



UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS
ESCOLA DE ENGENHARIA ELÉTRICA, MECÂNICA E DE COMPUTAÇÃO

CURSO DE BACHARELADO EM ENGENHARIA MECÂNICA

JÚLIA ARAÚJO DA PURIFICAÇÃO

ESTUDO EXPERIMENTAL DO ESCOAMENTO SOBRE UMA
ESFERA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado para
obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Me-
cânica.

Orientador: Prof^a. Dr^a. Andreia Aoyagui Nasci-
mento

Coorientador: Dr. Diogo Appel Colvero

Goiânia
2024



UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS
ESCOLA DE ENGENHARIA ELÉTRICA, MECÂNICA E DE COMPUTAÇÃO

TERMO DE CIÊNCIA E DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAR VERSÕES ELETRÔNICAS DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO DE GRADUAÇÃO NO REPOSITÓRIO INSTITUCIONAL DA UFG

Na qualidade de titular dos direitos de autor, autorizo a Universidade Federal de Goiás (UFG) a disponibilizar, gratuitamente, por meio do Repositório Institucional (RI/UFG), regulamentado pela Resolução CEPEC no 1240/2014, sem ressarcimento dos direitos autorais, de acordo com a Lei no 9.610/98, o documento conforme permissões assinaladas abaixo, para fins de leitura, impressão e/ou download, a título de divulgação da produção científica brasileira, a partir desta data.

O conteúdo dos Trabalhos de Conclusão dos Cursos de Graduação disponibilizado no RI/UFG é de responsabilidade exclusiva dos autores. Ao encaminhar(em) o produto final, o(s) autor(a)(es)(as) e o(a) orientador(a) firmam o compromisso de que o trabalho não contém nenhuma violação de quaisquer direitos autorais ou outro direito de terceiros.

1. Identificação do Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação (TCCG)

Nome completo da autora: JULIA ARAÚJO DA PURIFICAÇÃO

Título do trabalho: Estudo Experimental do Escoamento sobre uma Esfera

2. Informações de acesso ao documento (este campo deve ser preenchido pelo orientador) Concorda com a liberação total do documento [x] SIM [] NÃO¹

[1] Neste caso o documento será embargado por até um ano a partir da data de defesa. Após esse período, a possível disponibilização ocorrerá apenas mediante: a) consulta ao(à)(s) autor(a)(es)(as) e ao(à) orientador(a); b) novo Termo de Ciência e de Autorização (TECA) assinado e inserido no arquivo do TCCG. O documento não será disponibilizado durante o período de embargo.

Casos de embargo:

- Solicitação de registro de patente;
- Submissão de artigo em revista científica;
- Publicação como capítulo de livro.

Obs.: Este termo deve ser assinado no SEI pelo orientador e pelo autor.



Documento assinado eletronicamente por **Andreia Aoyagui Nascimento, Professora do Magistério Superior**, em 25/07/2024, às 11:24, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Júlia Araújo Da Purificação, Discente**, em 25/07/2024, às 13:15, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **4696179** e o código CRC **6FC8C564**.

Referência: Processo nº 23070.015090/2024-91

SEI nº 4696179



UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS
ESCOLA DE ENGENHARIA ELÉTRICA, MECÂNICA E DE COMPUTAÇÃO

CURSO DE BACHARELADO EM ENGENHARIA MECÂNICA

JÚLIA ARAÚJO DA PURIFICAÇÃO

ESTUDO EXPERIMENTAL DO ESCOAMENTO SOBRE UMA
ESFERA

Goiânia
2024

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor, através do Programa de Geração Automática do Sistema de Bibliotecas da UFG.

Purificação, Júlia Araújo da
Estudo Experimental do Escoamento Sobre uma Esfera
[manuscrito] / Júlia Araújo da Purificação. - 2024.
LVI, 56 f.: il.

Orientador: Prof. Dr. Andreia Aoyagui Nascimento; co-orientador
Dr. Diogo Appel Colvero.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade
Federal de Goiás, Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de
Computação (EMC), Engenharia Mecânica, Goiânia, 2024.

Bibliografia. Apêndice.

Inclui siglas, fotografias, símbolos, gráfico, tabelas, lista de
figuras, lista de tabelas.

1. Túnel de vento. 2. Escoamento Turbulento.. 3. Tubo de Pitot. I.
Nascimento, Andreia Aoyagui , orient. II. Título.

CDU 621



UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS
ESCOLA DE ENGENHARIA ELÉTRICA, MECÂNICA E DE COMPUTAÇÃO

ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

Aos 19 dias do mês de junho do ano de 2024 iniciou-se a sessão pública de defesa do Trabalho de Final de Curso (PFC) intitulado “Estudo Experimental do Escoamento sobre uma Esfera”, de autoria de Júlia Araújo da Purificação, do curso de engenharia mecânica, da Escola de Engenharias Elétrica, Mecânica e de Computação (EMC) da UFG. Os trabalhos foram instalados pela Andreia Aoyagui Nascimento – **orientadora (EMC/UFG)** com a participação dos demais membros da Banca Examinadora: Diogo Appel Colvero (**EMC/UFG**) e **Leonardo de Queiroz Moreira (EMC/UFG)**. Após a apresentação, a banca examinadora realizou a arguição do(a) estudante. Posteriormente, de forma reservada, a Banca Examinadora atribuiu a nota final de 7,8 (sete vírgula oito) pontos, tendo sido o PFC considerado aprovado.

Proclamados os resultados, os trabalhos foram encerrados e, para constar, lavrou-se a presente ata que segue assinada pelos Membros da Banca Examinadora.



Documento assinado eletronicamente por **Andreia Aoyagui Nascimento, Professora do Magistério Superior**, em 19/06/2024, às 09:33, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Diogo Appel Colvero, Engenheiro**, em 19/06/2024, às 09:35, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Leonardo De Queiroz Moreira, Professor do Magistério Superior**, em 19/06/2024, às 09:35, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **4612844** e o código CRC **698A6F52**.

*Este trabalho é dedicado à minha mãe que
sempre acreditou em mim. A minha vó que me ensinou
a sempre sonhar alto e ao meu pai que me ensinou a ser livre.*

AGRADECIMENTOS

Os agradecimentos principais são direcionados à FURNAS por apoiar esta pesquisa e fornecer os equipamentos para que esse projeto fosse realizado.

Agradecimentos especiais são direcionados ao técnico do curso de Engenharia Mecânica Anderson Gomes Girardi por estar presente durante os testes efetuados em laboratório e por sempre me suportar.

*“Nós iremos ocasionalmente nos
lembrar de que o que pensamos ser a nossa maior fraqueza,
pode ser a nossa maior força. E que a pessoa
mais improvável, pode alterar o curso da história.”
(Corte de Asas e Ruina- Sarah J. Maas)*

RESUMO

A análise do escoamento sobre uma esfera fornece informações importantes para processos industriais envolvendo forças aerodinâmicas em corpos esféricos em escoamentos laminares e turbulentos. Este estudo utilizou um tubo de Pitot para medir a pressão do escoamento em diferentes posições, variando a cada 25 mm. Foi utilizado o módulo de pressão AA-TVCR3, integrado ao software 'Aeroalcool- Túnel de Vento', para obter o diferencial de pressão em cada posição. A esfera, feita de polímero com diâmetro de 89,5 mm, foi posicionada no centro da seção de testes do túnel de vento. Os valores de pressão foram utilizados para determinar a velocidade do escoamento e comparar com os valores obtidos no estudo de Tyagi, verificando a precisão do uso do tubo de Pitot em escoamentos turbulentos.

Palavras-chave: Túnel de vento. Escoamento Turbulento. Tubo de Pitot.

ABSTRACT

The analysis of flow over a sphere provides important information for industrial processes involving aerodynamic forces on spherical bodies in laminar and turbulent flows. This study used a Pitot tube to measure the flow pressure in different positions, varying every 25 mm. The AA-TVCR3 pressure module, integrated into the 'Aeroalcool – Wind Tunnel' software, was used to obtain the pressure differential in each position. The sphere, made of polymer with a diameter of 89.5 mm, was positioned in the center of the test section of the wind tunnel. The pressure values were used to determine the flow speed and compare with the values obtained in Tyagi's study, verifying the accuracy of using the Pitot tube in turbulent flows.

Keywords: Wind Tunnel. Turbulent Flow. Pitot Tube.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Túnel de vento subsônico de circuito aberto (AA-TVSH1 (H1c)).	13
Figura 2 – Esquema túnel de Vento.	13
Figura 3 – Posicionamento do tubo de Pitot em uma Aeronave.	15
Figura 4 – Representação do escoamento turbulento e laminar com relação ao aumento do Re	16
Figura 5 – Escoamento viscoso ao redor de uma esfera.	17
Figura 6 – Esquema de teste sobre esferas com sulcos.	18
Figura 7 – Esquema de teste experimental em esferas lisas e rugosas.	18
Figura 8 – Esquema de testes em esferas realizados em um túnel de vento fechado.	19
Figura 9 – Bancada de testes.	20
Figura 10 – Esfera acoplada à haste de apoio.	21
Figura 11 – tubo de Pitot com base graduada.	22
Figura 12 – Módulo de pressão.	22
Figura 13 – As sete posições de teste no eixo X do túnel de Vento	24
Figura 14 – Posição da esfera e tubo de Pitot dentro da área de testes.	25
Figura 15 – Esquema das posições do tubo de Pitot	26
Figura 16 – Posicionamento do Anemômetro de fio quente em relação a esfera.	27
Figura 17 – Esquema tubo de Pitot.	30
Figura 18 – Pressão por número de pontos.	34
Figura 19 – Destaque para a pressão nas posições A, B e C.	34
Figura 20 – Velocidade por número de pontos.	35
Figura 21 – Destaque para as velocidades nos locais A e D.	36
Figura 22 – Destaque para as velocidades nos locais B e C.	37
Figura 23 – Comparativo entre valores obtidos para U_{rms}	39
Figura 24 – Comparação das velocidades entre o Anemômetro de fio quente e o Tubo de Pitot.	40
Figura 25 – Comparativo entre valores obtidos para Tu	40
Figura 26 – Comparação da razão U/\bar{U} com o estudo de Tyagi (2005).	41

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Parâmetros utilizados para a realização dos cálculos	23
Tabela 2 – As posições de teste	24
Tabela 3 – Viscosidade do ar a 1 atm	28
Tabela 4 – Dados obtidos utilizando o Anemômetro de fio quente	38
Tabela 5 – Comparação entre os resultados do tubo de Pitot e do anemômetro de fio quente.	38
Tabela 6 – Erro relativo percentual.	42

LISTA DE SÍMBOLOS

Tu	Intensidade da Turbulência (%).
ν	Viscosidade do ar (m^2/s).
Re	Número de Reynolds.
U_{rms}	intensidade das flutuações de velocidade ao longo do tempo (m/s).
U	Velocidade do fluxo (m/s).
T	Temperatura ($^{\circ}C$)
D	Diâmetro da esfera (mm).
\bar{U}	Velocidade média temporal (m/s).
u'	Desvio da velocidade média.
N	Número de dados.
m	Massa do fluido.
g	Gravidade.
P_t	Pressão dinâmica (Pa).
P_s	Pressão estática (Pa).
σ	Desvio padrão da velocidade do escoamento turbulento.
ub	Incerteza média das velocidades (m/s).
$u_{anemometro}$	Incerteza do anemômetro pela precisão do instrumento (m/s).

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	10
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	12
3	METODOLOGIA	20
3.1	BANCADA EXPERIMENTAL	20
3.2	PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	22
3.3	CÁLCULOS PARA OBTENÇÃO DO NÚMERO DE REYNOLDS	27
3.4	VELOCIDADE RMS	29
3.5	CÁLCULO PARA A OBTENÇÃO DAS VELOCIDADES	30
3.6	INTENSIDADE RELATIVA DA TURBULÊNCIA	31
3.7	INCERTEZA E CÁLCULO DO ERRO	32
3.7.1	Incerteza	32
3.7.2	Cálculo do Erro	32
4	RESULTADOS	33
5	CONCLUSÃO	44
	REFERÊNCIAS	45
	APÊNDICES	47
	APÊNDICE A – VALORES DE PRESSÃO TOTAL E VELOCIDADE AERODINÂMICA, POSIÇÃO A	48
	APÊNDICE B – VALORES DE PRESSÃO TOTAL E VELOCIDADE AERODINÂMICA, POSIÇÃO B	49
	APÊNDICE C – VALORES DE PRESSÃO TOTAL E VELOCIDADE AERODINÂMICA, POSIÇÃO C	50
	APÊNDICE D – VALORES DE PRESSÃO TOTAL E VELOCIDADE AERODINÂMICA, POSIÇÃO D	51
	APÊNDICE E – VALORES DE PRESSÃO TOTAL E VELOCIDADE AERODINÂMICA, POSIÇÃO E	52
	APÊNDICE F – VALORES DE PRESSÃO TOTAL E VELOCIDADE AERODINÂMICA, POSIÇÃO F	53
	APÊNDICE G – VALORES DE PRESSÃO TOTAL E VELOCIDADE AERODINÂMICA, POSIÇÃO G	54

1 INTRODUÇÃO

A análise do escoamento sobre uma esfera pode resultar em informações que nos ajudam a compreender melhor questões relacionadas ao mundo que nos rodeia, tais como: determinar os efeitos de detritos esféricos na atmosfera, os efeitos dos sulcos em bolas de golfe, o porquê de existirem esferas sinalizadoras fixas em cabos de proteção dos condutores de energia, entre outros. Logo, nos processos industriais se devem conhecer: as forças aerodinâmicas, a transferência de calor e massa dos corpos esféricos em três dimensões, tanto na presença de fluxos turbulentos, quanto em situações de escoamento externo (Tyagi et al., 2005; Spálenský; Rozehnal, 2017; Gómez-ortega et al., 2019).

O escoamento em um corpo esférico pode ser compreendido por meio da análise das suas características, sendo estas turbulentas ou laminares. A característica laminar existe em uma faixa de baixa intensidade, ou seja, para um número de Reynolds (Re) inferior a 20. Um anel de vórtice estacionário é observado em uma faixa de $20 < Re < 400$. Aumentando-se o Re até aproximadamente 1000, nota-se uma mudança no formato do anel de vórtice o qual tende a uma forma similar à de ferradura. Ao chegar a um Re alto, equivalente a $10^4 < Re \leq 10^6$. Tyagi et al. (2005) analisaram os seguintes parâmetros: o arrasto total, atrito na superfície da esfera e distribuição de pressão estática.

O estudo de uma esfera depende de outros fatores além do seu escoamento, estes são: as características da esfera utilizada (se sua superfície é lisa ou rugosa); a posição da esfera dentro do túnel de vento, a velocidade utilizada, entre outros. Já nos estudos com superfícies com sulcos, o foco é na análise da redução do arrasto aerodinâmico e no estudo do aumento da taxa de transferência de calor (Spálenský; Rozehnal, 2017).

Nos estudos a respeito de esferas as análises são montadas de forma não flutuante, com uma haste de apoio, sob um fluxo horizontal, porém, existem estudos de esferas suspensas como um pêndulo, presas com uma corda ou cabo, sob fluxo vertical. Nestes estudos utilizando um cabo como forma de fixação, a direção longitudinal do movimento é restringida devido à tensão no cabo e a ação da gravidade só afetará o plano transversal (Gómez-ortega et al., 2019).

Os estudos de objetos 3D em túnel de vento costumam ser utilizados para a análise aerodinâmica da asa de uma aeronave e dos vórtices gerados por ela. Em vista disso, o estudo de Hasan et al. (2020) fez análises em túnel de vento de três modelos de asa na Universidade de Al Ain, nos Emirados Árabes Unidos, observando os vórtices e as vibrações geradas em cada um dos modelos.

Assim como a asa de uma aeronave, as esferas também são vistas no dia a dia. No estudo de Gómez-ortega et al. (2019), foi realizado um trabalho com esfera transpassada por fio, com o objetivo de observar em pequena escala as esferas sinalizadoras posicionadas na rede de energia elétrica em cabos de proteção. Vale ressaltar também outro estudo importante com temática semelhante,

feito por Tyagi et al. (2005), tratando-se de uma esfera fixa em um túnel de vento fechado, cujo intuito foi analisar a influência da turbulência de fluxo livre em parâmetros, como: comprimento de Kolmogorov, taxa de dissipação e fatores de assimetria e planicidade.

Ademais, deve-se estudar os efeitos da turbulência em fluxo livre para adquirir mais conhecimento sobre o escoamento através de uma esfera, pois as interações entre fluido e esfera, na prática, estão sob turbulência (Tyagi et al., 2005). O presente estudo teve o objetivo de realizar a análise do escoamento sobre uma esfera em um túnel de vento subsônico de circuito aberto e averiguar o uso do equipamento tubo de Pitot para obtenção de dados. Os resultados foram comparados com os resultados obtidos pelo anemômetro de fio quente utilizado por Tyagi et al. (2005).

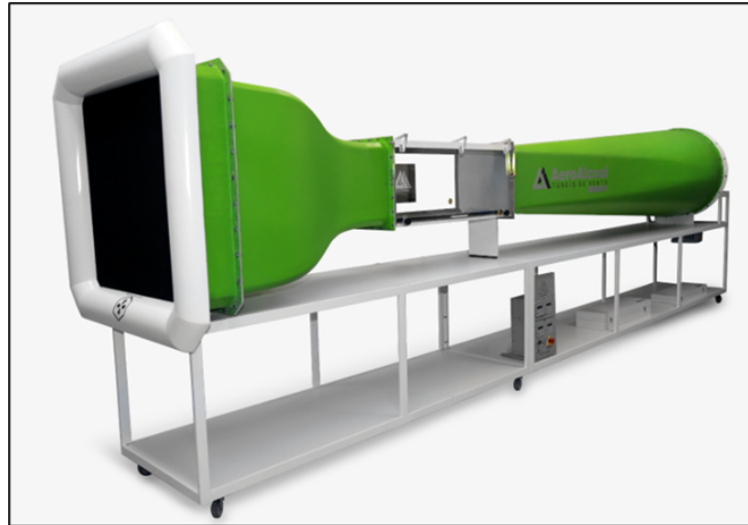
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Na França, os túneis de vento continuam sendo chamados de “*soufflerie*”, uma vez que as primeiras instalações usavam o sopro do ventilador como direção do fluxo de ar. Apesar do nome, os túneis de vento atuais possuem ventiladores que sugam o ar ao invés de soprar. Essa é considerada a primeira mudança no túnel de vento ao longo da história. (Chanetz, 2017). O túnel de vento também foi responsável por um dos pontos turísticos mais famosos da França, a Torre Eiffel, onde Gustave Eiffel (falecido em 1923) decretou que a arte também poderia ser produzida por engenheiros, assim, substituindo o talento.

Túneis de vento são instalações que podem variar de formato (circular ou retangular) e o vento pode ser produzido por ventiladores ou por ar comprimido. O principal foco dos túneis de vento é estudar e medir a ação do fluxo de ar em um sólido. Para realizar esses estudos, utiliza-se dos princípios de Isaac Newton (1687): as forças exercidas em um sólido imerso em um fluido e o fluido são iguais ou o sólido está se movendo através do fluido parado com uma certa velocidade (Chanetz, 2017).

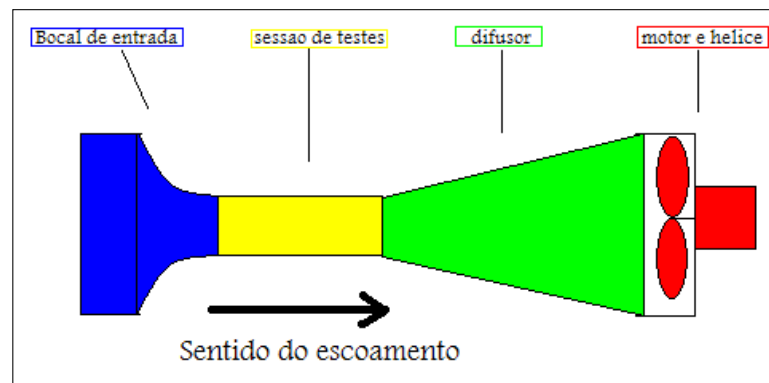
O túnel de vento promove um escoamento regulável, possibilitando o estudo de situações diversas que podem ocorrer quando o corpo de teste estiver em seu ambiente de trabalho. Os túneis de vento são divididos em abertos e fechados. Além disso, também são classificados referentes a sua velocidade de escoamento do fluido, o qual leva como unidade de escoamento o Mach. O Subsônico trabalha a 0,4 Mach, enquanto o supersônico alcança até 5 Mach (Lopes, 2018).

O túnel de vento subsônico de circuito aberto, Figura 1, é uma opção economicamente viável para projetos acadêmicos, visto que, um circuito aberto é menor, mais simples que o circuito fechado e economicamente favorável. As estruturas que compõem um túnel de vento aberto são: a câmara de estabilização, o bocal, a seção de testes, o difusor e o ventilador. O ar entra pela câmara de estabilização e passa pela colmeia que será responsável por deixar o escoamento mais uniforme. O bocal influenciará na qualidade do fluxo presente na seção de testes devido a sua geometria (Queiroga, 2023).

Figura 1 – Túnel de vento subsônico de circuito aberto (AA-TVSH1 (H1c)).

Fonte: Aeroalcool (2001).

A Figura 2 mostra que o ar entra pelo bocal cuja função é acelerar o ar, por isso possui o formato de um funil. Devido a diminuição da área ao longo do seu comprimento, a velocidade aumenta, essa afirmação pode ser descrita pela lei de conservação da massa ($m_1 \times v_1 \times A_1 = m_2 \times v_2 \times A_2$), onde (m_1) é a massa de entrada, (v_1) é a velocidade de entrada e (A_1) é a área inicial; (m_2) é a massa de saída, (v_2) é a velocidade de saída e (A_2) é a área saída; como a massa não se altera e a área de diminui, a velocidade deve aumentar para que a igualdade seja cumprida. (Fox et al., 2016)

Figura 2 – Esquema túnel de Vento.

Fonte: Soethe, Souza e Deyna (2011).

A seção de testes deve ser feita de material transparente para possibilitar a visão dos padrões de fluxo. A estrutura da seção de testes também deve ser capaz de suportar os equipamentos de medição e o modelo de testes. (Soethe; Souza; Deyna, 2011). O difusor tem a função de desacelerar

a velocidade do fluxo de ar que sai do túnel de vento, assim, recuperando a pressão estática antes de sair do sistema e recircular. Em túneis de vento do tipo sugador, utiliza-se o difusor com ângulo de abertura baixo (Carminatti; Konrath, 2019).

Dentro da seção de testes, costuma-se utilizar um medidor de pressão ou velocidade. O anemômetro de fio quente é um equipamento utilizado para realizar a medição da velocidade do escoamento na área posterior ao corpo de teste onde se situa o escoamento turbulento, pois possuem a capacidade de medir flutuações de velocidade e mudanças rápidas e fluxos pulsantes (Ligeza, 2022). Outro equipamento que também é utilizado para determinar a velocidade de um fluido de forma indireta é o tubo de Pitot, pois funciona como um sensor de pressão estática e dinâmica. Silveira e Possamai (2020) ressaltam a importância do tubo de Pitot na área da aeronáutica devido ao seu uso para medições de velocidade de voo. O tubo de Pitot é um equipamento que possibilita obter valores da velocidade ao se conectar com os instrumentos estáticos: altímetro, indicador de velocidade do ar e indicador de velocidade vertical, estes interpretam a pressão do ar durante a subida e descida do avião.

O tubo de Pitot faz a relação entre a velocidade dinâmica e o diferencial de pressão. Para isso, leva-se em conta três tipos de pressão: estática, dinâmica e de estagnação. A pressão estática é a pressão termodinâmica que atua no fluido; a pressão dinâmica é decorrente da transformação de energia cinética do fluido em pressão por meio da desaceleração desse fluido; a pressão de estagnação é a soma da pressão estática com a pressão dinâmica. Para correlacionar a pressão com a velocidade, utiliza-se a equação de Bernoulli, por isso, além da pressão, é necessário determinar a massa específica e a pressão estática. Esse instrumento de medição pode ser utilizado em instalações permanentes como sensores de fluxo ou como monitoramento portátil e serve como uma alternativa a placa de orifício, pois apresenta uma pressão de 0,5% a 5% de fundo de escala, diferentemente da placa de orifício, o tubo de Pitot pode ser instalado em tubulações já existentes, (Balbinot; Brusamarello, 2019). O tubo de Pitot pode ser interpretado como um transdutor que transforma velocidade de escoamento em pressão diferencial, o valor da pressão diferencial é utilizado para obter a velocidade na posição em que se encontra a ponta do tubo de Pitot, este instrumento costuma ser utilizado em aeronaves, como pode ser visto na Figura 3 e em medição da velocidade do ar em carros de corrida, entre outros, (Aguirre, 2013).

Figura 3 – Posicionamento do tubo de Pitot em uma Aeronave.

Fonte: Hangar33 (2014).

O anemômetro de fio quente é utilizado em condições de variação de fluxo. Um fio é aquecido eletricamente e posicionado na trajetória do fluxo, a velocidade pode ser obtida pela transferência de calor entre o fio e o fluxo, (Balbinot; Brusamarello, 2019). O anemômetro de fio quente pode ser composto de tungstênio ou de platina e o seu diâmetro varia de $1,5 \mu\text{m}$ a $15 \mu\text{m}$. Podem operar de duas formas: a corrente constante ou a temperatura constante, neste caso, quando a temperatura do fio estabiliza, o calor gerado no fio por efeito Joule será igual ao calor trocado por convecção na sua superfície, sabe-se que o coeficiente de troca de calor depende da velocidade, desse modo, o anemômetro de fio quente consegue obter a velocidade correlacionada a temperatura, (Aguirre, 2013).

Os principais fatores que influenciam na escolha do medidor de fluxo são o desempenho desejado, as propriedades do fluxo a ser medido, requerimentos da instalação, o ambiente para a instalação e o custo almejado para o projeto. Portanto, antes de escolher o instrumento de medição deve-se levar em conta o objetivo do estudo, o custo benefício, os valores de entrada que se deseja trabalhar e os valores de saída que seja obter com o instrumento, (Balbinot; Brusamarello, 2019).

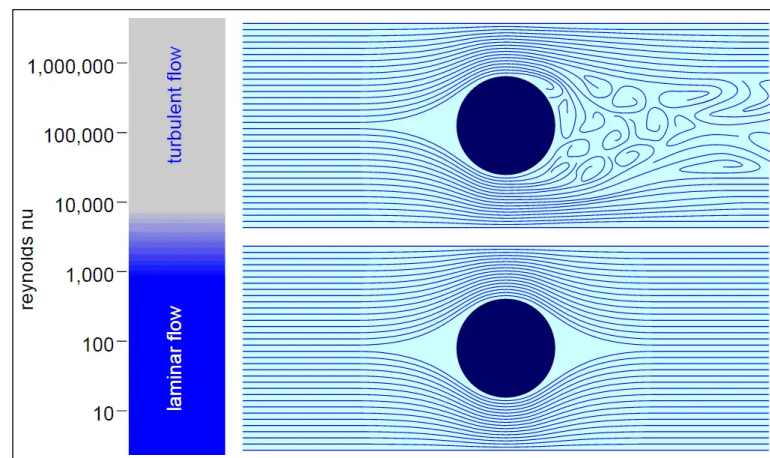
O escoamento ao redor de um corpo imerso é caracterizado por ser um escoamento externo. Nesse tipo de escoamento, o fluido de trabalho é considerado viscoso, o que resulta na influência da tensão viscosa e na força de cisalhamento viscoso próximo à superfície. Por outro lado, longe do corpo, o fluido de trabalho é considerado não viscoso. Assim surge a teoria da camada limite (White, 2010).

O estudo de Prandtl em 1904 deu origem à teoria da camada limite ao mostrar como é

possível estudar escoamentos ao levar em consideração os efeitos viscosos. Prandtl utilizou de experimentos para mostrar que o escoamento ao redor de um corpo possui duas regiões: a camada limite ao redor do corpo e uma região externa ao corpo onde as forças viscosas são desprezadas (Freire, 2012). Essa teoria auxilia no estudo sobre uma placa plana, como ocorreu no estudo de Lacerda e Amorim (2001), e no estudo de corpos rombudos, como visto no artigo de Cardona e Lago (2022), que usa a análise do escoamento para obter resultados.

O Número de Reynolds Re do escoamento externo em corpos redondos pode ser obtido pelo comprimento característico o diâmetro externo D multiplicado pela velocidade do fluido V e dividido pela viscosidade do fluido ν , (Çengel; Cimbala, 2007). Observa-se que, o fluido envolve a esfera na parte frontal, mas, posteriormente, acaba se desprendendo da superfície da esfera em velocidades e Re elevados, formando uma região de separação na parte posterior da esfera. O escoamento nessa região é caracterizado por vórtices e áreas de pressões muito mais baixas do que a pressão no ponto de estagnação (onde a velocidade do fluxo é nula e o sentido do movimento é revertido). Além disso, observa-se que em um intervalo alto, $10^4 < Re < 10^6$, o escoamento da camada limite será laminar, porém, na região atrás da esfera será altamente turbulento com uma esteira ampla turbulenta (Çengel; Cimbala, 2007). A Figura 4 apresenta o escoamento laminar e turbulento com relação ao Número de Reynolds.

Figura 4 – Representação do escoamento turbulento e laminar com relação ao aumento do Re .



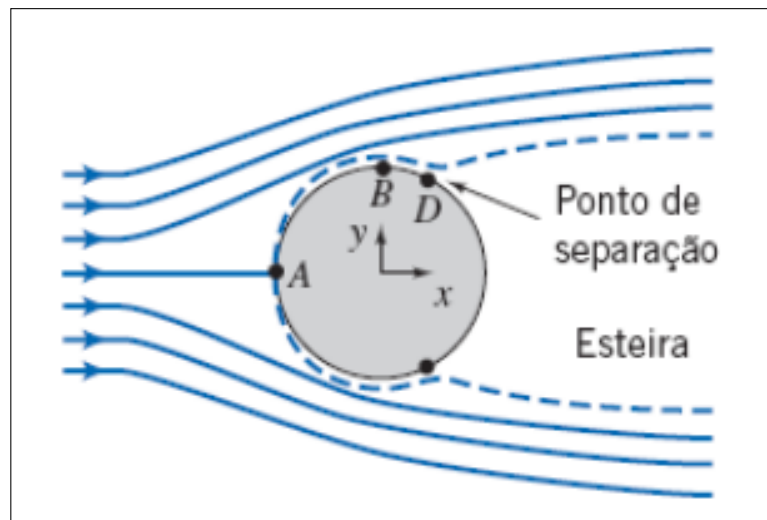
Fonte: Connor (2020).

O comportamento da camada limite, turbulento ou laminar, influencia de forma direta no perfil de velocidades. No regime laminar as parcelas de fluido se movem em uma trajetória bem definida, além disso, o escoamento é viscoso, onde a viscosidade diminui a tendência de turbulência. Por sua vez, no regime turbulento a quantidade de movimento se dá por meio de flutuações simultâneas que ocorrem no sentido do escoamento e no sentido perpendicular ao escoamento. Essas flutuações fazem com que a energia de escoamento penetre mais facilmente em camadas mais próximas da

superfície, assim, quanto mais próxima a superfície, mais a velocidade se aproxima a do escoamento livre. Esse fato é observado de forma inversa na região laminar, pois quanto mais próxima da superfície do objeto, mais a velocidade irá se aproximar de zero (Netto; R.; Souza, 2013).

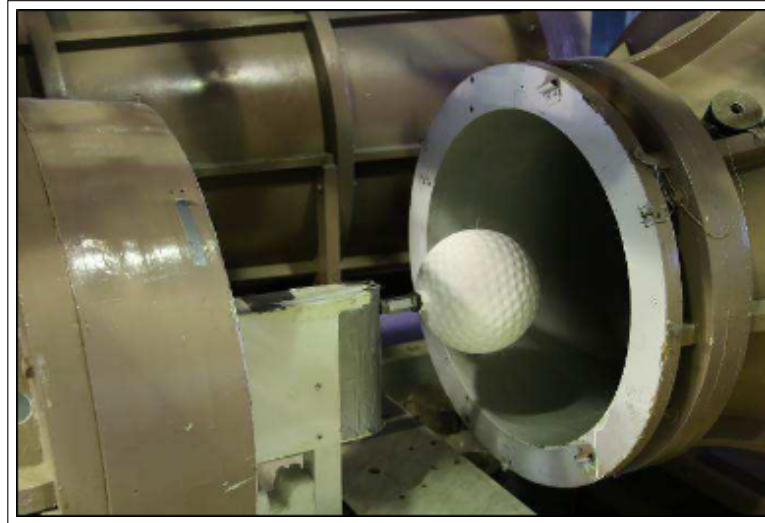
O escoamento em esferas é caracterizado por ter uma região de desprendimento do fluido na região de esteira, formando vórtices para um $Re > 90$ (Çengel; Cimbala, 2007). A Figura 5 exemplifica o escoamento viscoso ao redor de uma esfera. O ponto A é onde se encontra a velocidade de estagnação (próximo ou igual a zero), as velocidades nos pontos próximos ao ponto A são caracterizadas por serem mais baixas do que a velocidade do fluxo. A velocidade no ponto B sobre a borda externa da camada limite é maior ou igual ao valor da velocidade do fluxo. O ponto D é o ponto de separação onde se inicia a região de esteira, onde o fluido sai de uma região de baixa pressão (Ponto B) para uma região de alta pressão, essa variação de pressão será a causa para a diminuição da velocidade na parte posterior da esfera (Fox et al., 2016).

Figura 5 – Escoamento viscoso ao redor de uma esfera.



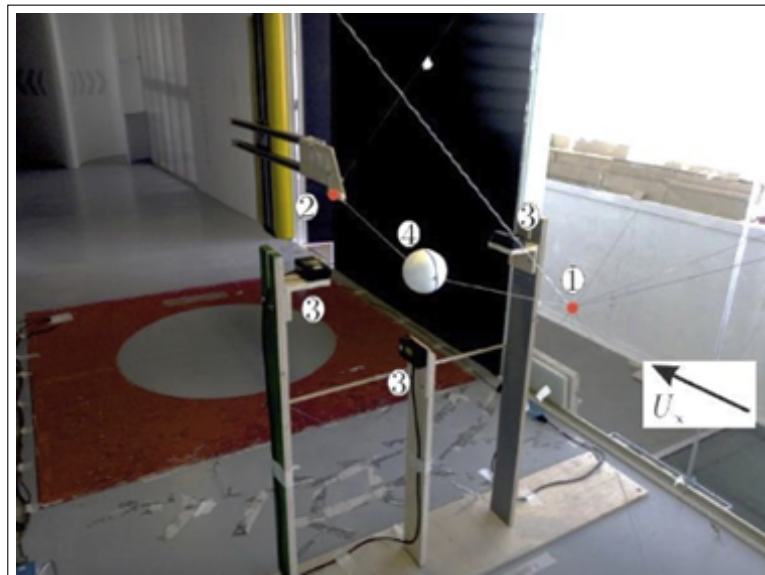
Fonte: Fox et al. (2016).

O estudo sobre esferas com sulcos de Spálenký e Rozehnal (2017), conforme apresentado na Figura 6, trabalhou com alguns detalhes diferentes: suas esferas possuíam detalhes na superfície similares às bolas de golfe, o túnel de vento era fechado, porém, possuía 60 cm de diâmetro e sua velocidade variava de 2 a 45 m/s. Além disso, a esfera utilizada tinha 21,6 cm de diâmetro e possuía 392 sulcos. Os sinais coletados foram processados por um computador e a sua força de arrasto foi medida utilizando as velocidades do fluxo livre e com números de Reynolds (Re) indo de 5×10^4 até 4.2×10^5 . Os resultados obtidos pelos autores mostraram como as saliências na superfície da esfera possibilitam uma curva de arrasto menor do que as esferas sem sulcos.

Figura 6 – Esquema de teste sobre esferas com sulcos.

Fonte: Spálenský e Rozehnal (2017).

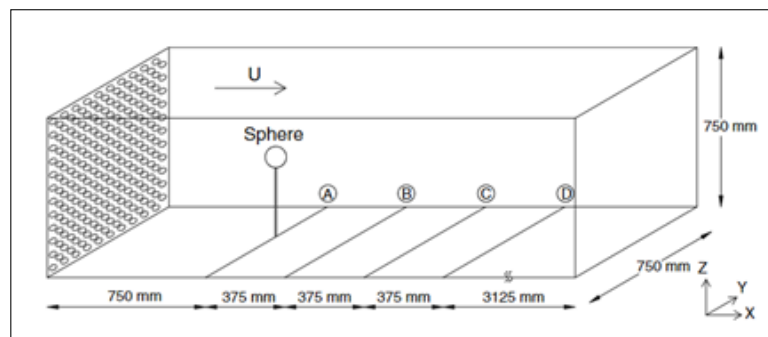
Os testes experimentais realizados pelos autores Gómez-ortega et al. (2019) tiveram uma estrutura bastante diferenciada, pois as esferas testadas foram transpassadas por um fio 7. Além disso, fez-se um teste com esferas lisas e rugosas, porém, esfera com rugosidade difere-se da esfera de golfe. O túnel de vento possuía 2,2 m de diâmetro, chegando a 32 m/s de velocidade, e as esferas possuíam 6,0 cm de diâmetro. Os dados foram obtidos utilizando um anemômetro de fio quente. O estudo mostrou que o movimento do cabo pode fazer com que ele acabe quebrando ao longo dos experimentos. Logo, deve-se levar em conta o comprimento do cabo, sua curvatura, a massa da esfera e a sua rugosidade, além da velocidade do vento.

Figura 7 – Esquema de teste experimental em esferas lisas e rugosas.

Fonte: Gómez-ortega et al. (2019).

Tyagi et al. (2005), utilizaram um túnel de vento fechado com uma seção de teste de dimensões 75x75cm e uma esfera de material polimérico com 10,2 cm de diâmetro, posicionada no interior do túnel de vento através de uma haste de alumínio com 6 mm de diâmetro fixada no lado externo da seção de teste, conforme mostrado na Figura 8. Além disso, os autores realizaram o experimento para uma faixa de Re de $3,3 \times 10^4$ até 6×10^4 . Os valores de velocidade foram obtidos utilizando um anemômetro de fio quente, sendo total de dados obtidos pelo anemômetro de 262,144 para cada medição. Tyagi et al. (2005) utilizaram as velocidades para obter a velocidade rms U_{rms} e a intensidade relativa da turbulência Tu .

Figura 8 – Esquema de testes em esferas realizados em um túnel de vento fechado.



Fonte: Tyagi et al. (2005).

Os resultados obtidos mostraram que a velocidade média no tempo no ponto central do plano é ligeiramente menor do que a velocidade média do fluxo. A velocidade rms e a intensidade de turbulência variaram a partir da utilização (ou não utilização) da colmeia, resultando em um valor maior quando a colmeia não está presente (Tyagi et al., 2005). O estudo de Tyagi et al. (2005) será utilizado como ponto de comparação de resultados e para a montagem da metodologia do presente estudo.

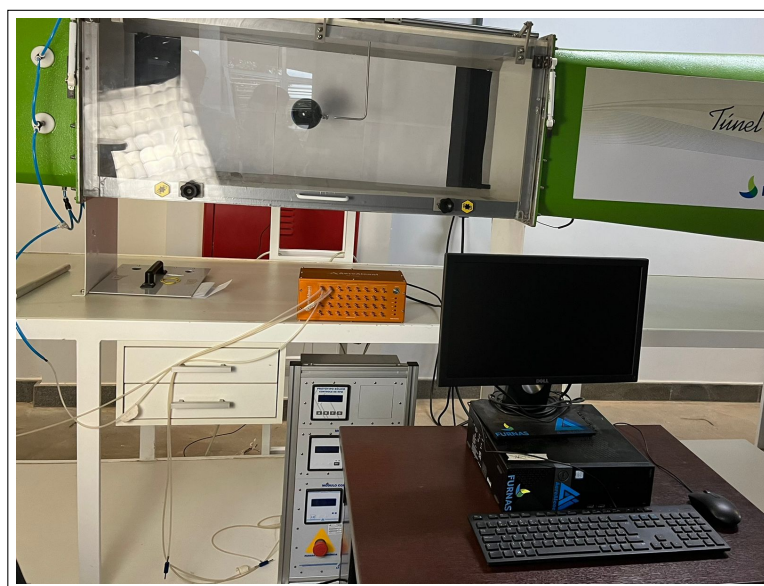
3 METODOLOGIA

Ao analisar os artigos expostos no Capítulo "Revisão Bibliográfica", observou-se que o artigo de Tyagi et al. (2005) é o que mais se assemelha às condições de teste disponíveis em laboratório, visto que a esfera a ser analisada no presente estudo possui um diâmetro de 89,5 mm, sendo próximo ao valor do diâmetro da esfera utilizada por Tyagi et al. (2005), que foi de 102 mm. Além disso, a velocidade máxima do túnel de vento utilizado por Tyagi et al. (2005) se assemelha à velocidade do presente trabalho.

3.1 BANCADA EXPERIMENTAL

A bancada experimental usada estava composta por: um túnel de vento subsônico de circuito aberto (Figura 1), cuja seção de testes utilizou-se uma haste de apoio (Figura 10), uma esfera de 89,5 mm de diâmetro e um tubo de Pitot (Figura 14) acoplado a uma base graduada (Figura 11). Para a obtenção dos dados, utilizou-se um módulo de pressão 32x (Figura 12), além de um computador para a análise e verificação dos dados obtidos utilizando o *software* 'Aeroalcool – Túnel de Vento'. A Figura 9, representa a bancada de testes.

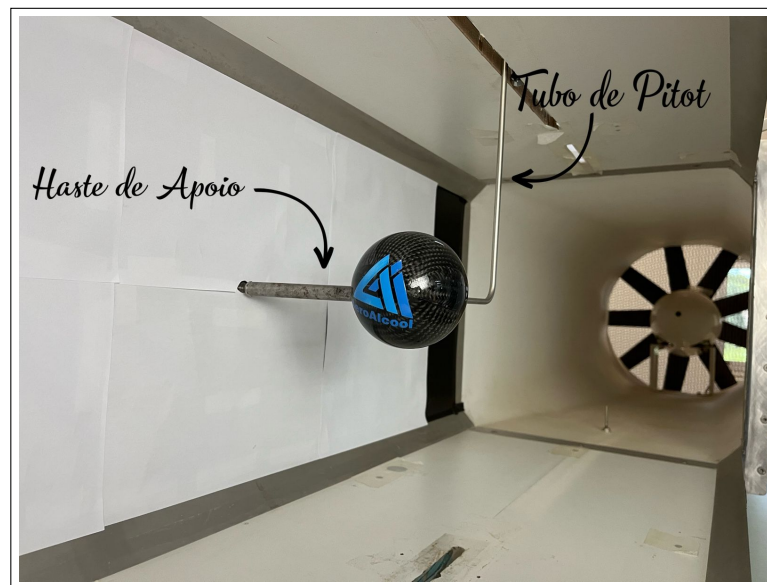
Figura 9 – Bancada de testes.



Fonte: Próprio autor (2024).

A Figura 10, representa a haste de apoio de 60,0 cm de comprimento em perpendicular a parede do túnel de vento e ao tubo de Pitot. A haste está acoplada à esfera permitindo que esta esteja localizada no centro da seção de testes. Para evitar a interferência de vibrações e a movimentação da haste ao longo do experimento devido a velocidade do fluido, utilizou-se de uma balança de três componentes externa a seção de testes. Como abordado por Fox et al. (2016) esse posicionamento é o ideal para a realização dos testes, visto que, as paredes do túnel de vento também interferem no fluxo do escoamento, uma vez que, quanto mais próximo a parede do túnel, mais a velocidade se aproxima da velocidade de estagnação, zero.

Figura 10 – Esfera acoplada à haste de apoio.



Fonte: Próprio autor (2023).

A posição vertical do tubo de Pitot é controlada por uma base graduada cujo menor valor é de 0,1 cm com uma incerteza de $\pm 0,05$ cm, Figura 11. A haste graduada encontra-se posicionada sobre a seção de ensaio, na parte exterior ao túnel de vento. Devido a essa posição, o tubo de Pitot sofre a interferência da força gravitacional, a qual, irá interferir na exatidão do posicionamento do tubo de Pitot na escala de mm.

Figura 11 – tubo de Pitot com base graduada.

Fonte: Aeroalcool (2001).

A pressão medida pelo tubo de Pitot é interpretada pelo módulo de pressão, AA-TVCR3, de 32 canais para medida, Figura 12, o qual, possui integração com o software ‘Aeroalcool – Túnel de Vento’, assim sendo possível obter os dados da pressão estática, pressão dinâmica, massa específica do ar e velocidade do escoamento no interior do túnel de vento.

Figura 12 – Módulo de pressão.

Fonte: Aeroalcool (2001).

3.2 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

O túnel de vento utilizado possui uma seção de testes de 462 mm x 462 mm e comprimento de 1200 mm, além disso, possui duas telas uniformizadoras de escoamento, (Franco; Colvero, 2023), ou seja, quebram os grandes vórtices oriundos do ambiente externo, como complemento, a colmeia alinha o escoamento (Queiroga, 2023). Os testes foram realizados com a esfera posicionada no

centro da seção de testes, ou seja, a 600 mm de distância da seção convergente, onde a turbulência é razoavelmente alta, visto que a seção convergente tem como função acelerar o escoamento incompressível para que o fluxo entre na seção de testes com a velocidade desejada.

Comparando as informações fornecidas pelos fabricantes do tubo de Pitot e do Anemômetro de fio quente, observa-se que o anemômetro de fio quente da marca INSTRUTEMP ITAN-740 com capacidade de coletar dados apenas de velocidades baixas (0,1 a 25,0 m/s), sua haste chega até 210 mm de comprimento e apresenta um sistema de desligamento automático de 10 em 10 minutos (INSTRUTEMP, 2013). Além disso, o anemômetro de fio quente custa em média R\$ 1.500,00 a R\$ 4.000,00 e os seus parâmetros de medição variam em relação a sua qualidade e demanda cuidado com o manuseio da cavidade de entrada da sonda, pois o fio quente pode romper durante o uso. Em comparação, o tubo de Pitot da marca TESTO são feitos de aço inoxidável, são resistentes e custam em média R\$ 1.400,00 a R\$ 4.000,00, variam de 360 mm a 1.000 mm de comprimento da haste, consegue medir uma faixa de velocidade de 1,0 m/s a 100 m/s sendo ideal para altas velocidades, mas também, consegue medir dados negativos de pressão.

Optou-se por utilizar o Tubo de Pitot como instrumento de medição, pois a Escola de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Goiás encontrava-se sem anemômetros disponíveis no momento devido ao fato dos anemômetros de fio quente sempre sensíveis e quebrarem com facilidade. Os pesquisadores não possuíam data para a chegada dos novos anemômetros, além disso, existia a possibilidade do instrumento quebrar durante os experimentos, assim, os testes ficariam estagnados até que novos anemômetros chegassem a unidade. Portanto, decidiu-se testar a eficiência do tubo de Pitot para a medição de velocidades uma vez que são instrumentos de maior durabilidade.

A medição de pressão foi realizada utilizando um tubo de Pitot em 26 pontos (N), obtendo 828 dados por ponto. O cálculo para obter o Número de Reynolds Re e a Viscosidade do ar (ν) é abordada no cálculo para obter o Re . Para escolher a velocidade \bar{U} , levou-se em consideração a maior velocidade utilizada por Tyagi et al. (2005) de 10 m/s; visto que o fabricante Testo (2024) do tubo de Pitot informa que o instrumento possui um melhor desempenho em velocidades altas. A temperatura T de 23 °C foi a temperatura ambiente na Cidade de Goiânia, Goiás (Goiás, 2019). Todos os valores utilizados para os cálculos estão na Tabela 1.

Tabela 1 – Parâmetros utilizados para a realização dos cálculos

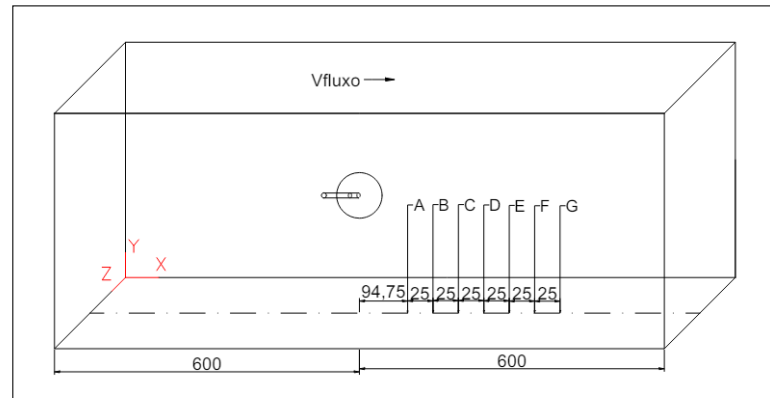
N	Re 10^4	ν 10^5 (m^2/s)	\bar{U} (m/s)	T (°C)	D (mm)
26	5,8	1,50	10	23	89,5

Fonte: Próprio autor (2023).

Variou-se a posição do tubo de Pitot no eixo X em 7 posições diferentes com um distanciamento de 25 mm entre si medidos a partir da circunferência da esfera, utilizando uma régua como

aparelho de medição. A haste responsável por fixar a esfera, encontra-se presa ao centro da parede da seção de testes, possibilitando posicionar a esfera na metade do eixo Z, de forma que a esfera fique com o centro posicionado na linha de simetria, como visto nas Figuras 13 e 10. O espaçamento igualitário entre as posições de medição tem como objetivo obter uma análise mais homogênea da turbulência na seção de testes.

Figura 13 – As sete posições de teste no eixo X do túnel de Vento



Fonte: Próprio autor (2023).

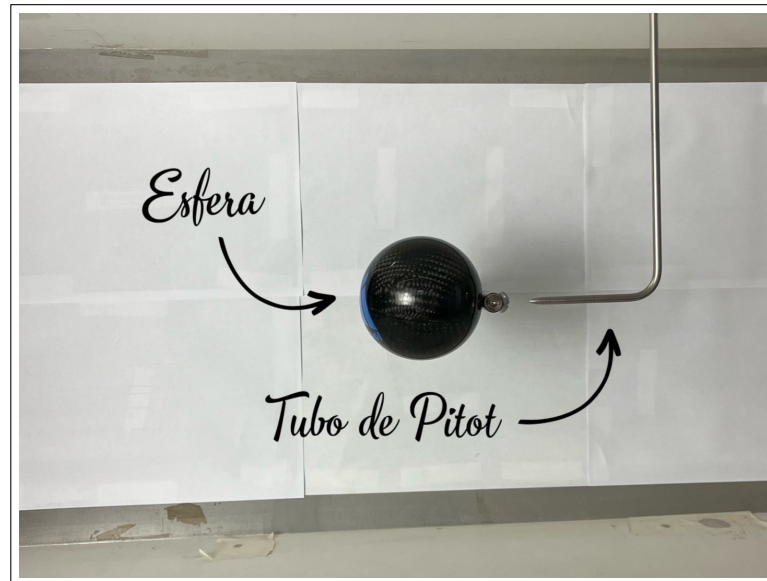
As 7 posições no eixo X representadas na Figura 13 representam as distâncias expostas na Tabela 2 como a soma do raio da esfera e do distanciamento de 25 mm. Utilizou-se do furo rosqueado presente na esfera feito para acoplar o suporte como ponto de referência para o centro da esfera. Visto que a esfera veio com o furo rosqueado centralizado especificado pelo próprio fabricante, Aeroalcool (2001).

Tabela 2 – As posições de teste

Sigla	Posição (mm)
A	94,75
B	119,75
C	144,75
D	169,75
E	194,75
F	219,75
G	244,75

Fonte: Próprio autor (2023).

A Figura 14 apresenta a montagem real na área de testes com a esfera posicionada no centro da seção de testes do túnel de vento e o tubo de Pitot a uma distância de 94,75 mm da esfera. Todas as aberturas existentes na área de testes foram seladas para que não houvesse interferência do ar externo no ensaio.

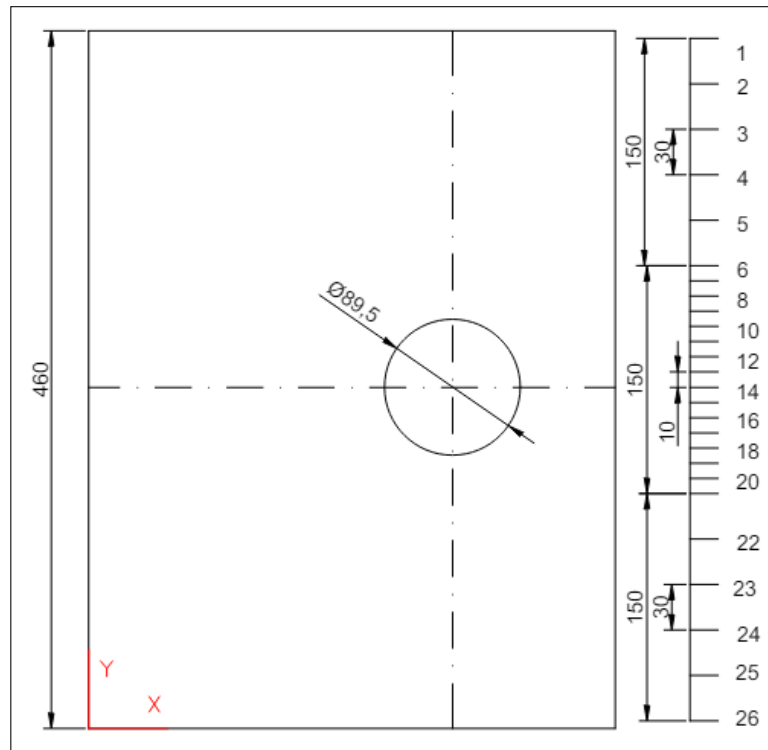
Figura 14 – Posição da esfera e tubo de Pitot dentro da área de testes.

Fonte: Próprio autor (2023).

Para estipular o distanciamento dos pontos de medição do tubo de Pitot no eixo Y, levou-se em consideração o diâmetro da esfera e a altura da seção de testes. A esfera ocupa apenas o espaço de 89,5 mm da altura da seção de testes do túnel de vento, enquanto a altura total da seção de testes é de 462 mm. Portanto, a região de turbulência representaria apenas 21% dos dados ao realizar uma divisão uniforme entre os pontos. Diante disso, optou-se por adotar dois espaçamentos distintos para as medições com o tubo de Pitot. As posições de medição anterior e posterior à esfera foram espaçadas em 30 mm, enquanto o espaçamento na parte posterior da esfera, onde a região de turbulência se encontra, foi de 10 mm entre as posições do tubo de Pitot, conforme ilustrado na Figura 15. Desse modo, a região de turbulência representa, aproximadamente, 58% dos dados obtidos.

A haste graduada do tubo de Pitot estava localizada na parte superior do túnel de vento, portanto, necessitou-se utilizar um apoio para alcançar haste, nesse caso, um banco de madeira, por não ser o apoio ideal, o experimento poderia colocar em risco a integridade física do pesquisador. Além disso, devido ao ruído produzido pelo túnel de vento, fez-se necessário utilizar um abafador sonoro do fabricante *3M Muffler* para evitar riscos a audição do pesquisador.

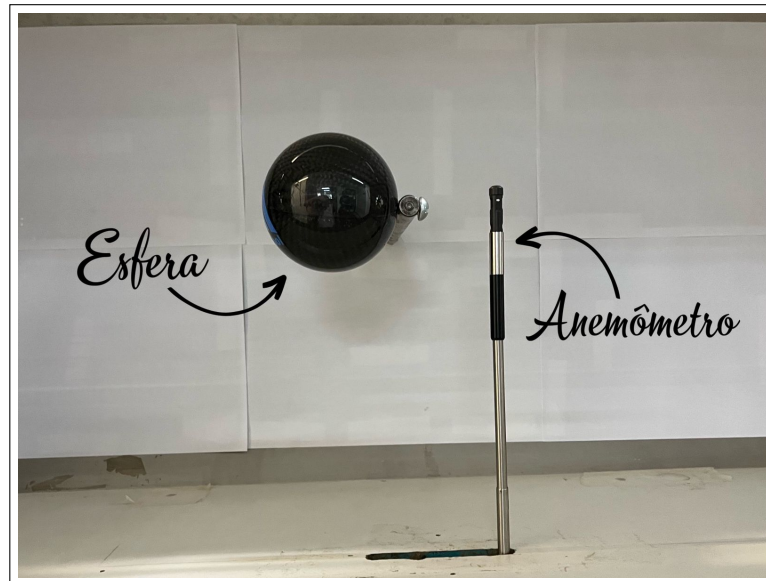
Figura 15 – Esquema das posições do tubo de Pitot



Fonte: Próprio autor (2023).

Apesar de possuir as características semelhantes a este experimento, o estudo de Tyagi et al. (2005) possui algumas discordâncias, como o comprimento e altura da seção de testes, além do tamanho do diâmetro da esfera utilizada e o instrumento de medição utilizado, sendo este um anemômetro de fio quente. Portanto, devido a essas discrepâncias do estudo de Tyagi et al. (2005) e do presente estudo, optou-se por realizar um experimento utilizando o anemômetro de fio quente com o objetivo de possuir dados comparativos no mesmo ambiente, utilizando o mesmo túnel de vento e o mesmo objeto de testes, a esfera.

Realizou-se a medição das velocidades utilizando um anemômetro de fio quente da marca INSTRUTEMP ITAN-740 para a posição A, Figura 13, no eixo x. O objetivo era ter um parâmetro de comparação a mais com o intuito de identificar se as diferenças de ambiente e comprimento poderiam afetar na comparação dos dados, além de comparar o Anemômetro com o tubo de Pitot no mesmo ambiente de testes. A Figura 16 é referente ao ensaio utilizando o Anemômetro de fio quente. A figura 16 mostra que o anemômetro foi posicionado na parte inferior da seção de testes, ou seja, ao contrário do tubo de Pitot. Esse posicionamento ocorreu devido a pré-existência do furo utilizado para inserir o anemômetro na seção de testes. Posicionar o anemômetro na parte inferior da seção de testes não irá influenciar nos resultados, pois a seção é simétrica, portanto, o fluxo na parte superior deve ser o mesmo fluxo na parte inferior da seção.

Figura 16 – Posicionamento do Anemômetro de fio quente em relação a esfera.

Fonte: Próprio autor (2023).

Os dados coletados com o tubo de Pitot e o Anemômetro de fio quente foram utilizados para calcular a velocidade como abordado nas próximas seções deste capítulo.

3.3 CÁLCULOS PARA OBTENÇÃO DO NÚMERO DE REYNOLDS

Como visto no Capítulo 2, o Número de Reynolds (Re) do escoamento externo em corpos redondos é obtido pelo diâmetro externo (D), a velocidade do fluido (\bar{U}) e pela viscosidade cinemática do fluido (ν), Equação 3.1, (Çengel; Cimbala, 2007).

$$Re = \frac{D\bar{U}}{\nu} \quad (3.1)$$

A viscosidade cinemática (ν) é a relação entre a viscosidade absoluta (μ) e a massa específica do fluido (ρ). ν pode ter como unidade m^2/s ou stoke, onde 1 stoke equivale a $0,0001 m^2/s$. Em geral, a viscosidade dos gases é causada pelas colisões entre as moléculas. Ao elevar a temperatura de um gás, a viscosidade também aumenta, isso acontece devido as forças intermoleculares nos gases serem desprezíveis, portanto, ao elevar a temperatura, as moléculas se movem de forma aleatória e com velocidades mais altas, (Çengel; Cimbala, 2007). A equação de *Sutherland* expressa a viscosidade dos gases em relação a temperatura, onde percebe-se que a viscosidade dos gases é proporcional a raiz quadrada da temperatura, (Fox et al., 2016). Assim, a viscosidade cinemática é independente da pressão sob pressões baixas e moderadas, portanto, as variações de pressão podem ser desprezadas, (Çengel; Cimbala, 2007).

Portanto, decidiu-se que utilizar a temperatura para encontrar a viscosidade cinética seria a melhor opção. Sabe-se que a velocidade dentro do túnel de vento não se altera de forma significativa devido a variação da pressão não ser significativa se comparado a pressão atmosférica. Assim, encontrou-se a temperatura média de Goiânia, Goiás, a qual, segundo o site Goiás (2019), é de 23 °C.

Para correlacionar temperatura e viscosidade cinemática, utilizou-se a tabela disponibilizada na literatura de White (2010), porém, a tabela não possuía valor de viscosidade cinemática para a temperatura de 23°C, portanto, fez-se necessário realizar a interpolação dos valores utilizando o trecho da tabela disponibilizada por White (2010) destacado na Tabela 3, onde o valor de 23°C encontra-se entre as temperaturas de 20°C e 50°C.

Tabela 3 – Viscosidade do ar a 1 atm

T (°C)	$\nu \times 10^{-5} (m^2/s)$
-40	0,99
0	1,33
20	1,50
50	1,79

Fonte: (White, 2010).

Observa-se que o valor de 23 °C situa-se entre os valores de 20 °C e 50 °C da Tabela 3. Portanto, o método de interpolação linear foi utilizado para obter o valor da viscosidade do ar para a temperatura desejada, visto que o método consiste em obter novos pontos de dados utilizando pontos previamente conhecidos, Equação (3.2), onde ν é a viscosidade desejada. Obteve-se o resultado de $1,50 \times 10^{-5} m^2/s$ para ν .

$$\frac{23 - 20}{50 - 20} = \frac{\nu - 1.50 \times 10^{-5}}{1.79 \times 10^{-5} - 1.50 \times 10^{-5}} \quad (3.2)$$

O valor da viscosidade cinemática foi aplicado na Equação 3.1 em conjunto com uma velocidade de 10 m/s, valor utilizado no trabalho de Tyagi et al. (2005) e com o diâmetro da esfera de 89,5 mm. O resultado obtido para Re foi de $5,8 \times 10^4$. Observa-se que o valor calculado para o Re está dentro do período de transição onde é possível obter valores laminares e turbulentos durante o experimento como afirmado por Çengel e Cimbala (2007).

Após encontrar o Re , estabelecer as distâncias no eixo X e no eixo Y para cada ponto de medição, bloquear quaisquer possíveis saídas de ar dentro da seção de testes. Além de conferir se os ductos que realizam a conexão entre o bocal do túnel de vento e do tubo de Pitot estavam devidamente conectados ao módulo de pressão e se o software estava conectado ao módulo de pressão, pode-se iniciar os testes e coletar os valores de pressão para utilizar no cálculo da velocidade RMS.

3.4 VELOCIDADE RMS

A Equação (3.3) pode servir para o cálculo do escoamento laminar e turbulento, onde (ρ) é a massa específica do fluido, (μ) é a viscosidade absoluta, ∇p é o gradiente de pressão, g é a gravidade em m/s^2 e $\nabla^2 V$ é o Laplaciano que representa a viscosidade cinemática do fluido.

$$\rho \frac{\partial \mathbf{V}}{\partial t} = -\nabla p + \rho \mathbf{g} + \mu \nabla^2 \mathbf{V} \quad (3.3)$$

No entanto, escoamentos turbulentos possuem flutuações de velocidade e pressão. Não existem equações matemáticas que possam lidar com variáveis flutuantes instantâneas, portanto, pensando em solucionar esse problema, Reynolds em 1895 reescreveu a equação (3.3), utilizando termos em médias temporais para as variáveis turbulentas, (White, 2010). Assim, pode-se obter a equação (3.4), onde (\bar{U}) é o valor médio temporal da velocidade e U são os valores da velocidade no tempo.

$$\bar{U} = \frac{1}{T} \int_0^T U dt \quad (3.4)$$

Sabe-se que a flutuação de velocidade U' em um escoamento turbulento também é definida como o desvio da velocidade em relação ao seu valor médio, Equação (3.5), (Wendt, 2015). Sendo a diferença entre velocidade média do fluxo (U) e a velocidade média temporal (\bar{U}) a qual é a velocidade variando no tempo (Tyagi et al., 2005).

$$U' = U - \bar{U} \quad (3.5)$$

A flutuação da velocidade possui um valor médio nulo, porém, a média do quadrado (\bar{U}'^2) possui uma flutuação não nula, (White, 2010). Portanto, Substituindo a Equação (3.5) na Equação (3.4), é possível obter a Equação (3.6).

$$\bar{U}'^2 = \frac{1}{T} \int_0^T U'^2 dt \quad (3.6)$$

O valor do quadrado das velocidades equivale ao desvio padrão. Logo, tem-se a Equação (3.7), cujas variáveis são a média do quadrado da velocidade (u_{rms}^2), o número de dados coletados por ponto (N), a velocidade do fluxo U e a velocidade variando no tempo (\bar{U}).

$$u_{rms}^2 = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T \frac{(U - \bar{U})^2}{N - 1} dt} \quad (3.7)$$

As flutuações de velocidade costumam ser representadas de forma adimensional, logo, pode-se simplificar a equação acima, obtendo-se assim a equação (3.8), onde U^* é denominada de velocidade de atrito, apesar de não ser, de fato, uma velocidade do escoamento, (White, 2010).

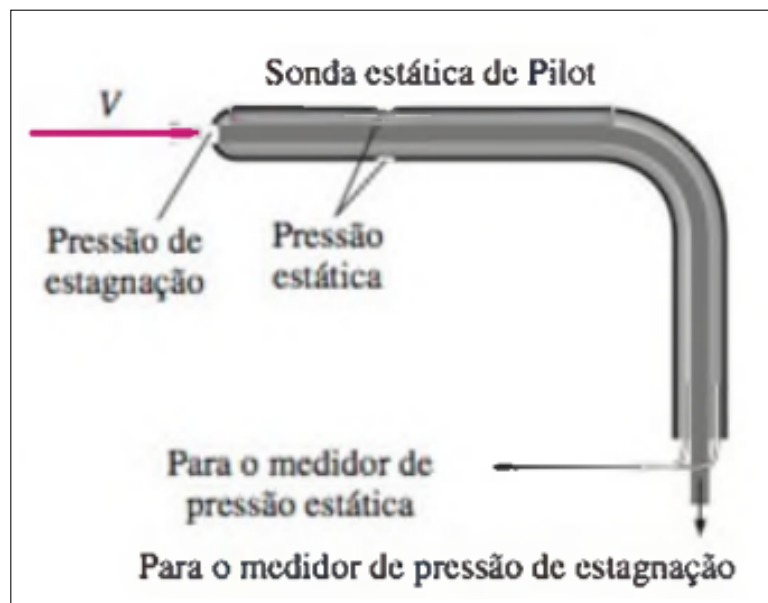
$$\bar{U}'^2 = \frac{U}{U^*} \quad (3.8)$$

Encontrar a velocidade rms é de devida importância, pois será utilizada para encontrar a intensidade relativa da turbulência dos experimentos conduzidos no presente artigo.

3.5 CÁLCULO PARA A OBTENÇÃO DAS VELOCIDADES

O tubo de Pitot consiste em um tubo duplo e fino, alinhado ao escoamento e conectado a um medidor de pressão diferencial. A Figura 17 mostra o tubo interno que permanece aberto para o escoamento e mede a pressão de estagnação; o tubo externo é vedado na ponta, mas possui orifícios na lateral da parede externa onde mede a pressão estática, (Çengel; Cimbala, 2007).

Figura 17 – Esquema tubo de Pitot.



Fonte: (Çengel; Cimbala, 2007).

Segundo Çengel e Cimbala (2007), a sonda estática do Pitot mede a velocidade local e a diferença de pressão, a qual é utilizada na equação de Bernoulli, Equação 3.9, cujas variáveis são: a pressão estática (p), a massa específica (ρ), o deslocamento no eixo z (z), a gravidade (g) e a velocidade (\bar{U}). A equação de Bernoulli é válida para situações onde o escoamento é em regime permanente, incompressível, sem atrito e ao longo de uma linha corrente, (Fox et al., 2016).

$$\frac{P}{\rho} + \frac{\bar{U}^2}{2} + gz = \text{constante} \quad (3.9)$$

A Equação 3.9 é utilizada para relacionar o ponto referente a pressão de estagnação e referente a pressão estática, obtendo-se assim a Equação 3.10, evidenciada por Fox et al. (2016).

$$\frac{P_1}{\rho} + \frac{\bar{U}_1^2}{2} + gz_1 = \frac{P_2}{\rho} + \frac{\bar{U}_2^2}{2} + gz_2 \quad (3.10)$$

A pressão de estagnação medida pelo tubo interno é obtida quando o fluido é desacelerado até zero por um processo sem atrito. Sabe-se que z no ponto de estagnação e z referente a pressão estática serão, aproximadamente, iguais. Portanto, pode-se simplificar a Equação 3.10, obtendo-se a Equação 3.11, (Fox et al., 2016).

$$P_1 = P_2 + \frac{\rho \bar{U}_2^2}{2} \quad (3.11)$$

Pode-se isolar a velocidade na Equação 3.11 para obter a velocidade local do escoamento, Equação 3.12.

$$\bar{U}_2 = \sqrt{\frac{2(P_1 - P_2)}{\rho}} \quad (3.12)$$

As velocidades locais obtidas serão utilizadas no cálculo da intensidade relativa da turbulência.

3.6 INTENSIDADE RELATIVA DA TURBULÊNCIA

A intensidade da turbulência (Tu) em um escoamento é definida como a razão do desvio padrão da velocidade do escoamento turbulento (σ) e da velocidade média temporal (\bar{U}) da corrente livre na mesma direção, Equação (3.13).

$$Tu = \frac{\sigma}{\bar{U}} \quad (3.13)$$

Sabe-se que o desvio padrão é uma medida de dispersão dos dados em relação à média, portanto, quanto maior o desvio padrão, mais irregular é essa amostra de dados (Martins, 2013). Logo, o desvio padrão pode ser visto como a flutuação de velocidade (U_{rms}), portanto, substituindo a flutuação de velocidade na Equação (3.13), obtem-se a Equação (3.14).

$$Tu\% = \frac{100 \cdot U_{rms}}{\bar{U}} \quad (3.14)$$

3.7 INCERTEZA E CÁLCULO DO ERRO

3.7.1 INCERTEZA

O manual do anemômetro de fio quente disponibilizado pela Instrutemp (2013) afirma que a velocidade obtida com o instrumento possui uma precisão de 5% do valor da medição somado a um dígito, o resultado dessa soma deve ser dividido por dois como apresentado na Equação (3.15).

$$u_{\text{anemometro}}(m/s) = \frac{5\% + 1d}{2} \quad (3.15)$$

Para encontrar a incerteza da velocidade em cada ponto de medição, fez-se necessário realizar o cálculo da incerteza combinada, visto que, em cada ponto de medição pode-se obter um número i de medidas, Equação 3.16.

$$\text{incerteza combinada} = \sqrt{\sum_i u_{(\text{anemometro})}^2} \quad (3.16)$$

O cálculo da incerteza média das velocidades para o Anemômetro de fio quente foi realizado com base no cálculo da incerteza tipo B, Equação 3.17, utilizando como a fonte de dados o manual do instrumento, Instrutemp (2013).

$$u_b = \frac{\text{incerteza combinada}}{\sqrt{3}} \quad (3.17)$$

3.7.2 CÁLCULO DO ERRO

O valor do erro relativo percentual (E_r) foi obtido ao subtrair o valor de referência (V_{ref}) ao valor medido (V_{real}), dividindo o resultado da subtração pelo valor de referência e multiplicando por 100 para obter o resultado em porcentagem, Equação 3.18 (BAENA, 2004).

$$E_r(\%) = \frac{(V_{ref} - V_{real}) \times 100}{V_{ref}} \quad (3.18)$$

4 RESULTADOS

Utilizando o *software* Aeroalcool - Túnel de Vento foi possível obter uma média de 827 dados por ponto, em cada experimento. Para obter um controle com relação a quantidade de dados obtidos por pontos, estipulou-se um período de tempo de 2 minutos para cada posição do tubo de Pitot no eixo Y.

Ao realizar o cálculo da média para cada uma das 26 posições presentes na Figura 15, obtiveram-se as tabelas A, B, C, D, E, F e G na Seção Apêndices, cada uma com os valores para as suas respectivas distâncias de medição entre o centro da esfera e o tubo de Pitot como apresentado na Figura 13. A análise dos dados foi realizada utilizando o *software* EXCEL, ferramenta desenvolvida e disponibilizada pela empresa *microsoft*. No EXCEL é possível realizar gráficos, equações e utilizar de tabelas dinâmicas para simplificar a sua base de dados; portanto, o *software* em questão foi escolhido por ser de fácil acesso, funcionar online e offline, além de ter a possibilidade e guardar os dados no *Drive* com o objetivo de evitar perdas do material caso o computador sofresse algum dano durante a pesquisa.

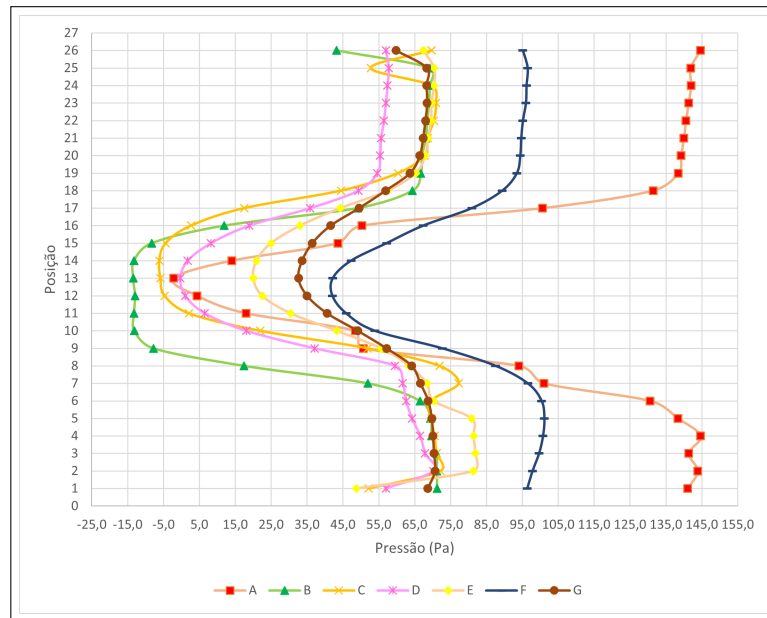
A Figura 18 apresenta o gráfico relacionando os valores de pressão obtidos em cada uma das 26 posições no eixo Y, sendo a posição 1 o primeiro ponto de coleta de dados e a posição 26 o último ponto. A esfera encontra-se posicionada entre os pontos 5 e 21.

Ao analisar a Figura 18, é possível observar que os valores de pressão antes e depois da esfera são equivalentes, pois essas regiões apresentam escoamento laminar. Observação similar é feita por Çengel e Cimbala (2007), este explica que em escoamentos com Re em um intervalo moderado ($10^3 < Re < 10^5$) o Coeficiente de Arrasto deve permanecer, relativamente, constante e o escoamento deve ser laminar antes e depois da esfera, porém, a região de esteira deve conter um escoamento altamente turbulento.

A posição A possui a série de valores mais instáveis pois é a mais próxima da esfera, portanto, próxima a zona de desprendimento da camada limite e do início da esteira pulsante. Em contrapartida, a posição G mais distante verticalmente da esfera, apresentou valores mais constantes e mais próximos à velocidade do fluxo obtidas na região laminar, indicando que já estava próxima do fim da região de esteira, Figura 18.

A Figura 19, evidencia que nas regiões A e C de testes, pode-se observar que o valor da pressão aumenta antes de iniciar a região de esteira. Fox et al. (2016) explica que esse ocorrido denomina-se gradiente de pressão adverso, ou seja, a variação de pressão em oposição ao movimento do fluido. Esse efeito causará a diminuição da velocidade das partículas ao longo que se movem na região de esteira. Portanto, a região de esteira sempre terá pressões mais baixas se comparado a pressão na região anterior a esfera, desse modo, a esfera estará sujeita a um arrasto de pressão.

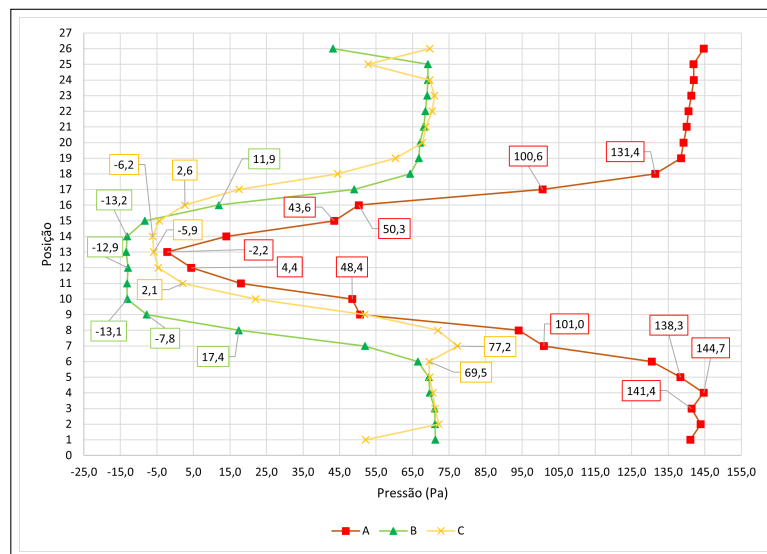
Figura 18 – Pressão por número de pontos.



Fonte: Próprio autor (2024)

À medida que o tubo de Pitot se aproxima da esfera no eixo Y, a pressão diminui até atingir o valor mínimo de -13,45 Pa no ponto 13 na posição B, Figura 19. Esse comportamento é devido à formação de vórtices na parte posterior da esfera, onde as pressões obtidas são mais baixas.

Figura 19 – Destaque para a pressão nas posições A, B e C.

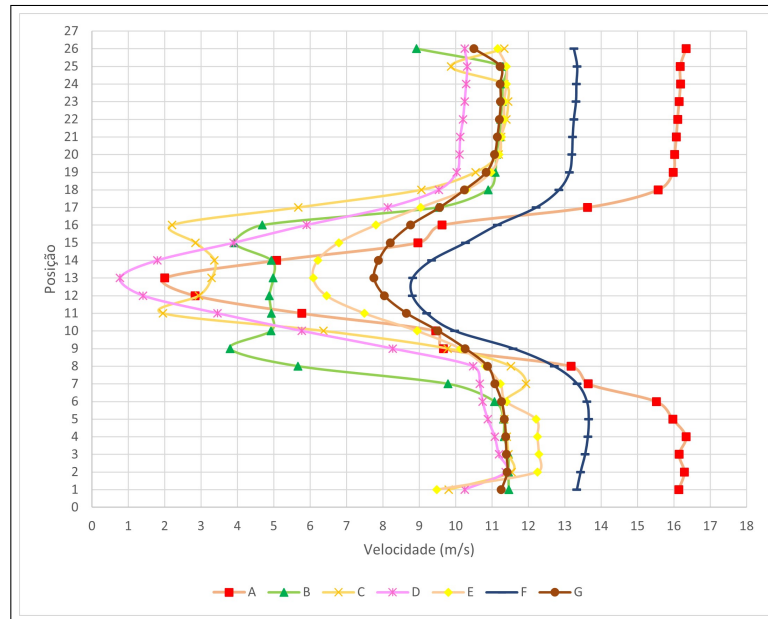


Fonte: Próprio autor (2024)

O gráfico apresentado na Figura 20 compara os valores calculados, utilizando a Equação (3.12), para as velocidades. É evidente que, quanto mais próximo da região de esteira, menor é a velocidade de fluxo média no tempo. Fox et al. (2016) afirma que a diminuição de velocidade na

região de esteira também é influenciada pelo atrito existente nessa região, portanto, as partículas são levadas ao repouso e, em seguida, afastadas da superfície da esfera pelas partículas de ar seguintes.

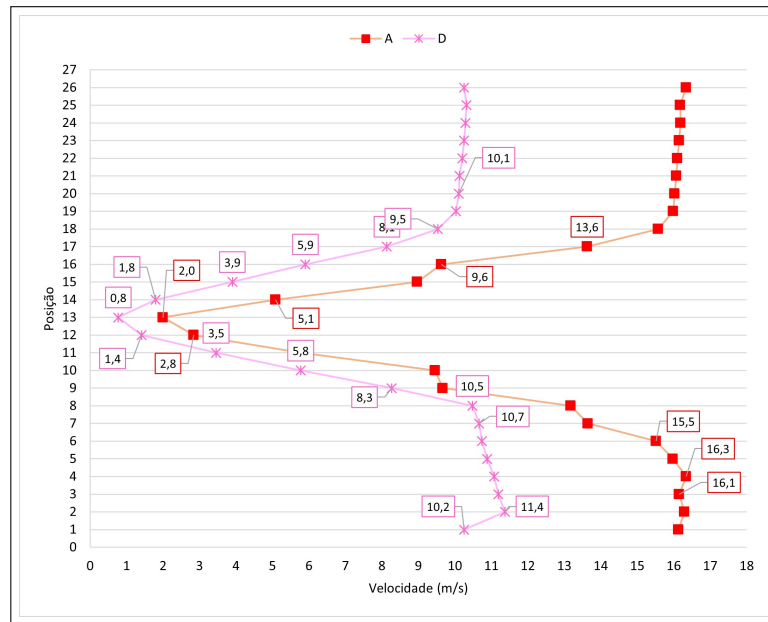
Figura 20 – Velocidade por número de pontos.



Fonte: Próprio autor (2024)

Nas regiões de teste A e D, Figura 21, observa-se que foi possível obter os menores valores de velocidade na mesma direção do escoamento, sendo o menor valor lido de 0,8 m/s no ponto 13 no eixo Y. Em escoamentos laminares, o valor da velocidade na região posterior a esfera deveria ser zero por levar em consideração que o escoamento não viscoso não sofre atrito, porém, essa observação se afasta da realidade quando o escoamento possui uma região de esteira turbulenta, logo, as velocidades são próximas de zero, porém, existentes nessa região, (Fox et al., 2016).

Figura 21 – Destaque para as velocidades nos locais A e D.

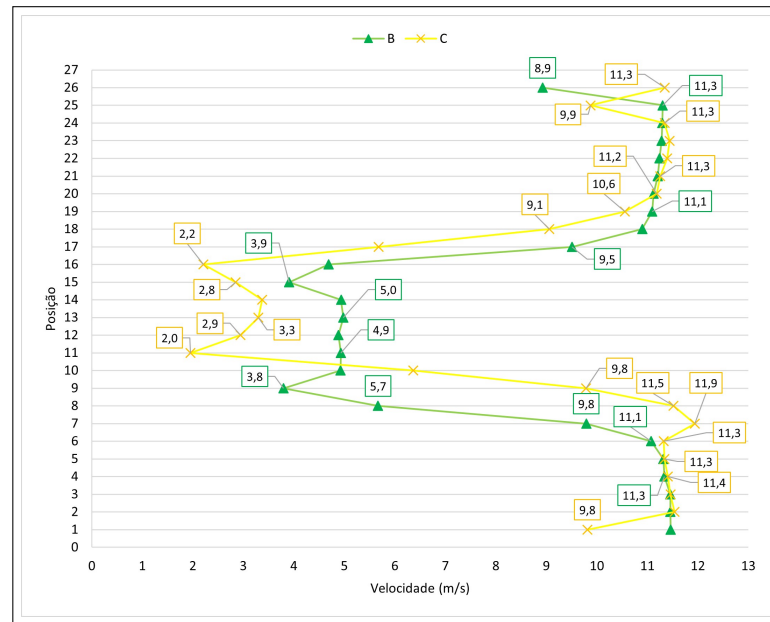


Fonte: Próprio autor (2024)

Além disso, nas regiões B e C é possível observar zonas com mudanças abruptas na direção da velocidade que são causadas devido à presença de vórtices nessas regiões. O fato das partículas mudarem de direção de velocidade é reforçado por Fox et al. (2016), como abordado anteriormente, pois as partículas entram e repouso e logo sofrem a ação das outras partículas de ar existente no escoamento, sendo levadas a se movimentar por influencia delas.

Ao analisar todos os valores de velocidade localizados na zona de turbulência (entre os pontos 6 e 20), observa-se que os valores de velocidade na região central, em cada uma das posições do eixo X de teste, são os mais baixos. Essa mesma observação também é feita por Tyagi et al. (2005) em seu estudo.

Figura 22 – Destaque para as velocidades nos locais B e C.



Fonte: Próprio autor (2024)

Os testes com o anemômetro foram realizados em 18 pontos devido ao tamanho limitado da haste, que não alcançava a altura total do túnel de vento. Além disso, o Anemômetro foi posicionado no ponto A a fim de comparar os seus resultados obtidos nessa região com os resultados obtidos utilizando o tubo de Pitot.

É importante ressaltar que o anemômetro apresentou algumas desvantagens durante o uso. Em um intervalo de 10 minutos, a coleta de dados era interrompida, porém, o aparelho não desligava, em vez disso, marcava o valor de 0,41 podendo levar o operador ao erro. Para solucionar o problema, fez-se necessário reiniciar o aparelho e realizar a medição do zero absoluto em todas as vezes que o desligamento automático ocorria, isto ocasionou o atraso do experimento. A Tabela 4 contém os resultados para as velocidades obtidas neste experimento, para cada um dos pontos listados, cerca de 230 valores de velocidade foram coletados por cada ponto.

Assim como o tubo de Pitot na região A, o anemômetro de fio quente também apresentou valores mais baixos na zona de esteira. Além disso, utilizando o anemômetro de fio quente, pode-se observar com mais nitidez os valores de velocidade aumentando na região do descolamento da camada limite (8 e 16), uma vez que a velocidade aumenta e em seguida diminui devido ao gradiente de pressão adverso.

Tabela 4 – Dados obtidos utilizando o Anemômetro de fio quente

pontos	média velocidades(m/s)
1	12,61
2	12,68
3	13,29
4	13,34
5	13,33
6	13,49
7	13,80
8	13,96
9	12,88
10	6,06
11	3,87
12	3,55
13	3,60
14	3,52
15	12,79
16	12,85
17	13,10
18	13,06

Fonte: Próprio autor (2023)

A Tabela 5 apresenta os resultados do valor eficaz da velocidade (U_{rms}), da razão entre a velocidade do fluxo média no tempo e a velocidade do fluxo (U/\bar{U}) e da turbulência relativa (Tu) para os valores obtidos com o tubo de Pitot e com o anemômetro na região de turbulência. Os resultados obtidos com o anemômetro foram próximos aos dados obtidos pelo tubo de Pitot, na posição A.

Tabela 5 – Comparação entre os resultados do tubo de Pitot e do anemômetro de fio quente.

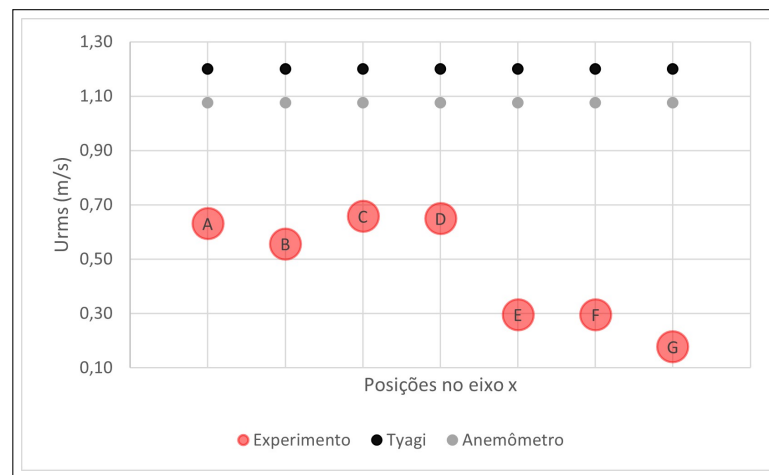
Posição	U/\bar{U}	U_{rms} (m/s)	Tu(%)
A	1,05	0,63	6,03
B	0,71	0,56	7,86
C	0,69	0,66	9,48
D	0,67	0,65	9,65
E	0,90	0,30	3,29
F	1,13	0,30	2,61
G	0,96	0,18	1,84
Anemômetro	1,00	1,06	10,60

Fonte: Próprio autor (2023)

Observa-se que a maior velocidade eficaz média (U_{rms}) foi registrada no ponto C, visto que, a Equação 3.7 envolve a diferença entre a velocidade do fluxo e a velocidade média do fluxo no tempo, portanto, quanto maior essa diferença, maior o valor da velocidade eficaz. Outro fator que influencia

diretamente no valor da velocidade eficaz é a quantidade de dados obtidos por ponto, Equação (3.7). O Pitot obteve 827 dados por ponto enquanto o anemômetro obteve uma média de 230 dados por pontos, logo, o valor de (U_{rms}) obtido pelo anemômetro foi maior do que o valor obtido pelo Pitot. A Figura 23 traz a comparação explicitada na tabela 5 de forma lúdica para evidenciar a discrepância entre os valores obtidos utilizando o Anemômetro de fio quente, o tubo de Pitot e o valor obtido por Tyagi et al. (2005).

Figura 23 – Comparativo entre valores obtidos para U_{rms} .

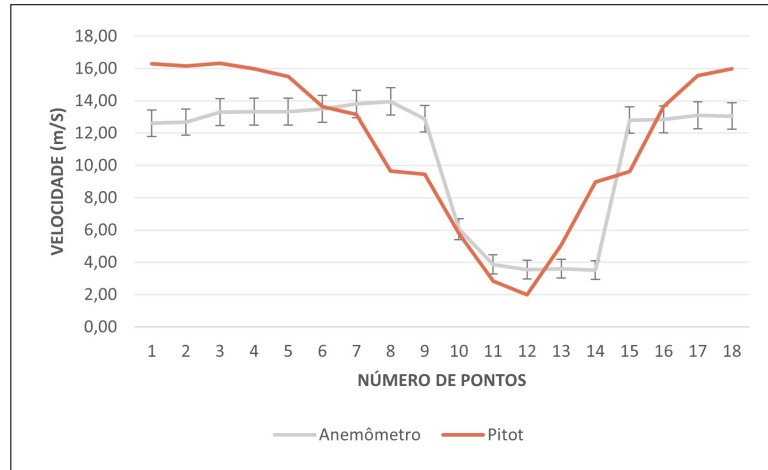


Fonte: Próprio autor (2024)

A Figura 24 apresenta a comparação focada nos aparelhos de medição tubo de Pitot e Anemômetro de fio quente para o mesmo ponto na posição A. Nota-se que ao inserir a incerteza para cada velocidade obtida com o Anemômetro de fio quente, utilizando a Equação 3.15 disponibilizada por Instrutemp (2013), o Tubo de Pitot apresentou velocidades que estiveram dentro da precisão do anemômetro. Com relação a este, O resultado obtido para a média das velocidades medidas e e suas respectivas incertezas foi de $(10,66 \pm 1,89)$ m/s. Para realizar a comparação entre os instrumentos de medição, levou-se em consideração que a medição da velocidade (no caso do anemômetro) e da pressão (no caso do tubo de Pitot) fossem feitas na mesma posição.

A análise entre os dois instrumentos foi realizada levando em consideração as características da região de esteira e as observações evidenciadas em literatura, tais como: a elevação do valor da velocidade antes do escoamento entrar na região de esteira, se os valores de velocidade decaem ao longo da esteira e se as velocidades estão próximas e respeitando o intervalo de incerteza da velocidade medida com o anemômetro de fio quente. Levou-se em consideração os valores obtidos com o anemômetro como o valor ideal, visto que o anemômetro de fio quente é um instrumento de medição feito propriamente para a medição de velocidades enquanto o tubo de Pitot está focado em medir a pressão.

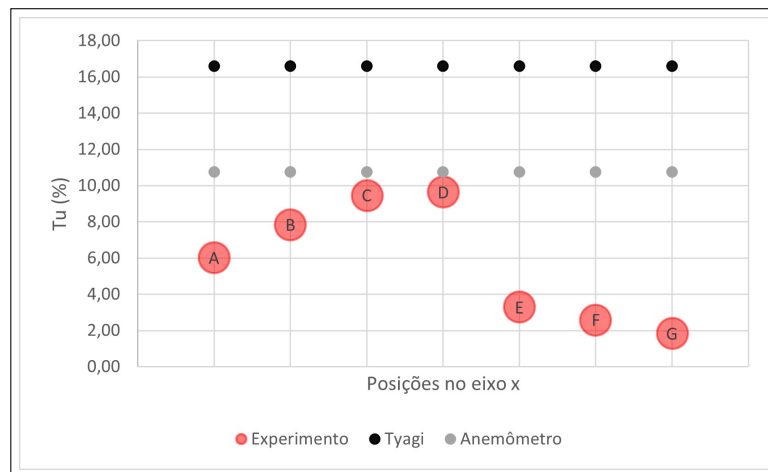
Figura 24 – Comparação das velocidades entre o Anemômetro de fio quente e o Tubo de Pitot.



Fonte: Próprio autor (2024)

Com relação a Turbulência, o erro absoluto entre o valor de Tu obtido pelo Pitot e o Anemômetro no ponto A foi de 4,6%, enquanto o erro absoluto do Anemômetro com relação ao Anemômetro utilizado por Tyagi et al. (2005) foi de 6,0%. Dentre os valores de Tu obtidos com o Pitot, o menor valor observado foi no ponto G; Tyagi et al. (2005) faz uma observação semelhante em seu estudo, afirmando que este efeito ocorre devido a lei do decaimento exponencial, onde, ausente de energias adicionais para continuar criando redemoinhos ao longo da esteira, a turbulência diminui exponencialmente ao longo da distância percorrida. A Figura 25, traz a comparação entre os valores obtidos com o tubo de Pitot, o Anemômetro de Fio quente e o estudos de Tyagi et al. (2005).

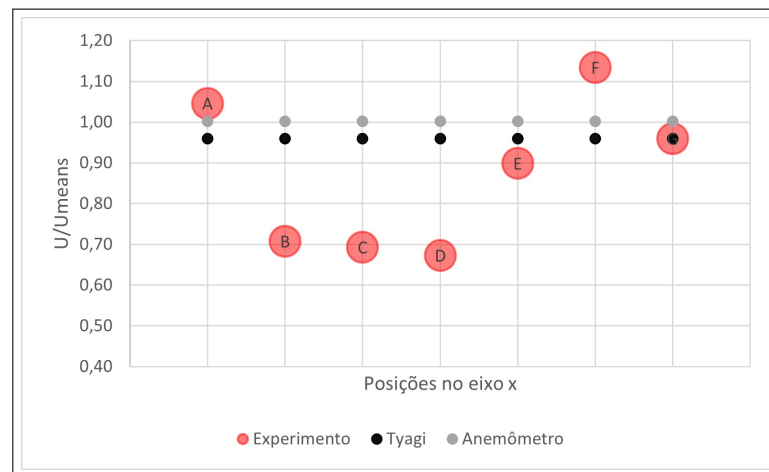
Figura 25 – Comparativo entre valores obtidos para Tu .



Fonte: Próprio autor (2024)

Ao comparar os valores obtidos na Tabela 5 com o valor obtido por Tyagi et al. (2005) para (U/\bar{U}), Figura 26, observou-se que os valores ao longo da região de esteira variaram com relação a média obtida por Tyagi et al. (2005), este efeito era esperado, pois os valores nessa região são imprevisíveis devido aos vórtices existentes nessa região. Ao comparar a posição A entre o valor médio obtido por Tyagi et al. (2005), o valor médio obtido com o Anemômetro de fio quente e o valor médio obtido com o Tubo de Pitot, percebe-se que o valor obtido com o equipamento Anemômetro de fio quente foi o mais se aproximou do valor médio de Tyagi et al. (2005). Porém, na posição G, a posição mais próxima da utilizada por Tyagi et al. (2005), percebe-se que o Tubo de Pitot obteve um resultado para a velocidade quase idêntico ao obtido por Tyagi et al. (2005).

Figura 26 – Comparação da razão U/\bar{U} com o estudo de Tyagi (2005).



Fonte: Próprio autor (2024)

O erro relativo percentual foi utilizado para comparar os valores obtidos com o tubo de Pitot e com o Anemômetro de fio quente com os valores de Tyagi et al. (2005), ver Equação 3.18. Os valores do erro relativo para cada posição do Pitot estão na Tabela 6. Ao analisar a tabela, é possível observar que a menor margem de erro para U/\bar{U} foi encontrada na posição G, isso se deve ao fato que a posição G está a 244,75 mm de distância do centro da esfera, a qual é a distância mais próxima da distância mínima utilizada por Tyagi, visto que seus experimentos iniciaram com uma distância de 375 mm da esfera.

Tabela 6 – Erro relativo percentual.

Posição	Er(U/\bar{U})%	Er(U_{rms})%	Er(Tu)%
A	8,99	47,44	0,64
B	26,26	53,66	0,53
C	27,77	45,20	0,43
D	29,87	45,88	0,42
E	6,35	75,35	0,80
F	18,18	75,36	0,84
G	0,00	85,24	0,89
Anemômetro	2,16	9,84	0,36

Fonte: Próprio autor (2023)

Os elevados valores de erro relativo percentual já eram esperados referente a comparação com o estudo de Tyagi et al. (2005), visto que há diversos fatores utilizados no presente estudo, que contribuem de forma significativa para os resultados, divergem do estudo de Tyagi et al. (2005), dentre eles: o comprimento da seção de testes, a quantidade de placas uniformizadoras de fluxo, o tamanho da esfera e o ambiente onde foram realizados os testes. Portanto, deve-se levar em consideração as análises dos resultados e não apenas os números em si. Além disso, o elevado erro para o U_{rms} confirma a importância do número de dados por ponto, quanto mais dados obtidos, menor será o valor de U_{rms} . Visto que, utilizando o anemômetro, Tyagi et al. (2005) obteve-se 262,144 dados por ponto, enquanto utilizando o Pitot foi possível obter 827 dados por ponto.

Comparando os valores de U/\bar{U} para o Tubo de Pitot e o anemômetro de fio quente, observa-se um erro percentual de 6,7% e um erro absoluto de 0,07. O valor do erro percentual, Equação 3.18, foi menor do que o valor obtido ao comparar o estudo de Tyagi com a posição A, apesar disso, ao comparar o valor de cada velocidade por ponto da tabela 4 e o A é perceptível que não há uma diferença tão brusca de valores, portanto, os valores podem ter variado devido a formação dos vortices não ser a mesma para cada experimento.

Çengel e Cimbala (2007), afirma que a velocidade de escoamento deve ser suficientemente alta para que o tubo de Pitot consiga medir a velocidade, visto que para que a leitura seja efetuada, uma pressão dinâmica mensurável deve ser desenvolvida. Portanto, para averiguar se o tubo de Pitot consegue medir as flutuações de velocidade no tempo com uma velocidade do fluxo de ar de 10 m/s, realizou-se a comparação dos dados obtidos com o tubo de Pitot na zona de turbulência e os dados obtidos com o anemômetro de fio quente. A velocidade média obtida com o anemômetro de fio quente para a região posterior a esfera foi de $(10,66 \pm 1,89)$ m/s; a média obtida com o tubo de Pitot foi de 10,46 m/s, levando em consideração a precisão do anemômetro, observa-se que o valor obtido com o tubo de Pitot está dentro do aceitável. Porém, deve-se ressaltar que para as regiões laminares, os valores obtidos com o Tubo de Pitot foram discrepantes em comparação com o anemômetro de fio quente.

Ressalta-se que para a validação do experimento, utilizou-se da literatura de Çengel e Cimbala (2007), Fox et al. (2016) e Tyagi et al. (2005), uma vez que os experimentos não foram repetidos durante o processo de pesquisa. Além disso, o tubo de Pitot é comumente utilizado em testes que envolvam velocidades elevadas, porém, os estudos utilizando esferas costumam optar por velocidades de escoamento baixas ou intermediárias para permanecer em um Re intermediário e, assim, ser possível estudar a camada laminar e a camada de turbulência. Porém, sabe-se que em estudos na indústria automotiva e aeroespacial costuma-se utilizar o tubo de Pitot para coleta de dados visto que o instrumento de medição não demanda uma alteração muito significativa no túnel de vento e é o ideal para velocidades elevadas.

5 CONCLUSÃO

Após realizar a análise do escoamento sobre a esfera no túnel de vento, os resultados obtidos foram consistentes com o esperado, de acordo com os autores citados no presente estudo. O valor do erro para U/\bar{U} foi aceitável em comparação com o erro obtido pelo anemômetro. Portanto, é possível realizar os testes em esfera usando o túnel de vento mencionado e coletar os dados utilizando um tubo de Pitot em vez do anemômetro de fio quente para estudos sobre zona de turbulência, pois o Pitot demonstrou ser um equipamento de medição mais fácil de manusear e que, segundo o fabricante, possui maior precisão em velocidades mais altas.

Os valores obtidos com o Tubo de Pitot apresentaram um ponto positivo não esperado com relação a fornecer valores negativos de turbulência, facilitando na observação da região de esteira, uma vez que, os valores negativos de pressão simbolizam a existência de vórtices na região. Os resultados para a velocidade na região de turbulência foram condizentes com os valores obtidos utilizando o anemômetro de fio quente para a mesma posição, uma vez que a maioria dos valores obtidos com o tubo de Pitot estavam situados dentro da incerteza do anemômetro nessa região. Além disso, torna-se mais viável realizar a análise longitudinal da esfera nas posições A, B, C e D, pois essas distâncias apresentaram ser as melhores para a observação dos vórtices. Destaca-se ainda que, ao aumentar o número de dados coletados por ponto, espera-se uma redução nos valores de turbulência relativa, uma vez que a turbulência está diretamente relacionada ao valor de U_{rms} , e esse valor é inversamente proporcional à quantidade de pontos coletados.

A maior dificuldade para a realização do experimento foi calcular a velocidade para cada valor de pressão obtido com o tubo de Pitot, pois o *software* 'Aeroalcool – Túnel de Vento' disponibiliza a pressão dinâmica além da diferença de pressão em cada ponto, isso pode gerar confusão no momento da escolha dos valores para realizar o cálculo da velocidade. Outro fator importante foi realizar a comparação entre os valores obtidos com o anemômetro de fio quente, o tubo de Pitot e os valores obtidos por outros autores que estudaram uma situação semelhante, pois a região de turbulência possui elevada variação dos valores. Para contornar esse problema, realizou-se uma média de 800 dados por ponto com o tubo de Pitot com o intuito de obter a maior variação possível de dados em cada ponto.

Como objetivo para estudos futuros, pode-se realizar novas medições utilizando o anemômetro de fio quente em cada posição do eixo x com o intuito de comparar o perfil dos vórtices ao longo do túnel de vento em comparação com o perfil obtido com o tubo de Pitot. Além disso, é possível realizar a automação do cálculo das velocidades utilizando a linguagem Python ou VBA para realizar o cálculo de forma automática e no mesmo instante que se realiza os experimentos, reduzindo o tempo do estudo e evitando erros aleatórios. O presente estudo também pode ser utilizado como referência para futuros estudos que busquem analisar o escoamento em outros corpos 3D.

REFERÊNCIAS

- AEROALCOOL. *Aeroalcool Tecnologia Ltda.* 2001. Eng. Msc. Omar J. J. Pugliesi e Eng. Dr. James R. Waterhouse. Disponível em: <<http://www.aeroalcool.com.br/>>.
- AGUIRRE, L. A. *Fundamentos de Instrumentação.* Pearson: 1 Ed, 2013.
- BAENA, L. G. N. *Modelo para a Geração de Séries sintéticas de dados climáticos.* Viçosa, MG: [s.n.], 2004.
- BALBINOT, A.; BRUSAMARELLO, V. J. *Instrumentação e Fundamentos de Medidas.* LTC: 3 Ed, 2019.
- CARDONA, V.; LAGO, V. *Aerodynamic Forces Of Interacting Spheres Representative Of Space Debris-re-entry: Experiments In a Supersonic Rarefied Wind-tunnel.* França: Elsevier, 2022.
- CARMINATTI, L. J.; KONRATH, R. *Desenvolvimento de Um Túnel de Vento Subsônico Com Foco no Ensino Didático.* [S.l.]: Disponível Em: <<https://uceff.edu.br/anais/index.php/engmec/article/view/229>>, 2019. Acesso Em: 17 Jan. 2024.
- ÇENGEL, Y. A.; CIMBALA, J. M. *Mecânica dos Fluidos: Fundamentos e Aplicações.* Bookman: 1 Ed, 2007.
- CHANETZ, B. *a Century Of Wind Tunnels Since Eiffel.* França: Elsevier, 2017.
- CONNOR, N. *O que é o número de Reynolds para fluxo turbulento – definição.* [S.l.]: Disponível Em: <<https://www.thermal-engineering.org/pt-br/o-que-e-o-numero-de-reynolds-para-fluxo-turbulento-definicao/>>, 2020. Acesso Em: 2020.
- FOX, R. W. et al. *Introdução à Mecânica dos Fluidos.* Santa Catarina: Cobenge, 2016.
- FRANCO, A.; COLVERO, D. *IT Túnel de Vento.* Goiás: Emc, 2023.
- FREIRE, A. P. S. *Teoria da Camada Limite.* Rio de Janeiro: Ufrj, 2012.
- GOIÁS, G. de. *Portal Goiás – Geografia.* [S.l.]: Disponível Em: <<https://www.goias.gov.br/>>, 2019.
- GÓMEZ-ORTEGA, O. et al. *Experiments On The Transverse Aeroelastic Instability Of a Single Sphere In Aswing Configuration Under a Longitudinal Wind.* Espanha: Elsevier, 2019.
- HANGAR33. *Qual a Função do Tubo de Pitot?* [S.l.]: Disponível Em: <<http://blog.hangar33.com.br/qual-e-a-funcao-do-tubo-de-pitot/>>, 2014. Acesso Em: 2024.
- HASAN, A. Q. et al. *Aerodynamics Analysis On Wings With Winglets And Vortex Generators.* [S.l.]: Wseas Transaction On Fluid Mechanics, 2020.
- INSTRUTEMP. *Anemômetro de fio quente, manual do usuário.* [S.l.]: ITAN - 740, 2013.
- LACERDA, K. B.; AMORIM, A. *Perfil de Velocidade para o Escoamento do Fluido Em Uma Placa Plana.* [S.l.]: Revista Brasileira de Ensino de Física, 2001.

- LIGEZA, P. *Method Of Testing Fast-changing And Pulsating Flows By Means Of a Hot-wire Anemometer With Simultaneous Measurement Of Voltage And Current Of The Sensor*. Polônia: Elsevier, 2022.
- LOPES, B. H. *Comparação Entre Estimativas de Altura de Eucalipto Realizadas Pelo Moti e Pelo Clinômetro Haglof.trabalho de Conclusão de Curso (curso de Engenharia Florestal)*. Diamantina: [s.n.], 2018.
- MARTINS, M. E. G. *Desvio Padrão Amostral*. Lisboa: Revista de Ciência Elementar, 2013.
- NETTO, D. C. C.; R., R. G.; SOUZA, D. S. *Estudo Comparativo de Metodologias para Solução Numérica da Camada Limite Turbulenta Sobre o Aerofólio Nrel S809*. Curitiba: Brazilianjournals, 2013.
- QUEIROGA, A. d. L. *Projeto de Túnel de Vento. 2022. 50 F., Il. Trabalho de Conclusão de Curso (bacharelado Em Engenharia Aeroespacial)*. Brasília: Unb, 2023. Disponível em: <<https://bdm.unb.br/handle/10483/33510>>.
- SILVEIRA, K. M.; POSSAMAI, T. s. *Análise Experimental da Medição de Velocidade Com Um Tubo de Pitot Em Escoamento Interno*. Santa Catarina: Ifc, 2020.
- SOETHE, V. L.; SOUZA, L. F. dos S.; DEYNA, A. *Projeto e Construção de Um Túnel de Vento Didático*. Santa Catarina: Cobenge, 2011.
- SPÁLENSKÝ, V.; ROZEHNAL, D. *Cfd Simulation Of Dimpled Sphere And Its Wind Tunnel Verification*. República Tcheca: Matec, 2017.
- TESTO. *TUBO DE PITOT 500MM DE COMPRIMENTO PARA MEDIÇÃO DE VELOCIDADE - TESTO 0635 2045*. [S.l.]: Disponível Em: <https://www.infodatas.com.br/produto/tubo-de-pitot-500mm-de-comprimento-p-medicao-de-velocidade-testo.html?utm_source=Site&utm_medium=GoogleMerchant&utm_campaign=GoogleMerchant&srsId=AfmBOoquCiS9ItaNyq0DW5moXywze4-mN1KMklKaCLKq285yPA8RGyXDLzI>, 2024. Acesso Em: 2024.
- TYAGI, H. et al. *Measurement Of Wake Properties Of a Sphere In Freestream Turbulence*. Canadá: Sciencedirect, 2005.
- WENDT, E. M. s. *Visualização de Escoamento Turbulento de Fluido Newtoniano Em Contrações Abruptas Com a Técnica Piv*. Curitiba: [s.n.], 2015.
- WHITE, F. M. *Mecânica dos Fluidos*. Bookman: 6 Ed, 2010.

Apêndices

APÊNDICE A – VALORES DE PRESSÃO TOTAL E VELOCIDADE AERODINÂMICA, POSIÇÃO A

Tabela com os dados de pressão Total (Pa) e velocidade aerodinâmica (m/s) para uma distância de 94,75 mm entre o tubo de Pitot e o centro da esfera

Ponto	Pressão Total (Pa)	Velocidade Aerodinâmica
1	141,07	16,13
2	143,84	16,29
3	141,36	16,15
4	144,66	16,34
5	138,32	15,97
6	130,53	15,52
7	100,98	13,65
8	94,04	13,17
9	50,65	9,67
10	48,44	9,45
11	18,04	5,77
12	4,37	2,84
13	-2,16	2,00
14	14,00	5,08
15	43,55	8,96
16	50,25	9,63
17	100,62	13,62
18	131,40	15,57
19	138,46	15,98
20	139,20	16,03
21	140,00	16,07
22	140,56	16,10
23	141,33	16,15
24	141,96	16,18
25	141,87	16,18

APÊNDICE B – VALORES DE PRESSÃO TOTAL E VELOCIDADE AERODINÂMICA, POSIÇÃO B

Tabela com os dados de pressão Total (Pa) e velocidade aerodinâmica (m/s) para uma distância de 119,75 mm entre o tubo de Pitot e a esfera.

Ponto	Pressão Total (Pa)	Velocidade Aerodinâmica
1	71,21	11,46
2	71,10	11,45
3	71,08	11,45
4	69,69	11,34
5	69,41	11,32
6	66,46	11,07
7	51,93	9,79
8	17,41	5,67
9	-7,81	3,80
10	-13,13	4,92
11	-13,19	4,93
12	-12,91	4,88
13	-13,45	4,98
14	-13,20	4,93
15	-8,28	3,91
16	11,91	4,69
17	48,98	9,51
18	64,36	10,90
19	66,70	11,09
20	67,01	11,12
21	68,06	11,21
22	68,48	11,24
23	68,97	11,28
24	69,14	11,29
25	69,20	11,30

APÊNDICE C – VALORES DE PRESSÃO TOTAL E VELOCIDADE AERODINÂMICA, POSIÇÃO C

Tabela com os dados de pressão Total (Pa) e velocidade aerodinâmica (m/s) para uma distância de 144,75 mm entre o tubo de Pitot e a esfera.

Ponto	Pressão Total (Pa)	Velocidade Aerodinâmica
1	52,18	9,81
2	72,16	11,54
3	71,15	11,46
4	70,52	11,41
5	69,65	11,34
6	69,51	11,32
7	77,25	11,94
8	71,91	11,52
9	51,88	9,78
10	21,96	6,37
11	2,06	1,95
12	-4,69	2,94
13	-5,88	3,29
14	-6,16	3,37
15	-4,39	2,85
16	2,64	2,21
17	17,47	5,68
18	44,47	9,06
19	60,34	10,55
20	67,76	11,18
21	68,62	11,25
22	70,34	11,39
23	70,95	11,44
24	69,70	11,34
25	52,82	9,87

APÊNDICE D – VALORES DE PRESSÃO TOTAL E VELOCIDADE AERODINÂMICA, POSIÇÃO D

Tabela com os dados de pressão Total (Pa) e velocidade aerodinâmica (m/s) para uma distância de 169,75 mm entre o tubo de Pitot e a esfera.

Ponto	Pressão Total (Pa)	Velocidade Aerodinâmica
1	56,93	10,25
2	70,15	11,38
3	67,88	11,19
4	66,51	11,08
5	64,23	10,89
6	62,57	10,74
7	61,68	10,67
8	59,54	10,48
9	37,08	8,27
10	18,05	5,77
11	6,48	3,46
12	1,08	1,41
13	-0,32	0,77
14	1,75	1,80
15	8,24	3,90
16	18,89	5,90
17	35,88	8,14
18	49,29	9,54
19	54,57	10,03
20	55,34	10,10
21	55,63	10,13
22	56,43	10,20
23	56,94	10,25
24	57,41	10,29
25	57,72	10,32

APÊNDICE E – VALORES DE PRESSÃO TOTAL E VELOCIDADE AERODINÂMICA, POSIÇÃO E

Tabela com os dados de pressão Total (Pa) e velocidade aerodinâmica (m/s) para uma distância de 194,75 mm entre o tubo de Pitot e o centro da esfera.

Ponto	Pressão Total (Pa)	Velocidade Aerodinâmica
1	48,77	9,49
2	81,31	12,25
3	81,88	12,29
4	81,39	12,25
5	80,83	12,21
6	70,37	11,39
7	68,38	11,23
8	63,42	10,82
9	55,68	10,14
10	43,32	8,94
11	30,41	7,49
12	22,54	6,45
13	20,06	6,08
14	20,92	6,21
15	24,98	6,79
16	33,06	7,81
17	44,27	9,04
18	57,47	10,30
19	65,32	10,98
20	67,91	11,19
21	68,69	11,26
22	69,57	11,33
23	69,71	11,34
24	70,40	11,40
25	70,40	11,40

APÊNDICE F – VALORES DE PRESSÃO TOTAL E VELOCIDADE AERODINÂMICA, POSIÇÃO F

Tabela com os dados de pressão Total (Pa) e velocidade aerodinâmica (m/s) para uma distância de 219,75 mm entre o tubo de Pitot e o centro da esfera.

Ponto	Pressão Total (Pa)	Velocidade Aerodinâmica
1	96,33	13,33
2	97,80	13,43
3	99,62	13,56
4	100,73	13,63
5	101,10	13,66
6	100,34	13,61
7	96,49	13,34
8	87,55	12,71
9	72,72	11,58
10	53,92	9,97
11	45,89	9,20
12	42,08	8,81
13	42,15	8,82
14	47,24	9,34
15	57,14	10,27
16	67,31	11,14
17	80,88	12,22
18	89,39	12,84
19	93,44	13,13
20	94,39	13,20
21	94,66	13,22
22	95,13	13,25
23	95,97	13,31
24	96,14	13,32
25	96,45	13,34

APÊNDICE G – VALORES DE PRESSÃO TOTAL E VELOCIDADE AERODINÂMICA, POSIÇÃO G

Tabela com os dados de pressão Total (Pa) e velocidade aerodinâmica (m/s) para uma distância de 244,75 mm entre o tubo de Pitot e o centro da esfera.

Ponto	Pressão Total (Pa)	Velocidade Aerodinâmica
1	68,65	11,25
2	70,64	11,42
3	70,34	11,39
4	70,11	11,37
5	69,74	11,34
6	68,76	11,26
7	66,56	11,08
8	64,12	10,88
9	57,12	10,27
10	49,08	9,52
11	40,55	8,65
12	35,00	8,04
13	32,60	7,75
14	33,63	7,88
15	36,47	8,20
16	41,58	8,76
17	49,51	9,56
18	56,90	10,25
19	63,70	10,84
20	66,41	11,07
21	67,32	11,14
22	67,99	11,20
23	68,45	11,24
24	68,30	11,23
25	68,32	11,23