido está ligada à resistência que este apresenta à deformação por cisalhamento. Assim, se um escoamento apresenta fenômenos de cisalhamento, difusão molecular e transporte de calor que não podem ser desprezados, então esse escoamento é denominado viscoso. Se os efeitos desses fenômenos forem insignificantes o escoamento pode ser considerado hipoteticamente como invíscido. Assim, como a compressibilidade, os fenômenos viscosos estão presentes em todos os escoamentos, entretanto para grande parte dos escoamentos aerodinâmicos, inclusive em túneis de vento, o escoamento pode ser modelado como invíscido, na região de interesse, ou seja, no escoamento fora da camada limite, que representa uma fina região adjacente à superfície do modelo. Ou seja, os estudos ocorrem no campo potencial, desconsiderando os efeitos viscosos no escoamento.

Outro conceito importante no estudo de um escoamento são as linhas de corrente, que White (2006) define como linhas desenhadas num escoamento que são tangentes ao vetor velocidade em cada ponto do campo de escoamento. Num escoamento em regime permanente a velocidade em cada ponto do campo permanece constante com o tempo, ou seja, as linhas de corrente não variam de um instante a outro.

2.1.2. Equações fundamentais

Para que um escoamento seja completamente determinado é preciso que sejam conhecidos seu vetor velocidade \vec{v} , e as seguintes propriedades termodinâmicas: pressão p , temperatura T , densidade ρ , viscosidade μ e condutividades térmica λ ao longo de todo o escoamento (KRAUSE, 2005). Isso pode ser feito através da resolução das equações de conservação para massa e energia e conservação da quantidade de movimento, a partir da segunda lei de Newton.

A equação de conservação da massa, também chamada de equação da continuidade é dada por:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = 0 \quad (4)$$

A variação da massa no tempo no volume de controle é expressa por $\frac{\partial \rho}{\partial t}$ e o fluxo de massa nas superfícies é expresso por $\nabla \cdot (\rho \vec{v})$. Para um fluido incompressível $\rho = cte$, logo $\frac{\partial \rho}{\partial t} = 0$. Com isso tem-se que $\nabla \cdot \vec{v} = 0$.

A segunda lei de Newton ou Lei da Conservação da Quantidade de Movimento pode ser expressa na seguinte forma (WHITE, 2006):

$$\frac{\partial \rho \vec{v}}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\rho \vec{v} \times \vec{v}) = -\vec{\nabla} p + \vec{\nabla} \cdot \bar{\sigma} \quad (5)$$

onde o valor médio do tensor tensão viscosa é dado como $\bar{\sigma} = \frac{1}{3} \tau_{xx} + \tau_{yy} + \tau_{zz}$ e para fluidos incompressíveis esse valor médio equivale à pressão estática ($\bar{\sigma} = p$).

Para um fluido incompressível com viscosidade constante a equação se reduz a equação de Euler (KRAUSE, 2005):

$$\rho \frac{d\vec{v}}{dt} = -\vec{\nabla} p + \mu \nabla^2 u + \rho \vec{g} \quad (6)$$

A equação da conservação da energia deriva da primeira lei da termodinâmica que diz que a energia interna de uma partícula de massa constante aumenta se a quantidade de calor adicionada ao fluido através de suas fronteiras for maior que o trabalho realizado contra o volume atuante e as forças de superfície (KRAUSE, 2005). Ela pode ser escrita na seguinte forma:

$$\frac{\partial \rho E_t}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot \rho \vec{v} E_t = \rho(\vec{g} \cdot \vec{v}) - \vec{\nabla} \cdot p \vec{v} + \vec{\nabla} \cdot (\bar{\sigma} \cdot \vec{v}) + \vec{\nabla} \cdot (K \vec{\nabla} T) \quad (7)$$

onde $\left[\frac{\partial \rho E_t}{\partial t} \right]$ representa a variação da energia total por unidade de massa e $[\vec{\nabla} \cdot \rho \vec{v} E_t]$ corresponde ao termo convectivo da equação de transporte de Reynolds, esse termo representa a energia que é transportada pelo movimento do fluido através de suas fronteiras.

Do lado direito, o primeiro termo $[\rho(\vec{g} \cdot \vec{v})]$ diz respeito ao trabalho realizado pelas forças de campo, podendo ser resumida à força de gravidade, a parcela $[-\vec{\nabla} \cdot p \vec{v} + \vec{\nabla} \cdot (\bar{\sigma} \cdot \vec{v})]$ representa o trabalho realizado contra as forças de superfície sendo a parte negativa correspondente às forças de pressão e a parte positiva às forças de cisalhamento. A contribuição

da condução de calor para o balanço de energia é dada pela expressão $[\vec{\nabla} \cdot (K\vec{\nabla}T)]$ que representa o fluxo de calor nas fronteiras do volume de controle onde K é a energia cinética turbulenta.

Para um escoamento perpendicular ao vetor aceleração da gravidade, o trabalho realizado pelas forças de campo será nulo, também podendo ser desprezado para pequenos ângulos. Assim uma forma mais usual para a equação da energia é:

$$\frac{\partial \rho E_t}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot \rho \vec{v} E_t = -\vec{\nabla} \cdot p \vec{v} + \vec{\nabla} \cdot (\bar{\sigma} \cdot \vec{v}) + \vec{\nabla} \cdot (K\vec{\nabla}T) \quad (8)$$

A equação da quantidade de movimento para um escoamento incompressível pode ser ainda mais simplificada se forem impostas novas restrições para o fluido e o escoamento. Para um escoamento incompressível, não viscoso, em regime permanente (como o ar num túnel de vento fora da camada limite), ao longo de uma linha de corrente chega-se à equação de Bernoulli:

$$p + \frac{1}{2} \rho V^2 + \rho g z = \text{constante} \quad (9)$$

2.1.4. Pressões de estagnação, estática, dinâmica e total

Na equação de Bernoulli é possível se observar que cada termo da equação é uma grandeza de unidade de pressão, sendo assim, é possível nomear cada um desses termos da seguinte maneira:

- p → Pressão estática
- $\frac{1}{2} \rho V^2 = q$ → Pressão dinâmica
- $\rho g z$ → Pressão hidrostática

A pressão estática é a pressão sentida pela partícula em movimento, ou seja, é uma pressão que se desenvolve e é sentida a todo momento ao longo da linha de corrente, por isso essa pressão pode ser medida diretamente através de uma tomada de pressão (WHITE, 2006).

O segundo termo, denominado pressão dinâmica está relacionado à velocidade desenvolvida pela partícula fluida e não é sentido na forma de pressão a todo momento, mas apenas quando há um ponto de estagnação, ou seja, quando a partícula tem sua velocidade reduzida a zero a energia associada à sua velocidade não perturbada é sentida na forma de um

acréscimo na pressão estática. A soma entre a pressão estática e a pressão dinâmica que pode ser mensurada através de um ponto de estagnação é denominada pressão de estagnação.

$$p_0 = p + \frac{1}{2}\rho V^2 \quad (10)$$

O terceiro termo é nada mais que a pressão hidrostática, que é independente do movimento da partícula fluida, é a pressão relacionada ao peso de uma coluna de fluido, e só aparece quando há uma diferença de altura (ou profundidade) entre os pontos da linha de corrente. Ademais, para fluidos com densidade muito baixa (gases e vapores), esse termo é geralmente muito menor que os demais.

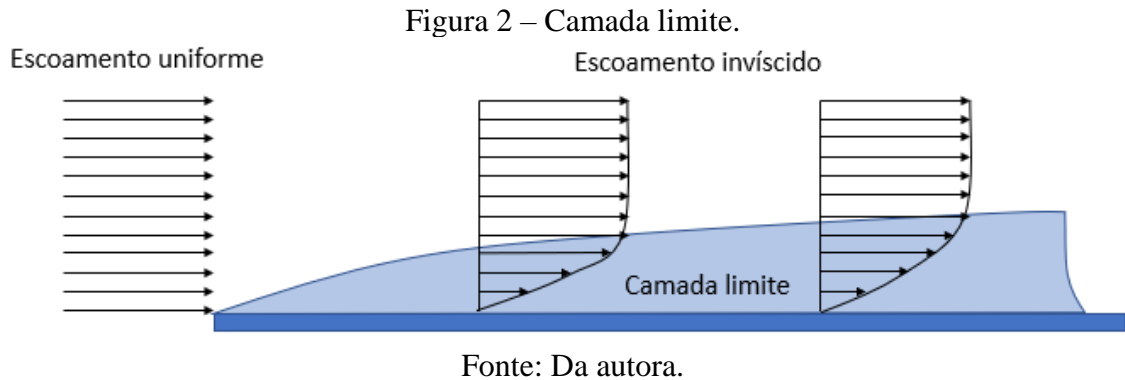
Por fim, a pressão total é simplesmente a soma da pressão estática com a pressão dinâmica e a pressão hidrostática, ou seja, é o termo que permanece constante de acordo com a equação de Bernoulli. É importante destacar que para um escoamento com linhas de corrente retilíneas sem deslocamento no eixo z , a pressão total tem o mesmo valor da pressão de estagnação.

$$p_t = p_0 \quad (11)$$

2.1.5. Camada limite

O conceito de camada limite foi criado por Prandtl em 1904. O que causa a existência dessa região é a condição de não deslizamento (SCHLICHTING, 1979), essa condição estabelece que um fluido não é capaz de deslizar sobre uma superfície sobre a qual mantém contato. Quando um fluido se movimenta dentro de um duto ou através de um corpo com uma velocidade v , essa condição implica que a velocidade das partículas do fluido em contato com a superfície seja zero, isso faz com que apareça um gradiente de velocidade na região entre a superfície do corpo (ou a parede do duto) e a região onde o fluido se movimenta com velocidade v , essa região é denominada camada limite.

Este gradiente de velocidade desde o fluido adjacente à superfície até a região de velocidade v do escoamento faz com que apareçam fenômenos viscosos de transporte de energia e massa que não podem ser ignorados, portanto a região da camada limite de um escoamento não pode ser considerada invíscida. Com isso, é possível dividir um escoamento entre uma pequena região viscosa onde os fenômenos de atrito (arrasto de atrito, por exemplo) atuam e uma região que pode ser considerada invíscida, portanto, mais simples de ser analisada. A Figura 2 – Camada limite Figura 2 representa o desenvolvimento da camada limite para uma placa plana.



Para um corpo que se movimenta ao ar livre, a única camada limite presente se encontra adjacente à superfície desse corpo, já para um modelo em um túnel de vento, a camada limite presente nas paredes da seção de testes também influenciam o escoamento.

2.1.6. Espessuras características da camada limite

Neste estudo, a espessura da camada limite (δ) é definida como a distância vertical na qual:

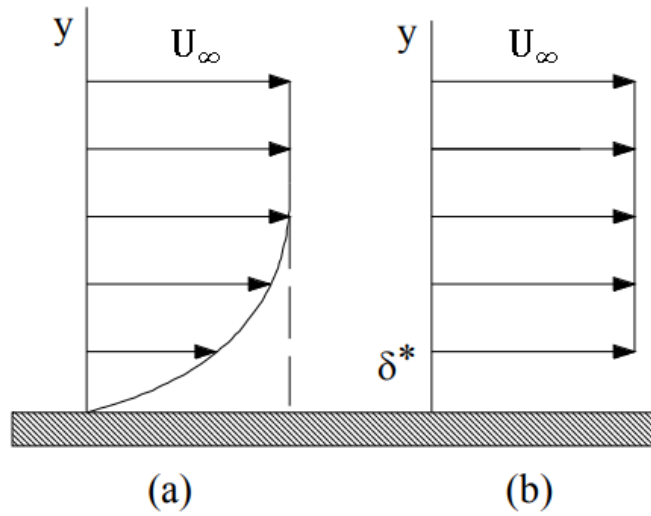
$$\frac{u}{U_{\infty}} = 0.99 \quad (12)$$

Isso significa que é a medida perpendicular à parede na qual a velocidade horizontal atinge 99% da velocidade do fluxo não perturbado pela parede.

Outras medidas importantes discutidas na literatura são as espessuras de deslocamento e de momento, ambas sendo soluções integrais aproximadas para a camada limite propostas por Von Kármán em 1921. Rosa (2023) relaciona a espessura de deslocamento (δ^*) à redução do fluxo que o fluido sofre devido à viscosidade.

A espessura de deslocamento é a distância imaginária da parede na qual o fluxo fora da camada limite (a U_{∞}) deveria começar para que tanto o fluxo real (Figura 3 (a)) quanto o fluxo idealizado (Figura 3 (b)) produzam as mesmas vazões.

Figura 3 – Espessura de deslocamento.



Fonte: Adaptado de Rosa (2023).

Considerando o perfil de velocidade (a) da Figura 3, a vazão mássica pode ser expressa como:

$$\dot{M} = \int_0^{\infty} \rho u \, dy \quad (13)$$

Enquanto a vazão produzida pelo fluxo (b), ajustada pelo déficit de massa devido à desaceleração do fluido adjacente à parede, é:

$$\dot{M} = \int_0^{\infty} \rho U_\infty \, dy - (\rho_\infty U_\infty \delta^*) \quad (14)$$

Por definição, ambas as vazões são iguais. Assim, dividindo uma equação pela outra e isolando δ^* , tem-se:

$$\delta^* = \int_0^{\infty} \left(1 - \frac{\rho u}{\rho_\infty U_\infty}\right) dy \quad (15)$$

Analogamente, a espessura de momento (θ) está associada à perda de momento sofrida pelo fluido devido à viscosidade. O fluxo em uma seção correspondente à Figura 3 (a) é:

$$J = \int_0^{\infty} u (\rho u dy) \quad (16)$$

O mesmo momento em um fluxo como na Figura 3 (b), ajustado para o seu déficit de momento, é:

$$J = \int_0^{\infty} U_{\infty} (\rho u dy) - (\rho U_{\infty}^2 \theta) \quad (17)$$

Seguindo o mesmo procedimento da espessura de deslocamento, chegamos à equação para a espessura de momento (ROSA, 2023):

$$\theta = \int_0^{\infty} \frac{\rho}{\rho_{\infty}} \frac{u}{U_{\infty}} \left(1 - \frac{u}{U_{\infty}}\right) dy \quad (18)$$

Tanto o conceito quanto a quantificação dessas espessuras são especialmente úteis quando se deseja caracterizar a camada limite de um túnel de vento por estarem relacionadas aos efeitos que o confinamento do ar na seção de testes pode provocar no escoamento.

2.1.7. Força de Arrasto

Para qualquer corpo que se encontre imerso em um fluido, por exemplo, o ar, é sabido que independente da sua geometria ou do comportamento do escoamento, as forças e momentos aerodinâmicos que atuam sobre ele são provenientes de apenas duas fontes (ANDERSON, 1984):

- A distribuição de pressão (p) sobre a superfície do corpo;
- A distribuição da tensão de cisalhamento (τ) na superfície do corpo.

A força aerodinâmica resultante pode ser obtida através da integração de p e τ sobre toda a superfície do corpo. Essa força é comumente decomposta em uma parcela na direção da velocidade do escoamento não perturbado (V), denominada arrasto (D , do inglês *drag*), e uma parcela na direção perpendicular a V denominada sustentação (L , do inglês *lift*).

Enquanto gerar força de sustentação é muitas vezes o objetivo de alguns corpos, como asas fixas e rotativas, a força de arrasto, por se tratar de uma força dissipativa, de sentido contrário ao movimento relativo entre o fluido e o corpo é geralmente indesejada e deve ser minimizada para que se atinja uma maior eficiência energética. Entretanto alguns corpos podem apresentar quantidades desprezíveis ou até mesmo nulas de sustentação, como é o caso de corpos que apresentam simetria no eixo de V , todo corpo que apresenta movimento relativo em direção a um fluido experimenta força de arrasto.

O arrasto pode ser classificado de acordo com a sua origem: o arrasto de atrito proveniente da integração do tensor das tensões de cisalhamento que aparecem na área superficial em função da viscosidade, e o arrasto de pressão proveniente da integração da pressão que age sobre a superfície do corpo. Existe também o arrasto de onda, inexistente em escoamentos de baixa velocidade. O arrasto então pode ser escrito como:

$$D = \iint_S \tau \vec{n} dS + \iint_S p \vec{n} dS \quad (19)$$

onde dS denota o elemento de área na superfície do corpo e \vec{n} é a projeção do vetor normal à superfície do corpo na direção do escoamento. A primeira parcela do lado direito da equação representa o arrasto de atrito, que é resultado dos fenômenos viscosos compreendidos dentro da camada limite e a segunda parcela representa o arrasto de pressão que está associado à região fora da camada limite modelada como invíscida.

A força de arrasto depende tanto das características do escoamento quanto do formato do corpo que se encontra imerso nele. Portanto, é conveniente que o arrasto seja tratado na sua forma adimensional denominada coeficiente de arrasto (C_d) que é a razão entre a força de arrasto e uma força característica associada à pressão dinâmica do escoamento não perturbado.

$$C_D = \frac{D}{\frac{1}{2}\rho V^2 A} \quad (20)$$

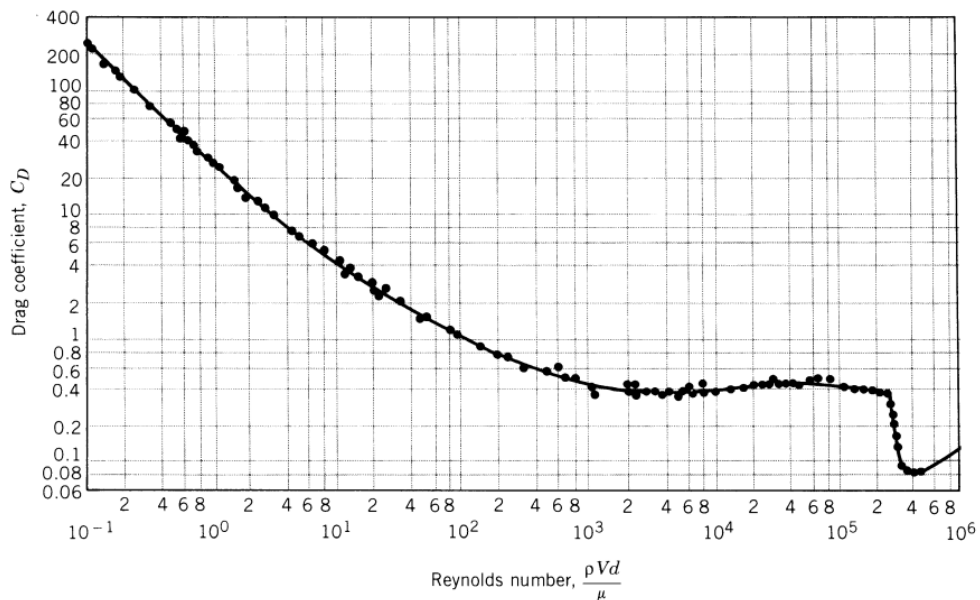
onde A denota a área característica do corpo, podendo ser definida como a área frontal do corpo (projeção da área em um plano perpendicular ao escoamento) utilizada frequentemente para corpos rombudos como cilindros ou esferas, a área de topo (projeção da área em um plano paralelo ao escoamento) utilizada para corpos delgados como perfis de asa, ou ainda a área molhada, que é toda a área em contato com o fluido, utilizada comumente para cascos e fuselagens.

Muitas vezes ao se estabelecer uma comparação ou uma diferença entre coeficientes de arrasto (como em uma correção, por exemplo), o valor encontrado pode ser muito baixo, o que

resulta em valores com muitas casas decimais que são pouco práticos. Para lidar com isso, é utilizada a “subunidade” *drag counts*, representada utilizando um prefixo delta (ΔC_D) que corresponde simplesmente a $1 \times 10^{-4} C_D$.

Algumas formas básicas, (como esferas, por exemplo), contam hoje com um grande acervo de dados experimentais para o coeficiente de arrasto. No caso das esferas isso é especialmente importante por se tratar de uma forma em que o coeficiente de arrasto não é independente do número de Reynolds (como é o caso de perfis aerodinâmicos). Munson et. al (1990) apresenta um gráfico com dados de vários ensaios em túnel de vento realizados com esferas lisas.

Figura 4 - Efeito do Número de Reynolds no coeficiente de arrasto de esferas lisas.



Fonte: Munson et. al (1990).

2.2. Túneis de Vento

O túnel de vento é uma ferramenta utilizada para se obter de maneira experimental as forças e os momentos que atuam em uma determinada geometria quando ela se movimenta através de um fluido.

2.2.1. Princípio de Funcionamento

Para se avaliar as forças e momentos aerodinâmicos em um corpo pode-se pensar de duas maneiras: a primeira é movimentar o corpo ou um modelo através do ar e a partir disso realizar as medições de interesse, a segunda é movimentar o ar através do corpo ou modelo e realizar as medições.

Pope (1999) destaca que no século XVIII, Robins, um dos primeiros aerodinamicistas experimentais, utilizou um braço giratório para estudar várias geometrias. Já no final do século XVII e início do século XIX, Cayley, também utilizando um braço giratório conseguiu investigar a sustentação e o arrasto de vários perfis. Entretanto ao final do século XIX, tornou-se perceptível que a utilização de braços giratórios fazia com o que o modelo sempre tivesse que se mover por um ar que já havia sido perturbado por ele mesmo na última volta, o que dificultava a obtenção de dados confiáveis.

No início do século XX os irmãos Wright utilizaram modelos estacionários e o vento natural para realizar medições que eles perceberam serem melhores que as anteriormente publicadas. Logo após, desenvolveram os primeiros túneis de vento, instalações em que o ar era movimentado através de um motor e passava pelo modelo fixo onde eram realizadas as medições.

2.2.2. Parâmetros de similaridade

Quando um corpo se move num meio fluido, forças atuam sobre ele graças à sua inércia, sua elasticidade, sua gravidade e a viscosidade do meio. Segundo (POPE, 1999), a força de inércia é proporcional à massa de ar afetada e à aceleração dada a essa massa. Associando essa massa à um volume efetivo de ar, podemos calcular este volume por kl^3 onde l é o comprimento característico do corpo e k é uma constante para o formato particular do corpo. Então:

$$\text{Força de inércia} \sim \rho l^3 V / t \quad (21)$$

A força viscosa por definição é:

$$\text{Força viscosa} \sim \mu V l \quad (22)$$

onde μ denota o coeficiente de viscosidade;

A gravidade é simplesmente:

$$\text{Força gravitacional} = \rho l^3 g \quad (23)$$

onde g denota a aceleração da gravidade

Por definição o módulo de elasticidade de um gás é a tensão necessária para aumentar uma unidade no seu volume. Ele é representado pela letra E :

$$\text{Força elástica} \sim El^2 \quad (24)$$

A velocidade do som no ar (c) se relaciona com sua elasticidade da seguinte maneira:

$$E = \rho c^2 \quad (25)$$

Logo, tem-se:

$$\text{Força elástica} \sim \rho c^2 l^2 \quad (26)$$

Os parâmetros adimensionais mais importantes no estudo da aerodinâmica, também chamados de parâmetros de similaridade recebem os nomes dos cientistas que mais cedo identificaram a relevância deles. São eles:

$$\text{Número de Reynolds} - Re = \frac{\text{Força de inércia}}{\text{Força de viscosidade}} = \frac{\rho}{\mu} V l \quad (27)$$

$$\text{Número de Mach} - M = \frac{\text{Força de inércia}}{\text{Força elástica}} = \frac{V}{c} \quad (28)$$

$$\text{Número de Froude} - Fr = \frac{\text{Força de inércia}}{\text{Força de gravitacional}} = \sqrt{\frac{V^2}{lg}} \quad (29)$$

Se um teste consegue impor a um modelo os mesmos números de Mach e Reynolds aos quais o objeto em escala real está sujeito, então os escoamentos sobre o modelo e o veículo serão dinamicamente equivalentes. O que significa que as forças e momentos sobre o modelo podem ser diretamente escaladas para um objeto real (POPE, 1999).

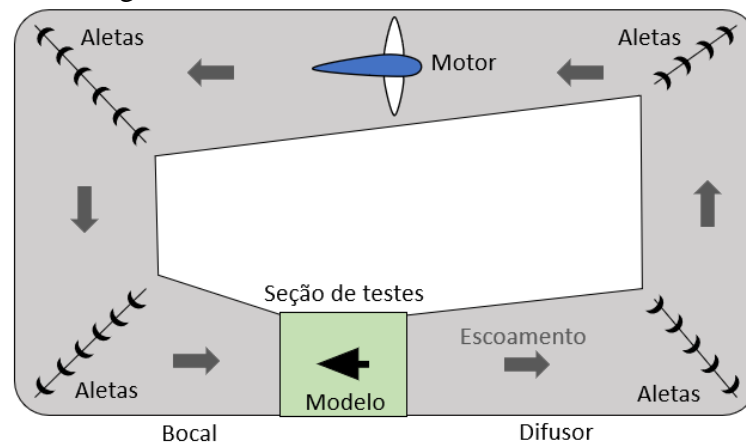
2.2.3. Classificação

Há algumas maneiras de se classificar um túnel de vento. Uma delas diz respeito ao circuito que o ar completa ao passar pelo túnel, podendo ser aberto ou fechado. Outra maneira de classificação é quanto à seção de testes do túnel, que também pode ser aberta ou delimitada pelas paredes do túnel (fechada). Além disso, é possível classificar os túneis pela velocidade de

trabalho que eles conseguem atingir, podendo ser de baixa velocidade, transônicos, supersônicos ou hipersônicos.

O LAExp conta com dois túneis de vento, o objeto de estudo desse trabalho é um túnel de circuito fechado com seção de testes fechada, de acordo com o desenho esquemático a seguir, por isso será referenciado a partir dessa seção como TVCF (Túnel de Vento de Circuito Fechado). Além disso, é um túnel de vento de baixa velocidade, uma vez que a velocidade máxima em que o túnel é capaz de trabalhar é de cerca de 90 m/s (VALLE, 2006).

Figura 5 - Túnel de vento de circuito fechado.



Fonte: Da autora.

Portanto, para o túnel de vento em questão, os efeitos de compressibilidade são desprezíveis, de forma que o número de Reynolds é um parâmetro de maior importância se comparado ao número de Mach (POPE, 1999). Cabe salientar que para este tipo de túnel de vento existem algumas vantagens operacionais tais como:

- A qualidade do escoamento pode ser mais facilmente controlada graças à presença de aletas nas curvas, e em alguns casos *honeycombs*.
- Para um dado comprimento e velocidade, este tipo de túnel exige menos energia para operar do que o túnel de vento de circuito aberto.
- Gera menos ruído durante sua operação.

Por outro lado, suas desvantagens são:

- Custo inicial mais alto do que o túnel de vento de circuito aberto.
- Quando no uso de fumaças ou motores à combustão deverá ser viabilizada uma forma de limpeza constante dos dutos.
- Se o túnel for altamente utilizado, deverá ser viabilizado um trocador de calor ou outra forma de resfriamento durante meses de calor excessivo.

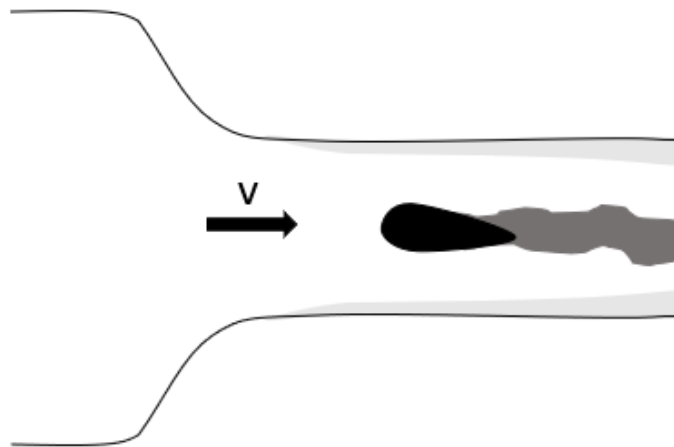
2.2.4. Efeitos de Parede

As condições na quais um modelo é testado num túnel de vento, não são exatamente as mesmas que ele estaria ao ar livre, (POPE, 1999) afirma que o gradiente de pressão estática longitudinal presente na seção de testes de um túnel, seja ela aberta ou fechada, produz forças excedentes que devem ser subtraídas dos resultados.

A presença de paredes laterais no túnel provoca alguns efeitos, Pope (1999) apresenta:

- Flutuabilidade horizontal: este efeito aparece por causa da variação de pressão estática ao longo da seção de testes de um túnel, isso acontece por causa do espessamento da camada limite ao longo da seção (Figura 6). Essa variação da pressão produz uma força análoga à força hidrostática em objetos imersos num fluido estacionário e normalmente produz um aumento de arrasto. Apesar de ser considerado desprezível para asas e perfis, esse efeito torna-se considerável para corpos rombudos, como fuselagens e nacelles. Alguns túneis possuem um pequeno ângulo de abertura para a seção de testes, de modo a minimizar esse efeito, esse não é o caso do TVCF do LAExp.

Figura 6 – Espessamento da camada limite na seção de testes.

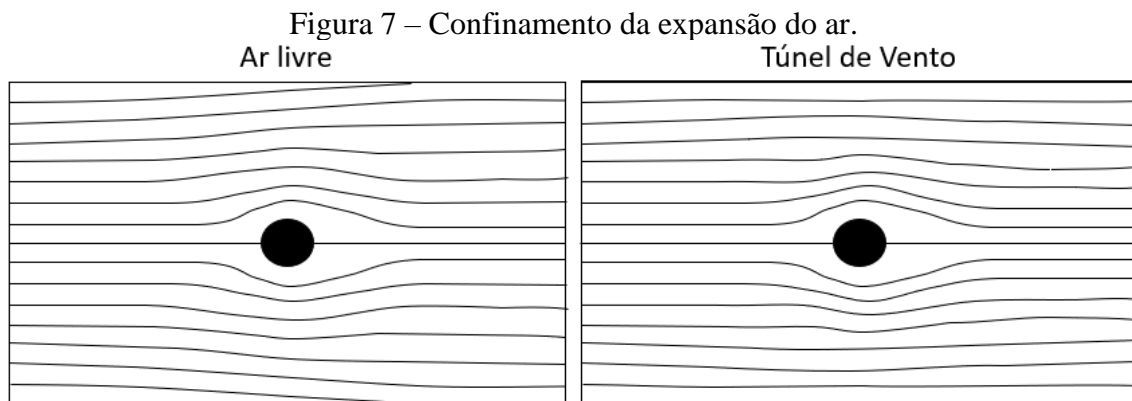


Fonte: Da autora.

- Bloqueio sólido: aparece por causa da restrição lateral ao escoamento em torno de um corpo. O escoamento não pode se expandir naturalmente após a perturbação causada pelo corpo graças à presença das paredes da seção de testes, o que causa um aumento de pressão dinâmica e por consequência um aumento em todas as forças e momentos para um determinado ângulo de ataque.

- Bloqueio de esteira: assim com o bloqueio sólido, também é uma consequência da restrição à expansão natural do escoamento em torno do corpo. Este efeito cresce com o aumento do comprimento da esteira atrás do modelo (arrasto) e causa um aumento do próprio arrasto. A Figura 7 ilustra o efeito desse confinamento da expansão natural do ar causado pelas paredes.

- **Curvatura do Fluxo:** é a mudança na curvatura das linhas de fluxo do fluido ao redor de um objeto dentro de um túnel de vento, comparada à curvatura observada em um fluxo infinito. Para uma asa, isso implica que o coeficiente de sustentação e o ângulo de ataque são amplificados em um túnel de vento fechado e reduzidos em um túnel de vento de seção aberta.



Fonte: Da autora.

- **Alteração no *Downwash* Normal:** se refere à mudança na componente do escoamento induzido na direção da sustentação do modelo, influenciada pela distância finita entre a superfície do modelo e as paredes do túnel. Em uma seção fechada, isso resulta em uma maior sustentação e menor arrasto para um determinado ângulo de ataque, levando a um adiantamento do estol do modelo. Por outro lado, uma seção aberta produz o efeito oposto.

- **Distorção do *Downwash* na Envergadura:** se refere à variação no ângulo de ataque local ao longo da envergadura de uma asa. Em uma seção de testes fechada, os ângulos de ataque próximos às extremidades das asas de um modelo com uma alta razão de aspecto são aumentados, resultando no início do estol da ponta da asa em um ângulo de ataque geométrico mais baixo. O efeito é inverso em um túnel de teste de seção aberta (a estol da ponta começa em um ângulo de ataque mais alto). Ambos os casos podem ser consideravelmente reduzidos se o modelo tiver uma razão de aspecto menor que 0,8.

- **Alteração no *Downwash* na Cauda:** refere-se à modificação do *downwash* normal (e outros componentes do escoamento induzido) atrás da asa, resultando na necessidade de ajustes para a estabilidade estática. Em um túnel de teste fechado, o ponto de estol da asa é mais alto em comparação com um escoamento livre, tornando o modelo mais estável. O oposto é observado em um túnel de teste de seção aberta.

- **Distorção Assimétrica de *Downwash*:** se refere à alteração no escoamento ao redor de uma asa com carga assimétrica, resultando na necessidade de ajustes nos momentos de rolamento e guinada observados.

- **Atenuação da Indução por Hélice:** diz respeito à modificação do escoamento em uma hélice, de modo que um determinado valor de tração ocorra a uma velocidade mais baixa do que em um ambiente de ar livre. O efeito é contrário em uma seção de teste aberta. Esse efeito também ocorre quando a hélice está freando.

Para um túnel de vento de baixas velocidades Pope (1999) elege como principais efeitos os três primeiros apresentados: Flutuabilidade Horizontal, Bloqueio Sólido e Bloqueio de Esteira.

2.3. Correções para os efeitos de parede

2.3.1. Flutuabilidade horizontal

Pope (1999) afirma que praticamente todos os túneis de vento de circuito fechado experimentam uma variação de pressão estática no eixo da seção de testes que resulta do espessamento da camada limite ao longo da seção e consequente diminuição da área de jato. O que acontece é que a pressão normalmente é mais negativa conforme se aproxima do cone de saída, de forma que o modelo é “empurrado” para trás.

A magnitude do gradiente de pressão pode ser expressa por um fator unidimensional k definido como (GLAUERT, 1933):

$$\frac{dp}{dl} = \frac{-k \left(\frac{\rho}{2}\right) V^2}{B} \quad (30)$$

Esse fator geralmente deve ser mensurado experimentalmente para cada túnel. Segundo Pope (1999), a equação proposta para estimar o arrasto devido à flutuabilidade horizontal para o caso bidimensional considera o diferencial de pressão estática entre dois pontos e a área média do modelo entre os mesmos pontos, da forma:

$$D_F = \int_0^l S(x) p'(x) dx \quad (31)$$

onde S denota a área do modelo e $p'(x) = \frac{dp}{dx}$.

Considerando um gradiente de pressão constante, e o efeito de “aperto” do jato ao espessamento da camada limite ao longo da seção de testes, Glauert (1933) propôs a seguinte equação para estimar o arrasto devido à flutuabilidade horizontal:

$$D_F = -\frac{\pi}{2} \lambda_2 t^2 \frac{dp}{dl} \quad (32)$$

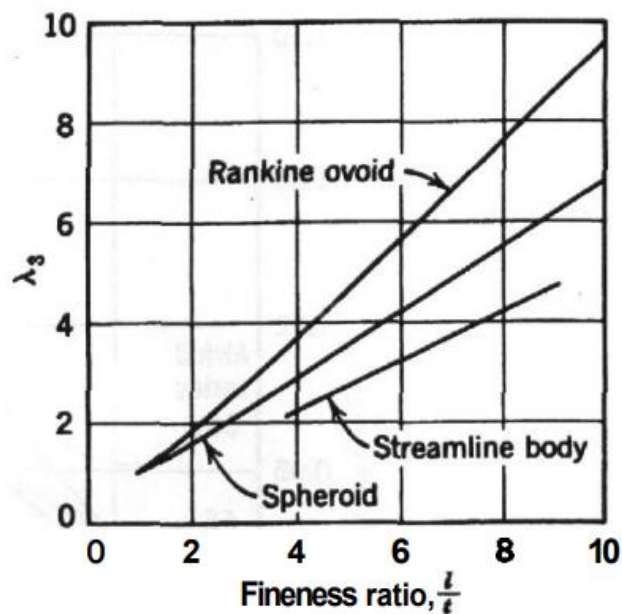
onde λ_2 denota um fator de forma bidimensional e t denota a espessura máxima do modelo.

De forma análoga, a expressão para o arrasto num corpo tridimensional é:

$$D_F = -\frac{\pi}{4} \lambda_3 t^3 \frac{dp}{dl} \quad (33)$$

onde λ_3 representa um fator de forma tridimensional apresentado na Figura 8.

Figura 8 – Fator de forma tridimensional para flutuabilidade horizontal.

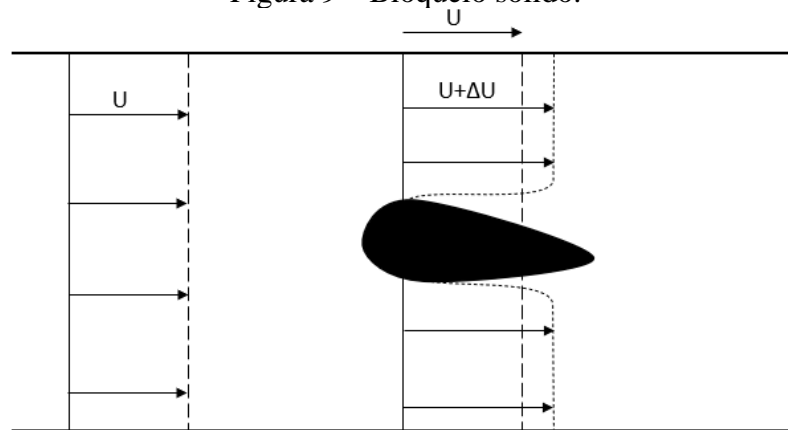


Fonte: Pope (1999).

2.3.2. Bloqueio sólido e bloqueio de esteira

A existência das paredes da seção de testes confinando o ar em volta do modelo faz com que em respeito à lei da continuidade e à equação de Bernoulli, a velocidade do escoamento em volta do modelo seja levemente maior do que a velocidade do escoamento não perturbado, como mostra a Figura 9. Segundo (POPE, 1999), o aumento de velocidade causado pelo bloqueio sólido é consideravelmente menor (cerca de $\frac{1}{4}$) do que o aumento que uma simples diminuição da área correspondente ao modelo na seção transversal causaria.

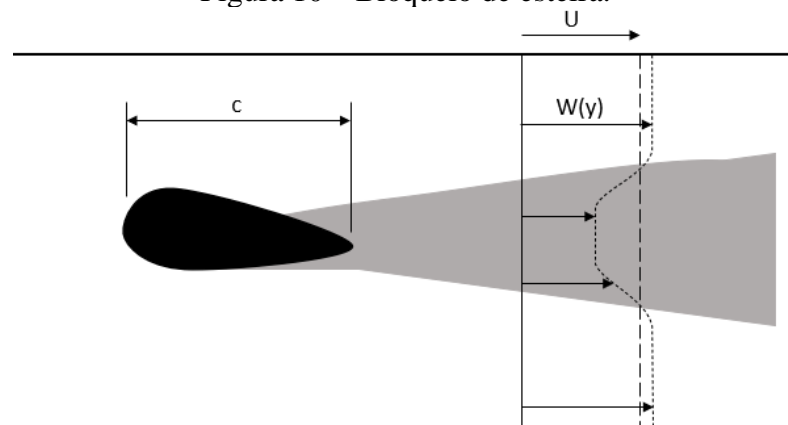
Figura 9 – Bloqueio sólido.



Fonte: Da autora.

Assim como o bloqueio sólido, o bloqueio de esteira é um efeito causado pelo aumento da velocidade do escoamento, dessa vez em volta da esteira que se forma atrás do modelo (SAHINI, 2004). Esse aumento de velocidade ocorre porque a velocidade do escoamento na esteira é menor do que a velocidade do escoamento não perturbado, então pela lei da continuidade, a velocidade do restante do escoamento tem que ser maior para que a vazão de mantenha (Figura 10).

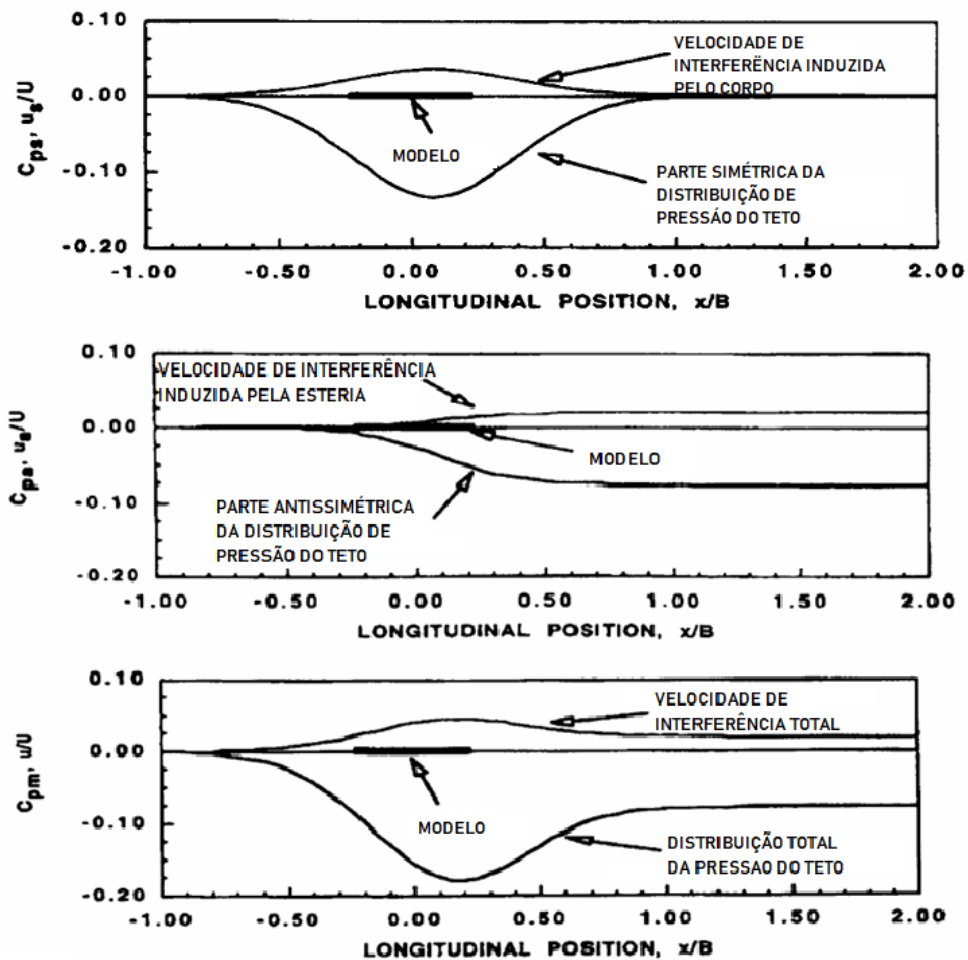
Figura 10 – Bloqueio de esteira.



Fonte: Da autora.

Apesar de ocorrerem por motivos diferentes, os efeitos de bloqueio sólido de esteira de somam no escoamento, causando uma distorção única nos campos de velocidade e pressão como mostra a Figura 11.

Figura 11 - Efeitos dos bloqueios sólido e de esteira nos campos de velocidade e pressão do escoamento.



Fonte: Adaptado de Sahini (2004).

Os efeitos dessa distorção foram estudados por Maskell (1965) que propôs um modelo de correção baseado nas seguintes considerações:

1. A distribuição de pressão não varia com a restrição de parede;
2. Escoamentos separados de corpos tridimensionais tendem a se tornar axi-simétricos mais a jusante; e
3. A pressão é constante em toda a região de separação e é igual à pressão estática no contorno da esteira.

A partir dessas considerações a teoria do *momentum* (quantidade de movimento, ou segunda lei de Newton) leva a uma correção da pressão dinâmica da forma:

$$\frac{q_c}{q} = \left(\frac{U_c}{U}\right)^2 = \frac{C_{DU}}{C_{DB}} = 1 + \theta C_{DB} \left(\frac{S}{C}\right) \quad (34)$$

onde:

q_c – Pressão dinâmica corrigida

q – Pressão dinâmica na ausência de modelo

U_c – Velocidade corrigida

U – Velocidade na ausência de modelo

C_{DU} – Coeficiente de arrasto não corrigido

C_{DB} – Coeficiente de arrasto corrigido para bloqueio

S – Área frontal do modelo

C – Área da seção transversal da seção de testes

θ – Constante de bloqueio

É possível observar que apesar de a Equação 48 ser iterativa, ela pode ser facilmente resolvida computacionalmente.

A constante de bloqueio está relacionada com o formato do modelo, Maskell (1965) propõe a seguinte equação para a definição de θ para placas planas bi de tridimensionais:

$$\theta = 0,96 + 1,94 \exp(-0,06AR) \quad (35)$$

onde AR representa o alongamento da placa.

Maskell (1965) também argumenta que θ varia pouco com o alongamento e prova experimentalmente que o valor de 2,5 é uma boa aproximação tanto para placas planas quando para corpos rombudos de alongamento pequeno. Enquanto para corpos de alongamento grande ou infinito o valor de θ é próximo de 0,96.

Essa tendência também é observada em Elfmark et.al, (2020) que tem o objetivo de definir as constantes de bloqueio para um alpinista em duas posições diferentes em um túnel de vento. Foi observado que para o alpinista em pé (posição de maior alongamento) a melhor constante encontrada foi de $\theta = 1,15$ e para a posição agachado foi de $\theta = 2,52$.

2.3.3. Outras correções

Uma nova abordagem para a obtenção de modelos de correção para efeitos de parede tem ganhado força nos últimos anos. Técnicas que utilizam modelagem computacional através da dinâmica dos fluidos computacional (CFD) são apresentadas em Heine et al. (2012) e Smith e Jones (2015).

Em Li et al. (2020) são apresentados métodos inovadores para a correção de parede em túneis de vento, incluindo a utilização de sensores inteligentes e algoritmos de aprendizado de máquina. Este estudo destaca como a tecnologia moderna pode ser aplicada para melhorar a precisão das correções de parede.

Apesar de cada uma dessas abordagens ser única em sua proposta, o que esses estudos têm em comum é a necessidade de validação dos modelos obtidos computacionalmente com dados experimentais.

Há também muitos trabalhos que investigam os efeitos de parede em outros contextos, como Kim e Park (2017) que trata de correções para túneis de alta velocidade. A pesquisa combina métodos experimentais e numéricos para investigar os impactos da compressibilidade e das ondas de choque nas medições aerodinâmicas, propondo novas metodologias para ajustar os coeficientes de sustentação e arrasto.

2.4. Análise metrológica

A metrologia é uma disciplina crucial na caracterização e avaliação de túneis de vento. A precisão das medições realizadas nesses túneis é vital para garantir resultados confiáveis e úteis para o desenvolvimento de produtos e tecnologias. A metrologia nesse contexto envolve não apenas a seleção e calibração adequada dos instrumentos de medição, mas também a compreensão e estimativa dos erros associados a essas medições.

Reis (2000) cita as etapas necessárias para o desenvolvimento de medições bem estabelecidas como sendo:

- Planejamento consistente;
- Análise teórica do experimento;
- Metodologia adequada;
- Procedimento bem elaborado;
- Controle de meio ambiente;
- Levantamento das fontes de erro;
- Cálculo da incerteza; e
- Aplicação da metodologia com regularidade.

Os erros de medição em túneis de vento podem surgir de diversas fontes, incluindo imprecisões nos instrumentos de medição, instabilidades no ambiente de teste e perturbações

externas, como variações na temperatura e na pressão atmosférica. É essencial quantificar e minimizar esses erros para garantir a validade dos resultados obtidos nos testes aerodinâmicos.

O INMETRO (1995) estabelece que o resultado de uma medição só é completo se vier acompanhado do valor da incerteza. O valor de um mensurando Y deve ser expresso como:

$$Y = \bar{Y} + U \quad (36)$$

A estimativa da incerteza de uma medição pode incluir a incerteza declarada pelo fabricante do instrumento utilizado, quando disponível e/ou uma análise estatística dos dados obtidos. Isso envolve a realização de múltiplas medições sob condições controladas e a aplicação de técnicas estatísticas para determinar a precisão e a incerteza associadas a essas medições. Essas análises estatísticas podem incluir a determinação de desvios padrão, intervalos de confiança e incertezas combinadas.

Se o mensurando Y for determinado indiretamente, ou seja, se este for uma função que envolve outras grandezas de entrada (X_1, X_2, \dots, X_n) onde n é o número de grandezas de entrada, deve-se identificar a relação funcional:

$$Y = f(X_1, X_2, \dots, X_n) \quad (37)$$

A incerteza padrão para este caso é obtida combinando-se adequadamente as incertezas padrão dos dados de entrada x_1, x_2, \dots, x_n . Essa incerteza é denominada incerteza padrão combinada e é calculada pela raiz quadrada positiva da variância combinada $u_c^2(y)$ dada pela Equação 38 (REIS, 2000).

$$u_c^2 = \sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 u^2(x_i) \quad (38)$$

Onde $u(x_i)$ representa as incertezas de cada mensurando x .

Além da análise estatística, é importante considerar as características específicas do ambiente de teste do túnel de vento ao estimar os erros de medição. Isso pode incluir fatores como a uniformidade do escoamento, a estabilidade da temperatura e da pressão dentro do túnel, e a presença de turbulências e vórtices que possam afetar as medições.

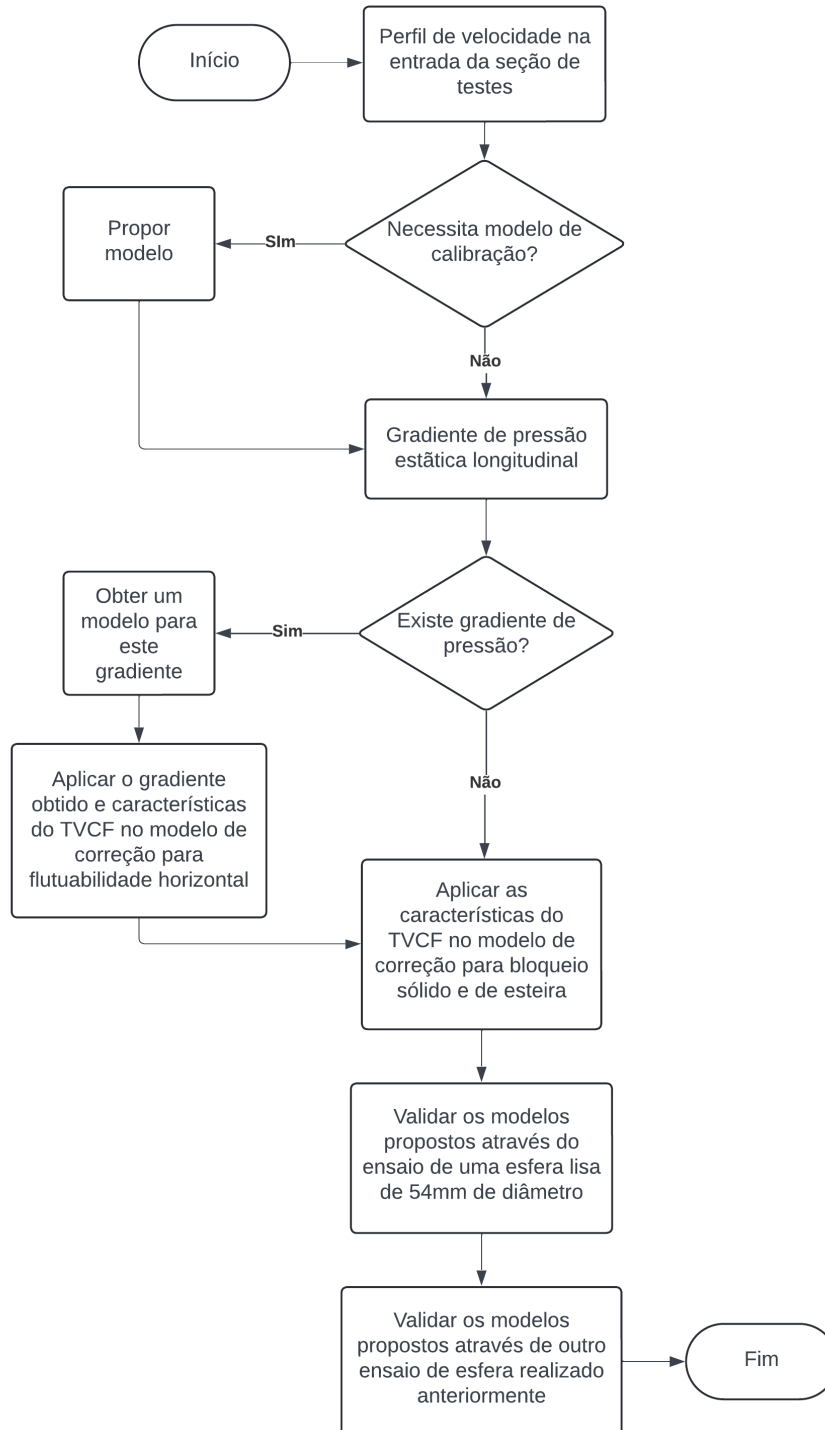
Em resumo, a metrologia desempenha um papel fundamental na garantia da precisão e da confiabilidade das medições realizadas em túneis de vento. A estimativa e minimização dos

erros de medição, juntamente com a calibração adequada dos instrumentos e a validação dos resultados, são aspectos essenciais para garantir a qualidade dos testes aerodinâmicos e o desenvolvimento de produtos e tecnologias.

3. METODOLOGIA

O fluxograma a seguir ilustra a sequência dos ensaios realizados.

Figura 12 - Fluxograma dos ensaios realizados



Fonte: Da Autora

3.1. Instrumentação

Nessa seção serão apresentados os aparatos utilizados para a calibração e as campanhas de testes mencionadas no trabalho, envolvendo as instalações do túnel de vento de circuito fechado do Laboratório de Aerodinâmica Experimental (LAExp), do curso de engenharia aeroespacial da UFMG, bem como os instrumentos de medição utilizados.

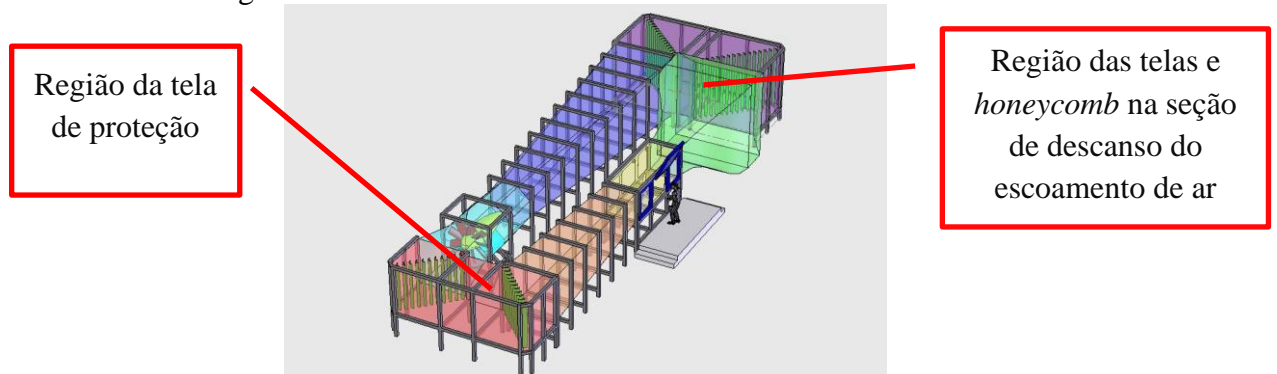
3.1.1. Túnel de vento de circuito fechado do laboratório

A estrutura do LAExp conta com um galpão, onde estão instalados dois túneis de vento: um de circuito aberto e outro de circuito fechado (TVCF), além de uma sala de controle e uma sala de preparação de modelos. A estrutura também conta com uma subestação da CEMIG para acionamento dos motores de ambos os túneis e toda a infraestrutura do laboratório.

O TVCF que teve seu projeto finalizado em 2006 (VALLE, 2006) e passou a operar em 2013 conta com um motor elétrico Siemens D-91056 ERLANGEN equipado com 6 pás atingindo uma rotação de até 1788 RPM capaz de induzir um escoamento de até 90 m/s na seção de testes.

O TVCF possui aletas para auxiliar o escoamento nas curvas de 90°. O efeito positivo da presença dessas aletas pode ser consultado em (FERNANDES, 2019). Também é equipado com uma *honeycomb* e duas telas tipo mosquiteiro na entrada da câmara de descanso, bem como uma tela de proteção após a seção de testes para evitar que um eventual detrito escape na direção das pás do ventilador e do motor elétrico. O papel principal das duas telas tipo “mosquiteiro” na entrada da seção de “descanso” do ar é “destruir” a turbulência do ar causada pelo ventilador. Já a *honeycomb* tem a função de uniformizar o perfil de velocidade do escoamento. E a seção de “descanso” do ar tem a função de reduzir a pressão dinâmica quase a zero e aumentar a pressão estática quase à total, de forma que os efeitos viscosos passem a ser relevantes, dissipando as micro turbulências remanescentes após as duas telas, bem como de armazenar a energia na forma de pressão total, para que o escoamento seja acelerado adiabaticamente ao longo do bocal convergente a montante da seção de testes. Sendo assim, um desenho básico 3D do projeto original é apresentado na Figura 13.

Figura 13 – Túnel de vento de circuito fechado da UFMG.



Fonte: Valle (2006).

O TVCF também conta com um sistema de controle de velocidade do escoamento de ar. Para a realização deste sistema foram utilizados um PLC de uso industrial com módulos de entradas e saídas comunicando via rede, integrados aos sensores de pressão, que recebem as tomadas de pressão estática e total oriundas de um tubo de Pitot localizado na entrada da seção de testes, bem como a um transdutor de temperatura também localizado na seção de testes. Todo o sistema de controle de pressão dinâmica na seção de testes foi baseado numa norma de cálculo de massa específica por altitude de pressão e programado via software livre Codesys. A pressão barométrica é a única variável de entrada manual, via barômetro de Torricelli. Este sistema de controle é mostrado na Figura 14.

Figura 14 - (a) seção de testes com o painel do sistema de controle de velocidade; (b) painel de controle de velocidade aberto e transdutores ScaniValves para aquisição de pressões



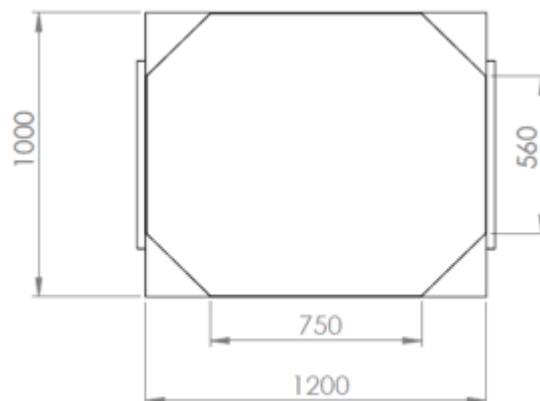
(a)

(b)

Fonte: Da autora.

A seção de TVCF tem 3,0 metros de comprimento e apresenta uma seção transversal no formato de um octógono irregular com as medidas como mostrado na, Figura 15.

Figura 15 – Seção transversal da seção de testes do TVCF.



Fonte: Arquivos do LAExp.

3.1.2. Tubos de Pitot utilizados

Como visto nas seções anteriores, o escoamento em um túnel de vento de baixa velocidade fora da camada limite pode ser considerado como invíscido e incompressível, assim, fazendo a consideração também de um escoamento com linhas de corrente retilíneas (que é o desejado para um túnel de vento), pode-se utilizar instrumentos chamados tubos de Pitot para aferição de pressões total e estática, e conseqüentemente pressão dinâmica, de onde é possível obter a velocidade do fluido na direção do tubo.

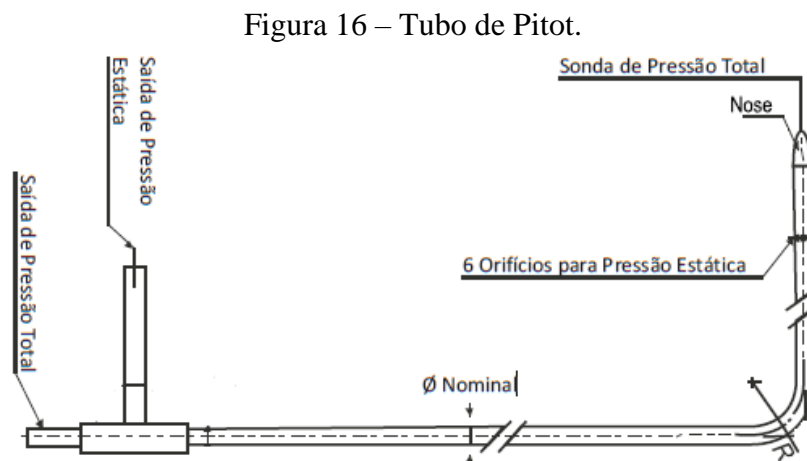
A partir da Equação 10, sabe-se que para um ponto de estagnação no escoamento (ponto onde a velocidade é zero) a pressão total (p_0) é igual à soma da pressão estática (p) com a pressão dinâmica ($\rho V^2/2$) do fluido não perturbado, com isso, a pressão total do escoamento naquele ponto pode ser determinada através de um tubo cujo furo esteja alinhado longitudinalmente ao escoamento (KRAUSE, 2005).

Fox (2016) sustenta que é possível provar que não há variação de pressão em uma direção normal a linhas de corrente retilíneas, isso faz com que seja possível medir a pressão estática de algum fluido em movimento por meio de uma tomada de pressão perpendicular ao escoamento. Dessa forma é possível obter a velocidade do escoamento no ponto a partir de:

$$p_0 - p = \frac{\rho V^2}{2}$$

$$V = \sqrt{\frac{2(p_0 - p)}{\rho}} \quad (39)$$

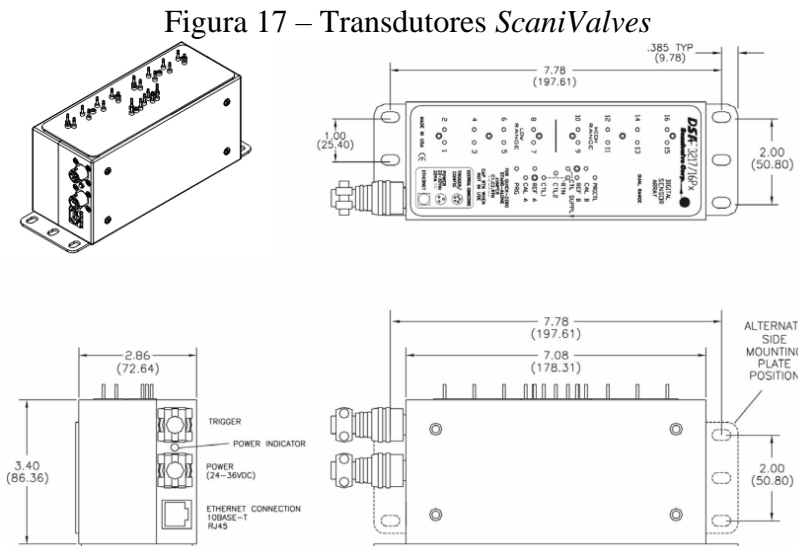
A Figura 16 ilustra um dos tubos utilizados no LAExp. Para este tipo de tubo, a fabricante garante uma incerteza de medição menor que 2% (INSTRUTEMP).



Fonte: INSTRUTEMP (editada).

3.1.3. Transdutores de pressão utilizados

Para fazer a leitura dos dados de pressão obtidos através dos tubos de Pitot e transformá-los em sinais digitais, o LAExp conta com um conjunto de quatro transdutores (ou scanners) de pressão *ScaniValves* totalizando sessenta e quatro canais para tubos capilares conforme mostra a Figura 17.



Fonte: SCANIVALVE (2018).

O transdutor transmite as informações coletas via cabo ethernet, com os sensores de pressão tendo compensação por temperatura e na faixa de 0 a 5 MPa. De acordo com informações do fabricante, o equipamento apresenta precisão de $\pm 0,05\%$ para toda a faixa de medição.

3.1.4. Bancada para medição de arrasto

Um dos ensaios conduzidos no presente trabalho teve como objetivo a obtenção do coeficiente de arrasto para uma esfera lisa. O modelo escolhido para o teste foi uma bola de bilhar de 54 mm de diâmetro devido à sua superfície bem-acabada e disponibilidade no acervo de dados do LAExp. Para a aquisição da força de arrasto foi utilizada uma célula de carga cujas especificações estão apresentadas na Tabela 1.

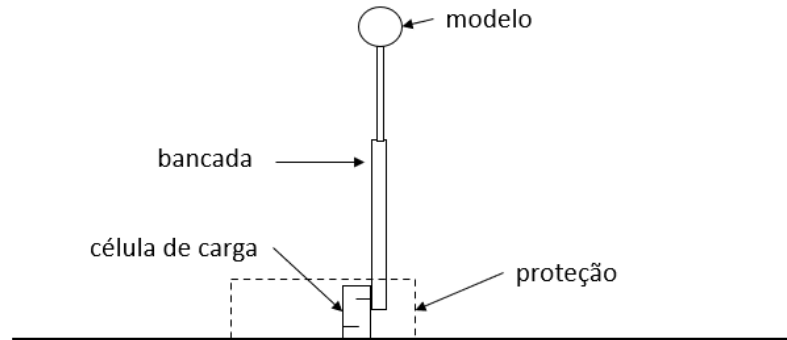
Tabela 1 - Especificações da célula de carga.

Propriedade	Valor	Unidade
Carga nominal	10	[Kg]
Potência nominal de saída	1.0 ± 0.15	[mV/V]
Tensão de funcionamento recomendada	3 ~ 12	[VDC]
Faixa de compensação de temperatura	-10 ~ 40	[°C]
Faixa de temperatura de operação	-20 ~ 60	[°C]

Fonte: SIMOKIT (2024).

Para possibilitar a aquisição dessa força de arrasto para a esfera, foi desenvolvida uma bancada de arrasto composta de uma ripa de madeira e uma haste metálica com a função de fazer a conexão física entre a bola de bilhar e a célula de carga como mostrado na Figura 18.

Figura 18 – Bancada de arrasto para a bola de bilhar



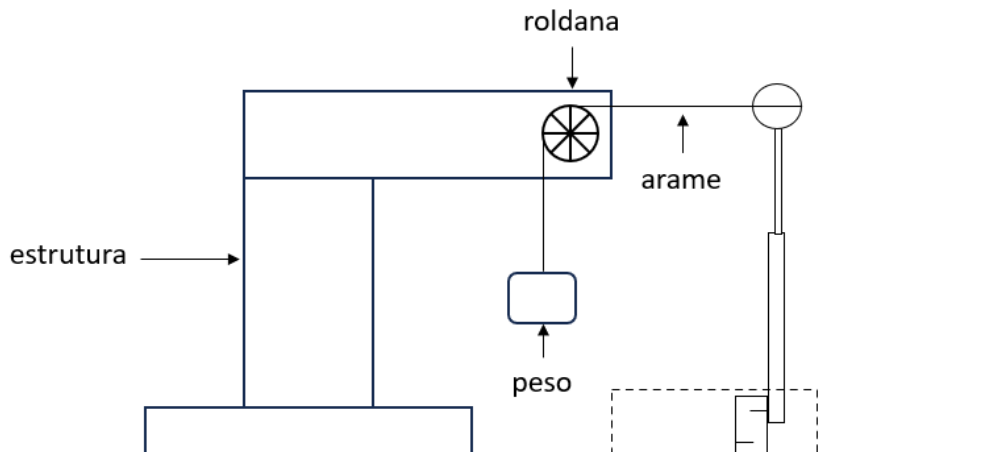
Fonte: Da autora.

A célula de carga é protegida da interferência pelo escoamento direto por uma carenagem na forma de um perfil simétrico.

3.1.5. Sistema de calibração para a célula de carga

O calibrador para a célula de carga consiste em uma estrutura de madeira equipada com uma roldana fixada em um braço móvel para ajuste de altura. Este equipamento serve para mudar a direção da força peso de uma massa conhecida da vertical para a horizontal possibilitando a leitura direta da força de arrasto. Para isso, basta que o cabo que passe pela roldana esteja ligando o centro de massa do modelo que se pretende ensaiar e a massa usada para a calibração, como mostra a Figura 19.

Figura 19 – Calibrador para a célula de carga



Fonte: Da autora

3.1.6. Aquisição e tratamento de dados

A aquisição dos dados de pressão é feita através do software *LabView*, o TVCF conta com um programa que grava os dados de pressão de cada canal da *ScaniValve* e os salva em um arquivo *.csv* (*comma separated values*, ou valores separados por vírgula) que pode ser tratado em qualquer software de análise de dados.

Já a aquisição dos dados da célula de carga foi feita a partir de códigos para Arduino produzidos pela equipe Uai Sô, Fly. O código *Q0481-Sketch-Calibrar* é utilizado na calibração da célula através de um peso conhecido, e o código *Q0481-Sketch* é utilizado para a aquisição dos dados de ensaio.

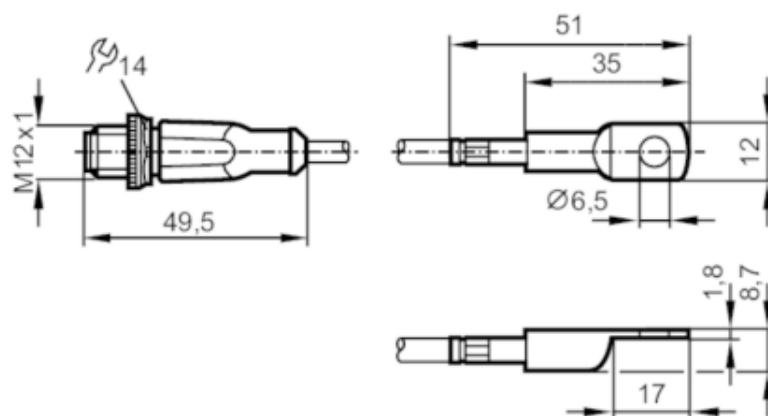
No presente trabalho, todo o tratamento de dados se deu através do software *Microsoft Excel*.

3.2. Calibração do Túnel de Vento

A calibração de um túnel de vento consiste em determinar os valores médios e a uniformidade de vários parâmetros do escoamento na região a ser usada para os testes. Ela é realizada a partir da determinação das relações entre os parâmetros mensurados na entrada ou fora ou da seção de testes (por exemplo, na câmara de descanso), e os mesmos parâmetros dentro da seção de testes na região que será ocupada pelo modelo. Isso é necessário porque quando há presença de um modelo na seção de testes, a medição direta de alguns parâmetros na própria seção pode se tornar inviável, seja pelo espaço exigido pelos instrumentos de medição estar ocupado pelo modelo ou, principalmente, porque a presença do modelo altera as condições do escoamento ao redor dele.

Para um túnel de vento de baixa velocidade os parâmetros utilizados para a calibração comumente são: a pressão estática, a pressão total (ou dinâmica) e a temperatura total (AIAA, 2003). O TVCF já conta com um sensor de temperatura TS2229 da marca IFM instalado na região de instalação do modelo, como mostra a Figura 20.

Figura 20 – Sensor de temperatura do TVCF



Fonte: IFM (2016)

Através da Figura 20 é possível observar que este sensor instalado no teto da mesa giratória utilizada para acomodar os modelos ocupa um espaço muito pequeno e já é capaz de captar a temperatura do escoamento em torno do modelo. Resta então obter a calibração para as pressões total e estática.

O TVCF tem um tubo de Pitot instalado na entrada da seção de testes, logo após o bocal convergente, a montante da seção de testes. Este tubo de Pitot fica posicionado a 150mm do teto da seção. Teoricamente pode-se considerar que não há variação de velocidade no plano perpendicular à seção de testes, mas na prática ocorrem pequenas variações entre a velocidade na linha de corrente na altura do tubo de Pitot e a velocidade na linha de corrente central da seção de testes.

A calibração da seção de testes do túnel de vento de circuito fechado do LAExp então consiste na obtenção de uma curva que relaciona a velocidade medida pelo tubo de Pitot na entrada da seção de testes e a velocidade de referência na linha central da seção. Também será obtido o gradiente de velocidade em relação à altura para a seção longitudinal central da seção de testes, de forma que para qualquer altura de instalação do Pitot de velocidade, haverá uma curva de calibração para a linha central.

3.3. Campanha de Testes

3.3.1. Perfil de velocidade na entrada da seção de testes

A caracterização do escoamento dentro da seção de testes é de suma importância para a correta interpretação dos dados coletados em qualquer túnel de vento. A obtenção do perfil de variação de velocidade com a altura em relação à linha central da seção de testes, na sua entrada, é necessária para a obtenção da curva de calibração da velocidade no TVCF como um todo.

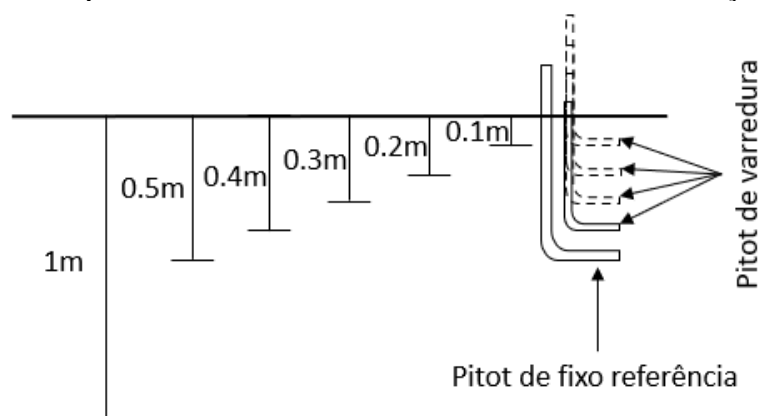
Este experimento seguiu o planejamento proposto por Papini (2024) para a disciplina Aerodinâmica Experimental e consistiu no posicionamento de dois tubos de Pitot, um fixado na altura da linha central longitudinal na seção de testes (500mm), e outro variando a altura em 4 posições diferentes em que o tubo de Pitot do TVCF pode ser posicionado para qualquer campanha de testes de forma que, para qualquer posição que o tubo de Pitot for utilizado num ensaio, a relação entre a velocidade determinada por ele e uma velocidade de referência na linha central da seção seja estabelecida. Este esquema está representado na Figura 21.

Para este experimento as variáveis controladas foram:

- A pressão atmosférica em cada ensaio, mensurada através do barômetro de Torricelli presente do LAExp;
- A temperatura total medida através do sensor de temperatura (Figura 20);
- As pressões estáticas e totais obtidas através dos tubos de Pitot.

As duas primeiras são utilizadas para o cálculo da densidade do ar no momento do teste, que por sua vez é um dado de entrada para o cálculo da velocidade.

Figura 21 – Experimento 1: Perfil de velocidade na entrada da seção de testes.



Fonte: Da autora.

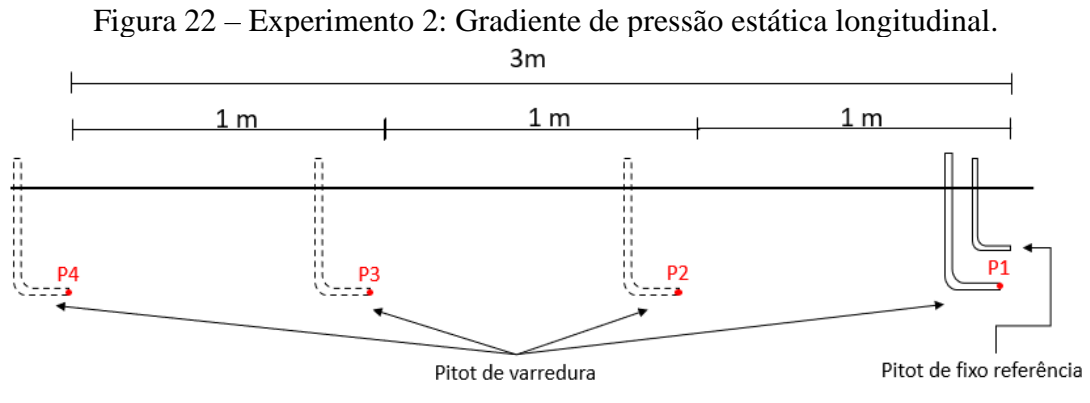
3.3.2. Gradiente de pressão estática longitudinal

O objetivo deste ensaio foi o de determinar como o campo de pressão se comporta dentro da seção de testes na ausência de um modelo. A partir dessa caracterização, é possível entender o que diferencia o escoamento interno do TVCF de um escoamento ao ar livre e alimentar modelos de correção que aproximem ao máximo esses dois escoamentos.

Para este ensaio foram utilizados os itens descritos nas seções 3.1.1, 3.1.2 e 3.1.3. Primeiro foram feitos furos de acesso na parede de cima da seção de testes do TVCF ao longo da linha central, de forma que fosse possível posicionar um tubo de Pitot em várias posições ao longo da linha central da seção conforme recomendado por Pope (1999).

Foi utilizado um tubo de Pitot de referência, que normalmente é utilizado para aquisição de velocidade nos ensaios realizados no TVCF, cujo comprimento da haste vertical não era suficiente para atingir a altura da linha central da seção (500mm), utilizado sempre na mesma posição na entrada da seção para que pudesse atuar como referência de velocidade.

Um segundo tubo de Pitot de comprimento da haste vertical maior foi então utilizado para a aquisição das pressões em várias posições ao longo da seção de testes como mostra a Figura 22, de modo que fosse possível obter curvas de pressão estática versus posição para cada velocidade e de velocidade na linha central para cada posição versus velocidade de referência.



Fonte: Da autora.

Para este experimento as variáveis controladas foram:

- A pressão atmosférica em cada ensaio, mensurada através do barômetro de Torricelli presente do LAExp;
- A temperatura total medida através do sensor de temperatura (Figura 20);
- A pressão estática obtida através dos tubos de Pitot.

3.3.3. Arrasto em esfera lisa de 54mm de diâmetro

O terceiro experimento teve como objetivo obter o coeficiente de arrasto para uma esfera via célula de carga, conforme item 3.1.5, visando a correção dos efeitos de flutuabilidade horizontal, bloqueio sólido e bloqueio de esteira. Para isso, os dispositivos descritos na seção 3.1 foram utilizados, conforme mostrado na Figura 23.

Figura 23 – Experimento 3: Arrasto em uma esfera.



Fonte: Da autora.

A escolha do modelo esférico para este experimento se deu por algumas razões. A seção 2.2.4 cita que o efeito de flutuabilidade horizontal é pouco presente em asas e perfis e considerável em corpos rombudos. O fato de esferas não apresentarem força de sustentação quando estáticas num escoamento paralelo facilita o tratamento dos dados, uma vez que a única

força aerodinâmica detectável é o arrasto. Também se espera que um corpo axissimétrico apresente uma esteira de mesmo comportamento.

Pode-se observar que a célula de carga está alinhada com o eixo horizontal, tornando possível fazer uma leitura direta da força de arrasto. A curva de força de arrasto versus velocidade do escoamento foi adquirida para o conjunto mostrado. Posteriormente a mesma relação foi adquirida somente para a bancada de testes, sem a esfera, visando a obtenção da força de arrasto líquida. Desta forma, a curva resultante representa apenas a força de arrasto devido à esfera, através da qual também foi possível obter o coeficiente de arrasto do modelo usando a Equação 34. Sendo assim, para este experimento as seguintes variáveis controladas foram:

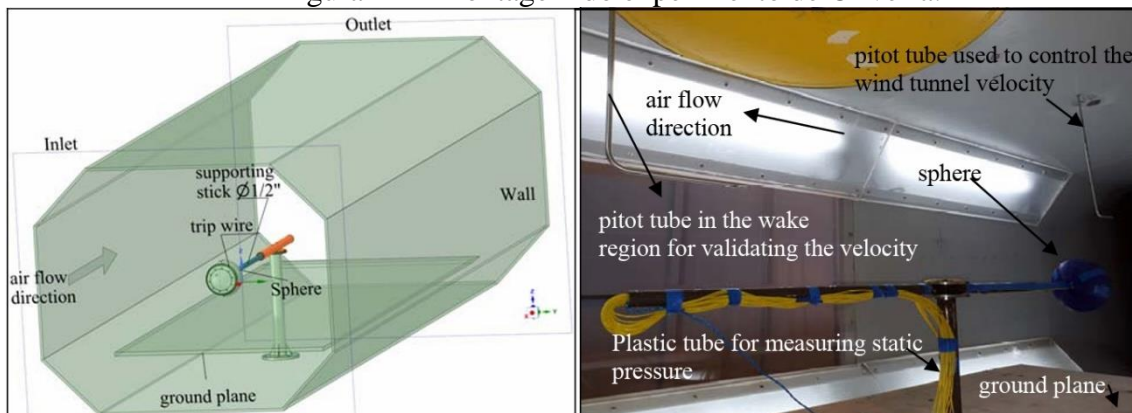
- A pressão atmosférica em casa ensaio, mensurada através do barômetro de Torricelli presente do LAExp;
- A temperatura total medida através do sensor de temperatura (Figura 20);
- As pressões estática e total obtidas através do tubo de Pitot.
- A leitura de força na direção horizontal adquirida através da célula de carga.

3.3.4. Arrasto em esfera de 150mm de diâmetro

Para uma melhor avaliação dos modelos de correção propostos no presente trabalho serão utilizados também resultados de outro trabalho que envolveu ensaios de arrasto realizados no TVCF.

O ensaio realizado por Oliveira et. al (2019) consiste em um experimento com uma esfera em PLA posicionada em um lança e equipada com diversas tomadas de pressão estática e uma célula de carga de onde foi possível obter o coeficiente de arrasto para algumas configurações de arames indutores de turbulência como mostra a Figura 24.

Figura 24 – Montagem do experimento de Oliveira.



Fonte: Oliveira (2019).

3.4. Simulação CFD

O presente trabalho utiliza os resultados teóricos obtidos por Oliveira et. al (2019). A simulação realizada por ele utilizou as equações médias (RANS) para regime permanente através do software Ansys Fluent utilizando o modelo de turbulência $\kappa\omega$. Mais detalhes estão disponíveis na referência.

Os resultados obtidos nos trabalhos de Oliveira (2019) serão utilizados de forma direta como comparação com os resultados experimentais obtidos pelo mesmo e pelos resultados corrigidos pelos fatores propostos neste trabalho.

3.5. Incertezas de Medição

A incerteza combinada é calculada considerando-se as diversas fontes de incerteza que contribuem para o resultado de uma medição. Cada uma dessas fontes é quantificada e combinada de acordo com métodos estatísticos adequados para fornecer uma estimativa global da incerteza.

Um método comum para calcular a incerteza combinada é a propagação de incertezas, que envolve a aplicação de regras estatísticas para combinar as incertezas individuais em uma única estimativa de incerteza. Isso pode ser feito usando técnicas como a lei de propagação dos erros, que permite calcular a incerteza combinada com base nas derivadas parciais das incertezas individuais em relação à quantidade medida.

3.5.1. Incerteza na medição dos parâmetros do escoamento

Para o presente trabalho a incerteza associada a cada medição foi obtida através da incerteza fornecida pelo fabricante de cada instrumento utilizado.

- Pressão atmosférica

Como a pressão atmosférica foi mensurada visualmente através do barômetro de Torricelli presente no LAExp, estimou-se que a incerteza esteja em torno de $\pm 0,5$ mmHg, que é metade da menor divisão de escala do equipamento.

- Pressões estática, dinâmica e total

Para as leituras diretas de pressão estática e pressão total a incerteza informada pelo fabricante dos tubos de Pitot utilizados é de $\pm 2\%$. A pressão dinâmica, portanto, tem sua incerteza calculada a partir da combinação das demais, na forma:

$$u_q^2 = \left(\frac{\partial q}{\partial p}\right)^2 u_p^2 + \left(\frac{\partial q}{\partial p_t}\right)^2 u_{p_t}^2$$

$$u_q^2 = u_p^2 + u_{p_t}^2 \quad (40)$$

$$u_q = \sqrt{8} \sim 2,83\%$$

onde:

u_q – Incerteza associada a estimativa da pressão dinâmica

q – Pressão dinâmica

p – Pressão estática

u_p – Incerteza associada a estimativa da pressão estática

p_t – Pressão estática

u_{p_t} – Incerteza associada a estimativa da pressão total

- Temperatura

O fabricante do sensor de temperatura TS2229 da marca IFM presente na seção de testes do TVCF informa uma incerteza na faixa de $\pm 0,15$ [K] + 0.002T.

- Massa específica

O cálculo da densidade do ar foi feito a através da equação dos gases ideais:

$$\rho = \frac{p_{amb}}{RT} \quad (41)$$

Portanto, a incerteza combinada é definida como:

$$u_\rho^2 = \left(\frac{\partial \rho}{\partial p_{amb}}\right)^2 u_{p_{amb}}^2 + \left(\frac{\partial \rho}{\partial T}\right)^2 u_T^2$$

$$u_\rho^2 = \left(\frac{1}{RT}\right)^2 u_{p_{amb}}^2 + \left(\frac{p_{amb}}{R T^2}\right)^2 u_T^2 \quad (42)$$

onde:

u_ρ – Incerteza associada a estimativa da densidade

ρ – Densidade

p_{amb} – Pressão ambiente

$u_{p_{amb}}$ – Incerteza associada a estimativa de pressão ambiente

u_T – Incerteza associada a estimativa da temperatura

T – Temperatura

R – Constante específica dos gases

- Velocidade

A velocidade do escoamento pode ser calculada pela Equação 10 onde $q = \frac{1}{2}\rho V^2$, portanto a incerteza combinada referente a este parâmetro é calculada por:

$$u_V^2 = \left(\frac{\partial V}{\partial \rho}\right)^2 u_\rho^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial q}\right)^2 u_q^2$$

$$u_V^2 = \left(\frac{q}{2\rho^3}\right) u_\rho^2 + \left(\frac{1}{2\rho q}\right) u_q^2 \quad (43)$$

onde:

u_V – Incerteza associada a estimativa da velocidade

V – Velocidade

3.5.1. Incerteza na espessura de deslocamento da camada limite

A espessura de deslocamento da camada limite será estimada através do aumento identificado na velocidade do escoamento ao longo da seção de testes, considerando que este aumento se deve apenas ao espessamento da camada limite e consequente diminuição da área de jato. Portanto:

$$\delta \sim V_{final} - V_{entrada}$$

Portanto, de maneira análoga ao calcula da incerteza para a pressão dinâmica:

$$u_\delta^2 = u_V^2 + u_V^2$$

$$u_\delta^2 = 2u_V^2 \quad (44)$$

onde:

u_δ – Incerteza associada a estimativa da espessura da camada limite

3.5.2. Incerteza no coeficiente de arrasto

O coeficiente de arrasto é determinado a partir da Equação 20, onde $\frac{1}{2}\rho V^2 = q$, por isso a equação que define a incerteza combinada para esta grandeza é:

$$u_{C_D}^2 = \left(\frac{\partial C_D}{\partial q}\right)^2 u_q^2$$
$$u_{C_D}^2 = \left(\frac{D}{Aq^2}\right)^2 u_q^2$$
(45)

onde:

u_{C_D} – Incerteza associada a estimativa do coeficiente de arrasto

C_D – Coeficiente de arrasto

D – Força de arrasto

A – Área de referência

4. ANÁLISE DE RESULTADOS

4.1. Perfil de velocidade na entrada da seção de testes

Através do procedimento descrito na seção 3.3.1 foi obtida a Tabela 2, que mostra a correspondência entre velocidade em cada uma das posições com a velocidade de referência obtida com o tubo de Pitot no centro da seção de testes, em metros por segundo.

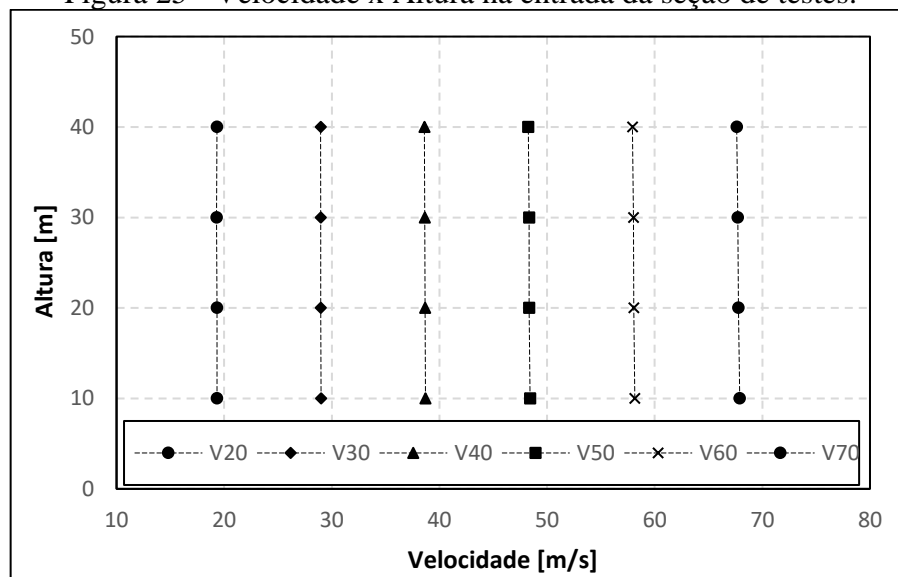
Tabela 2 - Velocidades para diferentes alturas na entrada da seção de testes.

H = 10mm		H = 20mm		H = 30mm		H = 40mm		u_V [%]
V_{REF}	V	V_{REF}	V	V_{REF}	V	V_{REF}	V	
21,36	20,67	21,37	20,67	21,42	20,69	21,48	20,78	0,27%
32,83	31,75	32,88	31,77	32,90	31,77	32,98	31,82	0,13%
44,54	43,08	44,53	43,02	44,55	43,04	44,69	43,11	0,06%
56,34	54,58	56,47	54,61	56,51	54,64	56,58	54,60	0,04%
68,23	66,15	68,32	66,11	68,48	66,26	68,52	66,19	0,03%

Fonte: Da autora.

A partir desses dados foi possível obter a função que relaciona a velocidade em cada altura com a velocidade de referência, e assim obter curvas de velocidade por altura para um mesmo patamar. O resultado é mostrado na Figura 25.

Figura 25 - Velocidade x Altura na entrada da seção de testes.



Fonte: Da autora.

A Figura 25 mostra que a velocidade apresenta pouca variação com a altura na entrada da seção de testes. Isso é um indicativo de que a seção de testes do TVCF oferece um escoamento bastante regular em relação à sua seção transversal, o que é desejado uma vez que se pretende reproduzir um escoamento ao ar livre. Isso também é mostrado na Tabela 3, que representa os pontos mostrados no gráfico acima e mostra a maior diferença entre velocidades encontradas para cada patamar.

Tabela 3 - Velocidade x Altura na entrada da seção de testes.

REF [m/s]	H10 [m/s]	H20 [m/s]	H30 [m/s]	H40 [m/s]	u_V	Dif Max
20	19,32	19,33	19,29	19,33	0,27%	0,22%
30	29,00	28,98	28,96	28,96	0,13%	0,16%
40	38,70	38,65	38,64	38,60	0,08%	0,27%
50	48,42	48,34	48,32	48,25	0,05%	0,34%
60	58,15	58,05	58,02	57,93	0,04%	0,38%
70	67,90	67,77	67,73	67,62	0,03%	0,42%

Fonte: Da autora.

A velocidade de referência não foi considerada pois foi adquirida através de um instrumento diferente, podendo haver discrepâncias de calibração e até posicionamento em relação ao escoamento, portanto essa aquisição foi considerada apenas para referência de cada patamar de velocidade, para garantir que os dados de cada altura sejam confrontados dentro do mesmo contexto.

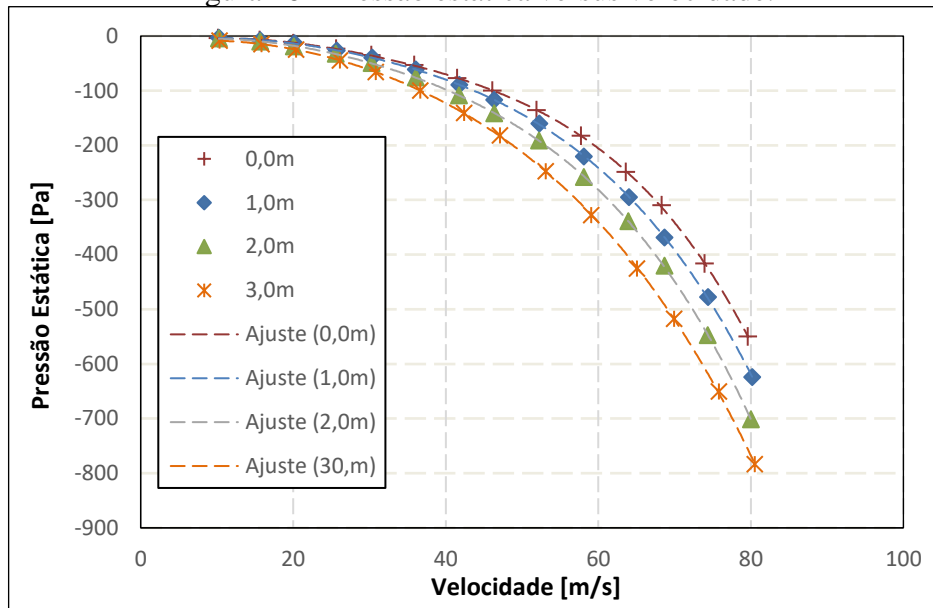
A última coluna da Tabela 3 mostra a maior diferença entre os valores encontrados para cada altura do tubo de Pitot para a mesma velocidade de referência. Devido a pequena diferença encontrada entre elas, não chegando a atingir 0,5%, não foi identificada a necessidade de se produzir uma curva de calibração de velocidade em relação à posição vertical do tubo de Pitot.

4.2. Gradiente de pressão estática longitudinal

4.2.1. Resultado experimental

Os valores obtidos para pressão estática para cada velocidade em cada ponto mostrado na Figura 22 estão expostos na Figura 26 onde é possível observar a queda da pressão estática com velocidade. Também é possível ver que para uma mesma velocidade há também uma queda de pressão estática à medida que o escoamento avança dentro da seção de testes como o esperado. Como não foi possível garantir que os dados obtidos estivessem sempre nos mesmos pontos de velocidade, foi utilizada a ferramenta de ajuste de curva do Excel para um polinômio de quarto grau para cada curva, com um coeficiente de ajuste mínimo de $R^2 = 0,9999$. Onde R^2 é uma medida estatística de quão próximos os dados estão da linha de regressão ajustada.

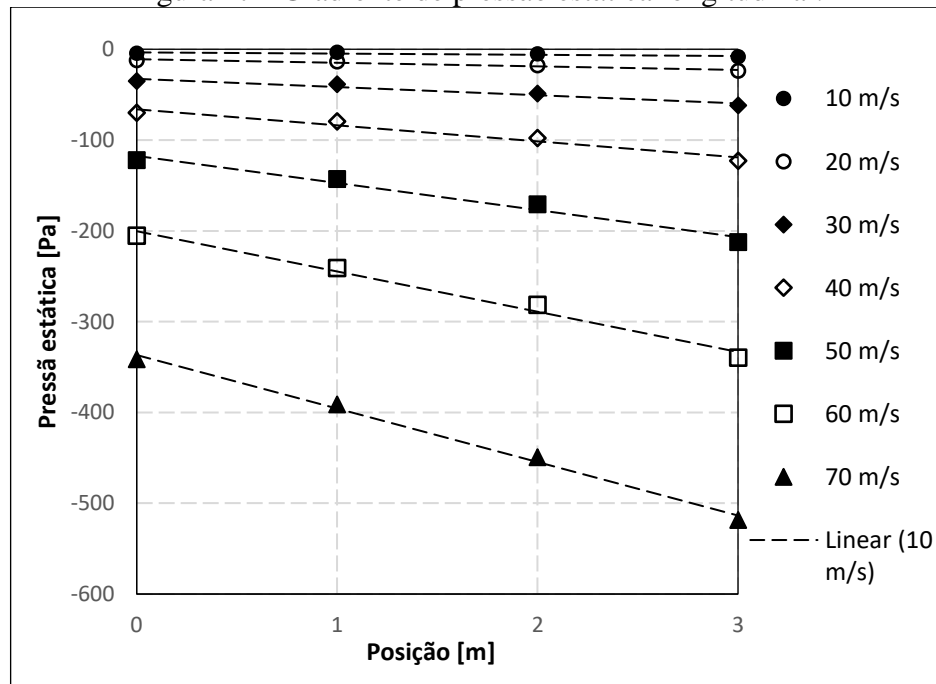
Figura 26 - Pressão estática versus velocidade.



Fonte: Da autora.

A partir das equações das curvas de ajuste foi possível obter as curvas de gradiente de pressão estática por posição na seção de testes para cada valor de velocidade. A Figura 27 mostra essas curvas para a faixa de velocidade típica de trabalho do TVCF. Os mesmos dados estão na Tabela 4.

Figura 27 - Gradiente de pressão estática longitudinal.



Fonte: Da autora.

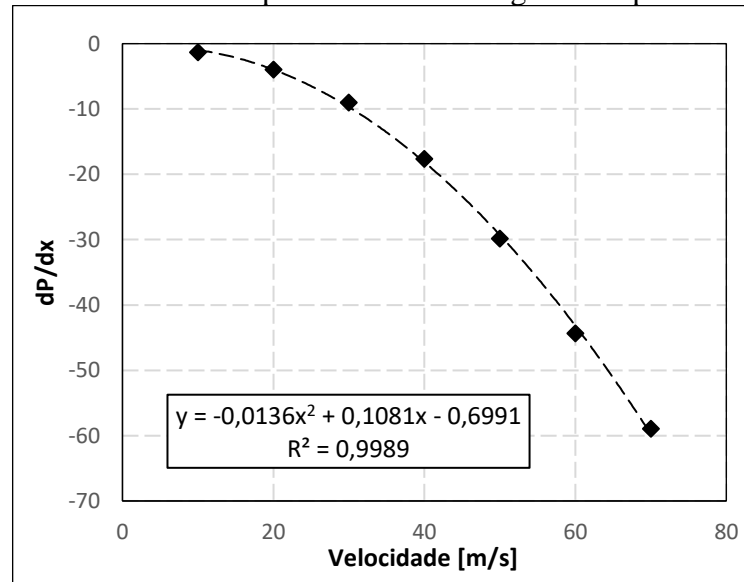
Tabela 4 - Gradiente de pressão estática longitudinal.

Velocidade de referência	Pressão estática [Pa]				u_p
	Posição				
	0 m	1 m	2 m	3 m	
20 m/s	-12,25	-13,48	-17,77	-23,99	2%
30 m/s	-35,15	-38,64	-48,91	-61,78	2%
40 m/s	-70,11	-79,68	-97,89	-122,85	2%
50 m/s	-122,35	-143,02	-171,01	-212,38	2%
60 m/s	-205,48	-240,88	-281,48	-339,74	2%
70 m/s	-341,47	-391,23	-449,40	-518,50	2%

Fonte: Da autora.

Novamente a ferramenta de ajuste de curva do Excel foi utilizada, dessa vez para polinômios de primeiro grau, para se obter a equação que relaciona pressão estática com a posição dentro da seção de testes. O coeficiente de ajuste variou entre $R^2 = 0,9254$ para a menor velocidade e $R^2 = 0,9946$ para a maior. Finalmente, a partir da derivada de cada curva, foi possível obter o gráfico que relaciona o gradiente de pressão longitudinal na seção de testes com a velocidade de entrada do escoamento.

Figura 28 - Gradiente de pressão estática longitudinal por velocidade.



Fonte: Da autora.

Logo, tem-se, exclusivamente para o TVCF do LAExp, a seguinte equação:

$$\frac{dp}{dl}(V) = -0,0136V^2 + 0,1081V - 0,6991 \quad (46)$$

A Equação 46 é a equação que caracteriza a queda de pressão estática que o escoamento experimenta ao longo da seção de testes do TVCF, esta informação é essencial para a caracterização do escoamento na seção de testes pois uma queda na pressão estática implica em um aumento na pressão dinâmica e conseqüentemente na velocidade longitudinal do escoamento. Esta aceleração do escoamento que acontece mesmo sem a presença de um modelo é a responsável pelo efeito de flutuabilidade horizontal no TVCF. Esta relação é válida para a faixa de velocidade entre 10 e 70 m/s.

Tabela 5 - Gradiente de pressão estática longitudinal por velocidade.

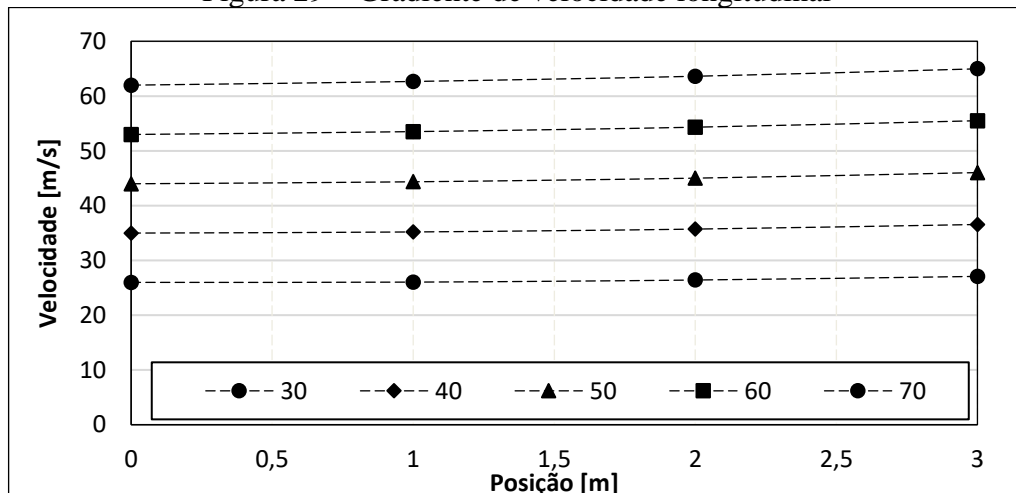
Velocidade de referência	dP/dx [Pa/m]
10 m/s	-1,33
20 m/s	-3,95
30 m/s	-9,02
40 m/s	-17,65
50 m/s	-29,81
60 m/s	-44,34
70 m/s	-58,93

Fonte: Da autora.

4.2.2. Espessura de deslocamento da camada limite

Sabe-se que para um escoamento hipoteticamente incompressível e isentrópico, a pressão total permanece a mesma ao longo de todo o campo de escoamento. Desta forma, é possível, a partir dos resultados apresentados na seção 4.3.1, obter-se o gradiente de velocidade longitudinal na seção de testes do TVCF. Os resultados obtidos são apresentados na Figura 29 e Tabela 6.

Figura 29 – Gradiente de velocidade longitudinal



Fonte: Da autora

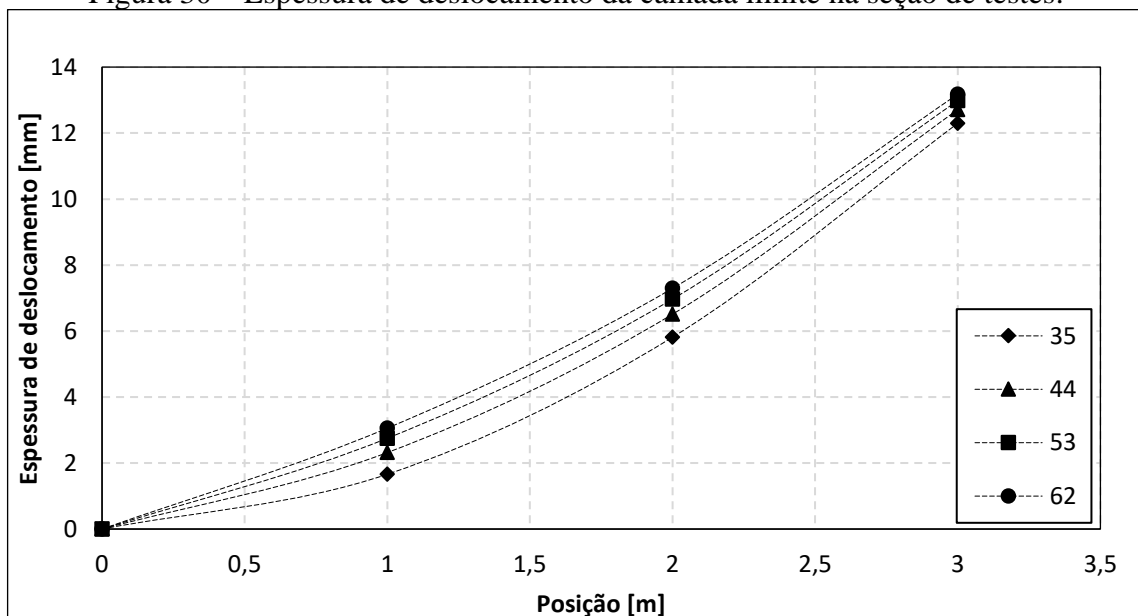
Tabela 6 - Gradiente de velocidade local.

Velocidade de referência	Velocidade local [m/s]				ΔV	u_V
	0 m	1 m	2 m	3 m		
20 m/s	16,98	16,87	17,11	17,60	3,67%	0,27%
30 m/s	25,98	26,03	26,41	27,07	4,21%	0,13%
40 m/s	34,98	35,18	35,71	36,55	4,48%	0,08%
50 m/s	43,98	44,34	45,01	46,02	4,64%	0,05%
60 m/s	52,98	53,50	54,31	55,49	4,74%	0,04%
70 m/s	61,99	62,66	63,61	64,97	4,81%	0,03%

Fonte: Da autora.

Sendo assim, a partir do gradiente de velocidade longitudinal na seção de testes foi possível inferir a espessura de deslocamento da camada limite ao longo da seção. Isto porque se o aumento da velocidade se deve apenas ao espessamento da camada limite, pela lei da continuidade, a vazão deve ser mantida ao longo dela, logo o aumento na velocidade do escoamento é diretamente proporcional à diminuição da área do jato. A espessura de deslocamento da camada limite então, pode ser obtida a partir da diferença entre as áreas de jato em cada ponto. As curvas obtidas para algumas velocidades são apresentadas na Figura 30 e na Tabela 7.

Figura 30 – Espessura de deslocamento da camada limite na seção de testes.



Fonte: Da autora.

Tabela 7 - Espessura de deslocamento da camada limite na seção de testes.

Velocidade na entrada da seção [m/s]	Espessura de deslocamento da camada limite [mm]					u_δ
	Posição					
	0 m	1 m	2 m	3 m		
34,98	0,00	1,66	5,81	12,30		0,11%
43,98	0,00	2,32	6,51	12,71		0,07%
52,98	0,00	2,75	6,97	12,98		0,06%
61,99	0,00	3,06	7,29	13,18		0,04%

Fonte: Da autora.

4.3. Correções de parede

4.3.1. Flutuabilidade Horizontal

A seção 4.2.1 apresentou uma equação que relaciona $\frac{dp}{dl}$ com a velocidade do escoamento não perturbado. Desta forma, substituindo a Equação 46 na Equação 33 obtém-se a seguinte flutuabilidade horizontal:

$$D_F = -\frac{\pi}{4}\lambda_3 t^3 (-0,0136V^2 + 0,1081V - 0,6991) \quad (47)$$

Como visto na seção 2.1 há situações em que é mais conveniente para um corpo que seu arrasto seja tratado em sua forma adimensional, não dependendo da velocidade do escoamento, por isso também é mais conveniente que a correção para flutuabilidade horizontal de um túnel de vento seja feita dessa forma. Assim, substituindo a Equação 47 na Equação 20, tem-se:

$$C_{DF} = \frac{-\frac{\pi}{4}\lambda_3 t^3 (-0,0136V^2 + 0,1081V - 0,6991)}{\frac{1}{2}\rho V^2 A} \quad (48)$$

Este é o modelo de correção proposto para o coeficiente de arrasto devido ao efeito de flutuabilidade horizontal para o TVCF. O valor de coeficiente de arrasto encontrado em um teste deve ser reduzido do valor acima para que o efeito de aceleração do escoamento devido ao espessamento da camada limite das paredes do túnel seja retirado do resultado final. Esta equação é aplicável na faixa de velocidade entre 10 e 70 m/s.

4.3.2. Bloqueio sólido e bloqueio de esteira

De acordo com a seção 2.3.2, o fator de correção para a soma dos fatores de bloqueio sólido e bloqueio de esteira é apresentado pela Equação 34. Substituindo a área da seção transversal pelo valor da seção de testes do TVCF, tem-se:

$$\frac{C_{DU}}{C_{DB}} = 1 + \theta C_{DB} \left(\frac{S}{1,101} \right) \quad (49)$$

A Equação 49 define a correção para efeitos de bloqueio para o TVCF. É possível observar que diferentemente da correção para flutuabilidade horizontal, esta correção não é diretamente dependente da velocidade do escoamento, além de ser calculada diretamente na forma de coeficiente de arrasto. A obtenção da correção para a força de arrasto, contudo, tem relação direta com a velocidade de acordo com o que foi mostrado na seção 2.1.

4.4. Arrasto corrigido

4.4.1. Esfera lisa

Aplicando a Equação 47 ao caso de uma esfera lisa de 54 mm de diâmetro e utilizando as velocidades alcançadas no terceiro experimento, foi possível obter a curva de C_{DF} versus V para o teste, conforme mostrado na Figura 31. É possível observar a forte relação entre a correção para flutuabilidade horizontal e a velocidade do escoamento mesmo na forma de coeficiente de arrasto. A Figura 31 mostra os dados correspondentes à Tabela 8, onde o fator de correção para o coeficiente de arrasto é apresentado em *drag counts* ($1\Delta C_{DF} = 0,0001C_{DF}$).

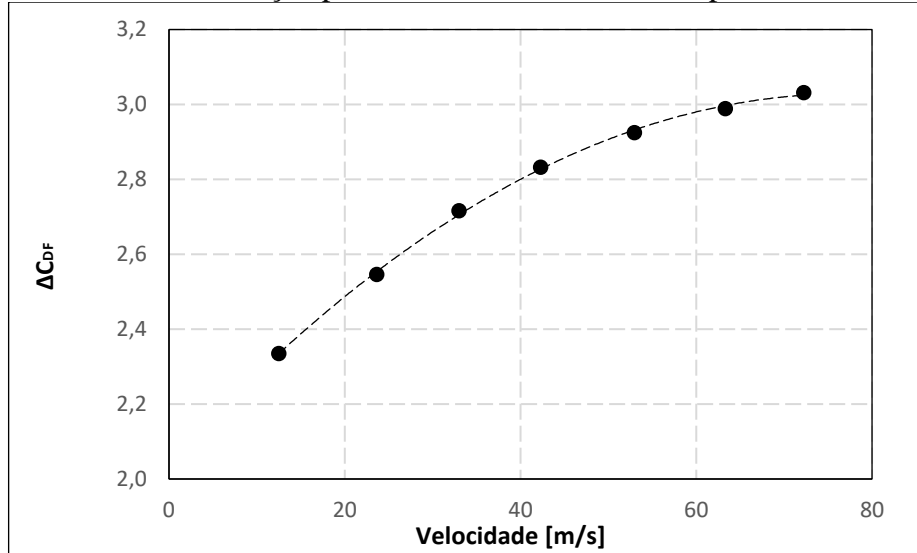
Tabela 8 - Fator de correção para flutuabilidade horizontal para a esfera lisa de 54mm.

Velocidade	ΔC_{DF}
12,50	2,33
23,65	2,55
33,00	2,72
42,30	2,83
52,96	2,92
63,32	2,99
72,24	3,03

Fonte: Da autora.

É possível observar a forte relação entre a correção para fluutuabilidade horizontal e a velocidade do escoamento mesmo na forma de coeficiente de arrasto.

Figura 31 – Fator de correção para fluutuabilidade horizontal para a esfera de 54mm.



Fonte: Da autora.

Adaptando-se a Equação 48 para o caso da esfera lisa, é possível obter a Equação 50:

$$\frac{C_{DU}}{C_{DB}} = 1 + 2,5C_{DB} \left(\frac{S}{1,101} \right) \quad (50)$$

Para esta correção, também foi considerada a área frontal da proteção utilizada para a célula de carga (Figura 23), uma vez que ela possui área relativa significativa e, portanto, desempenha um papel importante no aumento da pressão dinâmica do escoamento em torno da montagem. Assim, após resolvida a Equação 48, para cada velocidade, foi possível obter o valor do fator de correção para bloqueio, como:

$$dC_{DB} = C_{DU} - C_{DB} \quad (51)$$

Os resultados são apresentados em *drag counts* na Tabela 9.

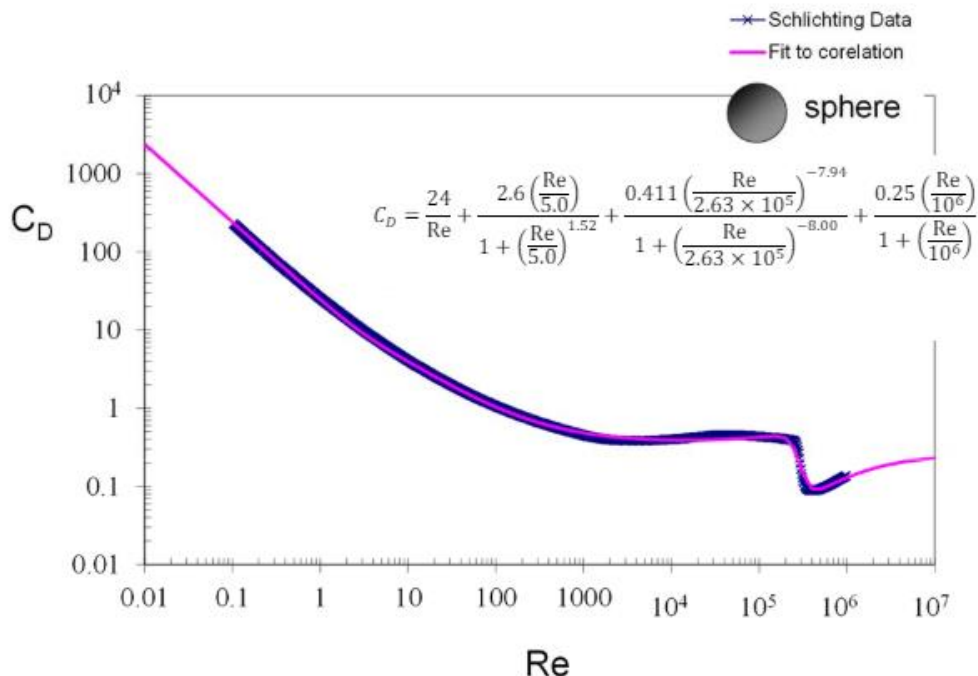
Tabela 9 - Fator de correção para bloqueio sólido e de esteira para a esfera de 54mm.

Velocidade	ΔdC_{DB}
12,50	83,13
23,65	80,55
33,00	83,93
42,30	76,61
52,96	85,38
63,32	88,47
72,24	74,02

Fonte: Da autora.

Para a validação dos dados de referência para o coeficiente de arrasto em esferas lisas mostrados na Figura 4, foi utilizada a aproximação proposta por Morrison (2016). Essa aproximação busca obter uma relação direta entre o Número de Reynolds do escoamento e o arrasto em esferas lisas, tendo como base os dados experimentais de arrasto apresentados em Schlichting, (1979) e que também podem ser encontrados em Munson (1990). A Figura 32 mostra essa aproximação.

Figura 32 - Aproximação de Morrison

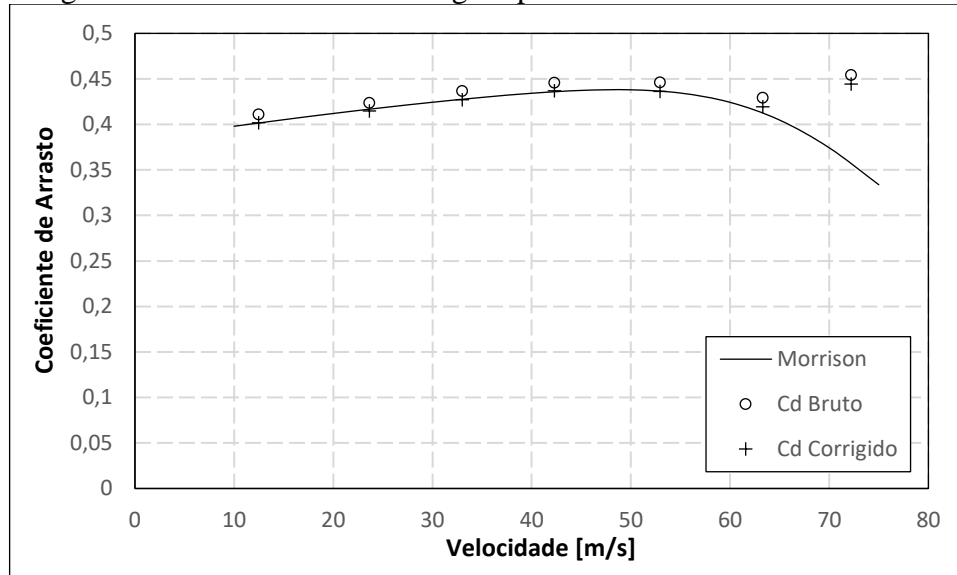


Fonte: Morrison (2016).

Por fim, aplicando a metodologia descrita na seção 3.3.3, os dados de arrasto foram adquiridos para pontos dentro da faixa de velocidade de trabalho típica do TVCF. Posteriormente foram aplicadas as correções propostas nas seções 4.3.1 e 4.3.2. A Figura 33

mostra tanto os dados brutos obtidos no teste quanto os dados corrigidos. A Tabela 10 apresenta os dados presentes na Figura 33.

Figura 33 – Arrasto bruto e corrigido para a esfera de 54mm no TVCF.



Fonte: Da autora.

Tabela 10 - Arrasto bruto e corrigido para a esfera de 54mm no TVCF.

Velocidade	C_D				Erro Relativo	
	Morrison	Bruto	Corrigido	u_{C_D}	Bruto	Corrigido
12,50	0,4016	0,4110	0,4018	2%	2,35%	0,04%
23,65	0,4168	0,4237	0,4147	2%	1,67%	-0,51%
33,00	0,4277	0,4367	0,4272	2%	2,12%	-0,10%
42,30	0,4359	0,4457	0,4369	2%	2,25%	0,24%
52,96	0,4365	0,4460	0,4363	2%	2,17%	-0,06%
63,32	0,4123	0,4293	0,4193	2%	4,13%	1,69%
72,24	0,3567	0,4544	0,4443	2%	27,36%	24,54%

Fonte: Da autora.

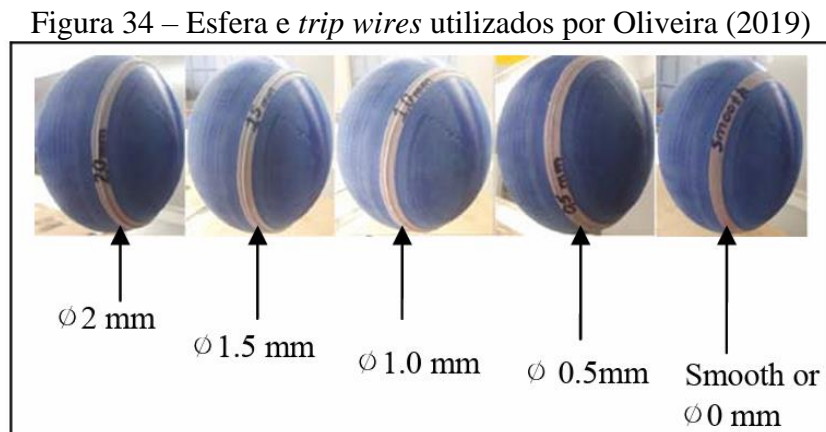
É possível observar que os resultados brutos apresentaram uma boa correspondência com os dados de referência, mostrando uma leve tendência a superestimar os valores, o que é esperado, uma vez que os efeitos de parede tendem a aumentar o arrasto para os modelos testados.

A correções também se mostraram eficazes trazendo o resultado para mais perto do esperado pela curva de Morrison (2013). Também é possível notar que a correção para bloqueio desempenha um papel mais importante na correção, uma vez que representa cerca de 95% do valor total da correção aplicada.

Para velocidades próximas a 70 m/s, foi observado que tanto a montagem do teste quanto a própria estrutura do TVCF mostraram considerável vibração mecânica, o que dificultou a aquisição dos dados de arrasto, causando uma grande dispersão neles.

4.4.2. Esfera de 150mm de diâmetro

A esfera utilizada no experimento de Oliveira (2019) é apresentada em detalhe na Figura 34.



Fonte: Oliveira (2019)

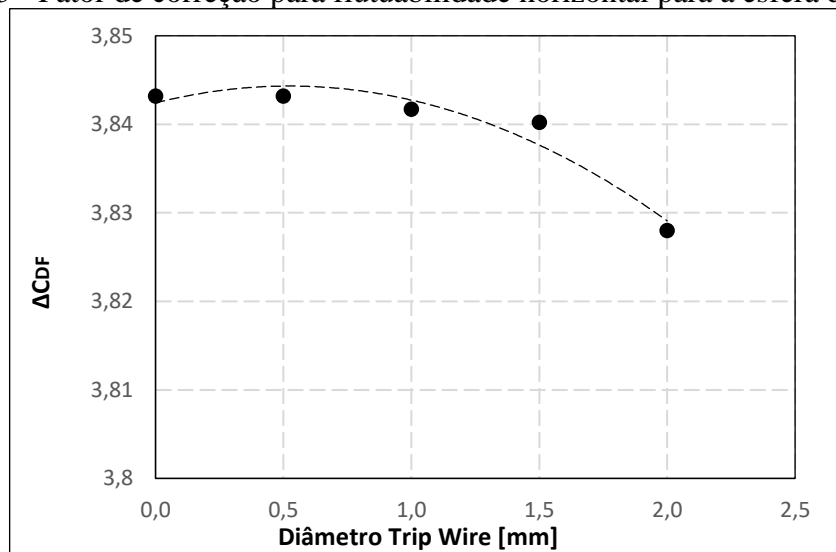
Para este experimento, mostrado na Figura 24 a presença de uma tábua para simular o solo foi considerada como uma diminuição da área útil da seção de testes do TVCF, impactando na Equação 50, transformando-a em:

$$\frac{C_{DU}}{C_{DB}} = 1 + 2,5C_{DB} \left(\frac{S}{0,9382} \right) \quad (52)$$

A correção para flutuabilidade horizontal do experimento da esfera considerou um aumento na força de arrasto causado pela presença do modelo e também pela presença da lança que ocupa o espaço da esteira, esta última tendo uma influência diminuta (em torno de 0,6%) no valor da correção do arrasto somente para flutuabilidade.

A Figura 35 e a Tabela 11 mostram os valores encontrados para a correção de arrasto para flutuabilidade horizontal da esfera de 150mm de diâmetro em *drag counts*.

Figura 35 - Fator de correção para fluuabilidade horizontal para a esfera de 150mm.



Fonte: Da autora.

Tabela 11 - Fator de correção para fluuabilidade horizontal para a esfera de 150mm.

Diâmetro Trip Wire [mm]	Velocidade [m/s]	ΔC_{DF}
0,0	43,2	3,84
0,5	43,2	3,84
1,0	43,1	3,84
1,5	43,0	3,84
2,0	42,1	3,83

Fonte: Da autora.

O cálculo da correção de parede para efeito de bloqueio sólido e de esteira para este experimento levou em conta a área frontal da esfera e a área frontal do suporte vertical mostrado na Figura 24. O resultado é apresentado na Tabela 12.

Tabela 12 - Fator de correção para bloqueio sólido e de esteira para a esfera de 150mm.

Diâmetro Trip Wire [mm]	Velocidade [m/s]	ΔdC_{DB}
0,0	43,2	96,39
0,5	43,2	63,05
1,0	43,1	65,76
1,5	43,0	68,53
2,0	42,1	83,63

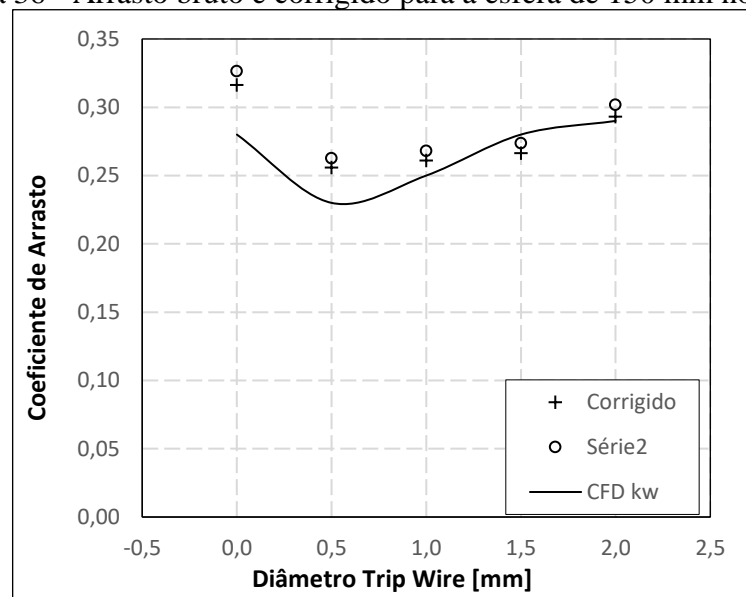
Fonte: Da autora.

Entre os dados disponibilizados por Oliveira (2019) estavam a leitura de força realizada diretamente através da célula de carga para cada montagem, bem como o coeficiente de pressão adquirido por meio das tomadas na superfície da esfera. Para esta análise foram utilizados os

dados da célula de carga afim de manter a coerência com os resultados obtidos na seção anterior. Com isso, os dados de força foram calculados para o coeficiente de arrasto para cada diâmetro de *trip wire*. Os resultados da simulação em CFD realizada por Oliveira (2019) também foram disponibilizados. A Figura 36 mostra esses resultados junto com o arrasto corrigido.

Novamente é possível observar que os valores medidos através da célula de carga são superestimados em relação ao esperado, de forma que de maneira geral os resultados corrigidos se aproximam mais da referência do que os dados brutos. Isso pode ser mais bem observado a partir da Figura 36 e da Tabela 13.

Figura 36 - Arrasto bruto e corrigido para a esfera de 150 mm no TVCF.



Fonte: Da autora.

Tabela 13 - Arrasto bruto e corrigido para a esfera de 150mm no TVCF.

Diâmetro Trip Wire [mm]	C_D			Erro Relativo	
	Bruto	Corrigido	CFD	Bruto	Corrigido
0,0	0,3264	0,3164	0,28	16,58%	13,00%
0,5	0,2625	0,2559	0,23	14,15%	11,24%
1,0	0,2681	0,2611	0,25	7,22%	4,44%
1,5	0,2736	0,2664	0,28	-2,28%	-4,86%
2,0	0,3019	0,2931	0,29	4,09%	1,07%

Fonte: Da autora.

Também, assim como na seção anterior, observa-se que a correção para bloqueio sólido representa a maior parte da correção, desta vez correspondendo em média a 96% do valor total da correção aplicada. A Tabela 14 apresenta um resumo das correções propostas por este trabalho de pesquisa.

Apesar de o presente trabalho de pesquisa contemplar experimentos para a validação aerodinâmica dos modelos ensaiados é importante ressaltar que essas correções foram desenvolvidas para qualquer formato de corpo – desde que haja separação de escoamento, o que pode ser observado pela presença de fatores adimensionais de forma em ambos os modelos, sendo λ_3 para flutuabilidade horizontal e θ para bloqueio sólido e de esteira.

Outros tipos de modelos, como aqueles que apresentam sustentação, podem experimentar outros tipos de efeitos de parede, aos quais também cabe o estudo e a proposição de modelos de correção

Tabela 14 - Correções de efeitos de parede para o TVCF

Equação	Modelo Geral	Modelo Específico para o TVCF
Gradiente de pressão estática longitudinal da seção de testes	-	$\frac{dp}{dl}(V) = -0,0136V^2 + 0,1081V - 0,6991$
Correção para Flutuabilidade horizontal	$C_{DF} = \frac{-\frac{\pi}{4}\lambda_3 t^3 \frac{dp}{dl}}{\frac{1}{2}\rho V^2 A}$ (Pope)	$C_{DF} = \frac{-\frac{\pi}{4}\lambda_3 t^3 (-0,0127V^2 + 0,0217V + 1,2064)}{\frac{1}{2}\rho V^2 A}$
Correção para Bloqueio sólido e de esteira	$\frac{C_{DU}}{C_{DB}} = 1 + \theta C_{DB} \left(\frac{S}{C}\right)$ (Maskell)	$\frac{C_{DU}}{C_{DB}} = 1 + \theta C_{DB} \left(\frac{S}{1,101}\right)$

Fonte: Da autora.

5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

5.1. Conclusões

Os resultados apresentados demonstram que foi possível obter modelos para a correção para os efeitos de fluutuabilidade horizontal, bloqueio sólido e bloqueio de esteira para corpos esféricos para o túnel de vento de circuito fechado do LAExp.

Os resultados obtidos no ensaio de perfil de velocidade na entrada da seção de testes mostraram que o TVCF tende a apresentar um escoamento bastante homogêneo na seção de testes, com variações menores que 0,5% com relação à posição vertical do tubo de Pitot. O gradiente de velocidade longitudinal também mostra um bom comportamento com a velocidade sofrendo um aumento de menos de 5% ao longo da seção.

O fator de correção apresenta um valor baixo percentualmente comparado ao valor bruto quando o modelo testado possui uma área frontal pequena comparada à área de seção transversal da seção de testes (não chegando a 3%), e isso se mostrou positivo, pois a diferença entre os resultados obtidos na seção de testes do TVCF e os valores de referência também foi pequena (menor que 5%) para velocidades entre 10 e 60 m/s.

Os resultados mostram também que, de maneira geral, o efeito de bloqueio sólido e de esteira foi mais significativo do que o efeito de fluutuabilidade horizontal para os modelos testados, representando cerca de 95% do valor total do efeito de interferência de parede sobre os resultados. Isso significa que o aumento da velocidade do escoamento ao longo da seção de testes devido ao volume de seção ocupado pelo modelo foi maior do que o aumento devido ao desenvolvimento da camada limite nas paredes da seção de testes.

Para o experimento com a esfera lisa de 54mm de diâmetro, a aplicação das correções de parede diminuiu a diferença entre os resultados brutos e a referência em cerca de 2%, resultando em uma diferença menor que 1% para a faixa de velocidade entre 10 e 50 m/s.

Já para o experimento com a esfera de 150mm de diâmetro a aplicação das correções resultou em uma queda de cerca de 3% da diferença entre os resultados e os valores de referência para quatro das cinco configurações testadas.

Por fim, fica destacada a importância deste trabalho como um primeiro estudo sobre os efeitos de parede presentes no TVCF, apresentando modelos semi-empíricos de correção para os principais efeitos de parede e validando-os para corpos esféricos. É esperado que o desenvolvimento e aplicação recorrente desses modelos acarrete uma melhor precisão e confiabilidade dos resultados obtidos através dele.

5.2. Recomendações

Para que os dados obtidos nos testes do TVCF se tornem ainda mais confiáveis, recomenda-se que os modelos de correção apresentados neste trabalho sejam validados também para modelos com uma área frontal maior e geometrias mais diversificadas, por exemplo, para perfis aeronáuticos e modelos de aeronaves em subescala.

Também, recomenda-se um trabalho de pesquisa envolvendo a metrologia em todos os testes possíveis de serem realizados neste túnel de vento de circuito fechado, visando as grandezas associadas aos ensaios aeronáuticos e automotivos, por exemplo.

Por fim, recomenda-se o amortecimento e/ou enrijecimento estrutural do túnel de vento de circuito fechado, para possibilitar estudos acima de 60 m/s até o limite de 90 m/s, de forma a mitigar a interferência de vibrações mecânicas, que hoje ultrapassam 8 mm/s a partir de 60 m/s, inviabilizando quaisquer estudos mais acurados.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALAM, F., CHOWDHURY, H., HUSNI, N., SMITH, L., **An Experimental study of baseballs and softballs**. APCST, 2013.
- AMERICAN INSTITUTE OF AERONAUTICS AND ASTRONAUTICS, **Calibration of Subsonic and Transonic Wind Tunnels**, 2003.
- ANDERSON, J. D. **Fundamentals of Aerodynamics** [S.1], 1984.
- ARAÚJO, P. H. **Caracterização do escoamento do túnel de vento de circuito fechado do Laboratório de Aerodinâmica Experimental da UFMG via fluidodinâmica computacional utilizando um modelo em escala real**. UFMG, 2024.
- ELFMARK, O., GILJARHUS, K. E. T., LILAND, F.F., OGGIANO, L., REID, R., **Aerodynamic investigation of tucked positions in alpine skiing**, Journal of Biomechanics, Volume 119, 2021.
- FERNANDES, M. C. **Caracterização da camada limite na seção de testes do túnel de vento da UFMG via CFD**, UFMG, 2019.
- FERNANDES, M. C. **Development of an experimental correction model for horizontal buoyancy in the testing section of the closed-circuit wind tunnel at UFMG**, COBEM, 2023.
- FERZIGER, J. H. e PERIC, M. **Computational Methods for Fluid Dynamics**, 3ª Edição. Springer, 2002.
- FOX, R. W., MCDONALD, A. T. & PRITCHARD, P. J. **Introdução à Mecânica dos Fluidos**, 8ª Edição. LTC, 2016.
- HEINE, F., MÜLLER, D., & SCHÜLEIN, E. **Advanced Wall Interference Corrections for Closed-Test-Section Wind Tunnels**. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2012.
- IFM, **TS-PT100 CONTACT SENSOR**, 2016.
- INSTRUTEMP, **Planilha de dados técnicos – Tubo de Pitot Tipo L**
- INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, QUALIDADE E TECNOLOGIA, **Vocabulário Internacional de termos fundamentais e gerais da Metrologia**. Portaria Número 29, Rio de Janeiro, 1995.
- KIM, H., & PARK, S. **Wall Interference Effects and Corrections in High-Speed Wind Tunnels**. Journal of Aircraft, 2017.
- KRAUSE, E. **Fluid Mechanics - With Problems and Solutions and an Aerodynamic Laboratory**, Springer, 2007.

LI, X., ZHANG, Y., & WANG, L. **Innovative Techniques for Wall Correction in Wind Tunnel Testing**. International Journal of Aerodynamics, 2020.

LU, F. K., e MARREN, D. E. **Advanced Hypersonic Test Facilities**, AIAA, 2002.

MASKELL, E. C. **A Theory of the Blockage Effects on Bluff Bodies and Stalled Wings in a Closed Wind Tunnel**, Aeronautical Research Council Reports and Memoranda, 1965.

MORRISON, A., **An Introduction to Fluid Mechanics**. Cambridge University Press, NY, 2016.

MUNSON, B. R., YOUNG, D. F., and OKIISHI, T. H., **Fundamentals of Fluid Mechanics**, Wiley, NY, 1990.

NASA, **Transonic Wind Tunnel at NASA Langley**. Disponível em: <https://www.nasa.gov/image-article/transonic-wind-tunnel-nasa-langley/>. Acesso em: 27/05/2024.

OLIVEIRA, V. F., PAPINI, G.S., HUEBNER, R., ASSÍ, G. R. S., & PALOMINO, A. E. C. **Optimization of drag reduction by a different trip wire's diameters variation on a sphere**, COBEM, 2019.

PALHARES, M. Q. **Ensaio em túnel de vento do conceito de propulsão de Goldschmied-Skaleski aplicado à polaina do trem de pouso principal da aeronave Anequim**. UFMG, 2016.

PALHARES, M. Q. **Avaliação teórica de um mecanismo passivo de controle de arrasto abordando o ruído aerodinâmico aplicado ao corpo de Ahmed com traseira quadrada**. UFMG, 2019.

POPE, A. **Low Speed Wind Tunnel Testing** [S.1], 1999.

POPE, A. **Wind Tunnel Calibration Techniques** [S.1], 1961.

RASUO, B. **On Status of Wind Tunnel Wall Correction**. 25th International Congress of the Aeronautical Sciences, ICAS, 2006.

REIS, M. L. C. C. **Expressão da Incerteza de Medição Associada a um Ensaio Aeronáutico em Túnel de Vento Subsônico**. Unicamp, 2000.

ROSA, E.S. **Equações integrais da camada limite bi-dimensional**, UNICAMP. Disponível em: <https://www.fem.unicamp.br/> Acesso em: 28/03/2023.

SAHINI, D. **Wind Tunnel Blockage Corrections: A Computational Study**. Texas Tech University, 2004.

SCANIVALVE, **DSA3217/3218 Series Pressure Scanner Operation and Service Manual**, 2018.

SCHLICHTING, H. **Boundary Layer Theory** [S.1], 1979.

SMITH, J., & JONES, A. Numerical Simulations and Wall Correction Methodologies in Wind Tunnel Testing. AIAA Journal, 2015.

VALLE, R. M. Aquisição do Primeiro Túnel de Vento de Pesquisa e Desenvolvimento de Produtos do Estado de Minas Gerais, Relatório Final, 2006.

WHITE, F. M. Viscous Fluid Flow [S.1], 2006.