

# DIMENSIONAMENTO E SIMULAÇÃO FLUIDODIÂMICA (CFD) DO FUTURO TÚNEL DE VENTO DO IMT PARA VERIFICAÇÃO INICIAL DAS CARACTERÍSTICAS DE ESCOAMENTO

Natalia Yin San Lee<sup>1</sup>; Joseph Youssif Saab Jr<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Aluna de Iniciação Científica da Escola de Engenharia Mauá (EEM/CEUN-IMT);

<sup>2</sup> Professor da Escola de Engenharia Mauá (EEM/CEUN-IMT).

## Resumo

O objeto da pesquisa envolveu o projeto, dimensionamento aerodinâmico e verificação inicial das características do escoamento do futuro túnel de vento de escoamento incompressível do IMT. As etapas das pesquisas incluíram a determinação dos requisitos, pesquisa sobre o estado da arte, a determinação de todos os segmentos necessários para um túnel de aplicação mista - atmosférico e de camada limite – o dimensionamento das suas seções transversais e a simulação, via mecânica dos fluidos computacional (CFD) para a determinação das suas características iniciais e estudo do perfil de velocidade na seção de testes atmosférica. Os resultados preliminares são apresentados, juntamente com as recomendações para ampliação da pesquisa, assegurando a verificação de outros importantes parâmetros de desempenho nas seções de teste, como a uniformidade do escoamento e a intensidade da turbulência nas seções de teste.

## Introdução

Os túneis de vento são equipamentos para estudo de escoamento utilizando modelos em escala. A técnica permite a análise de velocidades, forças, diferenças de pressões e outros esforços causados sobre um modelo de forma mais econômica e rápida do que em protótipos de escala real. O experimento para identificação das influências do escoamento sobre um modelo de projeto em sua fase inicial é essencial para a validação de cálculos iniciais e certificação do design selecionado, o que em um projeto implica na redução do custo final, confirmação prematura de que atenderá os requisitos e em grande economia de tempo no ciclo de desenvolvimento do produto.

Atualmente o IMT conta com um túnel de vento de pequena seção transversal (0,7 x 0,7 m<sup>2</sup>) e baixa velocidade ( $\approx 14$  m/s), do tipo aberto e de camada limite onde é possível visualizar o escoamento do ar ao redor de edificações, para efeitos meramente qualitativos e didáticos. Tal equipamento não é apropriado para as atividades da área aeronáutica ou demonstrações de fenômenos de mecânica de fluidos que demandem um escoamento uniforme e de baixo nível de turbulência, além de maiores números de Reynolds. Além disso, sua aplicação restrita impede o atendimento de demandas eventuais das indústrias com as quais o IMT mantém convênio de pesquisa.

Essas necessidades levaram o IMT a considerar a construção de um novo túnel de vento composto de duas seções de testes de mesma área (1,6 x 1,6 m<sup>2</sup>) e velocidade de referência da ordem de 30 m/s, porém com escoamentos de natureza distintas. A primeira seção é caracterizada pelo escoamento uniforme, para emprego aeronáutico e geral, enquanto a segunda seção é de camada limite, para emprego principalmente na área de engenharia civil. As próximas seções descrevem os tipos de túneis de vento mais comuns, a definição dos requisitos, a seleção do tipo de equipamento, a definição dos seus segmentos, o dimensionamento das seções transversais de entrada, contração, seções de teste e difusores, além da sua verificação inicial por simulação CFD.

## Materiais e Métodos

Os passos adotados para as definições das geometrias e o projeto (realizado no Solidworks 16.0), foram: (i) estudo e definição do tipo de túnel de vento; (ii) a natureza do escoamento necessário em cada tipo de seção de testes; (iii) pesquisa com os professores e membros do CP-IMT para a definição das áreas, velocidades e características dos escoamentos necessários para as atividades de ensino e pesquisa; (iv) estimativa da potência necessária no ventilador de acionamento do túnel; (v) definição dos segmentos e respectivas seções transversais do túnel, (vi) realização e aperfeiçoamento iterativo do desenho do projeto e (vii) simulação inicial do escoamento em CFD. Cada passo é explicado em maior detalhe, a seguir.

### Tipos de túnel de vento e seleção

Na construção de túneis de vento, há duas principais configurações iniciais a serem consideradas: dotipo circuito aberto ou fechado.

No primeiro caso, ilustrado na Fig. 1, tanto a entrada como saída do escoamento estão voltadas para o meio externo e o ar atmosférico é quase sempre o fluido de trabalho (Celis e Ubbens, 2016). De forma simplificada, o ar percorre o seguinte caminho: admissão controlada, telas retificadoras de fluxo, contração, seção ou seções de teste, difusor, ventilador e silenciador (Barlow, Rae e Pope, 1984). O circuito aberto é apropriado para testes de visualização com fumaça e para usos menos intensos do equipamento. Entretanto, o espaço onde será construído é uma limitação, tanto pelo seu comprimento quanto pela necessidade de se captar ar de forma cuidadosa, já que sofre influência do escoamento externo captado (Bradshaw e Pankhurst, 1964). Caso a entrada esteja localizada próxima a paredes ou objetos ou o clima local desfavoreça o teste, serão necessárias adaptações onde será instalado o túnel de vento. Além disso, túneis abertos requerem mais energia para o funcionamento (especialmente os de grande porte) e podem ser barulhentos (Barlow, Rae e Pope, 1984).

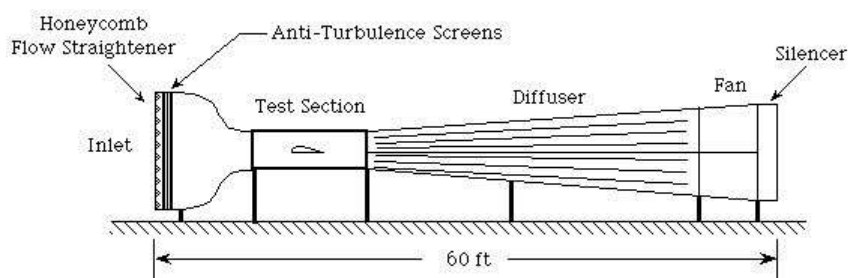


Figura 1 – Exemplo de túnel de vento de circuito aberto ou tipo Eiffel.

No segundo tipo, o de circuito fechado, ilustrado na Fig. 2, o fluido circulado não requer ou requer poucas trocas com o meio externo. Neste caso, o fluido é encaminhado pelas mesmas seções, de contração, seção de teste, difusor e ventilador, porém ele realiza esse percurso em circuito fechado, retornando à contração para reiniciar o ciclo. As vantagens desse tipo de construção são o melhor controle térmico e sobre a qualidade do escoamento, menor ruído (Quinn, Watts et al., 2017) e menores gastos energéticos (Bradshaw e Pankhurst, 1964). Porém, os custos iniciais desse tipo de túnel são mais altos devido aos dutos de retorno do fluido e guias de fluxo nas curvas (Barlow, Rae e Pope, 1984). O equipamento é mais apropriado, portanto, para experimentos ultrasensíveis e regime de uso constante do túnel, o que permite compensar os maiores gastos iniciais. Esses equipamentos também exigem acessórios caros para retirar fumaça no caso de seu uso para visualização e para redução da temperatura do fluido, que aumenta após diversas recirculações.

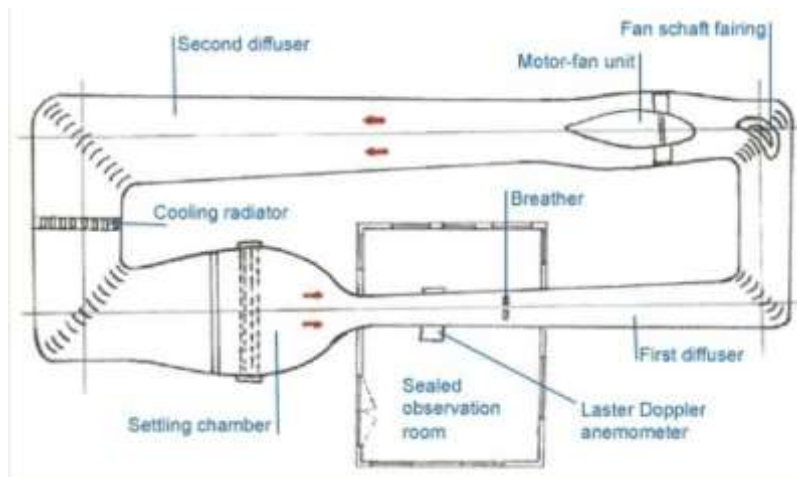


Figura 2 – Exemplo de túnel de vento de circuito fechado ou tipo Göttingen.

Em ambos os tipos de túnel é possível a construção de seções de testes abertas ou fechadas, de acordo com a necessidade de uso (Barlow, Rae e Pope, 1984).

Na interação com a comunidade, percebeu-se que o IMT necessita de um equipamento para uso didático e de pesquisa aplicada, com poucas horas de uso anual e sem custo inicial excessivo. Para o uso didático, as aulas de laboratório costumam durar cerca de 100 minutos e as pesquisas aplicadas podem demorar algumas horas no total, porém, nem sempre necessitam de teste contínuo. Além disso, muitos experimentos didáticos fazem uso extensivo de visualização com linhas de corrente visualizadas através da injeção de fumaça. Todas essas características concorreram para a seleção de um túnel de vento de circuito aberto para o IMT.

#### Tipos de escoamento nas seções de teste

A definição dos testes necessários, incluindo as dimensões dos modelos, o objetivo dos estudos e a natureza do escoamento necessário na seção é passo primordial para a seleção e dimensionamento do túnel de vento. Após a pesquisa com a comunidade do IMT, foram definidas duas seções de teste: uma atmosférica, com escoamento uniforme e outra de camada limite atmosférica, com perfil de velocidade turbulento.

A seção de teste atmosférica, caracterizado por certa uniformidade e baixa turbulência, visa o estudo do escoamento ao redor de aerofólios, asas e outros corpos, aerodinâmicos ou rombudos, para visualização e medição de forças, momentos e cálculo dos seus respectivos coeficientes aerodinâmicos. A maioria dos túneis de vento foi projetada e é utilizada para propósitos aeronáuticos (Barlow, Rae e Pope, 1984) e esses testes requerem um escoamento uniforme na região onde será colocado o modelo com o mínimo de influência possível da camada limite formada próxima à parede do túnel. Portanto, essa seção deve ser localizada logo após a seção de acomodação local onde o escoamento apresenta a maior uniformidade e menor turbulência ao longo de todo o túnel.

A segunda seção de testes é destinada ao estudo do escoamento turbulento atmosférico ao redor de edificações e construções civis. Essa seção de camada limite atmosférica deve apresentar um perfil de velocidade “da lei de potência 1/7”, valor retirado de medições em dutos realizadas por Prandtl em 1921 e que se mostraram apropriadas para os cálculos (White, 2006). O perfil da “lei de potência 1/7 é dado pela Eq. I:

$$\frac{\bar{u}}{V_c} = \left(1 - \frac{r}{R}\right)^{\frac{1}{n}} \quad (I)$$

Onde  $\bar{u}$  é a velocidade média do perfil de velocidade,  $V_c$  é a velocidade na linha de centro do perfil,  $r$  a distância do elemento de fluido em relação à linha de centro e o  $R$  o raio do tubo. O denominador do expoente,  $n$ , pode assumir valores entre 7 e 11, sendo 7 o valor que, frequentemente, encontra o melhor ajuste para representar escoamentos em situações reais (Bruce, Young e Okiishi, 2015).

Entre as seções de teste existe a necessidade de se colocar um comprimento significativo de duto para que o escoamento se desenvolva, de uniforme e com pouca turbulência, para escoamento turbulento plenamente desenvolvido. Em uma tubulação comum, essa transição natural pode levar até 40 diâmetros para ocorrer, o que tornaria o comprimento do equipamento inviável para a maioria das instalações. Por essa razão, em muitos casos são colocados indutores de turbulência dentro da seção de ligação, acelerando a formação de turbulência, pois, mesmo em números de Reynolds acima do valor de  $5 \times 10^5$ , o fluido requer uma perturbação de certa magnitude para que o momento instável inicie ou se amplifique (Davidson, 2004).

#### Pesquisa dos Requisitos para atender as necessidades da Comunidade do IMT.

O Túnel de vento a ser construído no Instituto Mauá de Tecnologia supriria diversas necessidades de ensino e pesquisa da Engenharia Mecânica e Civil, além de necessidades eventuais do Centro de Pesquisas (CP-IMT). Por essa razão, diversos professores foram entrevistados, além de um Engenheiro do CP-IMT e os resultados das entrevistas pode ser encontrado na tabela do Anexo A. Após as entrevistas o tipo de túnel aberto (Eiffel) foi ratificado e os seguintes requisitos foram definidos:

- Duas seções de teste: uma atmosférica e outra de camada limite atmosférica.
- Forma da seção transversal: Quadrada.
- Dimensões da seção transversal das duas seções de teste: 1,6 m x 1,6 m
- Velocidade de referência nas seções de teste: 30 m/s
- Visualização com fumaça.
- Equipamentos para medição de velocidade, forças e pressão.
- Balança para medição de forças e momentos.
- Trabalho com ar, em temperatura ambiente.
- Seções de trabalho estimadas em 90 minutos de uso contínuo máximo.
- Nível de turbulência na seção de testes atmosférica inferior a 1%.
- Uniformidade do escoamento de boa qualidade e suficiente para inserir um corpo de prova com área menor ou igual a 5% da seção transversal, dentro um escoamento essencialmente uniforme.
- Comprimento total da ordem de 30 m.

#### Definição das seções de teste e da seção de ligação.

O projeto de um túnel de vento é, em geral, iniciado pela seção de testes pois as características das demais partes de um túnel de vento derivam da seção transversal, velocidade e qualidade de escoamento da mesma. Enquanto uma seção circular apresenta melhor qualidade de escoamento, a seção quadrada apresenta maior facilidade de construção, manutenção e operação do equipamento.

No caso da seção de testes atmosférica, voltada à visualização e medição em torno de asas e aerofólios, Barlow et al. recomendam uma razão de aspecto (comprimento/largura) entre 1 e 1,5 (Barlow, Era, Pope, 1984), sendo que valores maiores são mais apropriados. Assim, com base na largura de 1,6 m, definiu-se um comprimento de 2,4 m para a seção de testes aeronáutica. Além disso, a camada limite aumenta ao longo do túnel (há exceções quando ocorrem reduções de área, porém essa é a regra geral), e, para neutralizar esse efeito nocivo na seção de testes, Barlow et al. (Barlow, Era, Pope, 1984) recomendam construir a seção de testes com ângulo divergente nas paredes de  $0,5^\circ$ .

O comprimento da seção de ligação entre as seções atmosférica e de camada limite atmosférica foi inicialmente desenhado com base no Túnel de vento do IPT-USP (Instituto de Pesquisa da Universidade de São Paulo), já que não há túneis com duas seções de testes na literatura disponível. Assim, definiu-se um comprimento de 7 m para seção de ligação e uma seção de testes com comprimento de 3,75 m, porém como os modelos que serão utilizados pelo IMT tem dimensões menores que os do IPT, está foi reduzida para 2,40 m. Em função do ângulo de divergência empregado na seção de testes aeronáutica, a seção transversal da seção de

camada limite atmosférica e o duto de transição ficaram com dimensões ligeiramente maiores, de 1,64 m x 1,64 m, mas que pouco deveriam afetar a velocidade de referência, já que o aumento representa uma compensação ao déficit de vazão imposto pelo crescimento da camada limite ou seja, equivale à espessura de deslocamento da camada limite.

#### Estimativa inicial da potência de acionamento do túnel.

Com base na velocidade de referência fixada para as seções de teste (30 m/s) e suas dimensões, é possível estimar a potência líquida a ser transferida pelo rotor do ventilador ao escoamento e também cotar o seu custo aproximado no início do projeto, já que é parte significativa dos custos totais de um túnel de vento. Um demonstrativo da estimativa da potência está na tabela 1.

Dados de projeto	Valores
Área de referência (A)	2,56 m <sup>2</sup>
Velocidade de referência ( $\bar{v}$ )	30 m/s
Temperatura de referência (T)	25 °C
Pressão de Referência (São Caetano do Sul)	94 kPa
Densidade do ar ( $\rho$ , modelo de gás perfeito)	1,08 kg/m <sup>3</sup>
Vazão volumétrica máxima (Q)	76,8 kg/s
Variação de carga ( $\Delta h$ )	134 m
Potência ( $\dot{w} = \rho \cdot g \cdot Q \cdot \Delta h$ ) injetada no volume de controle (túnel de vento)	108.736 W ou 146 HP

Tabela 1 – Estimativa da potência de acionamento do Túnel de Vento.

O IMT solicitou orçamento para o conjunto moto-ventilador à empresa especializada Howden, a mesma que forneceu o grupo motriz para o túnel do IPT, tendo recebido como a seguinte proposta técnica:

Ventilador axial AXIVANE 66-26 S2000 FB, com motor de 200 HP, ou alternativamente com o motor de 150 HP. Considerando que a potência injetada no volume de controle deve ser da ordem de 146 HP e que a eficiência típica desse tipo de rotor, no ponto de operação é da ordem de 72%, a potência aproximada necessária para acionar o equipamento é da ordem de 202 HP o que sugere a inadequação da proposta alternativa da Howden.

#### Definição das dimensões dos demais segmentos do túnel

Definidas as dimensões das seções de teste e a potência necessária para a velocidade média de escoamento de 30 m.s<sup>-1</sup> nessas seções, foi realizado o dimensionamento dos demais segmentos do túnel.

Para acelerar o ar para dentro do túnel de forma mais próxima possível a um processo isentrópico, coloca-se um segmento de entrada conhecido como lábio de entrada (*inletlip*) ou boca sino (*bellmouth*), de perfil semi-elíptico. A razão recomendada entre os semi-eixos da elipse é de 1:3 (Celis e Ubbens, 2016) e o perfil permite não apenas aumentar a eficiência de aceleração do fluido como também previne a formação de uma *venacontracta* (White, 2018), que representaria bloqueio de vazão e desperdício energético no sistema.

A seção seguinte alcançada pelo ar admitido é a câmara de acomodação e retificação (*settlingchamber*), onde são instaladas as telas para reduzir a escala da turbulência e as colmeias retificadoras (*honeycomb*). Ambas são colocadas na entrada para permitir o decaimento da turbulência durante a etapa de contração, onde ocorre o estiramento vortical e ambos os tipos provocam queda de pressão no escoamento em função do seu arrasto. As telas tipo colméia podem apresentar quatro tipos de configurações, sendo a mais comum a de células hexagonais (Celis e Ubbens, 2016). A razão de aspecto entre comprimento e diâmetro de cada célula é da ordem de 6 a 8 e a porosidade, da ordem de 0,8. Os coeficientes de perda costumam ser próximos à 0,5 (Barlow, Rae e Pope, 1984). As telas retificadoras são telas de fios de arame

cuja função é garantir a uniformidade do escoamento. Apesar de cumprirem papéis semelhantes, as colmeias apresentam maior eficiência no estiramento dos vórtices e as telas cumprem o papel de uniformizar melhor a velocidade do escoamento e, portanto, são empregadas complementarmente.

Todo o túnel foi definido com a seção transversal quadrada selecionada para as seções de teste, com exceção, naturalmente, à seção do ventilador e posteriores (silenciador e difusor), já que a seção do ventilador é circular. A transição entre as seções foi realizada pelo método clássico de um adaptador construído a partir de 4 segmentos triangulares, sendo dois calandrados e dois retos, técnica esta que permite fabricação simples.

O segmento de acomodação foi definido com um comprimento de 0,98 m, em função da razão de contração do bocal convergente, que será explicada a seguir.

O bocal convergente é considerado a região de maior complexidade do túnel de vento devido à elevada aceleração sofrida pelo ar e riscos de descolamento do fluido com conseqüente recirculação. Além disso, um projeto bem feito pode reduzir o comprimento do túnel. Como esta seção antecede a seção de teste atmosférica (aeronáutica), é necessário que a contração tenha uma razão de áreas que acelere o fluido até a velocidade média desejada de 30 m/s e também trate o escoamento para que alcance a uniformidade e o baixo nível de turbulência necessários nessa seção de testes crítica. A razão de contração (expressão XX) recomendada está na faixa entre 6 e 12 (Zanoun, 2017) e decidiu-se empregar a menor delas para reduzir ao máximo o comprimento do túnel de vento.

$$c = \frac{A_1}{A_2} \quad (2)$$

Na expressão da Eq. (2), o  $A_2$  representa a saída (2,56 m<sup>2</sup>) da contração ou entrada da seção de teste, resultando em área de entrada ( $A_1$ ) de 15,36m<sup>2</sup> equivalente a uma seção quadrada de entrada com 3,92 m de aresta.

As geometrias pré-selecionadas para a contração foram uma curva polinomial de 5ª ordem definida por Bell e Mehta (Eq. 3) e o polinômio de 3º grau de Hussein (Eq. 4) (Coelho, 2018). Ambos apresentam desempenhos satisfatórios em projetos anteriores (Zanoun, 2017). Os polinômios são

$$\text{Bell e Mehta: } y = H_e - (H_e - H_s) \cdot \left[ 6 \cdot \left(\frac{x}{L}\right)^5 - 15 \cdot \left(\frac{x}{L}\right)^4 + 10 \cdot \left(\frac{x}{L}\right)^3 \right] \quad (3)$$

$$\text{Hussein: } y = H_e - 3 \cdot (H_e - H_s) \cdot \left(\frac{x}{L}\right)^2 + 2 \cdot (H_e - H_s) \cdot \left(\frac{x}{L}\right)^3 \quad (4)$$

Onde os  $H_e$  é metade do comprimento da altura da entrada,  $H_s$  é metade do comprimento da altura da saída,  $x$  é a posição em relação ao eixo horizontal, sendo  $x = 0$  na entrada da contração e  $L$  o comprimento total da contração, que no caso é 2,40m. Os comprimentos da seção de acomodação pré contração  $L_p$ , contração  $L_{qn}$  e seção de acomodação pós contração,  $L_{qs}$  são obtidas como  $L_p = 0,5 \cdot H_e$ ,  $0,5 \cdot H_e < L_{qn} < H_e$  e  $0,5 \cdot H_s < L_{qs} < 1,5 \cdot H_s$  (Barlow, Rae e Pope, 1984). Assim, foram definidos os comprimentos de  $L_p = 0,98 \text{ m}$ ,  $L_{qn} = 1,96 \text{ m}$  e  $L_{qs} = 1,60 \text{ m}$ .

A seção de acomodação pós contração localiza-se imediatamente antes da entrada da seção de testes. Ela permite que o fluido uniformize sua velocidade, após a forte aceleração, antes de adentrar a área de testes. O comprimento desta varia com o valor de contração, sendo de  $L_p = 0,98 \text{ m}$  para a contração de  $c = 6$ .

Após as seções de teste é indicada a construção de um difusor. O conjunto moto-ventilador proposto pela Howden já apresenta uma seção silenciadora após o ventilador, seguida de um difusor, para minimizar as perdas na descarga do fluido e para evitar descolamento e recirculação que possam afetar as seções de teste. Como o comprimento do túnel é também uma limitação, optou-se por utilizar somente o difusor previsto no equipamento Howden.

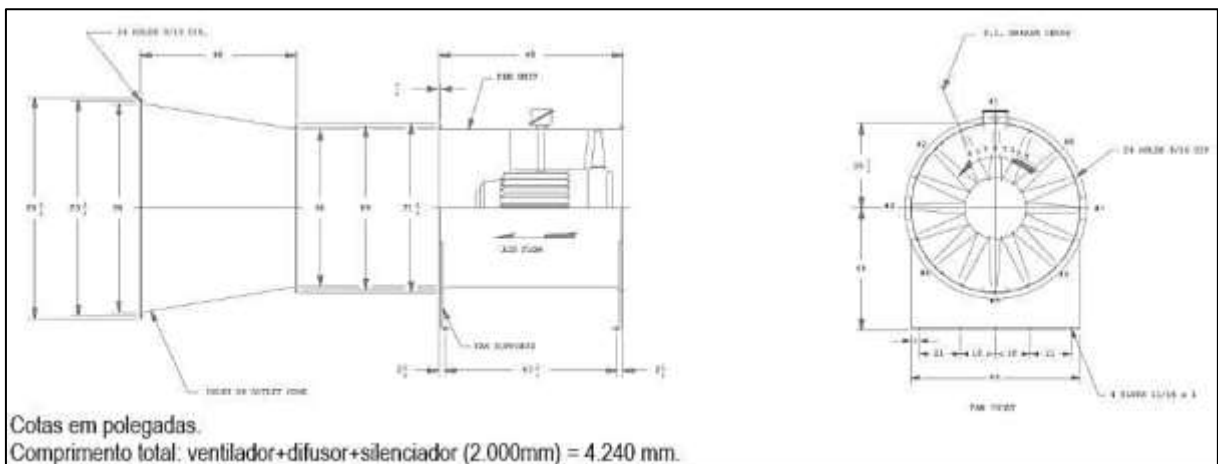


Figura 3 – Dimensões preliminares do ventilador Howden de diâmetro 1,676m.

O ventilador está na mesma seção do motor, com diâmetro de 1,676m e comprimento de 1,219m. A rotação do conjunto ocorre no sentido anti-horário, tendo a direção do escoamento como referência. O atenuador de ruído, acoplado ao conjunto tem comprimento de 2,0m. Por fim, o difusor apresenta diâmetro de 2,0 m na seção de saída e comprimento de 1,0m.

### Desenho

O desenho técnico da geometria dimensionada e suas cotas principais foi realizado em SolidWorks 16.0 e pode ser visto no Anexo B do texto.

Como o fluido ocupa o espaço interno à geometria fixada foi necessário criar um corpo contido por ela em preparação à simulação pretendida. Ainda como parte dos preparativos para a simulação, dois novos corpos auxiliares foram adicionados para reduzir a influência dos planos de entrada na simulação: uma caixa de entrada, com aresta de 30 m e um tubo prolongador na exaustão do ar, com seção circular constante de 2,0 m de diâmetro e comprimento de 10m.

### Simulação inicial

Após o dimensionamento de todos os segmentos e suas seções transversais, o projeto teve uma verificação inicial realizada por meio da técnica de Mecânica dos Fluidos Computacional (CFD), para assegurar minimamente, ainda nessa etapa inicial, o atendimento da principal restrição, que é a velocidade prevista na seção de testes atmosférica.

Mecânica dos Fluidos Computacional é uma técnica poderosa que se aplica a uma grande quantidade de áreas industriais e não-industriais, para a análise de sistemas envolvendo o escoamento de fluidos (Versteeg & Malalasekra, 2006).

A técnica, quando baseada no método dos volumes finitos, consiste em discretizar o espaço, ou domínio de cálculo, em pequenos volumes de controle nos quais se controla o balanço de massa, quantidade de movimento e energia dentro de certa tolerância especificada. As condições de contorno são propagadas para cada um dos pequenos volumes internos, durante a solução iterativa, até que tais tolerâncias de convergência especificadas sejam alcançadas.

A ferramenta empregada na presente análise foi o ANSYS CFX, em sua versão 19.0.

As simulações Computacionais Fluido Dinâmicas (CFD), foram feitas por meio do programa Ansys 19.0 CFX.

O segundo passo do processo de simulação envolve a criação da malha ou discretização do domínio de cálculo. As Figuras 4 e 5 mostram a malha criada com elementos hexaédricos e tetraédricos. A malha tem 1.070.196 nós e 637.559 e a qualidade dos elementos estava com valor médio de 0,84538 e desvio padrão de  $9,7139e^{-002}$ , sendo que a escala ANSYS de qualidade global varia de 0 a 1, sendo 1 elementos de geometria ótima.



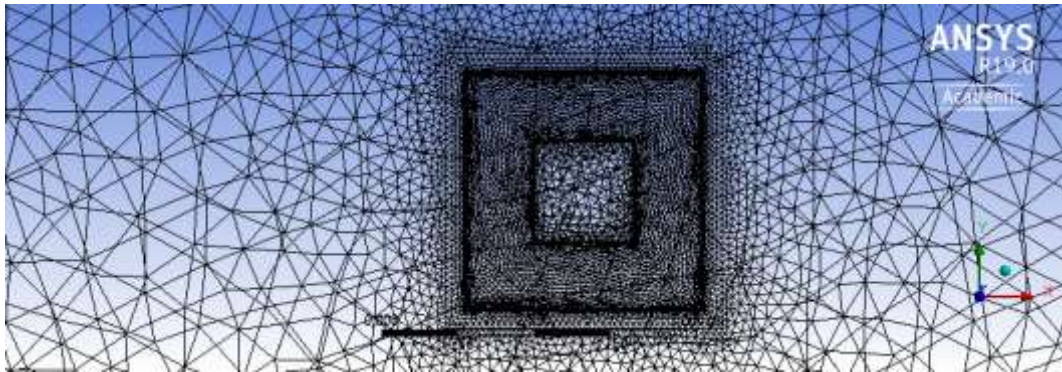


Figura 4 – Vista de entrada do Túnel de Vento: malha gerada em Ansys 19.0 CFX

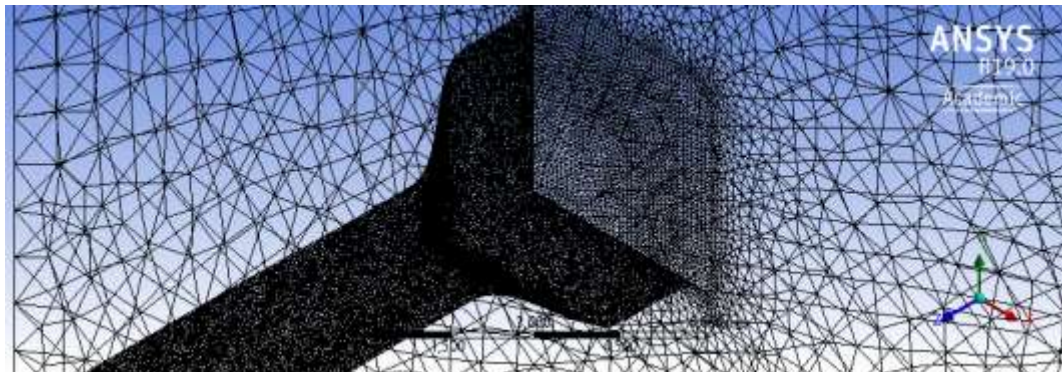


Figura 5 – Vista isométrica do Túnel de vento: malha gerada em Ansys 19.0 CFX

A terceira etapa no processo de simulação CFD consiste na definição dos modelos, na especificação das propriedades do fluido e na fixação das condições de contorno. O resumo do *setup* do ANSYS CFX PRE pode ser visto na tabela 2.

Modelo	Tipo
Fluido	Ar, gás perfeito @ 25 °C
Tipo de escoamento	Incompressível (sem equação da energia)
Aceleração da gravidade	Acionada.
Modelo de turbulência	RSM (Reynolds-Stress Modeling)
Tipo de transição	De dois parâmetros: Intermitência ( $\gamma$ ) e número de Reynolds baseado na espessura de quantidade de movimento ( $Re_\theta$ )
Esquema de Interpolação	Alta ordem para Equações de balanço e turbulência.
Resíduos máximos nos balanços (RMS)	1Ee_5
Desbalanceamento máximo aceitável	0,1%
Entrada:	$V_{ar} = 0,0853m/s$ com baixa turbulência: 1%
Saída:	Pressão atmosférica média, com distribuição radial
Paredes da caixa de entrada:	Sem atrito (slipwall)
Demais paredes	Com atrito (no slipwall)
Interface entre os corpos	Conservative Flux

Tabela 2 –Setup do Ansys CFX PRE para a simulação.

A quarta etapa da simulação, o cálculo numérico de inversão de matrizes, durou 83 minutos com 8 processadores calculando em paralelo até a convergência, obtida após 498 iterações. A convergência foi assegurada pelo fato de os resíduos terem caído abaixo de 1E-5



entre duas iterações sucessivas. A convergência foi monotônica para todos os parâmetros controlados, após as primeiras iterações.

### Resultados e discussões

Muitos resultados qualitativos e quantitativos importantes podem ser obtidos a partir dos dados gerados pela simulação CFD. A etapa de análise foi realizada com o auxílio do software de pós-processamento ANSYS CFX POST e alguns resultados relevantes são mostrados e comentados nesta seção.

A verificação do perfil de velocidades nas seções de teste atmosférica (aeronáutica) e de camada limite atmosférica são mostrados na Fig. 6. A curva 1 (em vermelho) mostra uniformidade da velocidade em  $30 \pm 0,2$  m/s (variação de 0,7%) ao longo de um raio de 0,7 m em torno do eixo da seção de testes, para a contração de Bell e Metha. Isso implica que, excetuando-se uma coroa circular de 0,1 m em torno da parede da seção, o escoamento é uniforme dentro de um critério de 0,7% de variação.

A curva 2 (em azul) mostra o perfil de velocidade na seção de camada limite atmosférica. Em uma primeira análise visual, o perfil turbulento ainda não se desenvolveu com a rugosidade natural do segmento de ligação, que tem 7 m de comprimento, e demandará a inserção de elementos de rugosidade e/ou turbuladores no segmento para tornar-se plenamente desenvolvido em tão limitado comprimento.

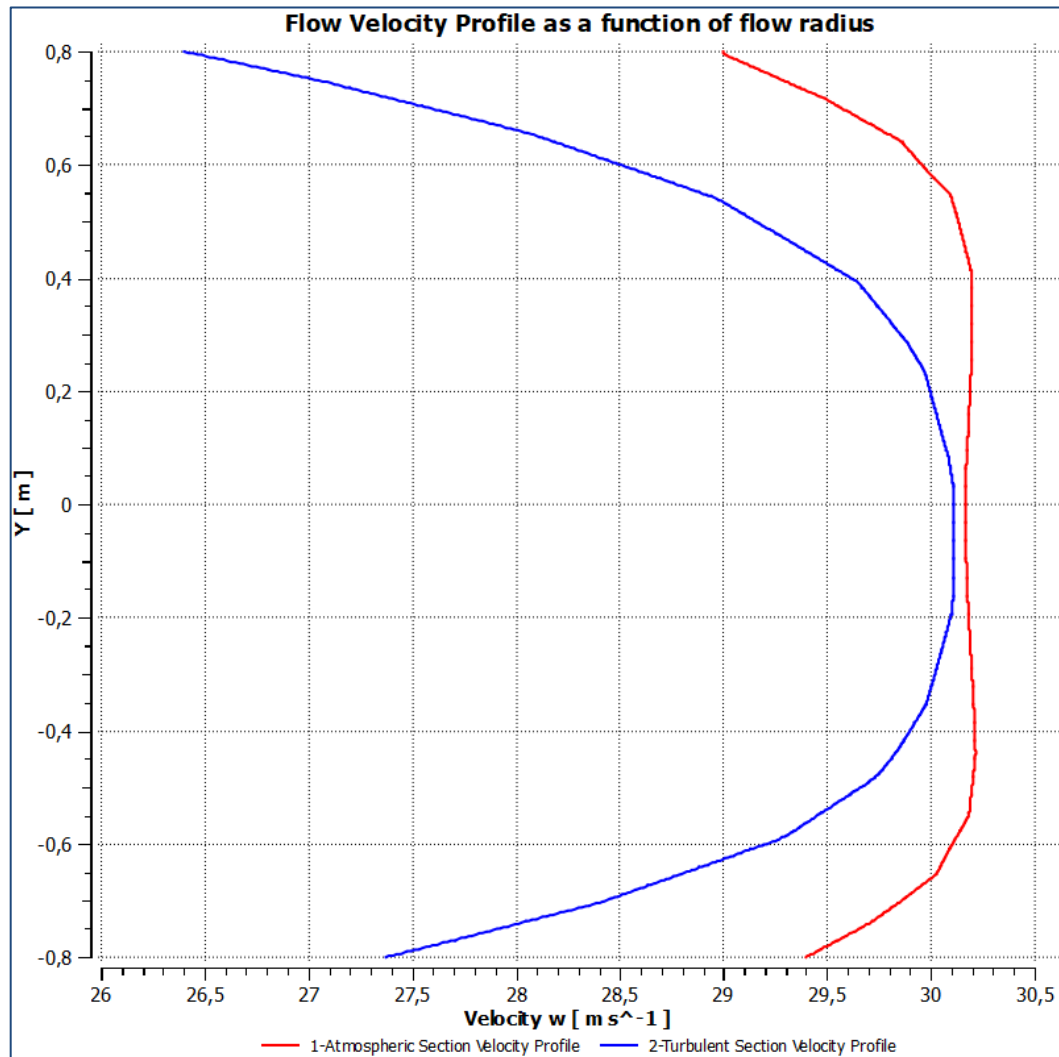


Figura 6 – Velocidade do fluido em um corte radial nas seções de teste.

Os mapas de isocontornos obtidos e mostrados nas Figuras 7, 8 e 9 mostram as linhas de corrente do escoamento, os contornos de mesma velocidade e distribuição de energia cinética

turbulenta no escoamento. A Fig. 8 mostra qualitativamente a maior uniformidade do escoamento após a contração, local da seção de testes atmosférica. A Fig. 9 mostra que a energia cinética turbulenta se concentra na periferia do escoamento, que contém um núcleo ainda laminar na seção de saída, reforçando a tese da necessidade de acréscimo de rugosidade entra as duas seções de teste para permitir o pleno desenvolvimento do escoamento turbulento na seção de testes de camada limite.

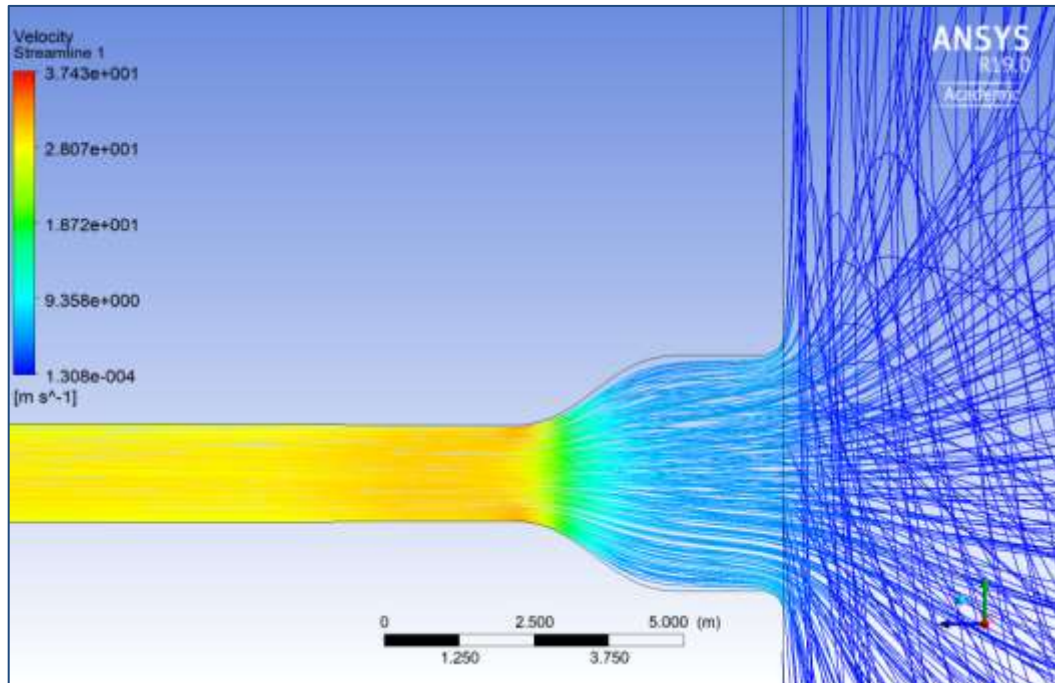


Figura 7 – Linhas de corrente na entrada do Túnel de Vento

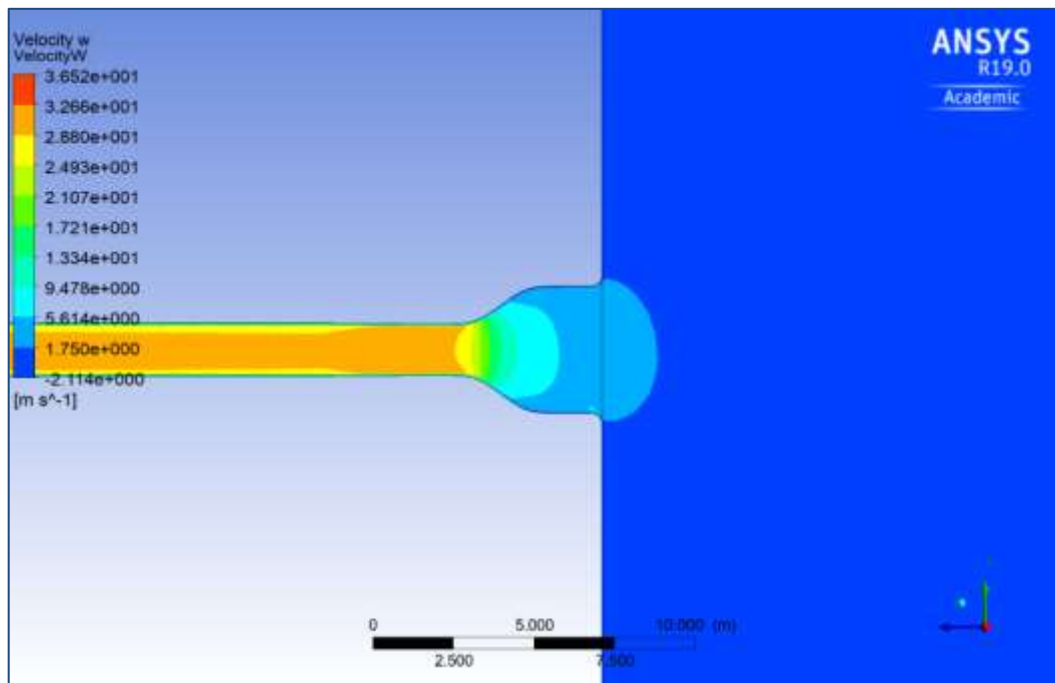


Figura 8 – Velocidade da seção de teste atmosférica.

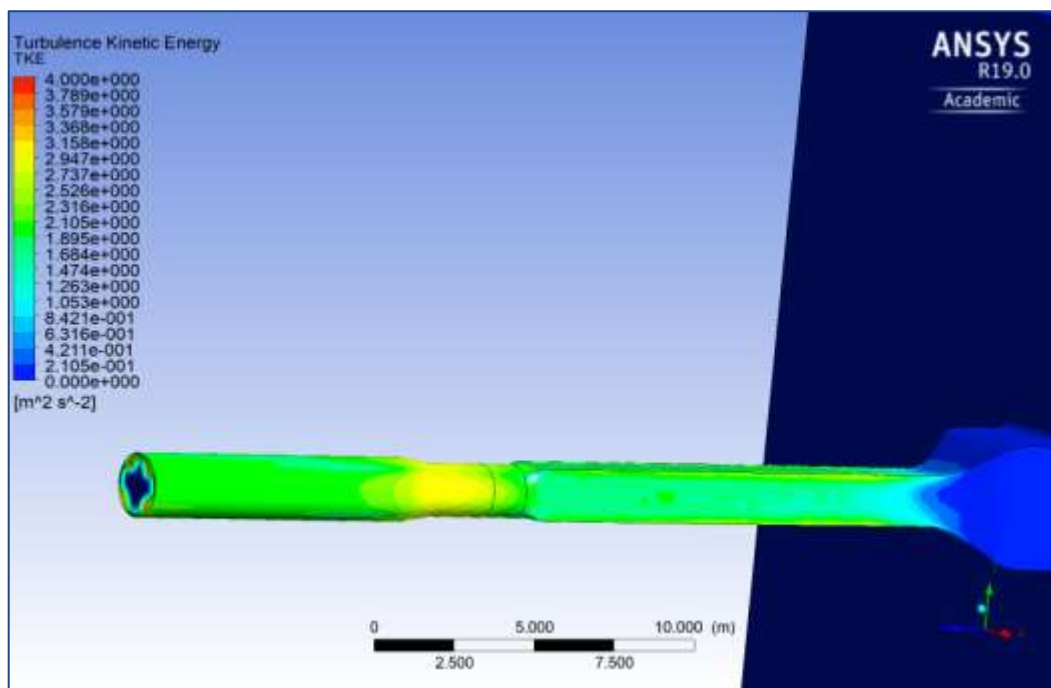


Figura 9 – Energia cinética turbulenta na seção de teste de camada limite.

Alguns cálculos de verificação básicos foram realizados e são mostrados na tabela 3.

Parâmetro	Calculado pelo CFD	Estimado no projeto conceitual
Vazão Mássica	91 kg/s	83 kg/s
Velocidade na caixa de entrada	0,08537 m/s	0,08533 m/s
Velocidade média na descarga para a atmosfera	23,845 m/s	N/A
Pressão Média na Seção de Entrada do Motor	-348,8 Pa	N/A
Pressão Média na Seção de Saída do Motor	+379,6 Pa	N/A
Velocidade de projeto na seção de testes atmosférica	30 m/s	30±0,2 m/s na maior parte da seção.

Tabela 3 – Cálculos de verificação

## Conclusão

A geometria de projeto fixada e os dados obtidos da simulação permitem realizar uma comparação dos principais requisitos e os resultados obtidos até aqui:

Requisito	Situação	Observação
O Projeto contempla duas seções de teste	Atende	
A seção transversal é quadrada nas duas seções de teste.	Atende	
Permite o uso de fumaça	Ok, túnel do tipo aberto.	
Velocidade na seção de testes	Verificada	
Uniformidade na seção de testes.	Verificada	
Comprimento máximo do túnel de vento.	21,59 m	O valor está dentro do limite desejado de 30 m.

Perfil turbulento 1/7 na seção de testes de camada limite	A verificar	Após adaptação de curva e testes com rugosidades na seção de ligação.
Definição da contração.	Falta testar a contração de Hussein	Já simulada, porém dados ainda não analisados.

Tabela 4 – Requisitos iniciais, resultados obtidos e observações.

Além disso os dados simulados permitiram selecionar a potência apropriada do motor do ventilador de acionamento do túnel e já permite o projeto elétrico de alimentação do equipamento e seu planejamento associado, além de estimativas de custo inicial de operação do mesmo.

Os estudos necessários para a continuidade da pesquisa e eliminação completa dos riscos de engenharia associados a esse projeto, são:

- 1) Melhorar a malha até obter  $Y^+=1$ ;
- 2) Refazer a análise dessa curva de contração com a nova malha;
- 3) Substituir as outras curvas no desenho e comparar a qualidade na seção de testes;
- 4) Separar o Caixa de Entrada (*Inletbox*) e o Seção de teste (*Test Section*) do restante;
- 5) Experimentar induzir o escoamento pela redução da pressão na seção do ventilador e colocando *Opening* na entrada e
- 6) Estudar a homogeneidade da velocidade e o nível de turbulência na seção de testes.

Apesar da relativamente longa duração da pesquisa, as simulações via CFD foram todas realizadas dentro de apenas um mês, o que comprova a velocidade de obtenção de resultados por esse método, que permitem reduzir os riscos de engenharia com custo relativamente reduzido pois não demanda a fabricação de modelos ou experimentos na etapa de projeto conceitual.

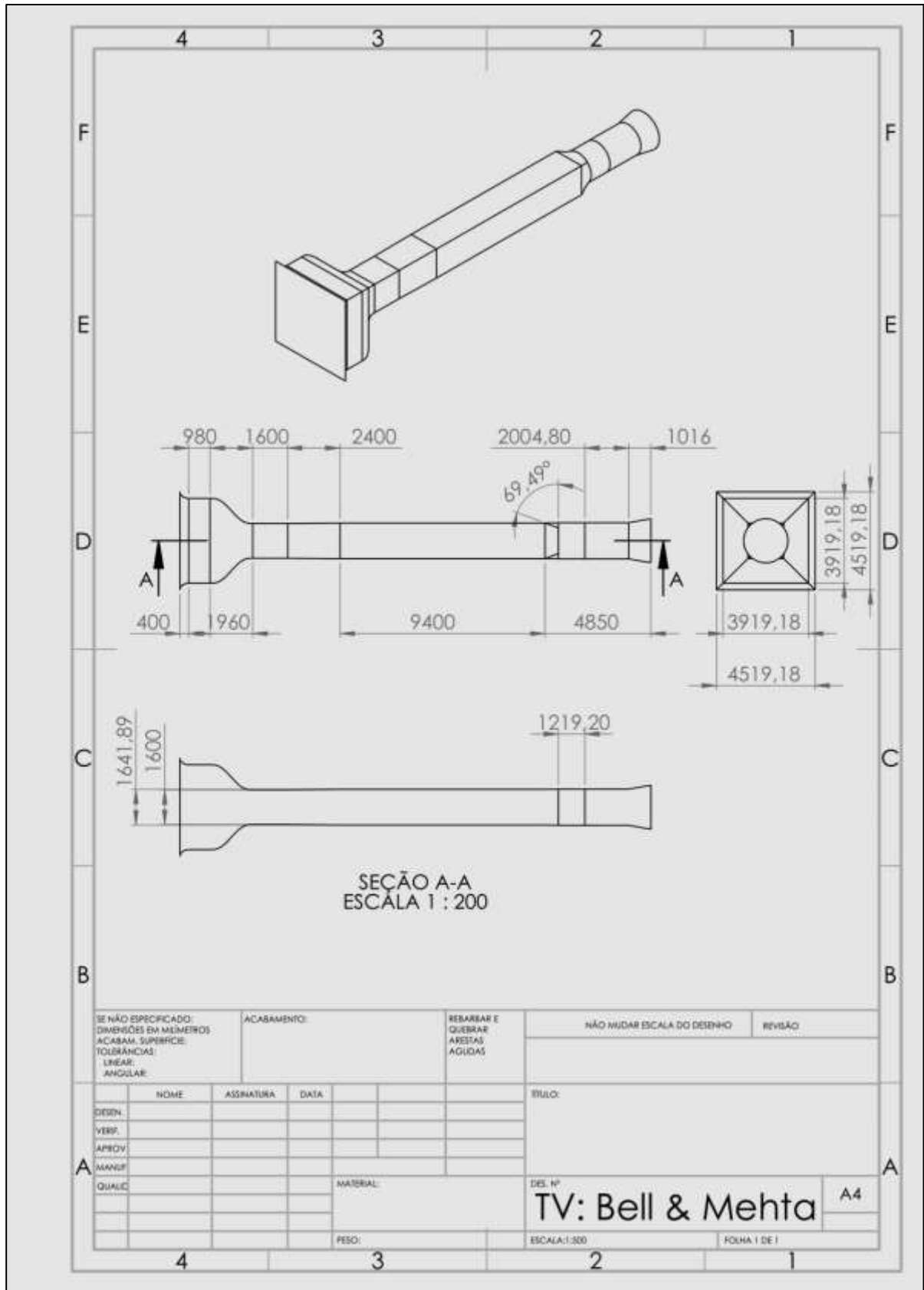
## Referências Bibliográficas

- Barlow, B. J.; Era, W. H. Jr.; Pope, A. (1984) *Low-Speed Wind Tunnel Testing*. 3<sup>rd</sup> edition.
- Bruce, R. M.; Young, D. F.; Okiishi, T. H. (2015) *Fundamentos da mecânica dos fluidos*, 4<sup>a</sup> edição.
- Celis, B.; Ubbens, H. H.; (2016) *Design and construction of an open-circuit wind tunnel with specific measurement equipment for cycling*.
- Coelho, J. C. M. (2018) *Análise preliminar da contração de entrada*.
- Davidson, P. A. (2004) *Turbulence introduction for scientists and engineers*, 1<sup>st</sup> edition, New York, Oxford University Press.
- Sampaio, R. (2017) *Howden Proposta Técnica*.
- Versteeg, H., & Malalasekera, W. (2006) *An Introduction to Computational Fluid Dynamics*. Loughborough, UK: Pearson.
- White, F. M. (2018) *Mecânica dos fluidos*, 8<sup>a</sup> edição, Nova York, McGraw-Hill.
- White, F. M. (2006) *Viscous fluid flow*, 3<sup>rd</sup> edition, Nova York, McGraw-Hill
- Zanoun, E. S. (2017) *Flow characteristics in low-speed wind tunnel contractions: Simulation and testing*.

Anexo A: Pesquisa de requisitos realizada no CEUN e CP.

Professor/Engenheiro	Área	Comentários na entrevista
Elisabeth Montefusco	Eng. Civil	Principais estudos são sobre a pressão do vento em edificações variando a geometria e comparativos do comportamento do vento em galpões industriais, variando a angulação para que possa evitar acidentes com deslocamentos da cobertura. Para isso, seria desejado o escoamento de camada limite com velocidades da ordem de 22 m/s a 27 m/s.
Cássia Silveira de Assis	Eng. Civil	os modelos utilizados pelo tronco da Engenharia Civil serão adaptados às dimensões de seção de testes. Para o respectivo tronco serão realizadas simulações em modelos em escala de pontes, prédios altos e conjuntos de prédio com o escoamento tipo camada limite. As velocidades de escoamento desejadas ela área são da ordem de 27 m/s a 42 m/s.
João Carlos Martins Coelho	Eng. Civil e Eng. Mecânica	Ensaio envolvendo arrasto, forças em cilindros em velocidade uniforme, porém, reforçou que mais importante que as especificações do túnel seriam os instrumentos necessários.
Antonio Luiz Pacífico	Eng. Mecânica	Para a sua matéria de Mecânica dos fluidos I, o túnel de vento será usado para testes visuais de arrasto sobre corpos, pressão estática, dinâmica e estagnação. Além disso, visualizações de vazão e velocidade.
Joseph Y. Saab Jr	Eng. Mecânica	Seção transversal atmosférica suficiente para testar uma semi-asa do Aerodesign com envergadura da ordem de 1,2 m. Nível de turbulência inferior a 1%, se possível chegando a 0,5%. Número de Reynolds baseado na aresta da seção de testes atmosférica da ordem de 3 milhões. Fundo do túnel com mesa giratória. Balança Aerodinâmica e instrumentação para velocidade, pressão e momentos aerodinâmicos. Rack de tubos de pitot para aplicação do método de Betz na determinação do arrasto de corpos.
Henrique Nelson Satkunas	CP-IMT	Não há especificação fechada pelo CP no momento.

Anexo B



SE NÃO ESPECIFICADO: DIMENSÕES EM MILÍMETROS ACABAMENTO: SUPERFÍCIE TOLERÂNCIAS: LINEAR: ANGULAR:		ACABAMENTO:	REBARBAR E QUEBRAR ARESTAS AGUDAS	NÃO MUDAR ESCALA DO DESENHO	REVISÃO
DESIGN.	NOME	ASSINATURA	DATA	TÍTULO:	
VERIF.					
APROV.					
MANUF.					
QUALIC.					
			MATERIAL:	DES. Nº	
				TV: Bell & Mehta A4	
			FESO:	ESCALA: 1:200	FOLHA 1 DE 1