

CENTRO UNIVERSITÁRIO ASSIS GURGACZ
PAULO EDUARDO DE OLIVEIRA SANTOS

CONSTRUÇÃO DE UM TÚNEL DE VENTO EM ESCALA PARA TESTES
AERODINÂMICOS

CASCADEL – PR
2019

CENTRO UNIVERSITÁRIO ASSIS GURGACZ
PAULO EDUARDO DE OLIVEIRA SANTOS

**CONSTRUÇÃO DE UM TÚNEL DE VENTO EM ESCALA PARA TESTES
AERODINÂMICOS**

Trabalho apresentado na disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso do Curso de Engenharia Mecânica, do Centro Universitário Assis Gurgacz, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

**Professor Orientador: Me. Eliseu Avelino
Zanella Júnior**

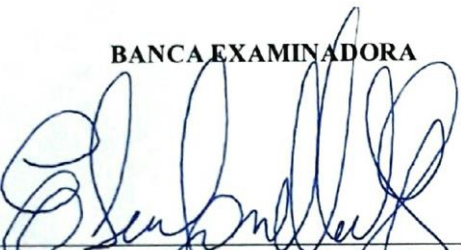
CASCADEL – PR
2019

**CENTRO UNIVERSITÁRIO ASSIS GURGACZ
PAULO EDUARDO DE OLIVEIRA SANTOS**

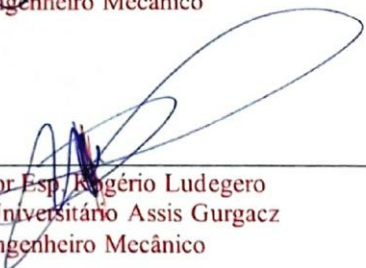
**CONSTRUÇÃO DE UM TÚNEL DE VENTO EM ESCALA PARA TESTES
AERODINÂMICOS**

Trabalho apresentado no Curso de Engenharia Mecânica do Centro Universitário FAG, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica, sob orientação do Professor Me. Elizeu Avelino Zanella Júnior.

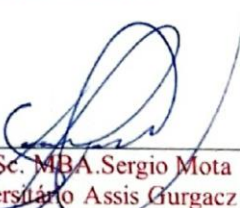
BANCA EXAMINADORA



Orientador Me. Elizeu Avelino Zanella Júnior
Centro Universitário Assis Gurgacz
Engenheiro Mecânico



Professor Esp. Rogério Ludegero
Centro Universitário Assis Gurgacz
Engenheiro Mecânico



Professor MSc. MBA. Sergio Mota
Centro Universitário Assis Gurgacz
Engenheiro Mecânico

Cascavel, 26 de novembro de 2019.

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho primeiramente a Deus que me proporcionou tal feito, a minha esposa e família, que ao longo de minha caminhada me deram suporte e amparo para realização deste sonho.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus, pela força divina em minha vida em que em todos os momentos difíceis se fez presente.

A minha esposa por entender minha ausência diária durante esta longa caminhada e por sempre me apoiar.

A minha família pelo grande incentivo e caráter de criação.

A todos os professores do curso pelo seu amplo conhecimento e experiência transmitida, em especial meu orientador pela dedicação e empenho em meu trabalho.

RESUMO

Este artigo apresenta o túnel de vento para testes aerodinâmicos da CEFAG – Centro Universitário Da Fundação Assis Gurgacz, Cascavel, PR. Este instrumento, recém-concluído, foi desenvolvido e construído por meio de uma pesquisa experimental, que teve como objetivo a pesquisa, o projeto e a construção do túnel de vento, para uso didático e de pesquisa no curso de engenharia mecânica da CEFAG. A metodologia adotada partiu de uma revisão bibliográfica referente a construção em outras instituições, em que o equipamento fornece de forma simples análises de escoamento do ar em diversos ambientes e superfícies, aerodinâmica aplicada à engenharia mais especificamente em mecânica dos fluidos, que tem por objetivo o estudo do escoamento dos fluídos em diversos ambientes e condições, além de proporcionar uma ferramenta capaz de demonstrar mudanças quando as variáveis não aparecem nos livros, ou seja, na pratica é possível introduzir mais elementos e realizar diversas análises. A contribuição deste instrumento para a faculdade é viabilizar a realização de ensaios aerodinâmicos em modelos físicos, agregando assim conhecimento e abrindo espaço para novas pesquisas na área como, aeromodelismo e automobilismo, essas áreas possuem diversos acessórios que dependem significativamente de sua aerodinâmica, com este equipamento os alunos poderão confeccionar seus próprios acessórios de forma mais eficiente. Este túnel de uma forma geral cumpriu bem seu papel, pois é possível a observação do fluxo de ar através da superfície testada de forma que a análise de várias superfícies na prática é capaz de dar uma noção maior do que na teoria aos acadêmicos da importância da aerodinâmica.

Palavras-chave: Túnel de vento. Aerodinâmica. Escoamento do ar.

ABSTRACT

This article presents the wind tunnel for aerodynamic tests of CEFAG - Assis Gurgacz Foundation University Center, Cascavel, PR. This instrument, recently completed, was developed and built through experimental research, the purpose of the research was the design and construction of the wind tunnel, didactic and research use for use in CEFAG's mechanical engineering course. The methodology adopted was based on a bibliographic review referring to the construction in other institutions, in which the equipment provides, in a simple way, the analysis of air flow in various environments and surfaces, aerodynamics applied to engineering more specifically in fluid mechanics and its purpose. The study of fluid flow in different environments and conditions, besides providing a tool capable of demonstrating changes when variables do not appear in books, in practice it is possible to introduce more elements and perform various analyzes. The contribution of this instrument to the college is to enable the performing aerodynamic tests on physical models, adding knowledge and making room for new research in the area, aeromodelling and motoring, these areas have several accessories that depend significantly on their aerodynamics, with this equipment students can make their own accessories more efficiently. This tunnel has done its job very well as it is possible the observation of air flow across the tested surface and that the analysis of various surfaces in practice is able to give academics a greater sense than in theory of the importance of aerodynamics.

Keywords: Wind tunnel. Aerodynamics. Air flow.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Túnel de vento da UFSM.....	17
Figura 2- Tubo de Venturi.....	18
Figura 3- Exaustor axial	21
Figura 4- Ventilador centrífugo.....	22
Figura 5- Túnel de vento de circuito aberto.	22
Figura 6- Túnel de vento de circuito fechado.....	23
Figura 7- Perfil de asa biconvexo simétrico	26
Figura 8- Perfil tipo plano-convexo	27
Figura 9- Túnel de vento desenhado com ajuda do <i>solidworks</i>	29
Figura 10- Bancada para sustentação do túnel	30
Figura 11- Chapas de MDF cortadas.....	31
Figura 12- Suporte traseiro com exaustor instalado	32
Figura 13- Colmeia instalada	33
Figura 14- Áreas de visualização	33
Figura 15- Vedação das junções.....	34
Figura 16- EVA instalado e protótipo revestido	35
Figura 17- Túnel finalizado	36
Figura 18- Teste no perfil biconvexo simétrico	36
Figura 19- Perfil biconvexo para comparação	37
Figura 20- Teste do perfil plano convexo.....	37
Figura 21- Perfil plano convexo para comparação.....	38

LISTA DE QUADROS

Quadro 1- Relação de materiais	28
---	----

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1: Equação de Reynolds	24
Equação 2: Equação de Vincensi para vazão volumétrica	24

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

MDF	Placa de fibra de média densidade
UFSM	Universidade Federal De Santa Maria
Re	Número de Reynolds
ρ	Massa específica do ar
V	Velocidade do ar na câmara
L	Comprimento da seção
μ	Viscosidade dinâmica do ar
Q	Vazão volumétrica
V	Velocidade do fluido
A	Área da seção transversal de passagem do fluido
cm	Centímetros
mm	Milímetros
RPM	Rotações por minuto
°C	Graus celcius
EVA	Acetato-vinilo de etileno

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
1.1 OBJETIVOS	14
1.1.1 Objetivo geral	14
1.1.2 Objetivos específicos	14
1.2 JUSTIFICATIVA	14
1.3 CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA	15
1.4 DELIMITAÇÃO DA PESQUISA	15
2 REFERENCIAL TEÓRICO	16
2.1 TÚNEL DE VENTO	16
2.2 ESCOAMENTO DO VENTO	17
2.3 PROPRIEDADES DO AR	18
2.4 CONDIÇÕES DE TESTE	18
2.5 AERODINÂMICA	19
2.6 COMPONENTES DE UM TÚNEL DE VENTO DE CIRCUITO ABERTO.....	19
2.6.1 Difusores.....	19
2.6.2 Bocal.....	19
2.6.3 Seção de testes	20
2.6.4 Colmeias	20
2.6.5 Sistema de acionamento do ar	20
2.7 COMPONENTES DE UM TÚNEL DE VENTO DE CIRCUITO FECHADO.....	23
2.8 PARÂMETROS A SEREM VERIFICADOS APÓS A CONSTRUÇÃO	24
2.8.1 Número de reynolds	24
2.8.2 Velocidade do escoamento	24
2.9 PERFIS DE TESTE ESCOLHIDOS PARA COMPARAÇÃO DE RESULTADOS....	25
2.9.1 Perfis biconvexos.....	25

2.9.2 Perfis plano-convexos	26
2.10 FUMAÇA PARA MELHORA DA VISUALIZAÇÃO	27
3 METODOLOGIA.....	28
3.1 PROJETO DO TÚNEL DE VENTO	28
3.2 PROJETO DA BANCADA DE APOIO	30
3.3 CONSTRUÇÃO	31
3.4 TESTES PRÁTICOS.....	35
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	39
4.1 DEFINIÇÃO DO TIPO DE ESCOAMENTO NO TÚNEL	39
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	41
6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	42
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	43
ANEXO 1 – TABELA DE PROPRIEDADES DO AR	45
ANEXO 2 – PARAFUSOS PARA FIXAÇÃO DO TUNEL NA BANCADA	46
ANEXO 3 – MODELO DE RODINHAS UTILIZADAS NA BANCADA.....	47

1 INTRODUÇÃO

Em 1906, na França, o mundo estaria à frente de um marco histórico, Alberto Santos Dumont seria o primeiro homem que fizera um objeto mais pesado que o ar realizar um voo. Após um século, podemos perceber o tamanho de sua conquista, estudiosos até hoje buscam melhorias em seus projetos e dedicam suas vidas a estudos aerodinâmicos (RODRIGUES 2010)

Com a evolução da área industrial em geral, surgiu o fator aerodinâmico que após estudos se comprovou sua grande influência em casos que dependiam de alto desempenho inicialmente, sendo mais tarde desenvolvidos os túneis para ensaios em laboratórios, onde as equipes podiam avaliar o comportamento de cada elemento e curva de suas criações minunciosamente, antes de lançar ao mercado.

Com a crescente busca do mercado por eficiência energética e relação potência e consumo, este trabalho teve por objetivo desenvolver um túnel de testes aerodinâmicos em escala, que ao final, demonstrasse resultados aproximados da realidade.

Para a construção de um túnel de vento, devem-se levar em conta alguns pontos. Seu tamanho e sua forma influenciam no seu desempenho final, então, os materiais, tais como o tipo de projeto deve ser feito levando em conta o comportamento do ar ao ser forçado a passar por dentro do túnel.

O estudo aerodinâmico se intensificou com o surgimento dos aviões e automóveis que tem a necessidade de se locomover de um determinado ponto a outro no período de tempo com o mínimo possível de atrito e consequentemente de combustível (RODRIGUES 2009). As pesquisas realizadas são de total importância para o desempenho dos elementos e o túnel de vento é uma das ferramentas que demonstram de forma prática a ação do vento nas superfícies.

A metodologia de pesquisa foi do tipo experimental, pois trabalha com experimentos em um ambiente controlado que no caso ocorreu nos laboratórios da instituição (Centro Universitário Da Fundação Assis Gurgacz), assim como a construção do túnel. Foram coletados dados e comparados de acordo com a realidade que assegure o máximo de confiabilidade dos testes possível.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

Este trabalho tem por objetivo construir um túnel de vento em escala que seja funcional o suficiente para testes laboratoriais.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Projetar o túnel de vento de acordo com o espaço pré- definido;
- Selecionar os materiais a serem utilizados;
- Montar o modelo de túnel de vento;
- Realizar testes visuais e funcionais do túnel que comprovem sua eficiência em laboratório;
- Comparar os resultados visuais obtidos com modelos similares já testados.

1.2 JUSTIFICATIVA

A aerodinâmica pode ser considerada como uma investigação da interface aérea com objetos. Durante seus estudos, é possível analisar o comportamento do ar de acordo com as leis básicas da mecânica dos fluidos. A mecânica dos fluidos estuda fluidos (dinâmicos) em movimento e seus efeitos subsequentes nos contornos, que podem ser superfícies sólidas ou interfaces com outros fluidos. Gases e líquidos são classificados como líquidos, e o número de aplicações de fluidos na engenharia são enormes. Por exemplo, respiração, circulação sanguínea, natação, bombas, ventiladores, turbinas, aviões, navios, rios, moinhos de vento, tubulações, foguetes, icebergs, motores, filtros, bicos e sprinklers, só para citar alguns (WHITE, 1999).

O mercado atual se torna cada dia mais exigente, são clientes mais preocupados com suas aquisições e grandes empresas em solucionar as tais preocupações.

A todo instante se ouve falar de eficiência energética, energias renováveis, placas fotovoltaicas e muitas outras tecnologias modernas que seguem o mesmo princípio, maximizar os ganhos de produção e minimizar os custos e danos ao meio ambiente, mas como realizar tal façanha? O grande investimento atual das multinacionais e grandes influenciadores do mercado é em pesquisas. Hoje há empresas especializadas em solucionar

problemas.

Com base neste assunto, atualmente necessita-se de pesquisas que melhorem os produtos do mercado atual quase que instantaneamente, a todo o momento há mudança tanto dos produtos como dos desejos do mercado.

Surgem então os estudos em relação à ação do vento nas estruturas e constatou-se sua grande influência em certos modelos aerodinâmicos que faziam os telhados voarem com mais facilidade em um temporal, por exemplo. Aplicando essa ideia no automobilismo, descobriu-se que o ar oferece tal resistência sobre a superfície da estrutura dos automóveis que diminui sua aceleração, conseqüentemente seu consumo é maior.

Para melhorar as formas geométricas de tal forma que reduza a ação do vento sobre elas, surgiu a ferramenta que é alvo deste trabalho: o túnel de vento.

Nem todas as instituições de ensino possuem este equipamento, pois muitas vezes seu custo é elevado, mas mesmo com um equipamento simples é possível avaliar a camada limite e seção de escoamento do ar, o que na prática agrega muito conhecimento e experiência aos acadêmicos em laboratório.

1.3 CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA

O referido trabalho busca desenvolver um túnel de vento eficiente para estudos laboratoriais, capaz de agregar conhecimento prático aos acadêmicos.

1.4 DELIMITAÇÃO DA PESQUISA

Este trabalho foi realizado em laboratórios da instituição de ensino da Fundação Assis Gurgacz, que envolverá sua construção e testes que comprovem a eficiência do túnel.

O túnel foi construído com materiais de baixo custo que atendem às necessidades de projeto. Toda a estrutura será de MDF fixado com parafusos, a geração do vento se dará por um exaustor axial, passando o vento então por uma colmeia que ajudará a diminuir a turbulência do ar para melhorar o resultado e a visualização dos testes.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 TÚNEL DE VENTO

Há bastante tempo é realizado o emprego de túneis de vento para analisar os fenômenos aerodinâmicos que ocorrem nos mais diversos materiais a fim de obter segurança, confiabilidade, eficiência e a redução de custos de projetos (COSTA; SILVA; ASSAYAG, 2013). São empregados nas mais diversas áreas, atualmente eles são importantes no estudo da aerodinâmica das construções, (edifícios, casas, coberturas, pontes, torres), também podem ser utilizados na aerodinâmica de veículos (automóveis, motocicletas, aviões, foguetes, bicicletas) que é nosso maior foco, na aerodinâmica de dispositivos especiais (aerogeradores, paraquedas, equipamentos esportivos, velas), dentre outros (erosão eólica (agricultura), dispersão de poluentes, ventilação) (NÚÑEZ; LOREDO-SOUZA; ROCHA, 2012).

Após muitos experimentos, o inglês Osborne Reynolds, da Universidade de Manchester, conseguiu provar que o padrão de fluxo de ar para um modelo em escala seria bastante parecido em um veículo em grande escala, se seguisse as mesmas condições de fluxo em ambos os casos. Esse fator, agora conhecido como número de Reynolds, é um parâmetro básico no estudo de todas as situações de fluxo de fluidos, incluindo os diferentes padrões de fluxo, transferência de calor e o início da turbulência. Essa descoberta fez com que o uso de modelos em túneis de vento fosse possível (JOGLEKAR; MOURYA, 2014).

Os túneis de vento são equipamentos muito importantes para os testes aerodinâmicos e podem ser classificados em três principais grupos, os subsônicos onde a velocidade do vento em questão é menor do que a velocidade do som, o supersônico onde a velocidade do vento supera a do som e por fim o hipersônico onde a velocidade é cinco ou mais vezes superior a do som (COUTINHO, 2014).

Esses três grupos são uma alternativa para o ensino em graduação, sendo de grande ajuda nas aulas práticas de aerodinâmica dos cursos de graduação de Engenharia Mecânica principalmente e em outros cursos que ofereçam disciplinas que estudem este assunto na área de mecânica dos fluidos ou fenômenos de transportes. Porém, devido ao alto custo de projetos complexos, muitas instituições deixam de adquirir o equipamento para fins didáticos, mas equipamentos mais simples também conseguem oferecer conhecimento aos acadêmicos com menos custo, e a falta desse conhecimento leva as instituições a abandonarem a ideia e não conseguindo aliar a teoria à prática no estudo da aerodinâmica (COSTA; SILVA; ASSAYAG,

2013)

Além desses três processos, podem ter ainda túneis de circulação de vento que são abertos e fechados, onde os de circuito aberto são menos complexos, porém não permitem um escoamento muito laminar, já os de circuito fechado o ar é recirculado por um duto permitindo assim um escoamento menos turbulento e testes mais eficientes (COUTINHO, 2014).

Segundo (RIPPEL, 2005), “as condições do escoamento do vento de forma mais fiel possível com a realidade são de grande influência para os resultados, pois condições diferentes podem resultar em testes errôneos que não condizem com a realidade em campo.”

A seguir uma ilustração de um túnel de vento feito pela UFSM:

Figura 1- Túnel de vento da UFSM



Fonte: UFSM

2.2 ESCOAMENTO DO VENTO

Para Brunetti, (2008), são dois tipos de escoamento: o laminar em que o fluido escoar de maneira homogênea ou uniforme e sem troca de massa entre suas linhas já o escoamento turbulento, que é mais comum, surge quando de uma forma macroscópica o fluido se mistura transversalmente ao seu escoamento.

Esse estado de deslocamento do vento leva em consideração a sua velocidade, diâmetro do tubo, viscosidade dinâmica e massa específica do fluido, conforme seu resultado dentre os valores pré-determinados se classifica a forma de escoamento (BRUNETTI, 2008).

Em um tubo de Venturi, por exemplo, onde existem entradas divergentes e convergentes o escoamento ganha velocidade na área de menor diâmetro fazendo com que se

torne mais laminar devido o escoamento ser forçado de uma área maior para uma menor, por outro lado na saída do escoamento de área menor para maior a tendência do escoamento de se tornar mais turbulento é alta (BRUNETTI, 2008).

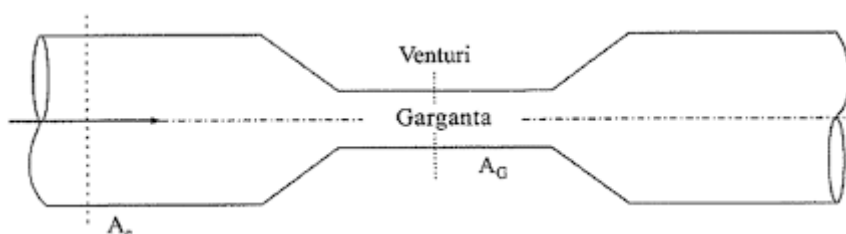
Em relação a escoamento do vento devemos considerar um termo importante chamado vento relativo, segundo Homa, (2006), o vento relativo é basicamente a ação contrária do vento ao corpo em movimento na atmosfera, ou seja, a lei de ação e reação de Newton se aplica neste caso pois a mesma intensidade com que o corpo se move o vento vem em direção oposta com a mesma intensidade e velocidade.

2.3 PROPRIEDADES DO AR

Quando tratamos com fluidos gasosos principalmente, devemos considerar três propriedades cruciais que alteram significativamente seu comportamento que são: temperatura, pressão e densidade. De acordo com a lei dos gases essas propriedades são dependentes umas das outras, pois qualquer variação em uma delas acarretará em consequências nas outras (HOMA, 2006).

O túnel de vento pode ser comparado de uma forma rústica ao tubo de venturi:

Figura 2- Tubo de Venturi



Fonte: BRUNETTI (2008, p. 76)

2.4 CONDIÇÕES DE TESTE

Segundo Catalano e Ismail (1988), tanto as condições climáticas quanto a geometria do protótipo a ser testado deve ser o mais fiel possível à realidade, pois até mesmo a rugosidade da superfície além da geometria errônea das curvas pode interferir grandemente nos resultados finais se comparados com a realidade.

As condições do tempo são variáveis que devem ser levadas em conta nos testes em laboratório, porém, ainda assim, os resultados são aproximados o que ressalta ainda mais a

importância da fidelidade dos testes, um dos exemplos são os carros de fórmula 1, que dependem de grandes esforços para se conseguir milésimos e o estudo aerodinâmico correto pode garantir (ROCHA, SEOLIN e VASQUES, 2013).

2.5 AERODINÂMICA

A aerodinâmica atua no estudo das forças que o vento causa nas mais diversas estruturas, os engenheiros se baseiam nestes estudos para realizarem seus projetos, aviões, barcos e carros são alguns exemplos (SANTOS, 2019).

Define-se como sendo superfícies aerodinâmicas, aquelas que produzem uma resistência mínima ao avanço do corpo que não alterem em desempenho do mesmo (HOMA, 2006).

Já a definição dos aerofólios ao contrário das aerodinâmicas servem para causar força útil ao corpo como é o caso das asas do avião e das asas dianteiras de um fórmula 1 (HOMA, 2006).

Hoje a indústria produz todo tipo de perfil possível graças a esses estudos. Um grande passo foi a invenção da ferramenta túnel de vento. A aerodinâmica atual não leva em consideração só o escoamento do ar, mas dos mais variáveis fluidos, como por exemplo, um submarino que não está exposto a ação do vento mais sim as correntes marítimas (SANTOS, 2019)

2.6 COMPONENTES DE UM TÚNEL DE VENTO DE CIRCUITO ABERTO

2.6.1 Difusores

Segundo (Barlow et al, 1999), a razão de área do difusor deve ser de duas a três vezes na saída em relação a seção de teste, ou seja, a saída de ar do difusor deverá ter uma área de duas a três vezes a entrada do mesmo, de acordo com estudos essa razão é a ideal para se evitar refluxo e jatos de ar que atrapalhem em laboratório.

2.6.2 Bocal

De acordo com os estudos de (Bell e Mehta, 1988) o bocal é importante, pois é ele quem direciona o ar para dentro da seção de testes e sua razão de área não deve ser muito

grande em relação a seção para evitar grandes perdas de carga, esta fase de transição deve ser a mais suave possível.

O bocal é instalado na entrada da seção de teste essa peça consegue captar um grande volume de ar, fazendo com que sua velocidade aumente ao longo de sua estrutura em ângulo maior para menor até a dimensão da seção de teste, isso acarretará em uma diminuição da turbulência no escoamento. Essa é uma parte muito importante do projeto, pois tem o maior impacto tanto na qualidade do fluxo de ar quanto na visualização do fluxo que chega à seção de teste (OLIVEIRA; DALMOLIN; HAUS, 2015; VINCENSI, 2014).

2.6.3 Seção de testes

O local de testes é onde os corpos de prova são posicionados para serem realizados os experimentos, suas paredes devem ser construídas de tal forma que permitam a visualização dos testes sem interferência interna dos resultados.

As dimensões da seção de teste são de acordo com os objetivos do projeto sem prejudicar o escoamento do fluido.

Segundo (Bradshaw e Mehta, 2008) o comprimento da seção de testes para níveis aceitáveis variam de 0,5 a 3 vezes o seu diâmetro hidráulico.

2.6.4 Colmeias

As colmeias são componentes localizados na entrada do fluxo que servem para direcionar o fluido tornando mais laminar, este componente aumenta a fidelidade dos testes, possuem uma característica construtiva com pequenas passagens como favos de abelha que forçam o escoamento a ser laminar, com essa restrição o ar é dividido em lâminas e depois se une novamente, porém com menos turbulência.

As colmeias possuem um papel importante e são destinadas a remoção ou redução de redemoinhos do fluxo e torna a velocidade média lateral mais regular. Apresentam formas geométricas hexagonais, quadradas e triangulares na maioria das vezes, mas podem ser encontradas com outras formas (FARIA; SILVA; RIBEIRO, 2014).

A seguir podemos observar um túnel de circuito aberto e seus componentes.

2.6.5 Sistema de acionamento do ar

O componente responsável pela locomoção do fluxo de ar dentro do túnel são os ventiladores, que são máquinas de fluxo motoras que realizam a transformação da energia elétrica da rede em energia mecânica do rotor e posteriormente em energia cinética do fluido (gás). O ventilador é uma das partes mais importantes do túnel de vento.

Nos modelos de túnel subsônicos podem ser utilizados modelos axiais, que basicamente é quando o ar entra e sai paralelamente ao eixo do rotor; ou centrífugos, que são mais incomuns, pois geralmente possuem um custo mais elevado e como o nome diz realiza a movimentação do ar girando em alta rotação no interior de uma carcaça, fazendo com que o ar seja movimentado por ação da força centrífuga, saindo perpendicular ao mesmo eixo (VINCENSI, 2014).

A seguir podemos observar os dois modelos mais comuns para túneis didáticos.

Figura 3- Exaustor axial



Fonte: Tron

Figura do modelo centrífugo.

Figura 4- Ventilador centrífugo



Fonte: Motovent

Para melhor representar o circuito aberto, segue abaixo a figura de demonstração de um túnel de vento de padrão construtivo aberto com todos os elementos acima descritos.

Figura 5- Túnel de vento de circuito aberto.



Fonte: HELIOTEC – equipamentos didáticos.

2.7 COMPONENTES DE UM TÚNEL DE VENTO DE CIRCUITO FECHADO

Em um túnel de circuito fechado o funcionamento é um pouco diferente, o fluxo de ar circula dentro do túnel constantemente diferente do circuito aberto, de forma que o mesmo ar que passou pela seção de teste entre novamente no sistema através de dutos. Apresenta vantagens como: menor demanda de energia, ruídos menores, melhor controle de velocidade, temperatura, pressão, umidade e qualidade de fluxo. Porém, pelo seu maior custo de construção acaba sendo menos empregado para uso didático, demanda estrutura física maior e possui maior dificuldade de visualização do escoamento já que a injeção de fumaça se torna complexa, pois o ar ao ser recirculado mistura a fumaça (MATOS; ARARIPE, 2016; KOLLROSS, 2015).

De uma forma geral os mesmos componentes que o túnel aberto tem também estão presentes no de circuito fechado, o que diferencia um do outro são os dutos de condução do vento ao longo do percurso, eles possuem curvas leves e seções que amenizam a perda de carga do fluido ao se chocar contra as paredes do túnel o que possibilita um fluxo bem mais laminar que o circuito aberto.

Na figura a seguir podemos observar um modelo de circuito fechado onde estão todos os elementos de um modelo aberto, porém neste estão presentes os dutos de condução do ar citados acima.

Figura 6- Túnel de vento de circuito fechado.



Fonte: Coppe/UFRJ

2.8 PARÂMETROS A SEREM VERIFICADOS APÓS A CONSTRUÇÃO

2.8.1 Número de Reynolds

O número de Reynolds muito usado nas disciplinas de transferência de calor é também utilizado em mecânica dos fluidos com o intuito de determinar o tipo de escoamento em que o fluido se encontra (laminar ou turbulento), e também determinar a velocidade que pode ser alcançada no túnel de vento (COUTINHO, 2014). Esta passagem do escoamento laminar para turbulento depende principalmente da geometria, da rugosidade da superfície, da velocidade de escoamento, da temperatura da superfície e do tipo de fluido (ÇENGEL; CIMBALA, 2007). Para um escoamento externo, o número de Reynolds se calcula como segue:

$$Re = \frac{\rho V L}{\mu} \quad (1)$$

Onde,

Re= Número de Reynolds (admissional);

ρ = Massa específica do ar (kg/m^3);

V= Velocidade do ar na câmara (m/s);

L= Comprimento da seção (m);

μ = Viscosidade dinâmica do ar (kg/m.s);

2.8.2 Velocidade do escoamento

De acordo com Vincensi (2014), a vazão volumétrica (Q) pode ser definida como sendo o resultado da multiplicação da velocidade (V) do fluido pela área (A) de seção transversal do conduto como mostra a equação 2 abaixo:

$$Q = V \times A \quad (2)$$

Onde,

Q= vazão volumétrica (m^3/s);

V = Velocidade do fluido (m/s);

A = Área da seção transversal de passagem do fluido (m²);

2.9 PERFIS DE TESTE ESCOLHIDOS PARA COMPARAÇÃO DE RESULTADOS

Quando se tem um perfil assimétrico há diferença de pressão da parte inferior e superior então o perfil que possuir a menor curvatura da veia fluida serão os mais aerodinâmicos, porque, para a mesma área frontal e para a mesma velocidade, estabelecem a menor diferença de pressões, (RODRIGUES, 2004).

Hoje em dia são utilizados vários formatos de perfis cada um de acordo com a necessidade e especificação de cada projeto, mas de modo geral, os perfis classificam-se em biconvexos (simétricos e assimétricos), plano-convexos, côncavo-convexos e de dupla curvatura, (RODRIGUES, 2004).

2.9.1 Perfis biconvexos

Os perfis deste modelo são os que possuem menor variação de pressão da parte inferior para superior, como explicado acima, a diferença da geometria causa aumento de velocidade do escoamento em um dos lados o que causa diferencial de pressão e realiza a sustentação, mas quando o perfil é simétrico, consequentemente a sustentação é menor.

Esse perfil possui o intra e extradorso convexos e iguais, oferecendo assim mínima resistência a 0° e abaixo dos 0° criam sustentação contrária de valor invertido, porém idêntico a sustentação criada no ângulo positivo correspondente, o que faz com que os aviões de acrobacia utilizem bastante esse modelo. A posição do centro de pressão destes perfis é muito pouco variável e por isso se denominam estáveis (RODRIGUES, 2004).

Na figura abaixo podemos observar um perfil simétrico biconvexo.

Figura 7- Perfil de asa biconvexo simétrico



Fonte: RODRIGUES(2004).

2.9.2 Perfis plano-convexos

Esses tipos de perfil são muito sustentadores e usados em modelos de treino, pois mesmo que os alunos em questão não tenham prática esse modelo de asa, permite um conforto maior por oferecer maior sustentação. Também utilizado em modelos de rádio controle e empenagens horizontais sustentadoras (RODRIGUES, 2004).

A forma geométrica deste perfil permite uma maior sustentação, pois como dito acima, seu diferencial de pressão da parte superior e inferior é diferente, com a parte plana em baixo se oferece menos resistência ao ar, já a parte superior por ser curvada força o ar a contornar sua curva aumentando sua velocidade e reduzindo a pressão na parte superior, pelas leis físicas na teoria se uma força é oposta a outra com intensidade maior tende-se a empurrar a outra, sendo assim cria-se sustentação, pois a pressão de baixo é maior e empurra o perfil para cima (RODRIGUES, 2004).

Em seguida a figura de um perfil tipo plano-convexo.

Figura 8- Perfil tipo plano-convexo



Fonte: RODRIGUES, 2004

2.10 FUMAÇA PARA MELHORA DA VISUALIZAÇÃO

São três tipos usuais. O mais empregado é o gelo seco, que consiste em gás carbônico congelado a 72 graus Celsius negativos. Quando é liberado, forma gotículas que parecem fumaça. Devido ao gás carbônico que absorve muito o calor o local se torna muito quente e desconfortável (VANIN, 1997).

Outro Modelo bastante empregado no teatro, é a mistura de água e glicerina. Após aquecida, ela condensa o que gera resíduos nos locais em que a fumaça se deposita fumaça. O terceiro tipo é o mais perigoso. O material empregado é a base de cloreto de amônia, que, quando esquentado, vira vapor. A amônia quando em contato com olhos ou via oral causa grande irritação (VANIN, 1997).

3 METODOLOGIA

3.1 PROJETO DO TÚNEL DE VENTO

Para o projeto do túnel de vento foi realizada uma pesquisa de materiais necessários visando a eficiência, mas também visando o baixo custo do projeto, detectei que havia disponibilidade de um material de sobra de outro projeto na instituição, então optei por utilizar um MDF de cor branca que me poupou de dar um acabamento estético ao projeto, além de possuir uma baixa rugosidade superficial.

Este modelo construtivo foi o escolhido, pois possui menor custo de fabricação, além de ser mais fácil.

Considerando um espaço útil disponibilizado para uso e armazenagem do túnel de 3 metros foram determinadas as melhores dimensões para que o projeto fosse armazenado após a finalização do mesmo. Ao todo a estrutura possui 270 cm, considerando a instalação do exaustor na saída do difusor.

A relação de materiais pode ser observada no quadro abaixo:

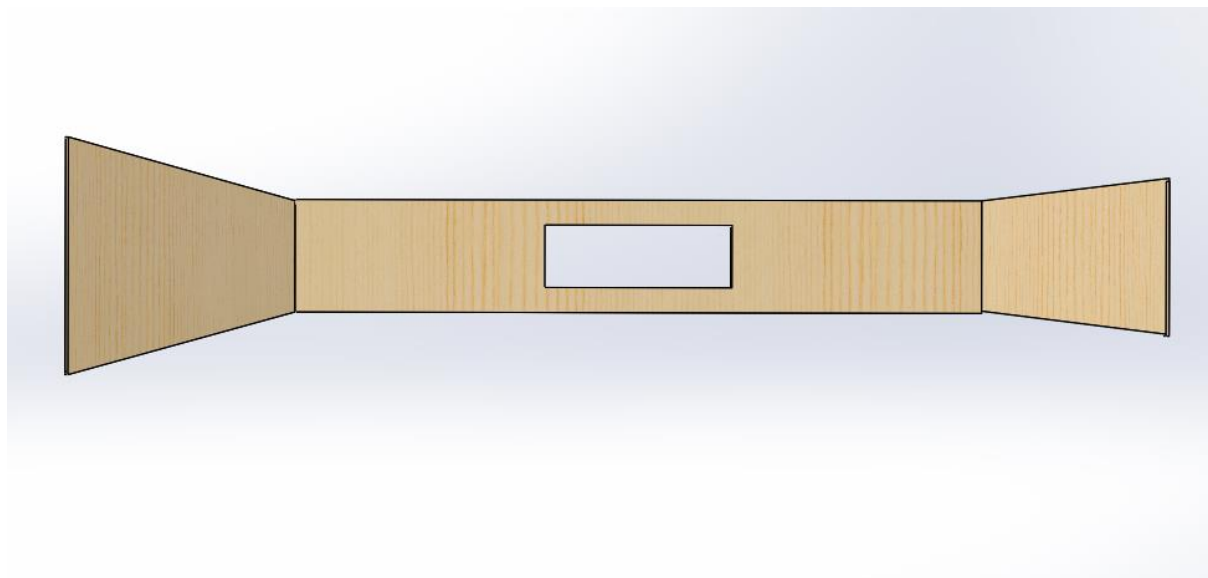
Quadro 1- Relação de materiais

MATERIAIS SELECIONADOS
MDF branco com 10 mm de espessura Exaustor axial 220 volts Cantoneiras de aço para sustentação Parafusos chip board para madeira Vidros transparentes para laterais de visualização Tubo quadrado de aço 20 mm x 20 mm Rodinhas rodízio para bancada EVA preto para revestimento da seção de teste Tubo de PVC de 32 mm Fita isolante branca para acabamento Fita silver tape para vedação dos cantos Máquina de fumaça

Fonte: O autor

A figura abaixo demonstra o projeto do túnel realizado com a ajuda do *software* de desenho 3D *solidworks*.

Figura 9- Túnel de vento desenhado com ajuda do *solidworks*



Fonte: Desenvolvido pelo autor.

Acima podemos observar o modelo construído e seus componentes, como já explicado anteriormente, existem modelos do tipo soprador e sugador, optei por utilizar o tipo sugador por proporcionar um fluxo mais suave.

Da esquerda para direita podemos observar o bocal de entrada do ar que possui sua abertura com ângulo maior para captação de mais volume de ar, após a seção de teste com a abertura em vidro transparente para visualização e por último o difusor com ângulo menor para redução da velocidade, é no difusor que o exaustor axial foi posicionado.

A seguir estão especificadas as medidas do projeto com unidades em centímetros:

Bocal: Possui 80x80 na seção de entrada e 40x40 na saída, pois a seção de teste possui essas medidas, além de um comprimento de 80 centímetros.

Seção de teste: Possui uma seção contínua de 40x40 com 120 de comprimento além de duas aberturas laterais de mesmo tamanho 60x30, porém uma deve ser removível para acesso ao interior da seção de teste.

Difusor: O difusor é o último item da direita que possui uma seção de saída de 50x50 e comprimento de 60 centímetros lembrando que a parte que se prende a seção de teste é sempre 40x40.

3.2 PROJETO DA BANCADA DE APOIO

A bancada de apoio foi projetada também com a ajuda do *solidworks* e tem a função de dar sustentação ao corpo do túnel de vento.

O material utilizado foram barras quadradas de aço carbono SAE 1020 com 20 mm de espessura, as uniões foram todas soldadas e o acabamento feito com tinta *spray*, como o túnel é de material leve as barras escolhidas foram de menor custo.

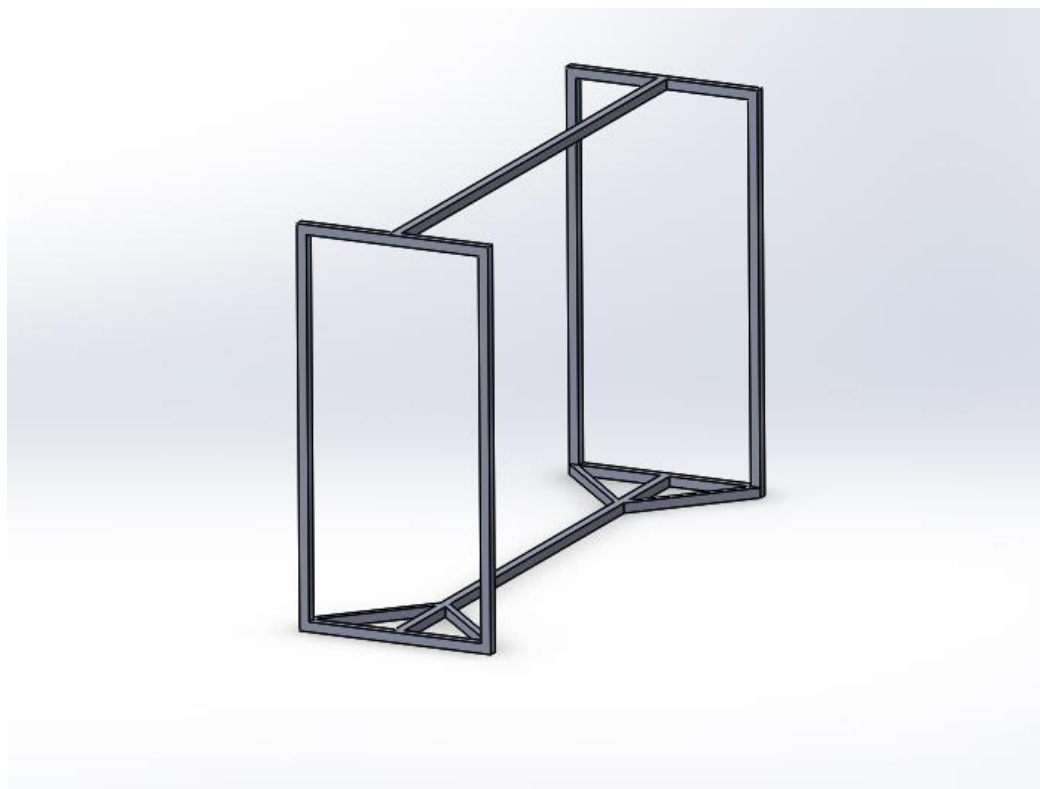
As medidas da bancada em centímetros estão relacionadas a baixo:

- Largura: 40 cm;
- Comprimento: 120 cm;
- Altura: 80 cm;

As medidas respeitam as dimensões da seção de teste para dar maior área de apoio possível, também foram adicionados tubos de reforço em ângulo com 25 cm de comprimento na parte inferior para dar rigidez à estrutura.

Abaixo a figura do modelo de bancada construída:

Figura 10- Bancada para sustentação do túnel



Fonte: Desenvolvido pelo autor.

A estrutura conta ainda com rodinhas de 4 cm de diâmetro nos cantos para locomoção da bancada que estão relacionadas no anexo (3) além do modelo de parafusos utilizados para fixar as rodinhas e o corpo do túnel na bancada anexo(2).

3.3 CONSTRUÇÃO

As chapas de MDF foram cortadas de acordo com o modo de montagem do projeto com auxílio de uma serra elétrica e parafusadas com parafusos auto atarrachantes devido a maior resistência.

A figura abaixo consiste nas chapas de MDF já cortadas:

Figura 11- Chapas de MDF cortadas



Fonte: O autor.

A fixação do exaustor foi realizada com cantoneiras de aço parafusadas no suporte traseiro do túnel, o suporte traseiro foi recortado de acordo com o diâmetro do exaustor que é de 30 cm, como demonstrado na figura abaixo.

Figura 12- Suporte traseiro com exaustor instalado



Fonte: O autor

O projeto conta com a instalação de apenas uma colmeia na entrada do fluxo de ar, as colmeias são passagens restritas que fazem com que o ar fique mais laminar, garantindo um melhor resultado prático dos testes.

O material utilizado na confecção da colmeia foi uma barra de cano PVC de 3,2 cm de diâmetro disponível na instituição, a figura abaixo demonstra a colmeia e seu local de instalação.

Figura 13- Colmeia instalada



Fonte: O autor

O projeto conta com uma área aberta reservada para a análise do comportamento do ar, essa área de vidro incolor proporciona uma visão limpa e clara dos testes.

O vidro foi comprado conforme as dimensões do corte para visualização na seção de testes. As duas laterais possuem vidros um fixo e um móvel para colocação das peças para teste dentro do túnel como mostrado na figura a seguir.

Figura 14- Áreas de visualização



Fonte: O autor

Para vedação das junções entre as chapas foram utilizadas fitas adesivas de dois tipos a *silver tape*, que é um modelo mais reforçado que adere melhor na superfície das chapas, e para dar acabamento fitas adesivas brancas demonstradas na figura abaixo.

Figura 15- Vedação das junções



Autor: O autor

Após o termino da montagem do projeto foi identificado uma dificuldade em observar a fumaça no interior do túnel, pois com as paredes brancas não havia contraste suficiente que destacasse a fumaça. Utilizando EVA preto para revestimento interno da seção de teste e na construção dos corpos de prova fica mais visível o interior.

A figura a seguir demonstra o EVA instalado na seção de teste.

Figura 16- EVA instalado e protótipo revestido



Fonte: O autor

3.4 TESTES PRÁTICOS

Após a construção do túnel e montagem dos aparelhos, foram realizados testes aerodinâmicos em perfis escolhidos.

Os dois perfis escolhidos foram um biconvexo simétrico e um plano convexo para observar a variação do fluxo.

Para a realização do teste o sistema conta com injeção de fumaça no interior da câmara que facilita a visualização do comportamento do fluido, a máquina de fumaça fica posicionada no lado externo da seção de teste, optei por adaptar a máquina em cima, pois ela precisaria de um suporte caso o local fosse outro.

A figura abaixo demonstra o projeto já finalizado com a máquina de fumaça posicionada.

Figura 17- Túnel finalizado



Fonte: o autor

Foram realizados testes visuais nos dois perfis escolhidos e comparados com imagens realizadas em outros testes. O primeiro teste realizado foi no perfil biconvexo simétrico.

Para realização dos testes foi utilizada a potência máxima do exaustor assim como da máquina de fumaça as imagens obtidas estão a seguir.

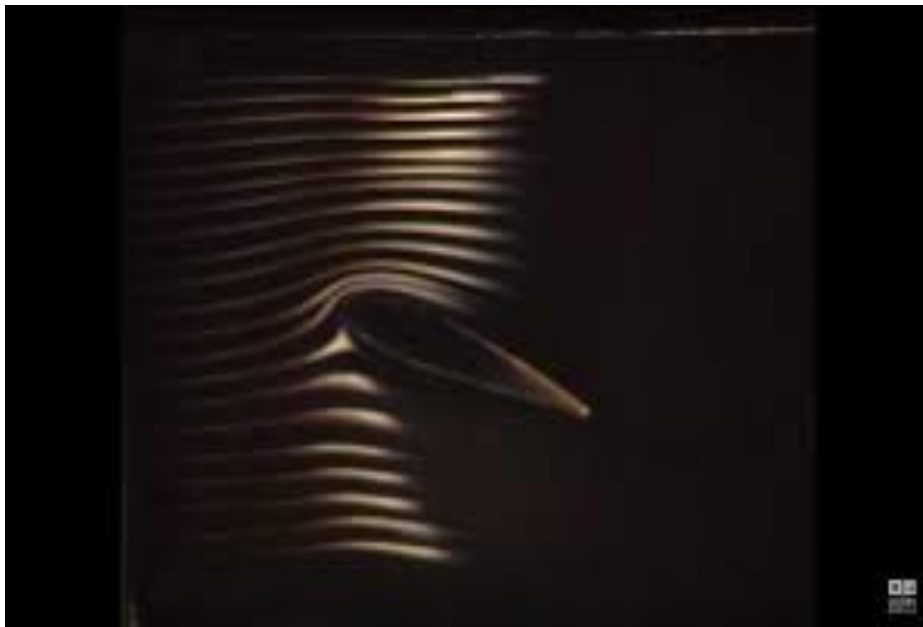
Figura 18- Teste no perfil biconvexo simétrico



Fonte: O autor

A seguir um perfil testado anteriormente em outro projeto para comparação.

Figura 19- Perfil biconvexo para comparação



Fonte: Guia do aviador

O segundo teste foi realizado no perfil plano convexo com as mesmas condições do perfil anterior e o resultado pode ser visto na figura abaixo.

Figura 20- Teste do perfil plano convexo



Fonte: O autor

A figura abaixo demonstra um teste em perfil plano convexo anterior.

Figura 21- Perfil plano convexo para comparação



Fonte: Rodrigo De P. túnel de vento- camada limite

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 DEFINIÇÃO DO TIPO DE ESCOAMENTO NO TÚNEL

Para definir o tipo de escoamento laminar ou turbulento precisamos de informações do exaustor utilizado que são, 1750 RPM e 1500 m³/h.

Para definirmos o número de Reynolds precisamos calcular a velocidade do escoamento através da fórmula 2 citada no texto acima.

$$Q = V \times A$$

Modelando a fórmula obtemos:

$$V = Q/A$$

Substituindo os valores de vazão do ventilador que é 1500 m³/h ou 25 m³/s e a área da seção de teste que é de 0,16 m² obtemos:

$$V = 1500/0,16$$

$$V = 9375 \text{ m/h ou}$$

$$V = 9375/3600$$

$$V = 2,60 \text{ m/s}$$

Com a velocidade definida podemos calcular o número de Reynolds pela equação 1 definida acima no texto.

$$Re = \frac{\rho V L}{\mu}$$

Considerando uma massa específica do ar a uma temperatura de 25 °C, segundo anexo 1, o valor é de 1,184 kg/m³, $\mu = 0,00001849 \text{ kg/m.s}$ e a distância L foi considerada o ponto de colocação dos corpos de teste que é o meio da seção ou 0,6 metros. Substituindo os valores obtemos:

$$Re = \frac{1,184 \times 2,6 \times 0,6}{0,00001849}$$

$$Re = 99893.99$$

O objetivo sempre é deixar o escoamento o mais laminar possível, considerando que para escoamentos internos os valores de Reynolds variam de 2300 a 4000 sendo laminar e turbulento respectivamente, o valor encontrado é considerado aceitável para equipamentos didáticos, porém lembrando que ainda é turbulento.

Visualmente os resultados foram satisfatórios com a colocação do EVA preto a fumaça em torno dos objetos ficou mais visível e facilitou a compreensão dos testes, como equipamento didático o túnel de vento construído funcionou bem.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O desenvolvimento do projeto citado neste artigo possibilitou uma análise e o desenvolvimento de um túnel de vento, que pode melhorar a parte prática das disciplinas de Mecânica dos Fluidos e das demais disciplinas da área.

O referido trabalho permitiu uma pesquisa de campo para obter dados mais consistentes sobre as etapas do processo, como os cálculos das dimensões. Permitindo também o aperfeiçoamento dos conhecimentos sobre o programa *SolidWorks*.

Conclui-se que o motor, tendo um controle de velocidade como um potenciômetro, por exemplo, facilita a visualização do escoamento, pois quando a velocidade é menor se torna mais visível. Este equipamento foi importante não somente para a pesquisa e o desenvolvimento deste projeto, visto que, também será importante no ensino didático, pois os alunos da instituição poderão adquirir novos conhecimentos aliando a teoria à prática, determinando a resistência dos materiais, visualizando as camadas do escoamento e, obtendo maior segurança e economia na produção de produtos, além de iniciação em áreas futuras como aeromodelismo ou disciplinas que estudem mais a fundo a aerodinâmica.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Otimização de aerofólios e perfis de asa.
- Estudo da camada limite em diferentes ângulos de ataque ao perfil escolhido.
- Estudo da viabilidade de instalação de um inversor de frequência ao exaustor e verificação de melhora na visualização do teste.
- Definição de velocidade de operação, da área útil para testes e se há interferência das paredes pela forma quadrada da seção e qual a melhor posição para o protótipo na câmara de teste.
- Realizar calibração de anemômetros para atender a demanda da região oeste do Paraná.
- Inserir componentes que possibilitem a coleta de dados computacionais dos testes.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BARLOW, B.J.; RAE W.H.; POPE, A. Low Speed Wind Tunnel Testing. 3ª ed. New York: John Wiley & Sons, 1999.

BELL, J. H; MEHTA, R. D. Contraction Design for Small Low-Speed Wind Tunnels. Stanford: 1988. Disponível em: < https://moodle.polymtl.ca/file.php/1047/JEROME/Contractions/Bell_1988.pdf > Acesso em: 03 de junho de 2019.

BRUNETTI, F. **Mecânica dos fluidos**: 2. Ed. Ver. São Paulo. Pearson Prentice Hall, 2008.

CARRIL JUNIOR, CELIO, F; FUSCO, P. B. **Projeto, construção e calibração de um túnel de vento**: 1995. Universidade de São Paulo, São Paulo, 1995.

CATALANO, Fernando Martini; ISMAIL, Kamal Abdel Radi. **Projeto, construçao e calibracao de um tunel aerodinamico de circuito aberto tipo n. P. L. De seccao transversal hexagonal**. 1988. Universidade de São Paulo, Sao Carlos, 1988.

ÇENGEL, A. Y.; CIMBALA, J. M. Mecânica dos fluidos: fundamentos e aplicações. São Paulo: AMGH Editora, 2007.

COSTA, H. R. S; SILVA, J. W.; ASSAYAG, E. S. Túnel de vento de baixo custo para atividades acadêmicas do curso de Engenharia Mecânica. COBENGE, Gramado, set. 2013. Disponível em: <http://www.fadep.br/engenharia-eletrica/congresso/pdf/116796_1.pdf>. Acesso em: 22 de out. 2019.

FARIA, A. I. R.; SILVA, E. F.; RIBEIRO, M. V. Projeto, construção e avaliação de um mini-túnel de vento para fins didáticos. 33f. Monografia (Bacharel em Engenharia Mecânica) – Faculdade Anhanguera, Anápolis, 2014.

FELIPE, R. C. Rio de Janeiro: UFRJ/ Escola Politécnica, 2014.

JOGLEKAR, B.; MOURYA, R. M. Design, construction and testing open circuit low speed wind tunnel. International Journal of Engineering Research and Reviews. Bhopal, vol. 2, n. 4, p.1-9, 2014.

JORGE M. HOMA, Aerodinâmica e teoria de voo. 24ª ed. 2006.

KOLLROSS, A. Máquina de fumaça de baixo custo para túnel de vento didático. 98f. Monografia (Bacharel em Engenharia Mecatrônica) - Universidade Federal de Santa Catarina, Campus de Joinville, Joinville, 2015.

LEANDRO, I. R. Estudo em túnel de vento do arrasto aerodinâmico sobre torres treliçadas de linhas de transmissão: 2005.

MATOS, F. F. S.; ARARIPE, R. S. Avaliação da curvatura do bocal de um túnel de vento subsônico e aberto, utilizando simulação numérica. Conex. Ci. e Tecnol. Fortaleza/CE, v. 10,

33 n. 5, p. 34 - 42. Disponível em: <<https://conexoes.ifce.edu.br/index.php/conexoes/article/view/1170>>. Acesso em: 22 out. 2019.

MEHTA, R. D.;BRADSHAW, P. Tecnical Notes: Design Rules for Small Low Speed Wind Tunnels.The Aeronautical Journal of The Royal Aeronautical Society, November 1979.

NÚÑEZ, G. J. Z.; LOREDO-SOUZA, A. M.; ROCHA, M. M. Uso do túnel de vento como ferramenta de projeto no design aerodinâmico. **Design e Tecnologia**, v. 2, n. 04, p. 10-23, 22 out. 2019.

OLIVEIRA, R. P.; DALMOLIN, V.; HAUS, T. L. Fabricação de um túnel de vento de circuito aberto para testes visuais em modelos geométricos. Memorial TCC – Caderno de Graduação, v. 1, n. 1, Curitiba, 2015. Disponível em: < <https://memorialtcccadernograduacao.fae.edu/cadernotcc/article/view/28>>. Acesso em: 23 out. 2019

Primeiro túnel de vento climático do hemisfério sul. disponível em: https://www.inovacaotecnologica.com.br/noticias/noticia.php?artigo=tunel-vento-climatico&id=010170140618#.xbgru2zv_iu acesso em: 24 out 2019.

ROCHA, M. R; JURISATO, A. S; HELLMEISTER, L. A. V. Concepção, modelagem, simulação e usinagem de um aerofólio automotivo auxiliado por computador. Proceedings of World Congress on Systems Engineering and Information Technology: v. 1, n. 2013, p. 178-181, 2013. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/11449/135198>>. Acesso em 18/04/2019.

RODRIGUES, L. E. M. J,Fundamentos da Engenharia Aeronáutica.1. ed. São Paulo: Edição do Autor, 2010

RODRIGUES, J. C. Aeromodelismo teórico e prático. Serviço de Publicações da Mocidade Portuguesa. Lisboa, 2004.

SANTOS, Marco Aurélio da Silva. "Aerodinâmica"; *Brasil Escola*. Disponível em: <<https://brasilecola.uol.com.br/fisica/aerodinamica.htm>>. Acesso em 03 de junho de 2019.

RODRIGO DE P. Túnel de vento- camada limite. Disponível em: <https://youtu.be/lGpEjfKMYp0>. Acesso em 03 de outubro de 2019.

VANIN, A. Fumaça artificial é uma nuvem de gases. **DISPONÍVEL EM:** <[HTTPS://SUPER.ABRIL.COM.BR/COMPORTAMENTO/FUMACA-ARTIFICIAL-E-UMA-NUVEM-DE-GASES/](https://super.abril.com.br/comportamento/fumaca-artificial-e-uma-nuvem-de-gases/)> **ACESSO EM 02 DE DEZEMBRO DE 2019.**

VINCENSI, A. Dimensionamento de um túnel de vento subsônico. 70f. Monografia (Bacharel em Engenharia Mecânica) – Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, Panambi, 2014.

WHITE, F. M. Mecânica dos Fluidos. 4ª ed. Editora McGraw-Hill Interamericana do Brasil Ltda, 2002.

ANEXOS

ANEXO 1 – TABELA DE PROPRIEDADES DO AR

TABELA A-15
Propriedades do ar a 1 atm de pressão

Temp. $T, ^\circ\text{C}$	Densidade $\rho, \text{kg/m}^3$	Calor específico $c_p, \text{J/kg} \cdot \text{K}$	Condutividade térmica $k, \text{W/m} \cdot \text{K}$	Difusividade térmica $\alpha, \text{m}^2/\text{s}$	Viscosidade dinâmica $\mu, \text{kg/m} \cdot \text{s}$	Viscosidade cinemática $\nu, \text{m}^2/\text{s}$	Número de Prandtl Pr
-150	2,866	983	0,01171	$4,158 \times 10^{-6}$	$8,636 \times 10^{-6}$	$3,013 \times 10^{-6}$	0,7246
-100	2,038	966	0,01582	$8,036 \times 10^{-6}$	$1,189 \times 10^{-5}$	$5,837 \times 10^{-6}$	0,7263
-50	1,582	999	0,01979	$1,252 \times 10^{-5}$	$1,474 \times 10^{-5}$	$9,319 \times 10^{-6}$	0,7440
-40	1,514	1002	0,02057	$1,356 \times 10^{-5}$	$1,527 \times 10^{-5}$	$1,008 \times 10^{-5}$	0,7436
-30	1,451	1004	0,02134	$1,465 \times 10^{-5}$	$1,579 \times 10^{-5}$	$1,087 \times 10^{-5}$	0,7425
-20	1,394	1005	0,02211	$1,578 \times 10^{-5}$	$1,630 \times 10^{-5}$	$1,169 \times 10^{-5}$	0,7408
-10	1,341	1006	0,02288	$1,696 \times 10^{-5}$	$1,680 \times 10^{-5}$	$1,252 \times 10^{-5}$	0,7387
0	1,292	1006	0,02364	$1,818 \times 10^{-5}$	$1,729 \times 10^{-5}$	$1,338 \times 10^{-5}$	0,7362
5	1,269	1006	0,02401	$1,880 \times 10^{-5}$	$1,754 \times 10^{-5}$	$1,382 \times 10^{-5}$	0,7350
10	1,246	1006	0,02439	$1,944 \times 10^{-5}$	$1,778 \times 10^{-5}$	$1,426 \times 10^{-5}$	0,7336
15	1,225	1007	0,02476	$2,009 \times 10^{-5}$	$1,802 \times 10^{-5}$	$1,470 \times 10^{-5}$	0,7323
20	1,204	1007	0,02514	$2,074 \times 10^{-5}$	$1,825 \times 10^{-5}$	$1,516 \times 10^{-5}$	0,7309
25	1,184	1007	0,02551	$2,141 \times 10^{-5}$	$1,849 \times 10^{-5}$	$1,562 \times 10^{-5}$	0,7296
30	1,164	1007	0,02588	$2,208 \times 10^{-5}$	$1,872 \times 10^{-5}$	$1,608 \times 10^{-5}$	0,7282
35	1,145	1007	0,02625	$2,277 \times 10^{-5}$	$1,895 \times 10^{-5}$	$1,655 \times 10^{-5}$	0,7268
40	1,127	1007	0,02662	$2,346 \times 10^{-5}$	$1,918 \times 10^{-5}$	$1,702 \times 10^{-5}$	0,7255
45	1,109	1007	0,02699	$2,416 \times 10^{-5}$	$1,941 \times 10^{-5}$	$1,750 \times 10^{-5}$	0,7241
50	1,092	1007	0,02735	$2,487 \times 10^{-5}$	$1,963 \times 10^{-5}$	$1,798 \times 10^{-5}$	0,7228
60	1,059	1007	0,02808	$2,632 \times 10^{-5}$	$2,008 \times 10^{-5}$	$1,896 \times 10^{-5}$	0,7202
70	1,028	1007	0,02881	$2,780 \times 10^{-5}$	$2,052 \times 10^{-5}$	$1,995 \times 10^{-5}$	0,7177
80	0,9994	1008	0,02953	$2,931 \times 10^{-5}$	$2,096 \times 10^{-5}$	$2,097 \times 10^{-5}$	0,7154
90	0,9718	1008	0,03024	$3,086 \times 10^{-5}$	$2,139 \times 10^{-5}$	$2,201 \times 10^{-5}$	0,7132
100	0,9458	1009	0,03095	$3,243 \times 10^{-5}$	$2,181 \times 10^{-5}$	$2,306 \times 10^{-5}$	0,7111
120	0,8977	1011	0,03235	$3,565 \times 10^{-5}$	$2,264 \times 10^{-5}$	$2,522 \times 10^{-5}$	0,7073
140	0,8542	1013	0,03374	$3,898 \times 10^{-5}$	$2,345 \times 10^{-5}$	$2,745 \times 10^{-5}$	0,7041
160	0,8148	1016	0,03511	$4,241 \times 10^{-5}$	$2,420 \times 10^{-5}$	$2,975 \times 10^{-5}$	0,7014
180	0,7788	1019	0,03646	$4,593 \times 10^{-5}$	$2,504 \times 10^{-5}$	$3,212 \times 10^{-5}$	0,6992
200	0,7459	1023	0,03779	$4,954 \times 10^{-5}$	$2,577 \times 10^{-5}$	$3,455 \times 10^{-5}$	0,6974
250	0,6746	1033	0,04104	$5,890 \times 10^{-5}$	$2,760 \times 10^{-5}$	$4,091 \times 10^{-5}$	0,6946
300	0,6158	1044	0,04418	$6,871 \times 10^{-5}$	$2,934 \times 10^{-5}$	$4,765 \times 10^{-5}$	0,6935
350	0,5664	1056	0,04721	$7,892 \times 10^{-5}$	$3,101 \times 10^{-5}$	$5,475 \times 10^{-5}$	0,6937
400	0,5243	1069	0,05015	$8,951 \times 10^{-5}$	$3,261 \times 10^{-5}$	$6,219 \times 10^{-5}$	0,6948
450	0,4880	1081	0,05298	$1,004 \times 10^{-4}$	$3,415 \times 10^{-5}$	$6,997 \times 10^{-5}$	0,6965
500	0,4565	1093	0,05572	$1,117 \times 10^{-4}$	$3,563 \times 10^{-5}$	$7,806 \times 10^{-5}$	0,6986
600	0,4042	1115	0,06093	$1,352 \times 10^{-4}$	$3,846 \times 10^{-5}$	$9,515 \times 10^{-5}$	0,7037
700	0,3627	1135	0,06581	$1,598 \times 10^{-4}$	$4,111 \times 10^{-5}$	$1,133 \times 10^{-4}$	0,7092
800	0,3289	1153	0,07037	$1,855 \times 10^{-4}$	$4,362 \times 10^{-5}$	$1,326 \times 10^{-4}$	0,7149
900	0,3008	1169	0,07465	$2,122 \times 10^{-4}$	$4,600 \times 10^{-5}$	$1,529 \times 10^{-4}$	0,7206
1000	0,2772	1184	0,07868	$2,398 \times 10^{-4}$	$4,826 \times 10^{-5}$	$1,741 \times 10^{-4}$	0,7260
1500	0,1990	1234	0,09599	$3,908 \times 10^{-4}$	$5,817 \times 10^{-5}$	$2,922 \times 10^{-4}$	0,7478
2000	0,1553	1264	0,11113	$5,664 \times 10^{-4}$	$6,630 \times 10^{-5}$	$4,270 \times 10^{-4}$	0,7539

Nota: Para os gases ideais, as propriedades c_p , k , μ e Pr são independentes da pressão. As propriedades ρ , ν e α em uma pressão P (em atm) diferente de 1 atm são calculadas multiplicando-se os valores de ρ na temperatura dada por P e dividindo ν e α por P .

Fonte: Dados gerados a partir do programa EES desenvolvido por S. A. Klein e F. L. Alvarado. Fontes originais: Keenan, Chao, Keyes, Gas Tables, Wiley, 198; e Thermophysical Properties of Matter, vol. 3: Thermal Conductivity, Y. S. Touloukian, P. E. Liley, S. C. Saxena, vol. 11: Viscosity, Y. S. Touloukian, S. C. Saxena, P. Hestermann, IFI/Plenum, NY, 1970, ISBN 0-306067020-8.

Scanned by CamScanner

ANEXO 2 – PARAFUSOS PARA FIXAÇÃO DO TUNEL NA BANCADA

ANEXO 3 – MODELO DE RODINHAS UTILIZADAS NA BANCADA