REVISTA DESIGN & TECNOLOGIA
ISSN: 2178-1974
2021, Vol. 11, No. 22
DOI 10.23972/det2021iss22pp70-82

PGDESIGN
www.pgdesign.ufrgs.br

Construção e Calibração do Túnel de Vento do Laboratório de Estudos Aerodinâmicos – LEA

Gustavo J. Z. Núñez[1]

1 *Departamento de Design e Expressão Gráfica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil*

RESUMO

Um Túnel de Vento de baixas velocidades e de circuito aberto foi projetado, construído e calibrado no Departamento de Design e Expressão Gráfica da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. O projeto foi concebido visando a construção de um equipamento de alta qualidade e de baixo custo para o ensino de Engenharia do Vento e pesquisa acadêmica. Estudos em Túneis de Vento constituem as principais ferramentas utilizadas para tratar de problemas que envolvam o escoamento de ar em torno de objetos (corpos) e as forças originadas desta interação ar-objeto. O equipamento foi projetado para reproduzir um escoamento uniforme e suave, ou seja, com distribuição uniforme da velocidade média do vento ao longo da seção transversal e com baixa turbulência. Nestas condições de escoamento simulado, diversos estudos com modelos reduzidos, visualizações do escoamento e medidas de pressões podem ser realizados. O presente artigo apresenta os processos de construção e calibração do Túnel de Vento. O equipamento projetado tem seção transversal quadrada de 0,3m x 0,3m e comprimento de 0,5m. A razão de contração é de 3,36. Duas telas foram utilizadas para minimizar as perturbações do escoamento na seção de testes. O processo de montagem é apresentado assim como os resultados de calibração da seção de testes do equipamento, que indicaram uma excelente correspondência com os parâmetros inicialmente propostos como premissas do projeto. A velocidade média do vento na seção de testes, sem modelos, é de aproximadamente 19m/s, com ótima uniformidade e com baixa turbulência, demonstrando que o processo de projeto e construção foram executados com êxito.

PALAVRAS-CHAVE

Túnel de Vento, Construção, Calibração, Aerodinâmica, Ensino de Engenharia do Vento

Construction and Calibration of the Wind Tunnel of the Laboratório de Estudos Aerodinâmicos- LEA

ABSTRACT

A low-speed open circuit wind tunnel has been designed, constructed, and calibrated at the Department of Design and Graphics at Federal University of Rio Grande do Sul. The design is conceived to be a high quality, low-cost tool for Wind Engineering teaching and academic research. Wind Tunnel studies are the main tool used to deal with problems involving the flow of air around objects (bodies) and the forces arising from this air-object interaction. The equipment was designed to reproduce a uniform and smooth flow with a uniform distribution of mean wind speed along the cross section and with low intensity of turbulence. In these conditions of simulated flow, several studies with reduced models, flow visualizations and pressure measurements can be performed. The present paper describes the process of construction and calibration of the wind tunnel. The proposed wind tunnel has a test section with cross sectional area of 0.3m x 0.3m and length of 0.5 m. The contraction ratio is 3.36. Two screens are used to minimize flow disturbances in the test section. The process of construction is described, as well the calibration of the test section of the equipment. A particularly good correspondence with the design input parameters were found. The mean wind speed at the test section, empty, is about 19m/s in a smooth and uniform profile, indicating that the design process and construction were well done.

KEYWORDS

Wind Tunnel, Construction, Calibration, Aerodynamic, Wind Engineering Teaching

CONTATO: Gustavo J. Z. Núñez – *gustavo.javier@ufrgs.br*

© 2021 – Revista Design & Tecnologia

1. INTRODUÇÃO

Neste artigo são abordados os principais aspectos associados ao processo de construção e calibração do Túnel de Vento do Laboratório de Estudos Aerodinâmicos – LEA, do Departamento de Design e Expressão Gráfica da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Este equipamento permite a realização de estudos e pesquisas com modelos reduzidos possibilitando à comunidade acadêmica a apropriação de conceitos de mecânica dos fluidos que fazem parte da multidisciplinaridade da Engenharia do Vento.

De acordo com Stathopoulos e Hajra (2013) a área correspondente à Engenharia do Vento engloba aspectos estruturais e ambientais, estudados em campo, através de modelagem física – via Túneis de Vento ou de forma computacional – via CFD – "*Computational Fluid Dynamics*", ANN – "*Artificial Neural Network*" e FEM – "*Finite Element Model*". Em função do caráter multidisciplinar desta área, a Engenharia do Vento enfrenta vários obstáculos para sua disseminação. Solari (2020) destaca que esta área da Engenharia, considerada relativamente jovem, tem sido difundida principalmente através de cursos, programas de pós-graduação e escolas independentes. Neste contexto, os estudos experimentais em Túnel de vento constituem uma relevante ferramenta para suprir estes obstáculos e assim disseminar o conhecimento para Engenheiros, Arquitetos e Designers.

Os Túneis de Vento (TV) são ferramentas utilizadas para tratar de projetos que envolvam o escoamento de ar em torno de objetos (corpos) e as forças originadas desta interação ar-objeto em diversas aplicações (NÚÑEZ et al., 2012). Através do emprego de túneis de vento é possível medir velocidades globais e localizadas, bem como o campo de pressões na superfície dos objetos.

As partes constituintes de um Túnel de Vento são especificamente projetadas de tal forma que, na seção de testes, o escoamento tenha velocidades médias invariáveis e baixo índice de turbulência (flutuações da velocidade em torno da média).

Dentre a grande variedade de TV existentes, os de baixa velocidade podem ser considerados aqueles que possuem uso mais genérico. Os equipamentos com seções transversais reduzidas são frequentemente utilizados para pesquisas mais específicas e para fins acadêmicos (BARLOW et al., 1999).

As dimensões globais dos TV dependem principalmente do tipo de testes a serem realizados, da velocidade máxima na seção de testes, dos custos de construção, de operação e características dos modelos. Diversos TV utilizados em pesquisas, calibrações e demonstrações possuem área de seção transversal com valores em torno de 0,3m² e até mesmo inferiores (BARLOW et al., 1999).

Uma vez estabelecidas as dimensões da seção de testes e a respectiva velocidade máxima, as outras partes podem ser dimensionadas. O TV do LEA foi projetado para reproduzir um escoamento uniforme e suave, ou seja, com distribuição uniforme da velocidade média ao longo da seção transversal e com baixa turbulência. Nestas condições de escoamento, diversos estudos com modelos reduzidos, visualizações do escoamento, medidas de pressões e forças podem ser realizados (BLESSMANN, 1982 e 1990).

No trabalho de Núñez (2021) são apresentados os fundamentos de projeto e a estimativa da perda de carga do Túnel de Vento do LEA. Na Figura 1 é mostrado o circuito aerodinâmico final do TV de circuito aberto do LEA onde podem ser vistas as partes constituintes e as principais dimensões (NÚÑEZ 2021). Finalizada a etapa de projeto do TV, a escolha do ventilador e de seus acessórios: junta flexível e telas de proteção pode ser realizada. A definição destes elementos acessórios requer a consideração de sua contribuição para a perda de carga total e avaliação final do ventilador a ser adquirido para a compor o equipamento.

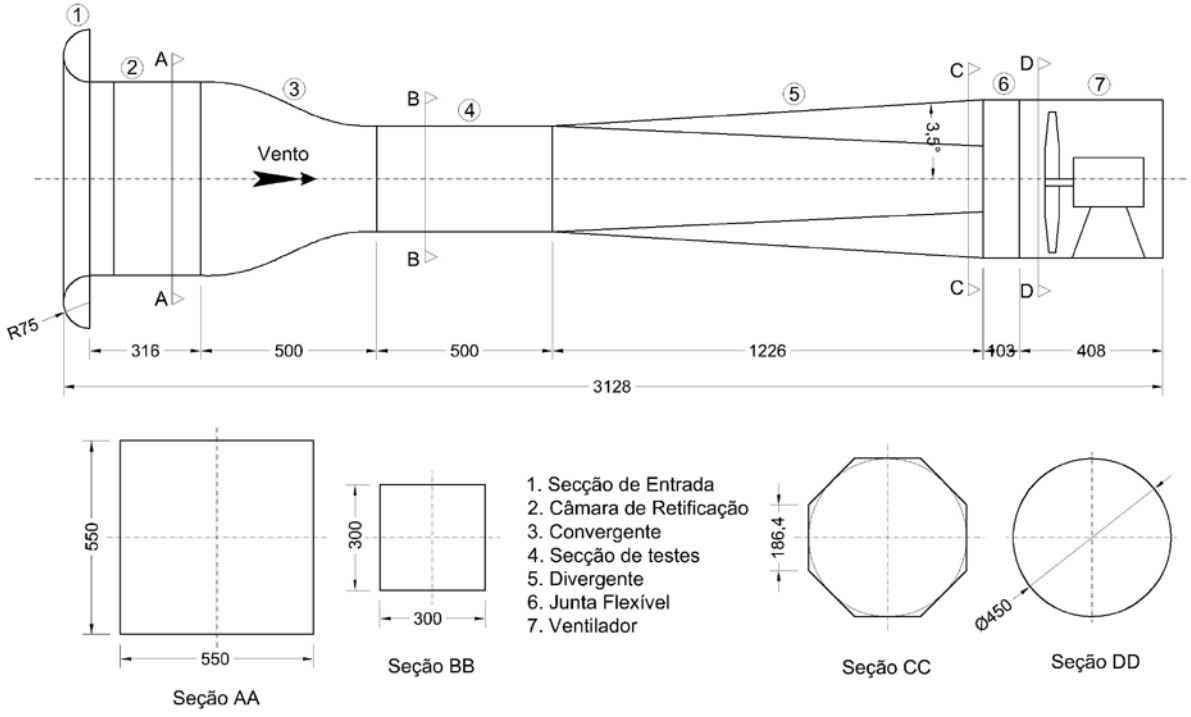


Figura 1 Circuito Aerodinâmico do Túnel de Vento [mm].

2. DEFINIÇÃO DO VENTILADOR DO TV

Estimada a perda de carga total do circuito do TV para a velocidade máxima de projeto na seção de testes, o ventilador pode ser dimensionado. Para tal, esta perda de carga total deve ser superada pelo ganho de pressão devido ao ventilador. Os ventiladores são classificados pela vazão que podem gerar e pela respectiva queda de pressão estática que podem superar. Para a estimativa do ponto de operação do TV foram estimadas as perdas de carga em termos de pressão estática para diferentes vazões.

Na fase inicial de projeto as perdas de carga estimadas para o TV sem ventilador tiveram seu o valor total aumentado em 100%. Este aumento foi devido ao desconhecimento das características dos acessórios do ventilador: junta flexível e telas de proteção. Com esta consideração, estimou-se que o ventilador deveria superar uma perda de carga de 98,07Pa (10mmH_2O) com vazão correspondente de 7.200 m³/h.

Adquiridos o ventilador, a junta flexível e as telas de proteção,foram re-estimadas as perdas de carga, com formulação apresentada em detalhes no trabalho de Núñez (2021), referentes ao conjunto TV com ventilador. Conforme mostrado na Tabela 1, constata-se que o aumento de 100% na estimativa inicial foi quase suficiente para suprir as perdas de carga devidas aos acessórios, sendo o valor final estimado de 104,49Pa (10,65mmH_2O), cerca de 6,5% maior ao inicialmente considerado.

Tabela 1 Estimativa das perdas de carga parciais por trecho para versão "TV – com ventilador".

Trecho	$k_i\ [adim]$	$\Delta p_i\ [Pa]$	%	$q_i\ [Pa]$	$q_i/q_{ref}\ [adim]$	$K_i\ [adim]$
Bocal de Entrada	0,040	1,05	1,0	26,3	0,089	0,0035
Câmara de Retificação	0,008	0,20	0,2	26,3	0,089	0,0007
Colmeia	0,091	2,40	2,3	26,3	0,089	0,0081
Telas (1ª e 2ª)	1,092	28,69	27,5	26,3	0,089	0,0968
Convergente	0,007	1,05	1,0	161,5	0,544	0,0038
Seção de Testes	0,019	5,77	5,5	296,7	1,000	0,0190
Divergente	0,044	7,64	7,3	175,1	0,590	0,0260
Junta Flexível	0,003	0,30	0,3	95	0,320	0,0010
Telas de Proteção (1ª e 2ª)	0,604	57,39	54,9	95	0320	0,1934
	$(k_i = \Delta p_i/q_i)$	∑ 104,49				∑ 0,3522

A variação da perda de carga versus vazão é apresentada na Figura 2, com valores para "TV – sem ventilador" e para "TV – com ventilador", juntamente com a curva das características mecânicas do ventilador selecionado, fornecida pelo fabricante, "Ventilador @ 1750rpm".

Através da combinação das características mecânicas do TV e do ventilador apresentadas na Figura 2 é possível identificar o ponto de operação, cruzando dados do fabricante com a perda de carga estimada. Observa-se que o ponto de operação (interseção das curvas) indica uma vazão muito próxima a de projeto (7.200 m³/h – 10mmH_2O (98,07Pa)). Assim, a previsão é de que com uma vazão de 7.115 m³/h, com perda de carga de 10,45mmH_2O (102,48Pa), a velocidade média na seção de testes será de 22m/s.

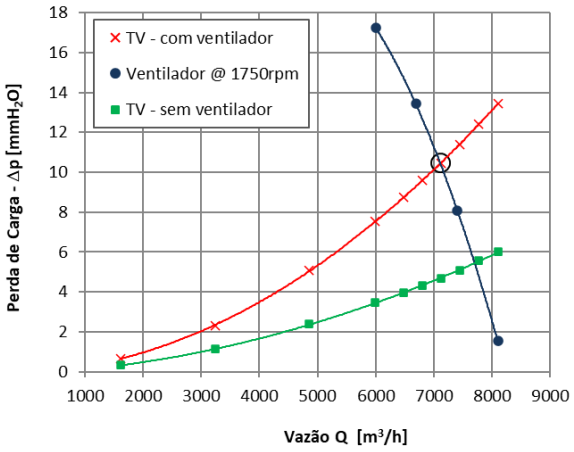


Figura 2 Estimativa do ponto de operação do TV.

O ventilador adquirido é do tipo axial, composto por motor elétrico trifásico de 1CV (WEG – W22 IR2) que aciona um conjunto de 7 hélices, montado em um trecho de seção circular com 450mm de diâmetro (OTAM – AVR AL 450/28 – 1750rpm). A escolha do ventilador também levou em consideração o ruído a ser gerado e a tensão de alimentação disponível. O controle do ventilador é feito por um inversor de frequência que controla a rotação do motor permitindo assim a variação da velocidade do vento na seção de testes.

De acordo Brusca et al. (2011), a razão de energia do TV pode ser calculada como a razão entre a potência do escoamento na seção de testes e a perda de potência ao longo do circuito devido às perdas de carga parciais, conforme a Equação 1:

$$E_R = \frac{1}{\Sigma K_i} \quad (1)$$

Na Equação 1, assim como na Tabela 1, K_i representa o coeficiente de perda de carga local, definido com a pressão dinâmica referente a seção de testes. Resulta que este indicativo de eficiência do TV do LEA é igual a 2,84. Segundo Brusca et al. (2011), quanto maior esta razão, melhor a eficiência do TV.

3. PROCESSO CONSTRUÇÃO DO TV

O processo de construção do TV teve início pelo detalhamento geométrico de cada um dos trechos do circuito aerodinâmico, definidos pelo processo de cálculo durante a etapa de projeto.

3.1 Detalhamento do Projeto Geométrico do TV

Após a definição da geometria de cada um dos trechos do túnel de vento, além da escolha do ventilador adequado, os desenhos puderam ser elaborados e refinados. As dimensões definidas no processo de cálculo (NÚÑEZ 2021) forneceram o comprimento total de cada um dos trechos e as medidas internas de cada correspondente seção do circuito aerodinâmico, mostradas na Figura 1. Uma vez estabelecido que as dimensões determinadas eram compatíveis com o espaço físico disponível, os desenhos finais e detalhamento do TV foram feitos. Para tal, foi utilizado um programa de CAD onde o projeto foi aprimorado levando em consideração os materiais disponíveis para a construção e a possibilidade de execução. O principal material utilizado na construção do TV é o MDF seguido pelo acrílico. Elencados os materiais, as respectivas espessuras foram definidas.

Neste processo de documentação dimensional do TV surgiram problemas de ordem prática, impostos pelo processo de corte e limitações orçamentárias. A partir da elaboração dos desenhos, diversas situações de encaixe, fixação e de articulação de partes móveis surgiram. Nesta fase de amadurecimento do projeto foi possível tomar partido dos

desafios associados à construção e montagem sendo então elaboradas as possíveis soluções.

Como exemplo de prancha representativa do projeto do TV do LEA, na Figura 3 é mostrada uma prancha com detalhes do projeto da seção de testes e de suas janelas de inspeção. A espessura do MDF utilizada em todas as peças deste trecho é de 12mm exceto no acrílico utilizado nas janelas de inspeção que tem espessura de 4mm. Comparando-se a Figura 1 com a Figura 3, com relação às dimensões da seção de testes, percebe-se o grau de detalhamento que deve ser desenvolvido a partir das medidas definidas no cálculo da geometria. Para cada umas das seções projetadas foi gerado um conjunto de desenhos com medidas e detalhamento pertinente.

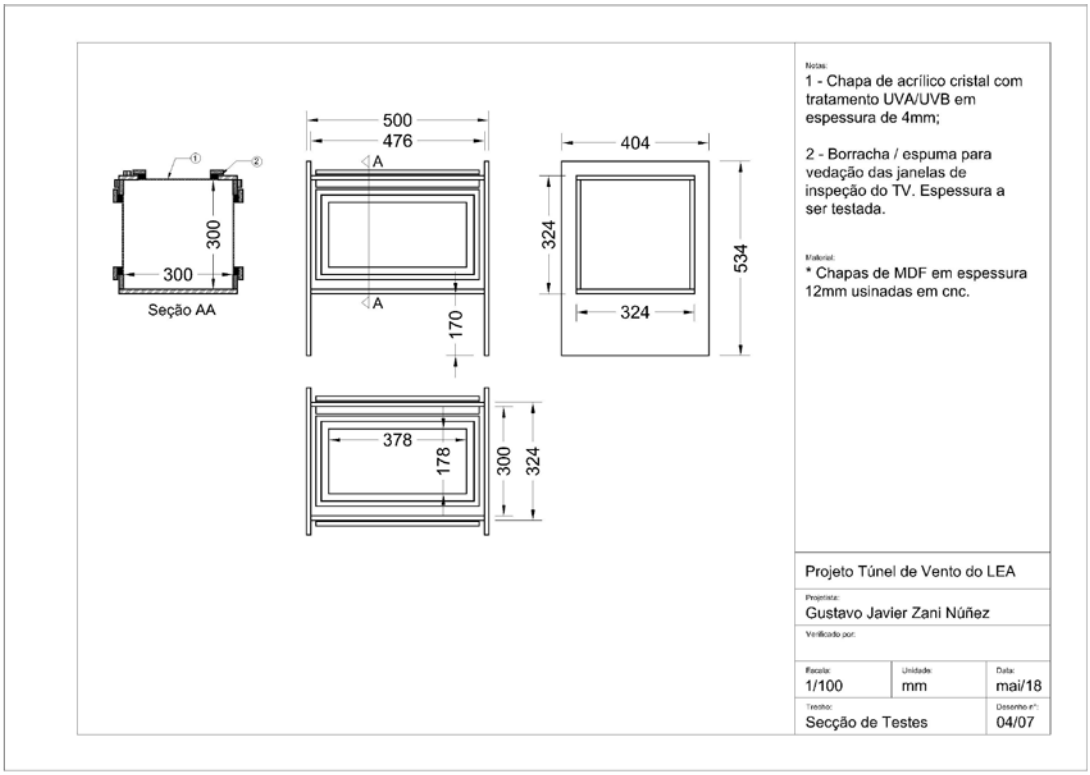


Figura 3 Prancha elaborada em programa de CAD referente aos desenhos da seção de testes do túnel de vento.

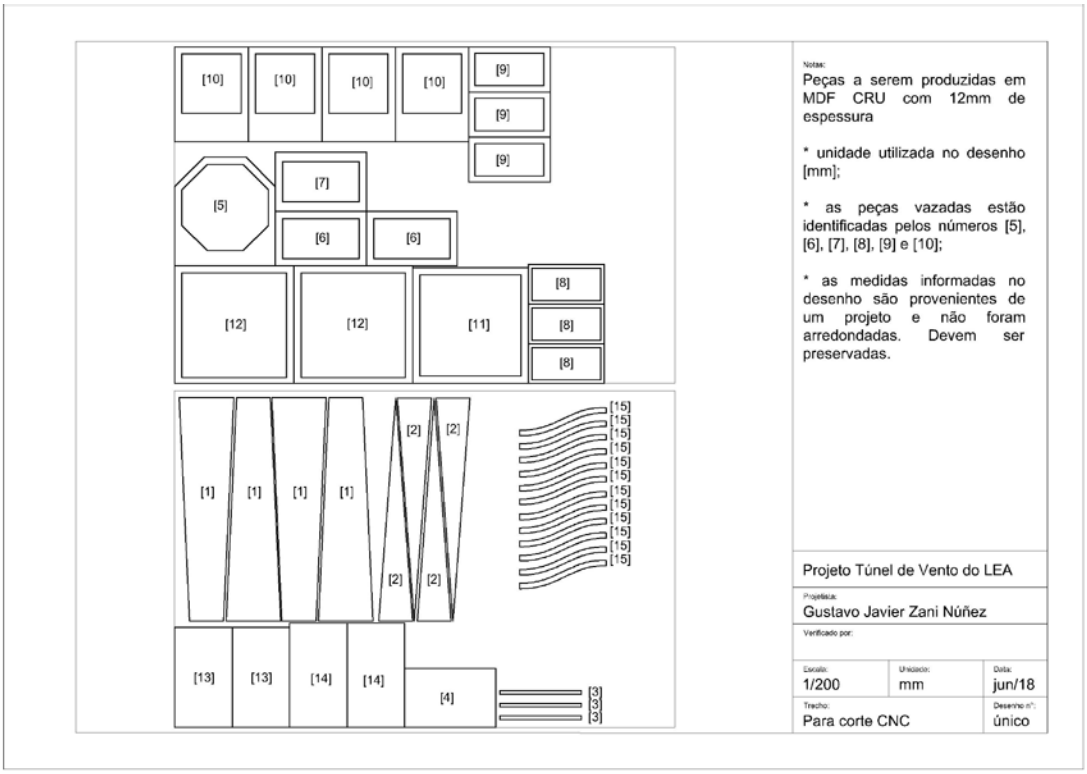


Figura 4 Prancha elaborada em programa de CAD referente aos desenhos das peças em MDF para corte em fresadora CNC.

3.2 Construção do TV

Concluída a etapa de projeto do túnel de vento, preparação de desenhos e detalhamento, teve início o processo de construção. Os materiais e as respectivas espessuras a serem empregados na construção foram definidos com base na forma, curvatura, resistência estrutural, disponibilidade e possibilidade de manejo, sem deixar de considerar os aspectos estéticos.

O principal material utilizado foi o MDF – "*Medium Density Fiberboard*", por tratar-se de um material de baixo custo e de fácil manuseio. As peças em MDF foram majoritariamente cortadas por fresadora CNC – "*Computer Numerical Control*" devido ao alto nível de precisão necessário para a montagem (esquadro, encaixes sem frestas, etc.). Além deste método de corte foi utilizada uma cortadora a Laser CNC na construção das paredes do convergente. Na **Figura 4** pode ser vista a prancha correspondente às peças cortadas por fresadora CNC.

Na **Figura 5** são mostradas as peças em MDF cru cortadas por fresadora CNC prontas para o início da montagem do equipamento.



Figura 5 Peças cortadas por fresadora CNC.

Após o processo de montagem das peças em MDF foi necessária a aplicação de duas demãos de selador e lixação. Posteriormente, observados os intervalos de tempo entre aplicações, foram aplicadas três demãos de tinta acrílica nas faces externas e internas. Tais cuidados com a cobertura da superfície do equipamento são necessários, pois o MDF é muito sensível à umidade. Como será utilizada a técnica de visualização do escoamento com fumaça gerada por fluido com glicerina, esta fumaça uma vez condensada pode gerar umidade.

Além de chapas de MDF foram utilizadas chapas de acrílico nas janelas de inspeção, aplicadas para possibilitar a visualização dos modelos reduzidos e do escoamento no interior do TV.

A união entre as peças se deu, quase que exclusivamente, através de parafusos específicos para MDF, tomando-se o cuidado da realização de pré-furos com brocas de diâmetro adequado. Parafusos com porcas e arruelas serviram para a união entre as partes do TV, que pode ser desmontado, e para fixá-lo à mesa de trabalho. Além destes materiais foram ainda utilizados resina epóxi, massa corrida, adesivo de contato, adesivo instantâneo e rebites.

Foram aplicadas fitas de borracha na união entre as peças para evitar frestas que poderiam ocasionar um indesejável ingresso de ar no circuito.

Cabe salientar que para que se obtenha um escoamento de qualidade, ou seja, o mais uniforme (pouca variação da velocidade média) e suave (menor turbulência) possível, além de se observar as orientações de projeto, deve se evitar a ocorrência de desníveis e rugosidades na superfície das paredes internas e vazamentos de ar no circuito aerodinâmico.

A evolução do processo de montagem é apresentada nas sessões a seguir. A montagem do equipamento foi realizada pelo autor deste trabalho.

3.3 Montagem da Seção de Entrada

A seção de entrada com as dimensões indicadas na **Figura 1** foi construída com tubo de PVC utilizado em construção civil. O tubo foi cortado longitudinalmente e montado sobre base de MDF com espessura 6mm através de cantoneiras em "L" com rebites. Para os cortes de encaixe das peças a 45° a linha de corte foi determinada. Nas junções entre as partes de PVC foi aplicada resina epóxi e massa corrida para acabamento. O conjunto foi pintado com tinta acrílica. Na **Figura 6** são mostradas imagens da junção dos tubos da seção de entrada e do conjunto concluído.



Figura 6 Detalhe da seção de entrada do TV.

3.4 Montagem da Câmara de Retificação

A câmara de retificação tem seção transversal constante construída em MDF e contempla a colmeia e as telas uniformizadoras. As dimensões da câmara de retificação podem ser vistas na **Figura 1**. Nas seções 3.4.1 e 3.4.2 são apresentados os elementos e sua construção.

3.4.1 Montagem da colméia

Dentre as possibilidades de seção transversal dos elementos constituintes da colmeia, hexagonal, quadrada, retangular, etc., optou-se pela seção circular com diâmetro de 10mm. A partir dos cálculos, resultou um total de 2491 tubos plásticos com comprimento de 67,7mm. Na **Figura 7** pode ser visto o processo de colagem dos tubos da colmeia.

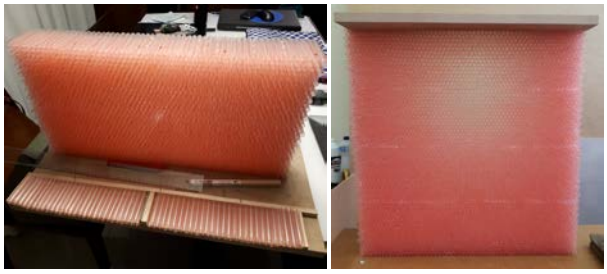


Figura 7 Montagem da colmeia.

3.4.2 Montagem das telas

Foram instaladas duas telas metálicas com diferentes porosidades na câmara de retificação. A tela de barlavento apresenta uma porosidade de 0,75 enquanto a tela de sotavento tem porosidade de 0,74. A tela de sotavento foi fixada com grampos metálicos e a de barlavento com parafusos para ajustar a tensão, garantindo que esteja bem esticada. Na **Figura 8** podem ser vistas as telas utilizadas no TV e detalhe do dispositivo de tensionamento.



Figura 8 Telas metálicas e dispositivo de ajuste de tensão da tela de barlavento.

3.5 Montagem do Convergente

O trecho correspondente ao convergente foi o que gerou mais atenção no processo de montagem do TV. Esta dificuldade de montagem deveu-se principalmente a forma de suas paredes, que devem respeitar uma variação polinomial, conforme apresentado em Núñez (2021). O convergente foi construído em MDF nas espessuras 12mm (seções inicial, final e longarinas) e 4mm (paredes). As dimensões estão apresentadas na Figura 1. Para a fixação foram usados parafusos específicos para MDF com a utilização de pré-furos. Na Figura 9 é mostrado o corte das paredes (MDF de 4mm) do convergente na cortadora Laser CNC do ViD-UFRGS.

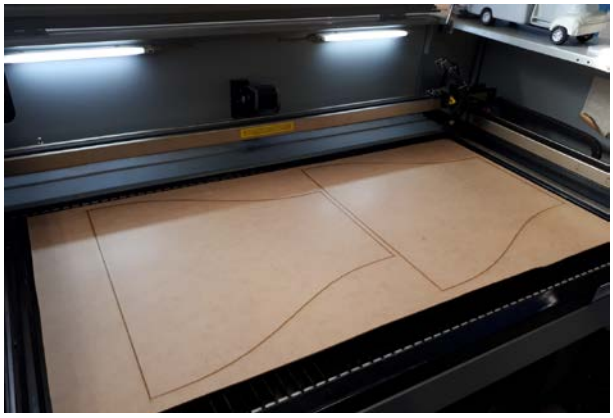


Figura 9 Corte das paredes do convergente em cortadora Laser CNC.

Na Figura 10 é mostrado o processo de montagem do convergente através do posicionamento e fixação das longarinas nas seções adjacentes. As longarinas são os elementos responsáveis pela estrutura resistente e funcionam como gabarito da forma polinomial do convergente.



Figura 10 Posicionamento das longarinas do convergente.

Na Figura 11 é mostrado o processo de fixação das chapas das paredes do convergente nas longarinas. Destaca-se a realização prévia de furos para que o MDF não fissure ao ser aparafusado, principalmente quando o furo é feito perpendicularmente à espessura de uma chapa de MDF.

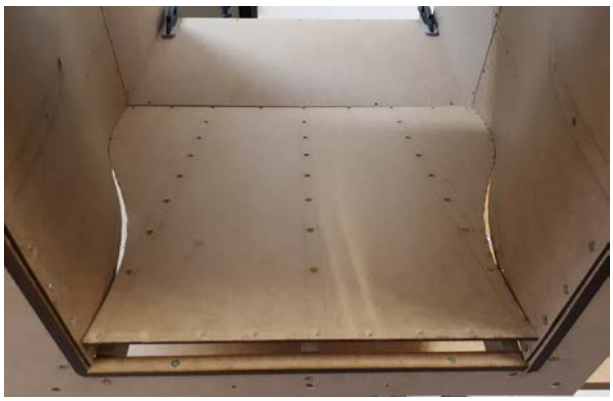


Figura 11 Processo de fixação das chapas das paredes do convergente nas longarinas.

Na Figura 12 é mostrado o convergente totalmente montado podendo ser identificada a utilização de resina epóxi para cobrimento de frestas na união entre as paredes.



Figura 12 Montagem do convergente do TV.

A Figura 13 apresenta o convergente em sua configuração final, ou seja, pintado e com a instalação dos anéis piezométricos, explicado em maiores detalhes na seção 4.1.



Figura 13 Convergente finalizado.

3.6 Montagem da Seção de Testes

A seção de testes do TV foi confeccionada em MDF de 12mm e para possibilitar a visualização e preparação dos testes recebeu 3 janelas de inspeção com partes em acrílico cristal transparente com espessura de 4mm. As principais dimensões da seção de testes estão indicadas na Figura 1 e na Figura 3. As peças foram unidas através de parafusos específicos para MDF

e conectadas aos trechos de barlavento e de sotavento com o uso de parafusos com porcas e arruelas. Na Figura 14 pode ser vista a fase inicial da montagem da seção de testes.

Na Figura 15 podem ser vistas as janelas instaladas, as ferragens para articulação (dobradiças), as trancas de fechamento e as partes em acrílico transparente das janelas.



Figura 14 Seção de testes com três janelas de inspeção e furação para conexões entre as partes adjacentes.



Figura 15 Seção de testes com três janelas e ferragens de articulação e de fechamento.

Na junção entre os trechos do TV bem como no contorno de fechamento de cada uma das janelas de inspeção foram instaladas fitas de borracha para vedação, conforme mostrado na Figura 16.

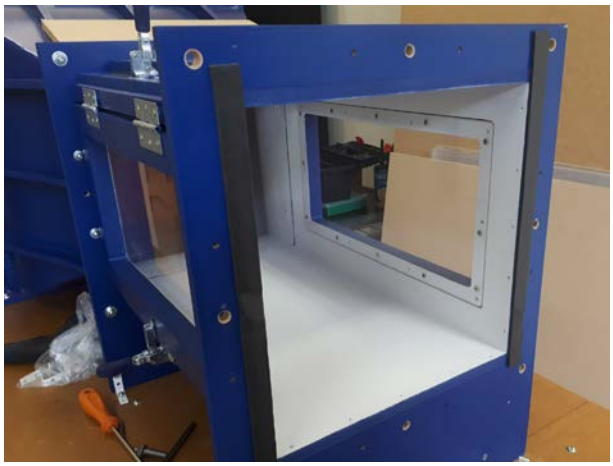


Figura 16 Seção de testes finalizada destacando o uso de fita de borracha para vedação.

Também na Figura 16 pode ser observada a pintura interna realizada em todo o circuito aerodinâmico do túnel de vento. Cabe salientar que, principalmente nesta seção de trabalho, não devem existir protuberâncias (cabeças de parafusos) nem saliências (desníveis entre as janelas e as paredes). Tais rugosidades podem gerar turbulência o que é totalmente indesejável na seção de testes do TV, projetado justamente para que a seção tenha baixos índices de turbulência e velocidade uniforme.

3.7 Montagem do Divergente

O trecho correspondente ao divergente foi montado com chapas de MDF com 12mm de espessura, com seção transversal variando de quadrada (barlavento) a octogonal (sotavento). As peças foram fixadas com o uso de parafusos específicos para MDF. As dimensões do divergente podem ser verificadas na Figura 1.

Na Figura 17 é mostrado o início da montagem do trecho correspondente ao divergente. Percebe-se que entre as seções de início e de fim, foi inserido um trecho de reforço na porção central pois a flexão, observada apenas durante a montagem, foi significativa.

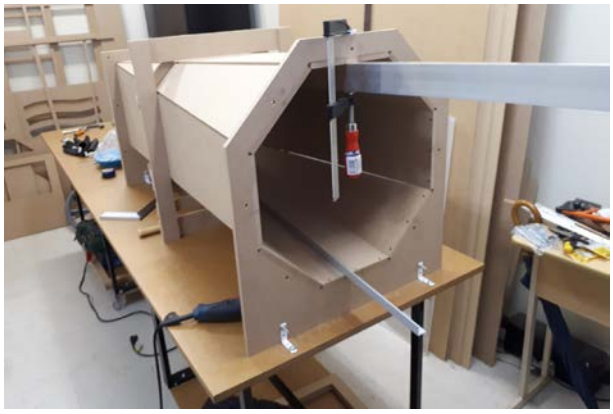


Figura 17 Montagem do divergente do TV.

Na Figura 18 pode ser vista a aplicação de massa corrida na junção entre as peças do divergente.



Figura 18 Aplicação de massa corrida nas junções das faces do divergente.

Devido ao processo de corte e montagem escolhidos formaram-se, entre o encontro das peças do divergente, regiões de pouco contato. Para garantir uma união rígida e evitar frestas, propiciando vazamento do escoamento, estas regiões foram preenchidas com massa corrida e posteriormente lixadas.

Após a lixação da massa corrida aplicada no divergente, as superfícies externa e interna foram pintadas conforme mostrado na Figura 19.



Figura 19 Aspecto final do divergente do TV.

3.8 Acoplamento TV – Ventilador

O trecho final do circuito aerodinâmico do túnel de vento do LEA consiste no conjunto junta flexível e ventilador. Este conjunto foi adquirido a partir das considerações apresentadas na seção 2. As dimensões da junta flexível bem como da carcaça do ventilador são mostradas na Figura 1.

A conexão da seção de saída do divergente (seção octogonal) com a junta flexível (seção circular) foi compatibilizada considerando a circunferência inscrita no octógono. Na Figura 20 podem ser vistos o ventilador com a junta flexível em primeiro plano e a seção octogonal preparados com fita de borracha para vedação.



Figura 20 Junta flexível e divergente.

Para evitar a transmissão de possíveis vibrações induzidas pelo ventilador ao circuito aerodinâmico, foi instalada uma junta flexível. Além deste cuidado, a mesa que suporta o TV está separada por uma pequena distância da mesa que contém o ventilador, conforme mostrado na Figura 21.

O túnel de vento do LEA foi montado sobre duas mesas de bases metálicas com tampos em MDF, especificamente construídas para esta finalidade. Foram instalados rodízios de silicone que possibilitam o deslocamento do conjunto da posição de repouso (próximo da parede) para a posição de ensaio (centro da sala), conforme pode ser visto na Figura 22.



Figura 21 Junta flexível e separação entre as mesas do TV.



Figura 22 Mesa de suporte com rodízios.

Na Figura 23 é mostrada uma fotografia do túnel de vento totalmente montado, onde pode ser vista a forma de união entre cada trecho por parafusos com porcas e arruelas e a fixação do TV sobre a mesa com perfis “L”. Numa vista interna do circuito aerodinâmico, mostrada na Figura 23, percebe-se o afunilamento da seção (convergente-seção de testes) e o ventilador ao fundo.

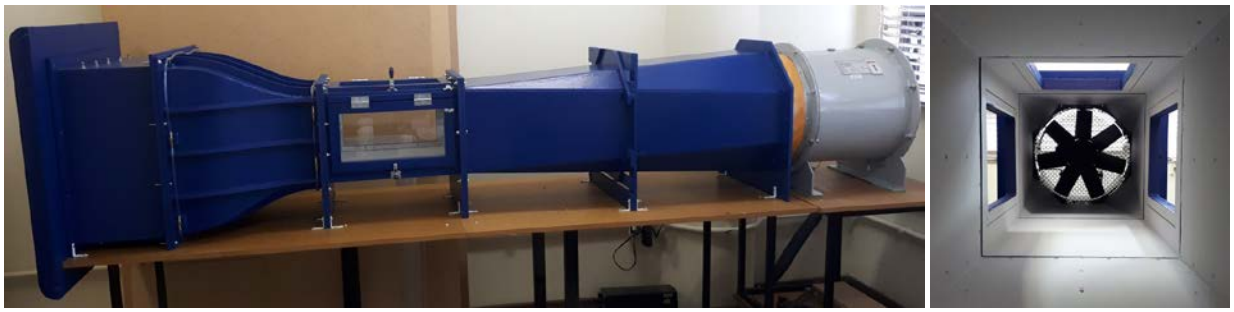


Figura 23 Vista lateral exterior do túnel de vento em sua versão finalizada e vista interna a partir do convergente - TV do LEA.

3.9 Montagem do quadro de acionamento do ventilador

Com a finalidade de possibilitar a variação gradativa da velocidade do vento foi instalado um comando de acionamento do ventilador (motor/hélices) via inversor de frequência (WEG – CFW-300). O inversor bem como o disjuntor motor utilizados, foram acondicionados num armário metálico com porta. Para evitar o desgaste da botoeira do painel de comando do inversor de frequências, além de permitir desligá-lo rapidamente em caso de emergência, foi montado um comando remoto com cabo, composto por botão liga-desliga e potenciômetro de precisão para o controle da velocidade do TV. Na Figura 24 podem ser vistos o quadro de acionamento e o controle remoto com cabo do túnel de vento.

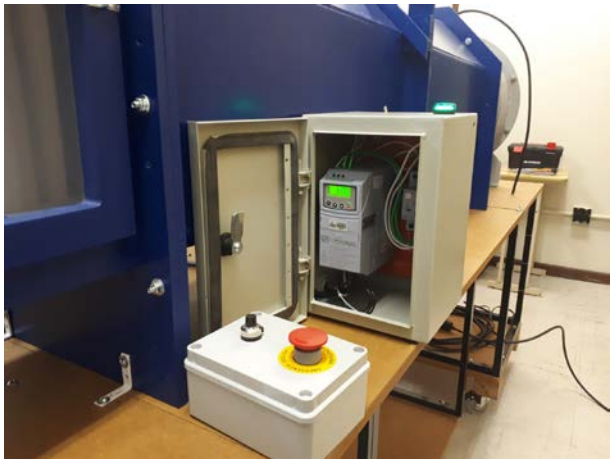


Figura 24 Quadro de acionamento com inversor, disjuntor e comando remoto do TV.

4. CALIBRAÇÃO

Uma vez finalizada a construção do túnel de vento de baixas velocidades do LEA, conforme apresentado na Figura 23, teve início o processo de calibração do equipamento.

De acordo com Barlow et al. (1999) após a construção de um túnel de vento o passo seguinte é a determinação das características do escoamento gerado na seção de testes, ou seja, sua calibração. Segundo Pankhurst e Holder (1968) os fenômenos que devem estar ausentes ou reduzidos para que o escoamento esteja adequado são:

- Distribuição de velocidades médias não uniformes;
- Vorticidade ou rotação do escoamento (*swirl*);
- Turbulência;
- Pulsações de baixa frequência das velocidades médias.

A seguir são apresentadas e discutidas as técnicas de medição com a finalidade de verificar as condições e características do escoamento no interior do túnel de vento.

4.1 Medição das Velocidades Médias do Vento

A medição das pressões dinâmicas, a partir das quais se pode determinar as velocidades médias do escoamento, na seção de testes foi realizada através de um tubo de *Pitot-Prandtl*. A velocidade média pode ser estimada a partir das medições da pressão dinâmica, levando-se em consideração a correção da massa específica do fluido (ar) em função da temperatura e pressão atmosférica durante as medições. Simultaneamente à medição das velocidades médias, foram medidas as diferenças de pressão em anéis piezométricos instalados nas seções inicial e final do convergente. A relação entre a pressão dinâmica medida (q) e a diferença de pressão nos anéis (ΔPa) é representada pelo fator adimensional (k_0). Desta forma, é possível saber durante a realização de ensaios, a velocidade do escoamento na seção de testes sem a inserção do tubo de *Pitot-Prandtl*. Na Figura 25 é mostrado um esquema de posicionamento dos anéis piezométricos $\mathrm{A1}$ e $\mathrm{A2}$ bem como do posicionamento longitudinal e transversal do tubo de *Pitot-Prandtl* durante as medições.

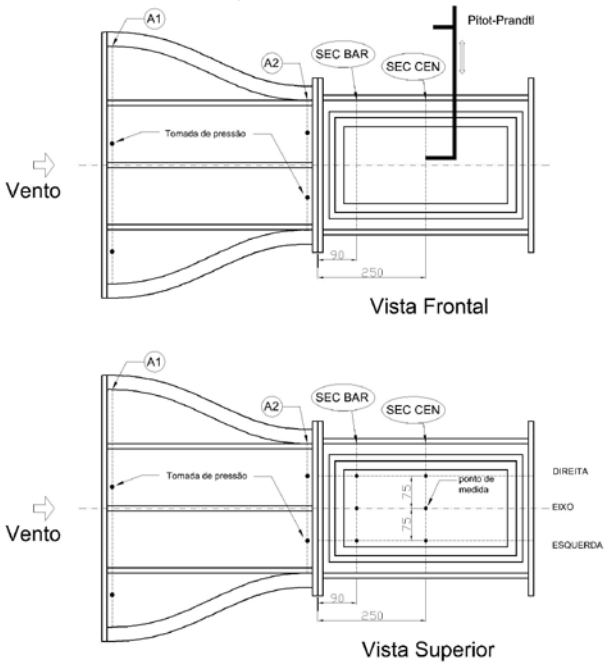


Figura 25 Localização dos anéis piezométricos A1 e A2 e posições de medida dos perfis de velocidades médias [mm].

Em cada posição longitudinal de medida dos perfis de velocidades médias (Figura 25) foram realizadas medidas transversais em três distintas posições. Para cada perfil foram medidas as velocidades em 24 alturas, sendo o intervalo menor para as posições próximas do piso e do teto para a verificação da espessura da camada limite. Para cada varredura de seção transversal foram medidas as velocidades em 72 distintas posições, totalizando 144 pontos de medidas para as duas seções. As medições foram realizadas com tubo de *Pitot-Prandtl* 350 mm de marca *Testo*, dois manômetros diferenciais de pressão modelo *510* de marca *Testo*, além de um termômetro digital modelo *0900 530* de marca *Testo* e de um barômetro digital modelo *WS110* de marca *VEC*.

Na Figura 26 é mostrada a seção de testes durante as medições como tubo de *Pitot-Prandtl* bem como os equipamentos utilizados na determinação das velocidades médias. Além do tubo de *Pitot-Prandtl*, podem ser vistos os outros equipamentos utilizados na determinação das velocidades médias: manômetros diferenciais de pressão, termômetro, barômetro e um manômetro de coluna de líquido em forma de U (*Dwyer* - modelo 1221-M-300).

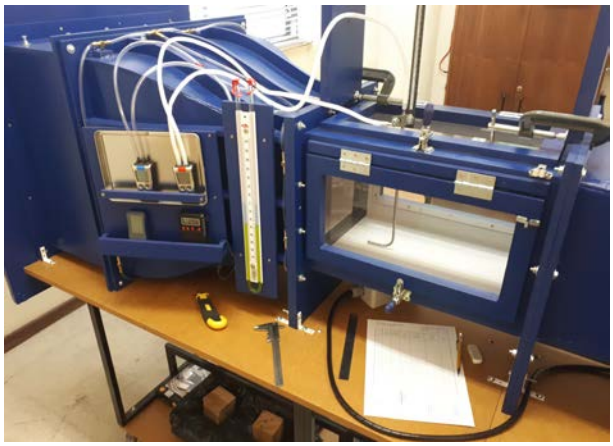


Figura 26 Vista externa da seção de testes durante a medição de velocidades médias no TV.

As medições com tubo de *Pitot-Prandtl* foram realizadas considerando todas as partes constituintes do túnel de vento descrito na Figura 1, incluindo telas e colmeia da câmara de retificação.

Na Figura 27 são apresentados os três perfis verticais de velocidade média para cada posição longitudinal da seção de testes: (a) SEC BAR: localizada a 90mm do início da seção e (b) SEC CEN: localizada a 250mm do início da seção (seção central). A posição transversal de cada perfil considera o observador olhando o escoamento de frente, sendo a posição EIXO no centro da seção, a posição ESQUERDA a 75mm, e DIREITA a 75mm ambas com relação ao eixo (Figura 25 – Vista Superior).

De acordo com o esperado, os perfis de velocidade média da seção de barlavento apresentam velocidades médias inferiores às observadas na seção central. Além disso, observa-se uma excelente uniformidade, podendo ser verificado que nos perfis correspondentes à Figura 27 (a) a uniformidade é menor do que a observada nos perfis da Figura 27 (b). A espessura da camada limite nas duas seções estudadas é inferior a 15mm.

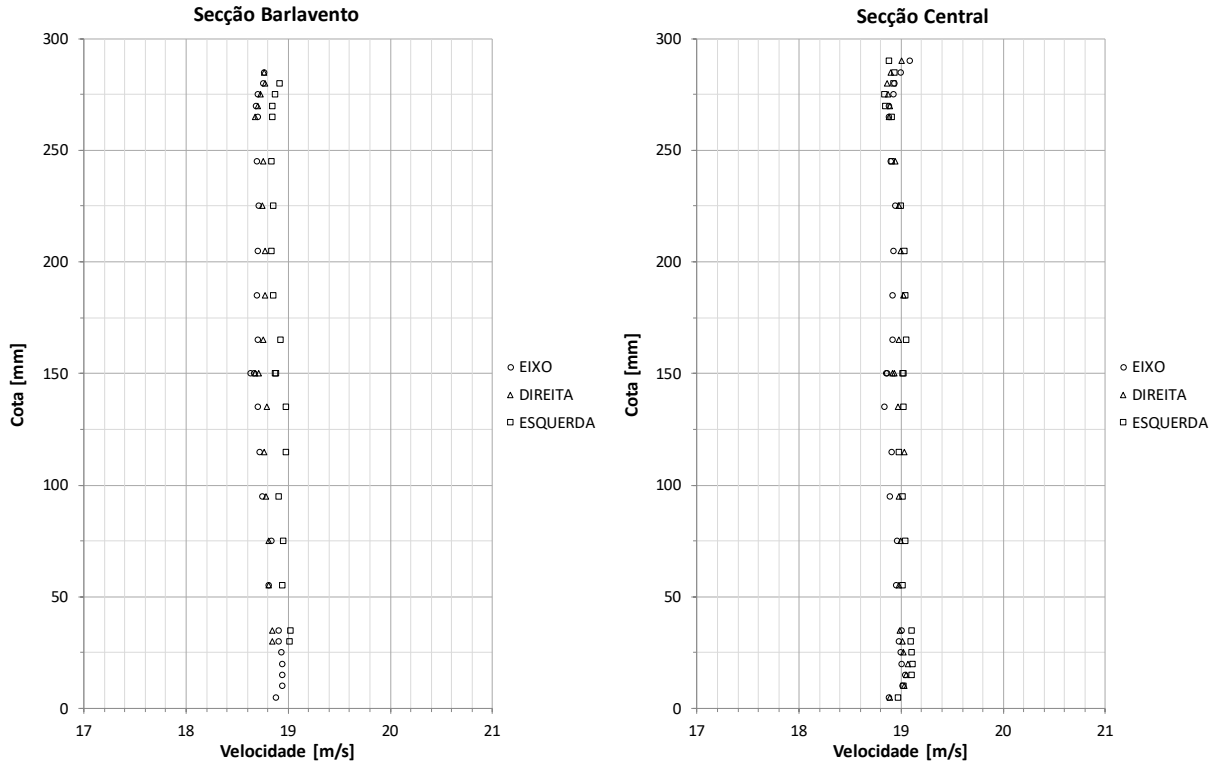


Figura 27 Perfis verticais de variação da velocidade média com a altura na seção de testes, em duas posições distintas: (a) Seção Barlavento (SEC BAR) e (b) Seção Central (SEC CEN) - TV do LEA.

Outra forma de apresentação dos resultados mostrados na Figura 27 é através de mapas da distribuição das velocidades médias em cada uma das duas seções. Cada curva de isovelocidade apresentada na Figura 28 (a) e na Figura 28 (b) foi gerada com 72 pontos de medição, considerando a velocidade nula nas paredes e que a espessura da camada limite nas laterais mede 15mm. A velocidade média resultante, ou seja, média dos 72 pontos de medida à barlavento é de 18,81 m/s enquanto de na posição central é de 18,97 m/s.

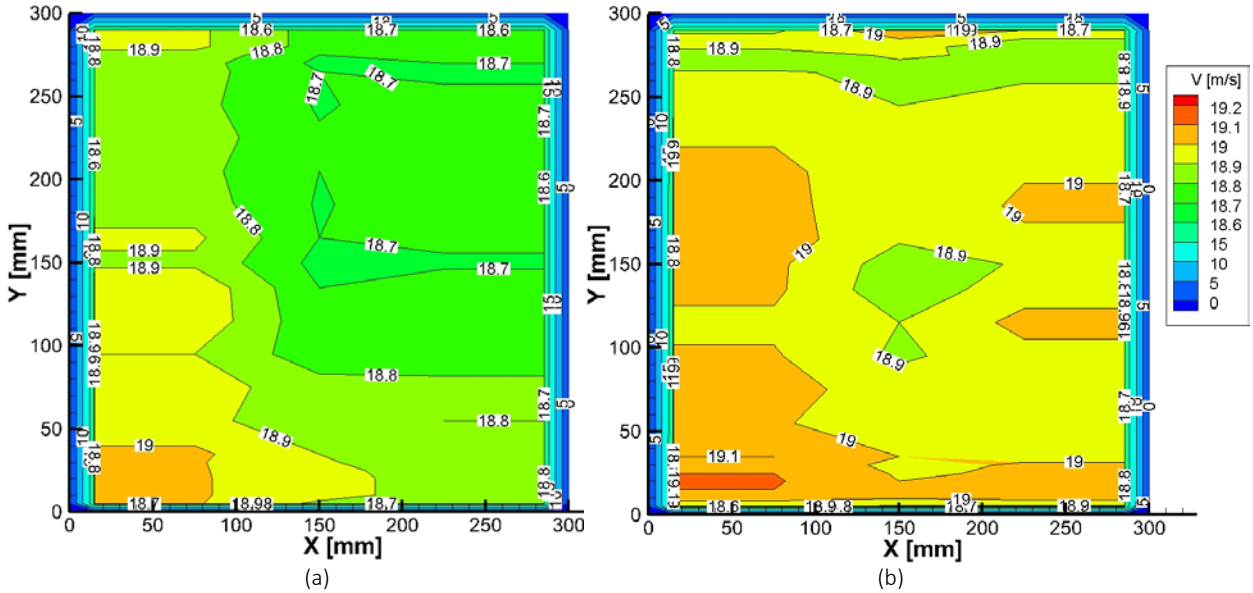


Figura 28 Curvas de isovelocidade nas Seções transversais de Barlavento (a) e Central (b) - TV do LEA.

A partir da Figura 28 (a) e da Figura 28 (b) pode ser estabelecido o grau de uniformidade de cada seção em estudo. Os valores medidos, fora da região afetada pela camada limite, apresentam um desvio inferior a 0,4 m/s, o que é um excelente indicativo de uniformidade.

4.2 Verificação Qualitativa da Hermeticidade e da Uniformidade

Através da técnica de visualização do escoamento com tufos de lã foi possível verificar que não existe ingresso de ar seção de testes. A verificação da hermeticidade da seção de testes é muito importante em túneis de vento de sucção pois a pressão estática no interior do equipamento é inferior à pressão atmosférica (CASTRO et al. 2003). O teste consistiu em inserir dentro da seção de testes, com o equipamento operando em velocidade máxima, uma haste metálica com um tufo de lã, de cerca de 100mm, na extremidade. Ao posicioná-lo próximo das janelas do túnel de vento e nas juntas entre as partes constituintes não foram observadas alterações na direção do tufo, ou seja, indicando que a seção de testes é estanque.

A identificação qualitativa da uniformidade da seção de testes foi realizada com o emprego de uma malha de tufos de lã posicionada em três distintas posições da seção de testes. A malha de tufos é composta de 25 fios espaçados a cada 50mm, sendo 5 distribuídos na largura e outros 5 na altura da seção transversal. As medições foram feitas em três distintas seções: SEC BAR: localizada a 90mm do início da seção, SEC CEN: localizada a 250mm do início da seção (seção central) e SEC SOT: localizada a 400mm do início da seção, conforme mostrado na Figura 29. Os testes foram realizados para 10 diferentes velocidades do escoamento, sendo apresentadas neste trabalho as visualizações correspondentes a velocidade máxima testada.

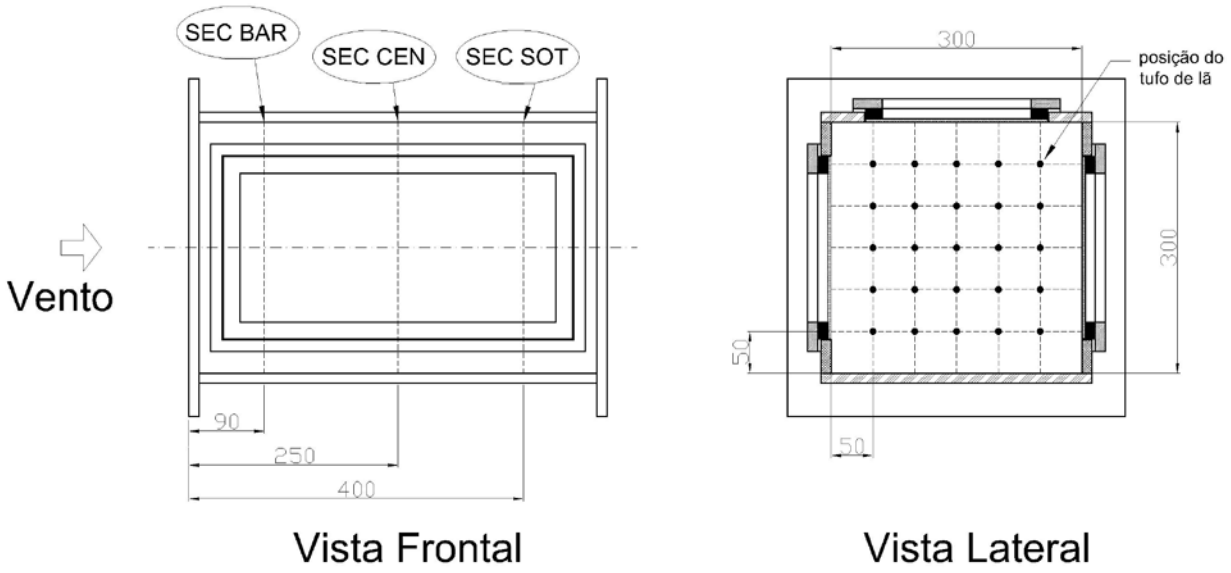


Figura 29 Posição das visualizações com malha de tufos de lã nas seções e espaçamento entre os tufos [mm].

Figura 30 pode ser observada a orientação lateral dos tufos de lã dispostos em malha, para as seções de barlavento (a), central (b) e sotavento (c). Na Figura 31 pode ser observada a orientação global dos tufos de lã dispostos em malha, para as seções de barlavento (a), central (b) e sotavento (c).

A análise dos registros fotográficos com as malhas de tufos de lã não indicou a existência de vorticidade no escoamento (*swirl*) nem de desprendimentos de vórtices próximos das regiões de aberturas (janelas de inspeção) ou nas juntas existentes entre as partes do túnel de vento. Esta ausência de pontos de separação do escoamento pode ser associada à baixa turbulência na seção de testes. Verifica-se na Figura 30 assim como na Figura 31, que os tufos de lã estão alinhados com a direção do escoamento e paralelos entre si, indicando a uniformidade do vento na seção de testes.

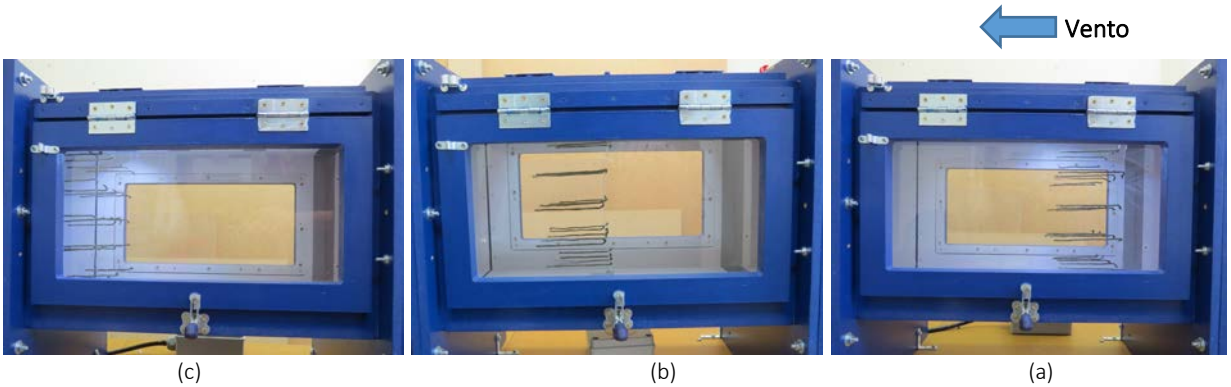


Figura 30 Malha de tufos de lã nas seções de (a) barlavento, (b) central e (c) sotavento – vista lateral - TV do LEA.

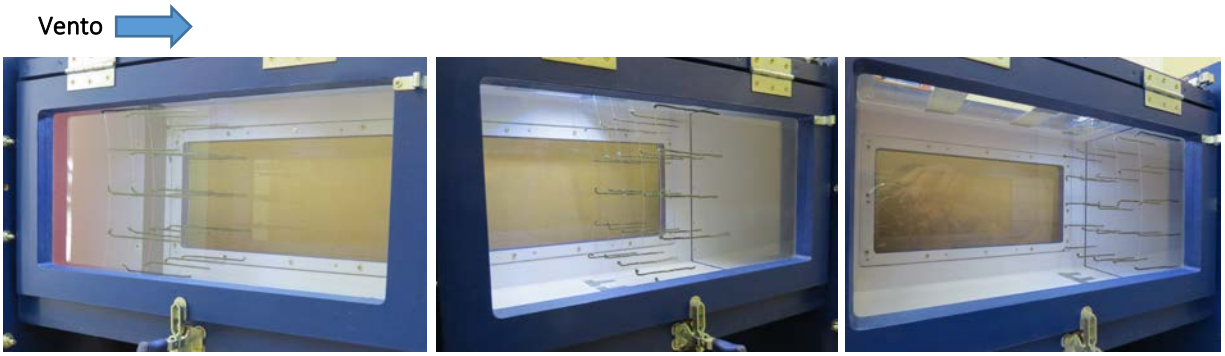


Figura 31 Malha de tufos de lã nas seções de (a) barlavento, (b) central e (c) sotavento – vista global – TV do LEA.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este artigo descreve o processo de construção e calibração do Túnel de Vento do Laboratório de Estudos Aerodinâmicos – LEA.

Túneis de Vento são ferramentas essenciais para fornecer uma resposta experimental aos problemas que envolvem a interação do vento. Dentre a ampla gama de tipos de túneis de vento existentes, o projeto de um novo equipamento é fortemente dependente da aplicação desejada. Desta forma, o projeto de um túnel de vento é um processo iterativo que leva em consideração diversas restrições e orientações. Após o projeto e construção de um TV deve ser realizada a caracterização do equipamento através de um processo de calibração.

O projeto do túnel de vento foi realizado com base em ampla pesquisa bibliográfica especializada. Os principais parâmetros e orientações de projeto foram selecionados e logo o processo de projeto foi programado em planilha eletrônica. A planilha programada foi repetidamente testada para verificar possíveis erros ou inconsistências. Durante o processo iterativo de projeto foram necessárias diversas alterações de parâmetros e medidas para adaptações às restrições iniciais. O uso da planilha eletrônica foi extremamente eficaz, fornecendo segurança e agilidade ao processo de cálculo (NÚÑEZ 2021).

É possível projetar e construir um túnel de vento com características e dimensões similares ao apresentado neste trabalho com investimento relativamente baixo. Cabe salientar que grande parte do custo associado à construção de um equipamento como este é devido à mão de obra. No projeto específico a montagem foi totalmente realizada pelo autor.

Os resultados provenientes da calibração indicam uma excelente correspondência com os parâmetros inicialmente propostos como premissas de projeto. A velocidade média na posição central da seção de testes foi de aproximadamente 19m/s, com ótima uniformidade e com baixa turbulência (qualitativa). A velocidade média medida é cerca de 13,6% inferior a estimada (22m/s). Uma hipótese para esta diferença pode ser associada a um erro na estimativa da perda de carga em algum dos componentes do circuito aerodinâmico. Especial atenção deve ser dada ao difusor do TV, para o qual não foram encontrados na literatura especializada coeficientes de perda de carga por expansão para seção octogonal. Cabe salientar que nos trechos de maior velocidade – pressão dinâmica, erros na estimativa da perda de carga têm maior influência (magnitude).

A medição quantitativa da intensidade da turbulência requer a utilização de um anemômetro de fio quente para sua determinação, equipamento que até o presente momento não está disponível.

Os resultados apresentados demonstram que o processo de projeto, construção e calibração foram executados com êxito, atestando a qualidade do equipamento, item indispensável para que sua utilização em testes e pesquisas tenha validade.

O presente túnel de vento projetado, construído e calibrado é uma ferramenta que possibilitará à comunidade acadêmica, através de experimentos interativos dirigidos, uma melhor apropriação de conceitos da mecânica dos fluidos. Estes conceitos fazem parte da multidisciplinaridade envolvida no Ensino de Engenharia do Vento. Por exemplo, ao se visualizar a separação do escoamento em torno de um objeto, através da técnica de injeção de fumaça, podem ser identificadas zonas de separação do escoamento (sucções) geralmente associadas a uma grande vorticidade. A partir desta identificação a geometria ou posicionamento do objeto podem ser modificados e uma nova visualização permitirá verificar se a intervenção foi benéfica ou não.

Além disso, o TV pode ser utilizado em pesquisas que visem a avaliação do comportamento aerodinâmico de modelos reduzidos em escala adequada, tendo em vista que o equipamento - TV atende aos quesitos técnicos indicados na literatura específica.

AGRADECIMENTOS

O autor agradece ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) - responsável pelos recursos financeiros, ao Professor Renato Vaz Linn e ao ViD – Virtual Design da UFRGS pelo apoio.

REFERÊNCIAS

1. BARLOW JB, RAE WH, POPE A. Low-Speed Wind Tunnel Testing. Third Edition. USA: A Wiley-Interscience Publication, 1999.
2. BLESSMANN J. The Boundary Layer Wind Tunnel of UFRGS. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Amsterdam, v. 10, p. 231-248, 1982.
3. BLESSMANN J. Aerodinâmica das construções. 2. ed. Porto Alegre. Editora Sagra, 1990. 263p.
4. BRUSCA S, LANZAFAME R, MESSINA M. Low-speed wind tunnel: design and build. Wind Tunnels: Aerodynamics, Models and Experiment.189-220. 2011.
5. CASTRO HG, ALVAREZ Y ALVAREZ GM, WITTWER AR, MARIGHETTI JO, DE BÓRTOLI ME, NATALINI MB. Relevamiento en vacío del nuevo canal de aire de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional del Nordeste. Reunión de Comunicaciones Científicas y Tecnológicas, Universidad Nacional del Nordeste, Octubre 2003.
6. NÚÑEZ GJZ, LOREDO-SOUZA AM, ROCHA MM. Uso do Túnel de Vento como Ferramenta de Projeto no Design Aerodinâmico. DESIGN E TECNOLOGIA, v. 2, p. 10, 2012.

7. NÚÑEZ GJZ. Projeto de um Túnel de Vento de Baixas Velocidades para o Ensino de Engenharia do Vento. Revista de Ensino de Engenharia, v. 40, 2021.

8. PANKHURST R, HOLDER D. Wind Tunnel Technique. Sir Isaac Pitmann & Sons LTD London. 1968.

9. SOLARI G. Education and dissemination in wind science and engineering. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Amsterdam, v. 203, 2020.

10. STATHOPOULOS T, HAJRA B. Wind engineering education: current state and outlook for the future. In: Proc. 6th Int. Symp. on. Wind Effects on Building and Urban Environment, Tokyo, Japan. 2013.