

DESENVOLVIMENTO DE UM TÚNEL DE VENTO SUBSÔNICO COM FOCO NO ENSINO DIDÁTICO

Luiz Jyonathan Carminatti¹
Rodrigo Konrath²

RESUMO

O presente trabalho tem por objetivo a construção de um túnel de vento subsônico com foco no ensino didático e de baixo custo para fins acadêmicos. Neste estudo, realizou-se uma revisão bibliográfica, elencando os diferentes tipos de túneis, bem como as particularidades que as distinguem. Dentre os tipos de túneis de vento existentes no mercado, optou-se pelo tipo de circuito aberto para a fabricação, pela sua simplicidade construtiva, um dos principais objetivos deste trabalho. Após a revisão bibliográfica, foram realizados os cálculos pertinentes ao equipamento em questão. Com a utilização do software *SolidWorks* foi realizado o desenho de todas as peças, além do dimensionamento dos componentes do túnel de vento. Em uma próxima etapa, o equipamento poderá ser melhorado, podendo determinar-se os padrões de fluxo e medir os coeficientes aerodinâmicos.

Palavras-chave: Túnel de vento. Aerodinâmica. *SolidWorks*.

1 INTRODUÇÃO

No início do século XX, o estudo da aerodinâmica foi impulsionado pela necessidade de melhorar o desempenho e o consumo de combustível dos carros e aviões da época, principalmente pelos fabricantes perceberem que os carros perdiam potência pela resistência do ar (MATOS; BOTELHO, 2007). Devido essa necessidade, os fabricantes estudaram e desenvolveram um equipamento chamado túnel de vento, o qual serviu para a realização de testes em protótipos. Esses túneis podem ser fabricados de diversas formas e tamanhos, além de apresentar variações de velocidades.

O túnel de vento é considerado uma das mais importantes ferramentas nas pesquisas de fenômenos aerodinâmicos em objetos expostos a escoamentos (SOUZA JUNIOR; FERREIRA; LETA, 2012). Ainda, segundo Kollross (2015), é uma estrutura empregada na análise dos padrões de escoamento dos ventos em torno de objetos sólidos, sendo que esses são mantidos estáticos na seção de testes, enquanto o ar é propulsado em seus entornos gerando interações

¹ Acadêmico do curso de Engenharia Mecânica da UCEFF. E-mail: kyonathan@unochapeco.edu.br.

² Docente do curso de Engenharia Mecânica da UCEFF. E-mail: konrath@uceff.edu.br.

entre o fluxo de ar e o corpo de prova.

O emprego de túneis de vento para analisar os fenômenos aerodinâmicos ocorre a fim de obter segurança, confiabilidade, eficiência e a redução de custos de projetos (COSTA; SILVA; ASSAYAG, 2013). Atualmente eles são importantes no estudo da aerodinâmica das construções (edifícios, casas, coberturas, pontes, torres), na aerodinâmica de veículos (automóveis, motocicletas, aviões, foguetes, bicicletas), na aerodinâmica de dispositivos especiais (aerogeradores, paraquedas, equipamentos esportivos, velas), dentre outros (erosão eólica (agricultura), dispersão de poluentes, ventilação) (NÚÑEZ; LOREDO-SOUZA; ROCHA, 2012).

Os túneis de vento capazes de analisar objetos em tamanhos reais não são comuns, e devido suas dimensões tornam-se caros. Além disso, muitos ensaios aerodinâmicos ainda não são produzidos adequadamente em simulações realizadas por computadores. Dessa forma, uma alternativa para realizar estudos de fluxo de ar de forma adequada é utilizar modelos menores de túneis de vento com objetos em tamanho reduzido.

Esses são uma alternativa para o ensino em graduação, sendo fundamental nas aulas práticas de aerodinâmica dos cursos de graduação de Engenharia Mecânica e em outros cursos que oferecem disciplinas na área de mecânica dos fluidos ou fenômenos de transportes. Entretanto, devido ao alto custo, muitas instituições deixam de adquirir o equipamento para fins didáticos, e acabam não conseguindo aliar a teoria à prática no estudo da aerodinâmica (COSTA; SILVA; ASSAYAG, 2013).

Com base no exposto acima, o presente artigo se propõe a responder a seguinte pergunta:
Qual é a base teórica para a construção de um túnel de vento com finalidade didática?

Como o Centro Politécnico da UCEFF Faculdades não possui um túnel de vento, este estudo tem como objetivo projetar um equipamento de escoamento subsônico, de pequeno porte e baixo custo, capaz de ser utilizado para analisar fenômenos aerodinâmicos com finalidade didática, proporcionando aos acadêmicos uma melhor compreensão de conceitos e ampliação dos conhecimentos teóricos.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O túnel de vento tem a função de determinar parâmetros nos projetos, como, montagem, análise em construção de carros, aviões, pontes e até mesmo edifícios. Com isso, pode-se avaliar

os requisitos estruturais para determinar a resistência dos projetos, conseqüentemente oferecendo maior segurança e economia na montagem.

2.1 TÚNEIS DE VENTO: HISTÓRICO E CLASSIFICAÇÃO

O primeiro túnel de vento de circuito fechado e acionado por uma máquina a vapor foi construído na Inglaterra em 1871, para a *Aeronautical Society of Great Britain*, por um dos fundadores desta associação, Francis H. Wenham (GORECKI apud SANTOS *et al*, 2014). Já em 1897, Konstantin Tsiolkovsky construiu um túnel de vento de circuito aberto com um ventilador centrífugo e determinou os coeficientes de arrasto de placas planas, cilindros e esferas (JOGLEKAR; MOURYA, 2014).

Após experimentos exaustivos na década 1880, o inglês Osborne Reynolds, da Universidade de Manchester, demonstrou que o padrão de fluxo de ar para um modelo em escala seria o mesmo que para um veículo em grande escala, se certo parâmetro de fluxo fosse o mesmo em ambos os casos. Esse fator, agora conhecido como número de Reynolds, é um parâmetro básico na descrição de todas as situações de fluxo de fluidos, incluindo as formas dos padrões de fluxo, a facilidade de transferência de calor e o início da turbulência. Essa descoberta justifica o uso de modelos em túneis de vento para simular fenômenos da vida real (JOGLEKAR; MOURYA, 2014).

De acordo com a NASA (2015), cada túnel de vento é projetado para uma faixa de velocidade e propósito específico. Dessa forma, há inúmeros tipos e diferentes formas de classificá-los. Porém, a maioria dos autores basicamente diferenciam os túneis de vento de acordo com sua geometria ou circuito, velocidade de escoamento e sentido do escoamento.

2.1.1 Túneis de circuito aberto e fechado

Existem dois tipos de túneis de vento: os de circuito aberto e os de circuito fechado. Em um túnel de circuito aberto, o fluxo de ar é puxado da atmosfera por uma extremidade e passa por todo o túnel até retornar à atmosfera pela outra extremidade. Tem como vantagens o baixo custo de construção, tamanho diminuído e o escoamento poder ser visualizado através do sistema de fumaça. Como desvantagens podem ser citados: o barulho causado pelo mesmo, maior consumo de energia para produzir o escoamento e dificuldade no controle da temperatura do ar (MATOS; ARARIPE, 2016; KOLLROSS, 2015).

Já, em um túnel de circuito fechado o fluxo de ar circula dentro do túnel constantemente, de forma que o escoamento que passou pela seção de teste entre novamente no sistema através de dutos. Apresenta vantagens como: a menor demanda de energia, ruídos menores, melhor controle de velocidade, temperatura, pressão, umidade e qualidade de fluxo. Porém, tem maior custo de construção, demanda estrutura física maior e possui maior dificuldade de visualização do escoamento do ar através de fumaça ou outros meios (MATOS; ARARIPE, 2016; KOLLROSS, 2015).

2.1.2 Velocidades de escoamento

Os túneis de vento são frequentemente identificados de acordo com uma relação existente entre a velocidade do som e a velocidade do escoamento. Essa relação é chamada de número de Mach (Ma), número este adimensional, definido pela expressão (1):

$$Ma = \frac{V}{c} = \frac{\text{Velocidade do escoamento}}{\text{Velocidade do som}} \quad (1)$$

De acordo com os autores Çengel e Cimbala (2007), a velocidade do som é igual à 346m/s no ar à uma temperatura de 25 °C e ao nível do mar. O escoamento é denominado *sônico* quando $Ma = 1$, *subsônico* quando $Ma < 1$, *supersônico* quando $Ma > 1$, e *hipersônico* quando $Ma \gg 1$.

2.1.3 Sentido do escoamento

Segundo Matos e Araripe (2016), os túneis de circuito aberto podem ser classificados quanto ao sentido do escoamento. Chamamos de soprador, quando o ventilador que promove o fluxo de ar é posicionado na entrada do equipamento e impulsiona o vento diretamente para dentro do sistema; enquanto que para um sugador, o exaustor que promove o fluxo de ar é posicionado na saída do sistema, extraíndo o ar de dentro do túnel e compelindo o fluxo de dentro para fora. O tipo sugador apresenta turbulência maior na entrada do que o tipo soprador (SANTOS et al, 2014).

2.2 ELEMENTOS DE UM TÚNEL DE VENTO

Um túnel de vento é basicamente constituído por 5 elementos: sistema de acionamento, difusor, câmara de estabilização, contração e seção de teste (VINCENSI, 2014; FARIA; SILVA; RIBEIRO, 2014).

2.2.1 Sistema de acionamento

O acionamento do sistema ocorre através de ventiladores, que são máquinas de fluxo motoras que transformam a energia mecânica do rotor em energia cinética do fluido (gás). O ventilador é um elemento importante e que compõe grande parte do custo de um túnel de vento.

De acordo com Vincensi (2014), podem ser utilizados nos túneis subsônicos, modelos axiais, quando o ar entra e sai paralelamente ao eixo do rotor; ou centrífugos, quando o rotor gira em alta rotação no interior de uma carcaça, sendo que o ar é movido do centro para a periferia do rotor por ação da força centrífuga, saindo perpendicular ao mesmo eixo. O ventilador a ser escolhido para um túnel de vento deve superar as perdas de carga geradas em cada componente do túnel para fornecer a vazão esperada.

2.2.2 Difusor

De acordo com Oliveira, Dalmolin e Haus (2015), a função do difusor é desacelerar o fluxo de ar que sai com uma velocidade elevada da seção de teste, conseguindo assim recuperar a pressão estática antes de sair do sistema e recircular.

Vincensi (2014) destaca que há dois tipos de difusores: com ângulos de abertura baixos e com ângulos maiores. Os primeiros são praticados em túneis do tipo sugador e os difusores com ângulos maiores são comumente utilizados em túneis de vento sopradores, resultando em difusores mais curtos.

2.2.3 Câmara de estabilização

Este é o local onde se instalam as telas e colmeias ou outros elementos que se deseje para melhorar a qualidade do escoamento do fluido proveniente do difusor. O comprimento utilizado é em média metade do valor do diâmetro de entrada da câmara (VINCENSI, 2014).

As telas, geralmente constituídas em seções quadradas ou retangulares de metal, apresentam como função evitar a separação da camada limite e proporcionar uma uniformidade em todo fluxo. As colmeias são componentes destinados a remoção de redemoinhos do fluxo e da variação da velocidade média lateral. Apresentam formas geométricas hexagonais, quadradas e triangulares (FARIA; SILVA; RIBEIRO, 2014).

2.2.4 Contração

A seção de contração é instalada na entrada da seção de teste com finalidade de coletar um grande volume de ar e fazer com que a velocidade do mesmo seja aumentada (esse aumento pode chegar a 20 vezes). Isso acarretará em uma diminuição da turbulência no escoamento. Essa é uma parte crítica do projeto do túnel, pois tem o maior impacto na qualidade do fluxo de ar que chega à seção de teste (OLIVEIRA; DALMOLIN; HAUS, 2015; VINCENSI, 2014).

2.2.5 Seção de testes

A seção de teste, segundo Vincensi (2014), é a área do túnel onde é possível visualizar o escoamento em torno do objeto de estudo; materiais transparentes, como acrílicos, podem ser utilizados na construção deste, a fim de facilitar a visualização dos escoamentos. É o elemento que determinará as dimensões de todo o restante do túnel. Nesta seção também podem ser instalados instrumentos capazes de quantificar as forças envolvidas atuantes sobre o objeto de estudo.

Após as dimensões do modelo a ser estudado e também a velocidade pretendida na seção, para fazer a correta definição da dimensão da seção de testes, indica-se que o objeto de estudo a ser inserido na seção de testes possua no máximo 80% da largura da seção e que a base da seção seja 20% maior do que a altura (OLIVEIRA; DALMOLIN; HAUS, 2015; VINCENSI, 2014).

2.3 CONCEITOS DA MECÂNICA DOS FLUIDOS NECESSÁRIOS PARA A FABRICAÇÃO DE UM TÚNEL DE VENTO

Neste tópico serão apresentados equações e conceitos que servirão de base para o desenvolvimento da teoria do projeto de um túnel de vento.

2.3.1 Escoamento

Pode-se definir escoamento como o movimento de fluidos, e cabe à mecânica dos fluidos analisar todos os possíveis tipos de escoamentos e classificá-los de acordo com as suas características particulares (COSTA; SILVA; ASSAYAG, 2013).

Vianna (1993) relata que os fluidos podem escoar de duas formas diferentes, de acordo com a direção da trajetória de suas partículas. Se o escoamento ocorrer com as partículas deslizando umas sobre as outras, como se fossem lâminas superpostas, tem-se o escoamento *laminar*. Se, ao contrário, as partículas fluidas trocarem de posições entre si, passando de uma lâmina para outra, diz-se que o escoamento é *turbulento*.

2.3.2 Pressão

Tudo que está na atmosfera terrestre experimenta o efeito da pressão. A pressão total (p_{tot}) é constituída da soma de duas componentes: a pressão estática (p_{est}) e pressão dinâmica (q). A pressão estática é proporcional a energia potencial e a pressão dinâmica proporcional a energia cinética (VINCENSI, 2014).

$$P_{tot} = P_{est} + q \quad (2)$$

Portanto, define-se a pressão dinâmica (q) como sendo a diferença entre a pressão total e a pressão estática.

2.3.3 Conservação de massa

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

$$Q = V \times A \left(\frac{m^3}{s} \right) \quad (3)$$

Já a vazão mássica (\dot{m}) é dada pela multiplicação da vazão volumétrica pela densidade do fluido (ρ):

$$\dot{m} = \rho \times Q \left(\frac{kg}{s} \right) \quad (4)$$

A vazão mássica também é definida como sendo a quantidade em massa de um fluido que escoar através de certa seção em um intervalo de tempo.

2.3.4 Equação de Bernoulli

Esta foi proposta por Daniel Bernoulli em 1738 e se aplica em regiões de escoamento incompressível e em regime permanente, onde as forças de atrito resultantes são desprezíveis. A mesma assume que a pressão total seja constante (ÇENGEL; CIMBALA, 2007; VINCENSI, 2014).

$$P_{est} + \rho \frac{v^2}{2} + \rho g z = constante \quad (5)$$

Dessa forma, pode-se aplicar esta equação a um túnel de vento nas regiões fora das camadas-limite (muito próximas de paredes) e esteiras (região deficiente em quantidade de movimento), onde o movimento do fluido é governado pelos efeitos das forças de pressão e gravidade (ÇENGEL; CIMBALA, 2007). Para uma altura $z = 0$, tem-se:

$$P_{est} + \rho \frac{v^2}{2} = constante \quad (6)$$

Como a pressão dinâmica é dada por:

$$p = \rho \frac{v^2}{2} \quad (7)$$

Então, pode-se dizer que:

$$P_{est} + q = constante \quad (8)$$

A equação de Bernoulli, segundo Vincensi (2014), pode ser utilizada para calcular a velocidade em um escoamento quando as pressões estática e total forem conhecidas. Estas podem ser medidas com um tubo de Pitot.

2.3.5 Número de Reynolds

O número de Reynolds (Re) é um número utilizado em mecânica dos fluidos onde se pode determinar o regime de escoamento de um determinado fluido (laminar ou turbulento) e

também determinar a velocidade que pode ser alcançada no túnel de vento (COUTINHO, 2014). A transição 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:

$$Re = \frac{\rho VL}{\mu} \quad (9)$$

No caso de um túnel de vento, ρ é a massa específica do ar, V é velocidade do escoamento, L é o comprimento do perfil e μ é a viscosidade dinâmica do ar ambiente.

O número de Reynolds constitui a base do comportamento de sistemas reais, pelo uso de modelos físicos reduzidos. Pode-se dizer que dois sistemas são dinamicamente semelhantes se o número de Reynolds for o mesmo para ambos. L refere-se em geral, a qualquer dimensão do sistema, por exemplo, a corda de asa de um avião, o comprimento de um navio, a altura de um edifício (MOREIRA JUNIOR; ANTUNIASSI, 2010).

O número de Reynolds adimensional, para o túnel de vento:

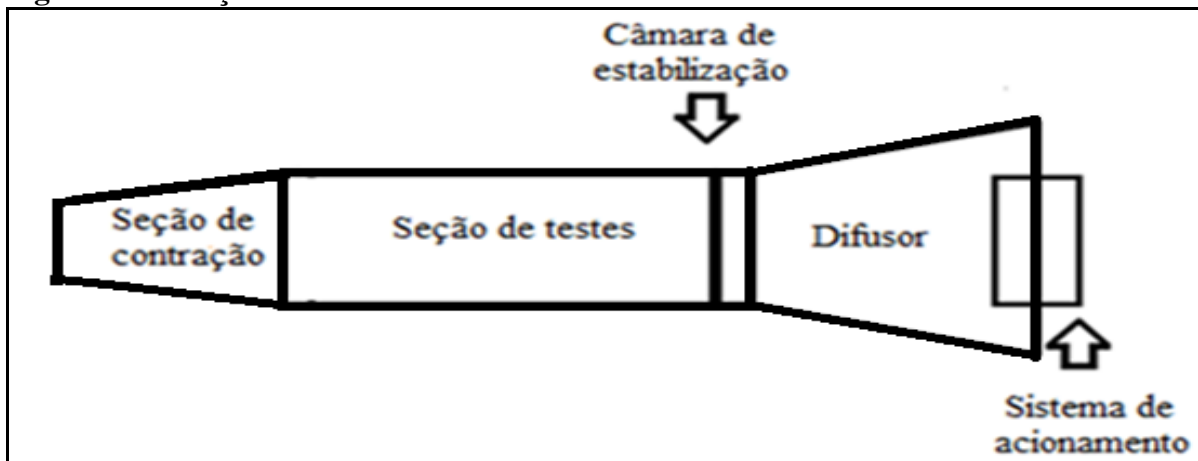
- $Re < 2 \times 10^5$ – *Escoamento Laminar*
- $Re > 2 \times 10^5$ – *Escoamento Turbulento*

Deve-se ressaltar que, para um escoamento interno, o valor acima é radicalmente menor ($2300 \cong 4000$).

3 METODOLOGIA

Foi projetado um túnel de vento de circuito aberto, como o modelo apresentado na Figura 1. Este foi composto por sistema de acionamento, difusor, seção de testes, câmara de estabilização e seção de contração. Este modelo foi escolhido por ter menor custo e maior facilidade de fabricação.

Figura 1 - Esboço do túnel de vento

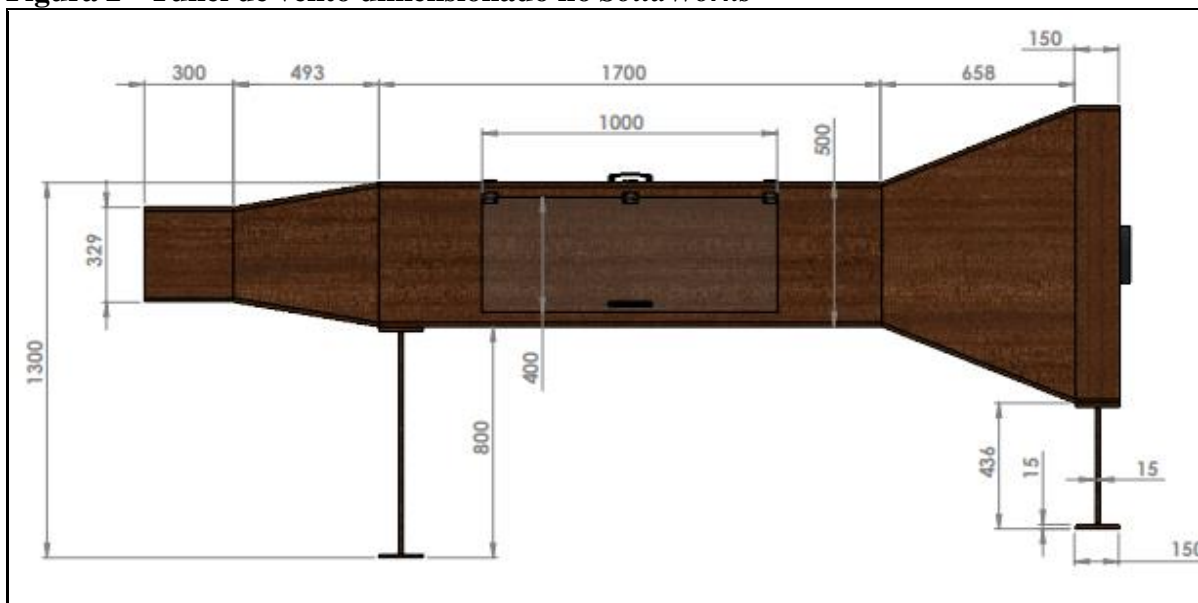


Fonte: Elaborado pelo autor no programa *SolidWorks* (2018).

Após o recebimento do motor foram verificadas as especificações que o fabricante informou, obtendo-se os seguintes dados: Vazão: 5 m³/s; Potência: 0,36 kW; Rotação: 1550 RPM.

Com os dados coletados foi possível realizar o dimensionamento no programa *SolidWorks* do desenho do mesmo, conforme apresenta a Figura 2.

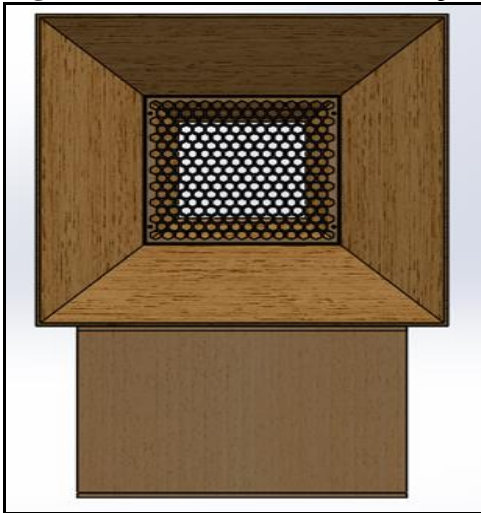
Figura 2 - Túnel de vento dimensionado no *SolidWorks*



Fonte: Elaborado pelo autor no programa *SolidWorks* (2018).

Foi adicionada uma colmeia hexagonal entre a seção de teste e o difusor para melhorar o dimensionamento do ar no túnel de vento, como ilustrado na Figura 3.

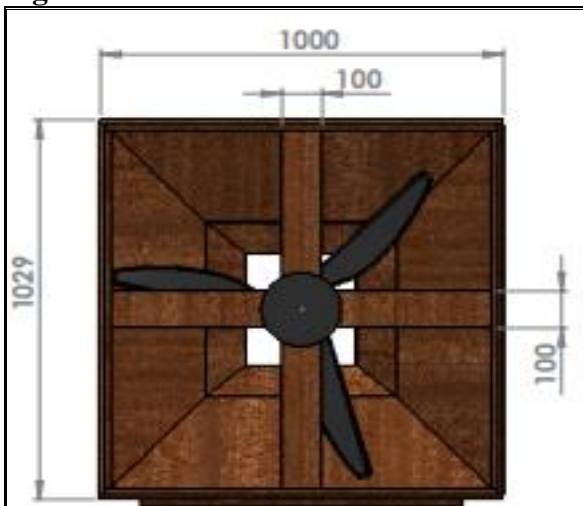
Figura 3 - Câmara de estabilização



Fonte: Elaborado pelo autor no programa *SolidWorks* (2018).

O sistema de acionamento foi composto por um ventilador axial. Com a determinação do modelo deste, obtêm-se o valor de diâmetro do exaustor e vazão que o ventilador pode produzir. A partir disso, é possível calcular a velocidade do ar. Na Figura 4 apresentam-se as dimensões do sistema de acionamento.

Figura 4 - Dimensões do sistema de acionamento



Fonte: Elaborado pelo autor no programa *SolidWorks* (2018).

Com a velocidade teórica do ventilador calculada, utilizou-se a equação de conservação de energia de Bernoulli para calcular a velocidade na seção de teste. A primeira parte do túnel a ser projetada é a seção de testes; a partir desta se calcula as demais partes (BARLOW apud OLIVEIRA; DALMOLIN; HAUS, 2015). Com o cálculo da seção de teste, a mesma foi desenhada no *SolidWorks*, com suas unidades de medida em milímetros, representada na Figura

5.

Figura 5 - Seção de teste

Fonte: Elaborado pelo autor no programa *SolidWorks* (2018).

Portanto, para a determinação final do tamanho do túnel, foi considerado o espaço disponibilizado pela instituição de ensino para a sua construção e armazenamento posterior.

Após os devidos cálculos e dimensionamento do túnel de vento, foi realizado o modelamento e detalhamento dos componentes do mesmo com auxílio do programa *SolidWorks*.

O túnel de vento foi construído sobre uma base de madeira e o mesmo fabricado com uma chapa de MDF cru, à exceção da seção de testes, com suas laterais em acrílico transparente, para melhor visualização dos ensaios. A seção de testes contém uma abertura na parte lateral com tampa acrílica, onde é possível introduzir os modelos a serem testados. Todas as emendas entre as partes do túnel foram vedadas com silicone para evitar perda do fluxo de ar.

A fim de melhorar a qualidade do fluxo de ar na seção de testes, foi confeccionada a colmeia em MDF com seções hexagonais, esta tem a função de eliminar os vórtices que surgirão devido o movimento das hélices do ventilador e com finalidade de direcionar o escoamento, deixando-o laminar.

A fabricação do túnel de vento poderá ser finalizada futuramente no laboratório do Centro Politécnico da UCEFF pelos acadêmicos, sendo que, a aquisição dos materiais necessários foi adquirida pela própria instituição.

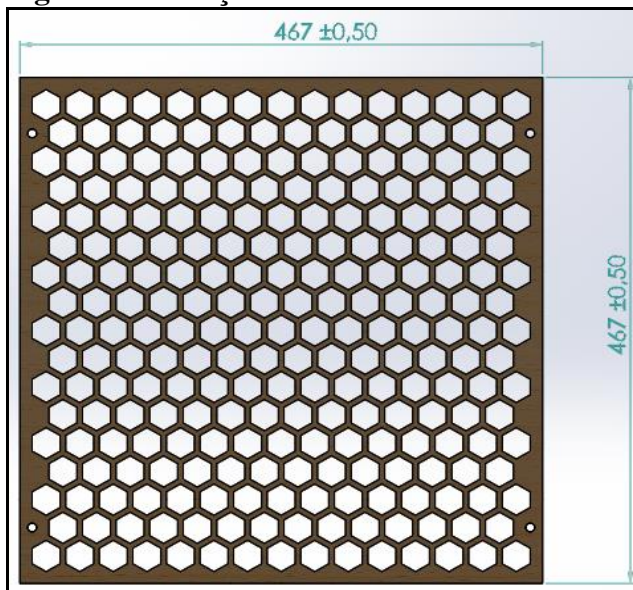
Através do programa *SolidWorks* foi possível fazer testes para verificar a qualidade e a eficiência do túnel, esses testes foram comparados com os devidos cálculos. Para pesquisa futuras, com o modelo físico finalizado, este proporcionará uma melhor compressão dos métodos de escoamento aos acadêmicos.

3.1 POSICIONAMENTO DAS TELAS E DA COLMEIA

Nesta etapa posicionou-se a colmeia para o direcionamento do vento, onde o sistema de acionamento do ar fica de frente para o objeto a ser testado. A colmeia é localizada antes da câmara de teste para que haja uma corrente de ar mais suave, assim evitando-se uma transmissão de vibrações para dentro da câmara de teste.

Antes de chegar à área de teste, o ar soprado passa pela câmara de estabilização. Este fato ocorre porque o fluxo é gerado com turbilhonamento, o que o torna instável e intermitente. A câmara faz exatamente o que seu nome sugere: retifica e estabiliza o fluxo por meio de colmeias hexagonais. Para desenvolver a colmeia, o *SolidWorks* calculou quantos hexágonos podem ter no espaço entre a câmara de teste e o difusor. Na Figura 6, demonstra-se a colmeia hexagonal.

Figura 6 - Esboço da colmeia do túnel de vento



Fonte: Elaborado pelo autor no programa *SolidWorks* (2018).

Com a adição da colmeia hexagonal, o túnel de vento direciona o fluxo de ar e evita o surgimento de vórtices.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Através da pesquisa e análise foram definidos os seguintes resultados a respeito do túnel de vento com finalidade didático. Verificado e coletado os dados do motor, os mesmos foram

utilizados para encontrar o diâmetro do exaustor para determinar a velocidade do ar que o mesmo produzia:

$$\begin{aligned}
 Q &= V \times A \\
 V &= \frac{Q}{A} = \frac{18000}{1 \times 0,4} \\
 V &= 45.000 \frac{m}{h} \text{ ou} \\
 V &= \frac{45.000}{3600} \\
 V &= 12,5 \frac{m}{s}
 \end{aligned}$$

Esta velocidade foi determinada após a instalação da colmeia. Utilizou-se uma densidade do ar a uma temperatura de 18 °C, com o valor de $\rho = 1,2041 \text{ kg/m}^3$. Já a vazão mássica (\dot{m}) [kg/s] é dada pela multiplicação da vazão volumétrica pela densidade do fluido:

$$\begin{aligned}
 \dot{m} &= \rho \times Q \\
 \dot{m} &= 1,2041 \times 18000 \\
 \dot{m} &= 21625,2 \\
 \dot{m} &= \frac{21673,8}{3600} \\
 \dot{m} &= 6 \frac{kg}{s}
 \end{aligned}$$

Portanto, temos um escoamento com vazão mássica de 6kg/s, com a massa específica tabelada e a velocidade do ar calculada, calcula-se a pressão dinâmica. A mesma é calculada pela equação (7):

$$\begin{aligned}
 p &= 1,2041 * \frac{(15,62)^2}{2} \\
 p &= 146,89 \text{ Pa}
 \end{aligned}$$

Com todas as medidas obtidas, pode-se calcular o número de Reynolds, utilizando a massa específica tabelada a uma temperatura de 18°C. Utilizou-se a seguinte equação:

$$\begin{aligned}
 Re &= \frac{\rho VL}{\mu} \\
 Re &= \frac{1,2041 \times 12,5 \times 0,4}{1,82 \times 10^{-5}}
 \end{aligned}$$

$$Re = 330.796,70$$

Com o número de Reynolds igual a 330.796,70, tem-se um escoamento turbulento. Podemos ter uma variação no número de Reynolds, visto que o comprimento do objeto pode ter uma variação, como descrito no tamanho da seção de teste.

Através da velocidade do vento teoricamente calculada, pode-se obter o número de Mach através da equação:

$$Ma = \frac{v}{c}$$

$$Ma = \frac{12,5}{346} = 0,036 \text{ ou } 3,6\%$$

O número de Mach igual a 0,036 ou 3,6% refere-se a velocidade do ar, definindo-o como um túnel de vento subsônico.

A Figura 7 mostra o túnel de vento fabricado:

Figura 7 - Vista do túnel de vento fabricado



Fonte: Dados da pesquisa (2018).

Este projeto tem a intenção de estar em constante atualização devido às melhorias a serem feitas por alunos da UCEFF faculdades.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O desenvolvimento do presente estudo possibilitou uma análise e o desenvolvimento de um túnel de vento, que pode melhorar a apuração dos resultados das disciplinas de Mecânica dos Fluidos e Fenômenos dos Transportes da UCEFF. Além disso, permitiu uma pesquisa de

campo para obter dados mais consistentes sobre as etapas do processo, como os cálculos das dimensões. Permite aperfeiçoar os conhecimentos sobre o programa *SolidWorks*, o qual possibilitou analisar a eficiência do túnel, dividido em três partes para facilitar sua construção e a montagem. Conclui-se que, o motor tendo um controle de velocidade, facilita a visualização do escoamento.

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 UCEFF, 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.

REFERÊNCIAS

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: 29 dez. 2017.

COUTINHO, F. R. **Projeto de um túnel de vento subsônico tipo soprador**. 2014.81f. Monografia (Bacharel em Engenharia Mecânica) – Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2014.

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.

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.

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.

MATOS, C. C.; BOTELHO, R. D. **A influência da aerodinâmica no design**. Disponível em:<fido.palermo.edu/servicios_dyc/encuentro_auspicios_publicaciones/actas_diseno/articulos_pdf/A4064.pdf>. Acesso em: 29 dez. 2017.

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,

n. 5, p. 34 - 42. Disponível em: <<https://conexoes.ifce.edu.br/index.php/conexoes/article/view/1170>>. Acesso em: 22 dez. 2017.

MOREIRA JUNIOR, O.; ANTUNIASSI, U. R. Construção e validação de um túnel de vento para ensaios de estimativa da deriva em pulverizações agrícolas. **Rev Energia na Agricultura**, Botucatu, vol. 25, n.3, 2010.

NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION (NASA). **Wind tunnel index**. 2015. Disponível em: <https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplanes/shortt.html>. Acesso em: 03 jan. 2017.

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**, [S.l.], v. 2, n. 04, p. 10-23, dez. 2012. Disponível em: <<https://www.ufrgs.br/det/index.php/det/article/view/69>>. Acesso em: 02 jan. 2017.

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: 02 jan. 2017.

SANTOS, A. R. et al. **Elaboração de túnel de vento para aplicações de ensaios aerodinâmicos**. 39f. Monografia (Técnico em mecânica) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo, São José dos Campos, 2014.

SOUZA JUNIOR, D. P.; FERREIRA, G.G.F.; LETA, F. R. **Desenvolvimento de um túnel de vento compacto para simulações didáticas de projeto de engenharia mecânica**. CONEM, Maranhão, jul-ago 2012. Disponível em: <<https://www.abcm.org.br/conem2012>>. Acesso em: 15 dez. 2017.

VIANNA, M. R. **Mecânica dos fluidos para engenheiros civis**. Belo Horizonte: Instituto de Engenharia Aplicada, 1993.

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.