



UNIVERSIDADE DE PASSO FUNDO

FACULDADE DE ENGENHARIA E ARQUITETURA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA

Moacyr Fauth da Silva Jr.

**TÚNEL DE VENTO DE CAMADA LIMITE
ATMOSFÉRICA: METODOLOGIA DE PROJETO**

Dissertação apresentada à Faculdade
de Engenharia e Arquitetura da
Universidade de Passo Fundo, para
obtenção do título de Mestre em
Engenharia.

Passo Fundo

2006

Moacyr Fauth da Silva Jr.

**TÚNEL DE VENTO DE CAMADA LIMITE ATMOSFÉRICA:
METODOLOGIA DE PROJETO**

Dissertação de Mestrado

UNIVERSIDADE DE PASSO FUNDO
FACULDADE DE ENGENHARIA E ARQUITETURA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA

Moacyr Fauth da Silva Jr.

Orientador: Prof. Dr. Mario José Paluch

Co-orientador: Prof. Msc. Rubens Stuginski Jr.

**TÚNEL DE VENTO DE CAMADA LIMITE ATMOSFÉRICA:
METODOLOGIA DE PROJETO**

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia e Arquitetura da Universidade de Passo Fundo, para obtenção do título de Mestre em Engenharia.

Passo Fundo

2006

UNIVERSIDADE DE PASSO FUNDO
FACULDADE DE ENGENHARIA E ARQUITETURA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA

A Comissão Examinadora, abaixo assinada, aprova a Dissertação:

**Túnel de vento de camada limite atmosférica:
metodologia de projeto**

Elaborada por:

Moacyr Fauth da Silva Jr.

Como requisito parcial para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia

Aprovado em 30/09/2006
Pela Comissão Examinadora

Prof. Dr. Mario José Paluch
Presidente da Comissão Examinadora

Prof. Dr. Antonio Thome
Coord. Prog. Pós-Graduação em Engenharia

Prof. Ph.D. Acir Mércio Loredo Souza
UFRGS - Universidade Federal do Rio Grande
do Sul

Prof. Msc. Rubens Stuginski Jr.
UPF – Universidade de Passo Fundo

Prof. Dr. Moacir Kripka
UPF – Universidade de Passo Fundo

Prof. Dr. Luís Édson Saraiva
UPF – Universidade de Passo Fundo

Passo Fundo

2006

A Deus, a minha esposa Abigail, aos meus filhos, ao meu orientador, aos meus colegas colaboradores, aos meus pais e à Universidade de Passo Fundo, os quais têm tido paciência por ter me auxiliado neste trabalho.

Agradeço pela dedicação, e empenho demonstrado na elaboração desta dissertação:

- Ao meu orientador Professor Mario José Paluch que incentivou, coordenou e acompanhou toda a realização deste trabalho com grande presteza e eficiência;

- Aos professores e funcionários do Curso de Pós Graduação em Engenharia da Universidade de Passo Fundo, pelo conhecimento transmitido e pelas vezes que de diferentes maneiras contribuíram para a efetivação do presente trabalho;

- A minha esposa Abigail, aos meus pais e demais familiares, pela incansável atenção e compreensão dispensada nos momentos difíceis, durante a realização desta dissertação;

- Aos inesquecíveis colegas e amigos, pela convivência, pelo apoio e pelos momentos vividos no Curso de Pós-Graduação em Engenharia da Universidade de Passo Fundo.

RESUMO

O presente trabalho tem como tema central “Túnel de Vento de Camada Limite Atmosférica: Metodologia de Projeto”, justamente pelo fato de o túnel de vento ser um equipamento, pelo qual se destina a testes e estudos do ar em movimento. Justifica-se a temática deste trabalho pela sua relevância para a área de pesquisa, sobretudo, para que se possam efetuar os estudos na área da engenharia do vento. Este trabalho está estruturado em quatro capítulos que se complementam e se constituem num todo que articula revisão teórica, a qual possibilita a montagem de um documento com as especificações a serem consideradas no projeto das diferentes partes de um túnel de vento: Introdução, onde são identificados: o tema, o problema de pesquisa e os objetivos; Apresenta uma revisão bibliográfica sobre aspectos associados ao tema da pesquisa: Túnel de Vento de Camada Limite Atmosférica: Metodologia de Projeto; “Túnel de Vento de camada Limite Atmosférico para a Universidade de Passo Fundo”, apresenta as duas alternativas de Túneis de Vento de Camada Limite Atmosférica a FEAR/UPF; Apresenta conclusões advindas do estudo e sugestões para futuras pesquisas. Dessa forma, este trabalho pretende contribuir com a pesquisa na área da engenharia de vento.

Palavras-chave: túnel de vento, projeto de túnel de vento de camada limite atmosférica.

ABSTRACT

The present work has as its main subject the design and calculation of two atmospheric boundary layer wind tunnels. It is with their possible assembly at the University of Passo Fundo, to perform researches in the field of Wind's Engineering. The work is structured around four chapters: Introduction, where the theme and objectives are explained; Review, where the state-of-the-art is present; Projects, where calculations and design are showed; Conclusions and suggestions for future works.

Key words: wind tunnel, project of wind tunnel of atmospheric boundary layer.

LISTA DE FIGURAS

Fg. 1: Perfis de velocidade média sobre terrenos com diferentes rugosidades.....	14
Fg. 2: Túnel de vento de camada limite de retorno fechado da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.....	17
Fg. 3: Túnel de vento de camada limite da Universidade Nacional do Nordeste, Resistência, Argentina.....	18
Fg. 4: Equipamentos para simulação de CLA.....	22
Fg. 5: Lábios feitos a partir de uma elipse (comunicação pessoal).....	29
Fg. 6: Lábios feitos a partir de duas circunferências.....	30
Fg. 7: Geometria das células em colméias.....	31
Fg. 8: Tela de uniformização, utilizada em túneis de vento.....	31
Fg. 9: Convergente, colméia e lábios, vista externa de um túnel de vento.....	34
Fg. 10: Contorno de Witoszinsky, $rw(x)$, $c=5,4$, onde rw_1 é o raio de entrada, o rw_2 é o raio de saída, l é o comprimento da parte curva.....	36
Fg. 11: Contorno do convergente tipo Boerger e Witoszinsky.....	37
Fg. 12: Curva polinômio de quinta ordem, com a primeira e segunda derivada iguais a zero nas extremidades.....	38
Fg. 13: Perfil do convergente formado por duas elipses tangentes.....	38
Fg. 14: Câmara de ensaio do túnel de vento da UFRGS, com o modelo de um pavilhão industrial e os dispositivos de simulação da CLA.....	41
Fg. 15: Dimensões pavilhão ensaiado por Paluch.....	43
Fg. 16: Diagrama de Moody.....	45
Fg. 17: Difusor de saída de um túnel de vento.....	46
Fg. 18: Ventilador e carenagem instaladas com as janelas direcionadoras e anti-rotativas são também parte do conjunto.....	49
Fg. 19: Ventilador centrífugo e o perfil de velocidades na sua saída.....	49
Fg. 20: Linha piezométrica da primeira versão do túnel de vento de CLA.....	58
Fg. 21: Desenho TV1-000 Vista superior do túnel de vento.....	61
Fg. 22: Desenho TV1-000A Vista lateral do túnel de vento.....	62
Fg. 23: Desenho TV1-000B Vista lateral do túnel de vento.....	63
Fg. 24: Desenho TV1-001 Lábios de entrada (bocal).....	64
Fg. 25: Desenho TV1-001A Lábios de entrada (bocal).....	65
Fg. 26: Desenho TV1-002 Tela corretora.....	66
Fg. 27: Desenho TV1-002A Tela corretora.....	67
Fg. 28: Desenho TV1-003 Colméia.....	68
Fg. 29: Desenho TV1-003A Colméia.....	69
Fg. 30: Desenho TV2-004 Câmara de estabilização.....	70
Fg. 31: Desenho TV1-004A Câmara de estabilização.....	71
Fg. 32: Desenho TV1-005 Gabarito da curva do convergente.....	72
Fg. 33: Desenho TV1-006 Forma convergente.....	73
Fg. 34: Desenho TV1-007 Convergente e estrutura.....	74
Fg. 35: Desenho TV1-007A Convergente e estrutura.....	75
Fg. 36: Desenho TV1-008 Bancada de teste.....	76
Fg. 37: Desenho TV1-008A Bancada de teste.....	77
Fg. 38: Desenho TV1-009 Adaptador retangular/circular.....	78
Fg. 39: Desenho TV1-009A Adaptador retangular/circular.....	79
Fg. 40: Desenho TV1-010 Ventilador.....	80
Fg. 41: Desenho TV1-010A Ventilador.....	81
Fg. 42: Linha piezométrica da segunda versão do túnel de vento de CLA.....	87

Fg. 43: Desenho TV2-002 Vista superior do túnel de vento.....	89
Fg. 44: Desenho TV2-003 Vista lateral do túnel de vento.....	90
Fg. 45: Desenho TV2-004 Seção de testes vista lateral.....	91
Fg. 46: Desenho TV2-005 Colméia.....	92
Fg. 47: Desenho TV2-006 Câmara de estabilização.....	93
Fg. 48: Desenho TV2-007 Telas.....	94
Fg. 49: Desenho TV2-008 Junta anti-vibração.....	95
Fg. 50: Desenho TV2-008 Ventilador de sopro duplo.....	96

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Dimensões e proporções do pavilhão industrial.....	43
Tabela 2 – Coeficientes de perdas da primeira versão do túnel de vento de CLA.....	57
Tabela 3 – Dados da curva piezométrica da primeira versão do túnel de vento de CLA.....	58
Tabela 4 – Orçamento da primeira versão do túnel de vento de CLA.....	59
Tabela 5 – Coeficientes de perda da segunda versão do túnel de vento de CLA.....	85
Tabela 6 – Dados da curva piezométrica da segunda versão do túnel de vento de CLA.	87
Tabela 7 – Orçamento da segunda versão do túnel de vento de CLA.....	88
Tabela 8 – Comparação entre custos das duas versões do túnel de vento de CLA.....	97

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	11
1.1 Considerações iniciais	11
1.2 Problemas de pesquisa	12
1.3 Justificativas	13
1.4 Objetivos.....	13
1.4.1 Objetivo geral	13
1.4.2 Objetivos específicos	13
1.5 Estrutura da dissertação.....	13
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	14
2.1 Camada limite atmosférica (CLA).....	14
2.2 Túneis de vento.....	16
2.3 Túneis de vento de retorno fechado	18
2.4 Túneis de vento de retorno aberto.....	20
2.5 Simulação de camada limite atmosférica (CLA)	21
2.6 Projeto de túneis de vento.....	23
2.7 Considerações energéticas.....	26
2.8 Regras gerais de projeto.....	28
2.8.1 Lábios de ingresso ou bocal (bell mount)	29
2.8.2 Câmara de estabilização do escoamento (setling chamber).....	30
2.8.3 Colméia.....	30
2.8.4 Telas de uniformização (screens).....	31
2.8.5 Convergente ou bocal convergente (nozzle).....	33
2.8.6 Câmara de testes (test-section).....	41
2.8.7 Difusor (diffuser).....	46
2.8.8 Sistema propulsor	48
3 TÚNEL DE VENTO PARA A UNIVERSIDADE DE PASSO FUNDO.....	51
3.1 Condicionantes dos projetos	51
3.2 Projeto da primeira versão do túnel de vento de CLA	49
3.2.1 Circuito aerodinâmico e geometria da primeira versão do túnel de vento de CLA.....	52
3.2.2 Projeto executivo da primeira versão do túnel de vento de CLA.....	54
3.2.3 Estimativa da performance da primeira versão do túnel de CLA	54
3.2.4 Linha piezométrica da primeira versão do túnel de vento de CLA.....	58
3.2.5 Orçamento da primeira versão do túnel de vento de CLA.....	59
3.2.6 Desenhos da primeira versão do túnel de vento de CLA.....	60
3.3 Projeto da segunda versão do túnel de vento de CLA	82
3.3.1 Circuito aerodinâmico e geometria da segunda versão do túnel de vento de CLA.....	82
3.3.2 Projeto executivo da segunda versão do túnel de vento de CLA	83
3.3.3 Estimativa de performance da segunda versão do túnel de vento de CLA	83
3.3.4 Linha piezométrica da segunda versão do túnel de vento de CLA	87
3.3.5 Orçamento da segunda versão do túnel de vento de CLA.....	88
3.3.6 Desenhos da segunda versão do túnel de vento de CLA.....	88
3.3.7 Comparativo de custos dos dois túneis.....	97
4 CONCLUSÕES	98
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	100

1 INTRODUÇÃO

1.1 Considerações iniciais

Túneis de vento são construídos há pelo menos cem anos. Inicialmente, eles foram concebidos para superar as limitações de outros métodos de ensaio aerodinâmicos, como por exemplo, o ensaio de queda livre.

Mais antigas ainda são as equações de Navier-Stokes que descrevem o movimento dos fluidos. Essas equações, não lineares e muito complexas, proporcionam soluções fechadas (analíticas) somente em algumas situações muito simples. Por muitos anos, seu valor foi conceitual e a maioria dos problemas de engenharia foram solucionados a partir de ensaios em túneis de vento.

Os túneis de vento foram e são usados como “sofisticados computadores analógicos”. Nas palavras do matemático John Von Neumann (1946, apud GORECKI, 1998):

Indeed to a great extent, experimentation in fluid dynamics is carried out under conditions where the underlying physical principles are not in doubt, where the quantities to be observed are completely determined by known equations. The purpose of the experiment is not to verify a theory but to replace a computation from unquestioned theory by direct measurements. Thus wind tunnels, for example, are used at present, at least in part, as computing devices to integrate the partial differential equations of fluid dynamics. (1998)

Muitos túneis pequenos (de até 50HP) foram construídos entre 1900 e o início da Primeira Guerra Mundial, tanto em Europa como nos EUA. Eles foram projetados para realizar pesquisa básica vinculada a problemas da aeronáutica. Com o início da Guerra, o número de túneis, seu tamanho, sua velocidade e potência crescem para dar suporte ao desenvolvimento de maiores, mais rápidos e mais potentes aeronaves e mísseis. Nos anos 90, alguns túneis ultrapassaram a potência de 10.000HP e possuem velocidades que abrangem todo o espectro possível (desde baixo-subsonico até hipersônico).

Fora do campo aeroespacial, os denominados túneis de vento de propósito geral, desde 1930, foram empregados para resolver problemas vinculados à Engenharia do Vento, tais como: ação do vento sobre edifícios, torres, pontes, etc.

Novos desenvolvimentos, entre 1965 e 1980, mudaram a situação indicada nos parágrafos anteriores:

- A dinâmica de fluidos computacional (*computational fluid dynamics*, CFD) se transforma em uma ferramenta muito poderosa da aerodinâmica, com o desenvolvimento de novos e poderosos computadores.
- Descobre-se a importância de simular a camada limite atmosférica (CLA) nos ensaios das estruturas civis. Desde então, se inicia a construção dos denominados túneis de vento de camada limite, que permitam sua reprodução em escala reduzida, e o desenvolvimento de uma área nova do conhecimento chamada de Engenharia do Vento.

A Engenharia do Vento (BARLOW et al, 1999) pode ser definida como o campo do conhecimento que combina a meteorologia, mecânica dos fluidos, mecânica estrutural e estatística, para minimizar os efeitos desfavoráveis do vento e maximizar os favoráveis. Em geral, quatro são as áreas de interesse da Engenharia do Vento:

- 1) Forças estáticas exercidas pelo vento em edifícios e estruturas;
- 2) Dinâmica das estruturas submetidas à ação do vento;
- 3) Ventos locais. Esses problemas requerem a medição das propriedades médias e flutuantes do vento;
- 4) Transporte de massa pelo vento: erosão de solos, transporte de neve, poluição atmosférica, etc.

Hoje em dia, as ferramentas da Engenharia do Vento são os túneis de vento de CLA, principalmente, e a CFD, em segundo lugar.

1.2 Problemas de pesquisa

O túnel de vento de camada limite é uma ferramenta fundamental no estudo de poluição ambiental, ação do vento em estruturas, micro-meteorologia, etc. Porém, o projeto e a construção de um túnel de vento não é uma tarefa simples, ainda que exista uma abundante bibliografia sobre o tema em questão.

Assim surge o problema a ser desenvolvido: *como projetar um túnel de vento de camada limite atmosférica?*

1.3 Justificativas

O presente estudo justifica-se considerando que a construção de um túnel de vento na Faculdade de Engenharia e Arquitetura (FEAR) da Universidade de Passo Fundo (UPF), somente será possível se houver, como primeira condição, um projeto executivo do referido túnel. Portanto, o presente estudo oportunizará à FEAR vir a ter um túnel de vento, e com isto, ter-se-ão novas oportunidades de pesquisa.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo geral

O objetivo geral desta pesquisa é projetar um túnel de vento, de camada limite, com o qual se possam efetuar testes e estudos na área de engenharia do vento.

1.4.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos desta dissertação são os seguintes:

- Montar um documento com as especificações a serem consideradas no projeto dos diferentes trechos ou seções de um túnel de vento.
- Definir o circuito aerodinâmico e a geometria (forma e tamanho) de, ao menos, duas alternativas de túneis de vento para a FEAR.
- Estabelecer para cada alternativa de túnel de vento o projeto executivo e o orçamento.

1.5. Estrutura da dissertação

O trabalho está estruturado em quatro capítulos, incluindo este, “Introdução”, onde são identificados o tema, o problema de pesquisa, os objetivos e as justificativas.

No capítulo 2 é apresentada uma revisão bibliográfica sobre aspectos associados ao tema da pesquisa: projeto de um túnel de vento.

O capítulo 3, “Túneis de vento para a Universidade de Passo Fundo”, apresenta as duas alternativas de túneis de vento para a FEAR/UPF.

Em “Conclusões”, capítulo 4, apresentam-se conclusões advindas no estudo e sugestões para futuras pesquisas.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Camada Limite Atmosférica (CLA)

A camada limite atmosférica (CLA) é a parte da troposfera que recebe a influência direta da superfície terrestre. Nos termos da engenharia do vento, a camada limite (CL) está determinada pela espessura da atmosfera na qual existe um gradiente vertical de velocidade. Dentro da CLA a velocidade média do vento varia desde zero, junto à superfície, até a denominada velocidade gradiente, na altura gradiente, que marca o limite superior da CLA.

A espessura da CLA é variável no tempo e espaço mas, em geral, é menor do que 1000m. Nesta região as características do vento dependem principalmente da topografia do terreno, da forma, dimensões e distribuição dos obstáculos naturais e artificiais (a chamada rugosidade superficial) e da variação da temperatura na direção vertical. Quanto maior a rugosidade superficial, tanto maior será a agitação mecânica provocada no ar (maior turbulência atmosférica), maior o intercâmbio turbulento de quantidade de movimento e maior a altura interessada neste processo. A CLA em uma cidade é maior do que em campo aberto ou sobre o mar, pois apresenta mais e maiores obstáculos ao escoamento do ar.

Na Fig. 1 são apresentados os perfis de velocidade média do vento, dentro da CLA, sobre terrenos de diferentes rugosidades, na condição de atmosfera em equilíbrio neutro.

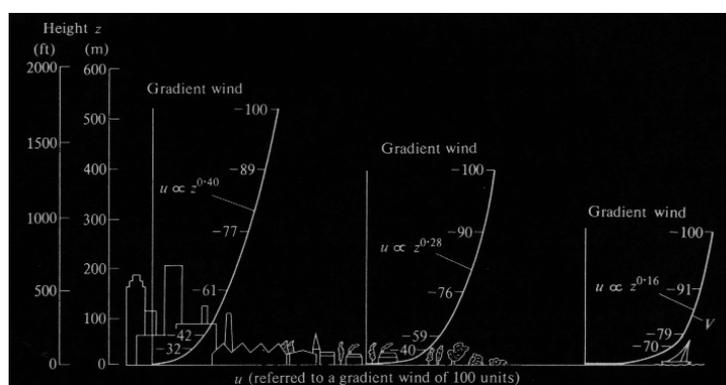


Figura 1 - Perfis de velocidade média sobre terrenos com diferentes rugosidades (PARKER 1977, apud WITWER, 2003)

As condições de estabilidade da atmosfera estão intimamente ligadas ao gradiente térmico vertical do ar seco que sobe adiabaticamente. Este gradiente é de aproximadamente $1^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$.

Se o gradiente vertical da temperatura ambiente coincide com o gradiente adiabático, se diz que a atmosfera está em equilíbrio neutro. Nestas condições, as flutuações de velocidade, ou seja, a turbulência é de origem mecânica, existindo assim, um equilíbrio dinâmico entre a rugosidade do terreno e as características do vento (médias temporais e flutuantes). A atmosfera se encontra em equilíbrio neutro, se o vento pode ser definido como forte, e tiver sua origem em ciclones tropicais e extratropicais. Os ciclones extratropicais de grandes dimensões, em seu estágio maduro, geram tormentas (ventos fortes) de grande extensão e duração, conhecidas como “sistemas de pressão plenamente desenvolvidos”, ou simplesmente tormentas - EPS (*extended mature pressure systems*, ou *extratropical pressure systems*). Estas tormentas apresentam o melhor equilíbrio dinâmico com a rugosidade do terreno. Finalmente, é útil estabelecer quando um vento pode ser considerado como forte. Counihan (1975), a partir de sua revisão de dados adquiridos por diferentes pesquisadores no período de 1880 a 1972; sugere que velocidades médias, medidas a 10 m de altura, maiores que 5 a 7 m/s são suficientes para produzir condições adiabáticas ou quase adiabáticas. Segundo Harris et al. (1980), um vento é considerado forte se a velocidade média horária, medida a 10 m de altura, excede os 10 m/s. Entretanto, segundo Jeary (1995) este limite deveria ser de 20 m/s, já que existem evidências de que a intensidade de turbulência adota valores relativamente constantes, para velocidades médias superiores à indicada anteriormente.

Quando o gradiente vertical da temperatura ambiente é maior que o adiabático, diz-se que a atmosfera está em equilíbrio instável, formando-se correntes de convecção com intercâmbio de massas de ar, de diferentes alturas. Nestas condições, a turbulência de origem mecânica gerada pela rugosidade do terreno, se agrega a de origem térmica. As tormentas elétricas (*thunderstorms*), de relativamente curta duração (5 a 30 minutos), conhecidas também como trovoadas ou tormentas TS, se produzem em atmosferas em condições de equilíbrio instável. Estas tormentas, segundo Riera (BLESSMANN, 1990), podem causar ventos com velocidades de pico superiores às tormentas de origem ciclônica.

Se o gradiente vertical da temperatura for menor que o adiabático, ou então, quando a temperatura ambiente cresce com a altura (inversão térmica), se diz que a atmosfera se encontra em equilíbrio estável. Nestas condições, há uma tendência à supressão de intercâmbio de massas de ar, localizadas em diferentes alturas. Assim, a turbulência do vento

tende a adotar valores muito baixos. Em geral para ventos fracos, conforme os limites estabelecidos anteriormente, a atmosfera se encontra em estado de equilíbrio não neutro. Então, a turbulência pode ser incrementada pela ação convectiva, ou então, pode ser bloqueada pela inversão térmica.

A transferência de quantidade de movimento na camada limite atmosférica é dada, fundamentalmente pelas tensões aparentes de Reynolds ou tensões turbulentas. O comportamento desta tensão define duas zonas na camada limite: a camada superficial (*inner layer* ou *atmospheric surface layer*) e a camada de Ekman (*outer layer*). Na camada superficial, que se estende até 150m de altura, aproximadamente, as tensões de Reynolds são aproximadamente constantes, e, por conseguinte, também são constantes as taxas de transferência de quantidade de movimento, massa e calor.

2.2 Túneis de vento

Existem basicamente dois tipos de túneis de vento, de circuito fechado e aberto, e dois tipos de configurações de câmara de ensaio, aberta e fechada (BARLOW et al., 1999).

Nas Fig. 2 e 3 são apresentados túneis de vento de camada limite, com câmaras de ensaio fechadas, de retorno fechado e aberto, respectivamente.

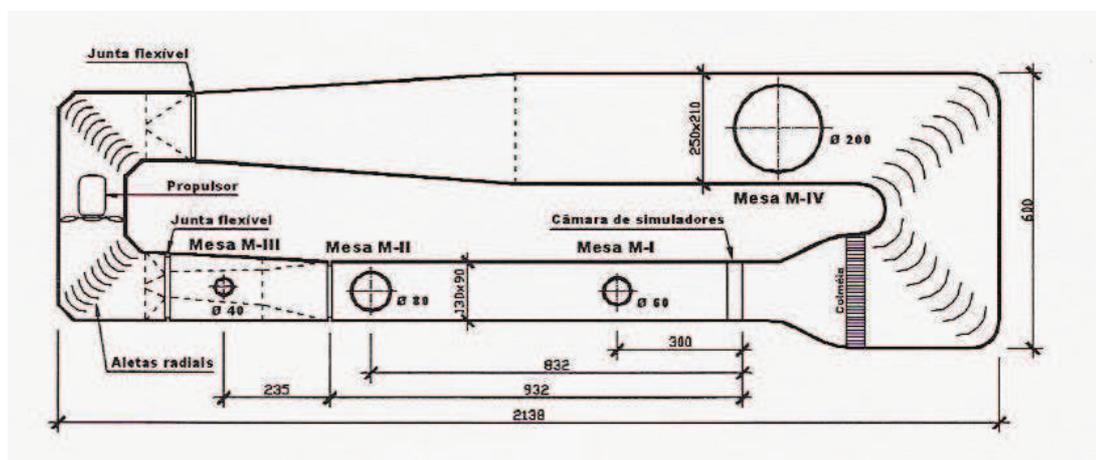


Figura 2 – Túnel de vento de camada limite de retorno fechado da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre (BLESSMANN 1982, apud LOREDO-SOUZA et al. 2004)

Os primeiros túneis de vento foram construídos no fim do século passado (BLESSMANN, 1990). O primeiro parece ser o de Francis Herbert Wenham, construído para a *Aeronautical Society of Great Britain*, em 1871. Tanto no fim do século XIX, como no início do século XX, os túneis eram empregados principalmente para o estudo de modelos de

construções e de sólidos simples. Porém, com a aparição da aviação, o desenvolvimento dos túneis se adequou às necessidades do novo meio de transporte. A engenharia aeronáutica está interessada no estudo de aviões que se deslocam preferentemente por cima da camada limite, numa atmosfera calma, sem turbulência. Para abordar esses estudos foram desenvolvidos os chamados túneis aerodinâmicos ou aeronáuticos, com uma relação comprimento/altura da câmara de ensaio em torno de um a dois, onde o escoamento de ar (vento) é o mais uniforme e isento de turbulência quanto possível.

No início da década dos 60, Jensen e Frank (apud BLESSMANN, 1990) mostraram que se pode obter uma escala apropriada da estrutura do vento natural, cobrindo-se um comprimento considerável do piso do túnel de vento com um material de rugosidade adequada. Essa rugosidade é a principal fonte de turbulência na atmosfera a baixa altitude, em ventos em condições de estabilidade neutra. Baseado nestes estudos, Davenport construiu o seu túnel de vento de camada limite (*boundary layer wind tunnel*) em 1965, na *University of Western Ontário*, Canadá, enquanto que já em 1963, Cermak finalizou a construção de um túnel de vento meteorológico (*meteorological wind tunnel*), na *Colorado State University*, EUA, capaz de simular camadas limites termicamente estratificadas. Os modernos túneis de vento de camada limite, conhecidos na literatura inglesa como *boundary layer wind tunnel* ou *environmental wind tunnel* ou *meteorological wind tunnel*, possuem uma relação comprimento/altura da câmara de ensaio a partir de oito, dada a necessidade de dispor de uma câmara de ensaio com comprimento suficiente para cobri-lo com rugosidade.

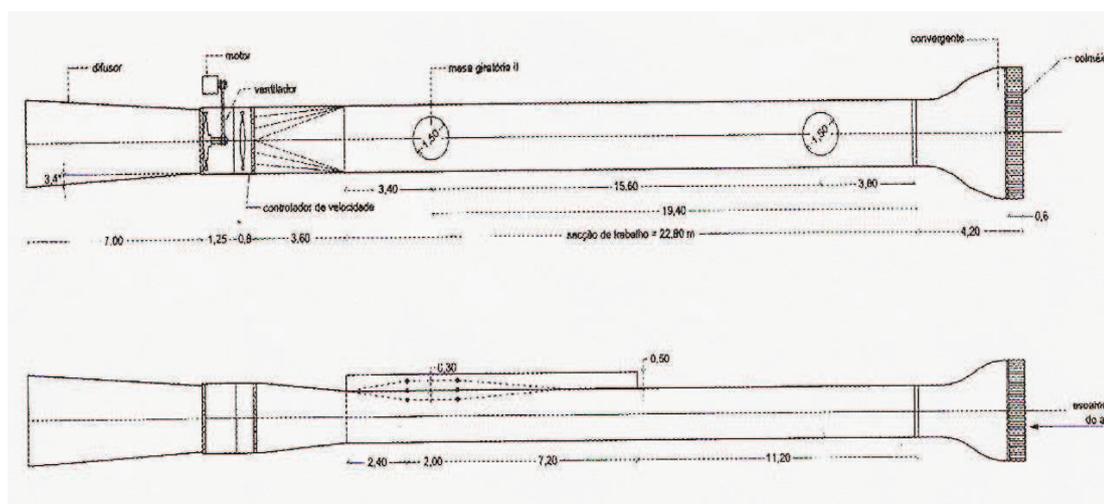


Figura 3 – Túnel de vento de camada limite da Universidade Nacional do Nordeste, Resistência, Argentina (WITTER, MÖLLER 2000, apud LOREDO-SOUZA et al. 2004)

2.3 Túneis de vento de retorno fechado

Na Fig. 2 é apresentado o circuito aerodinâmico do Túnel de Vento de Camada Limite, Joaquim Blessmann, do Laboratório de Aerodinâmica das Construções (LAC) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). Começando pela câmara de ensaio e deslocando-se a sotavento, o circuito deste túnel de retorno fechado inclui as seguintes partes:

- Câmara de ensaio de seção transversal retangular e uma relação altura/comprimento de 10,40. A câmara de ensaio é levemente divergente no sentido do escoamento, para manter a pressão na câmara de testes constante. No início da câmara a seção transversal é 1,20m x 0,90m (largura x altura) e no final 1,30m x 0,90m;
- Junta para estabelecer a pressão atmosférica na câmara de testes;
- Primeiro difusor com transição de seção retangular a hexagonal. O maior ângulo entre paredes opostas é 10^0 ;
- Primeira junta de lona para evitar a transmissão de vibrações geradas pelo conjunto propulsor;
- Transição de seção hexagonal a circular, para ajustar o ventilador;
- Primeiro canto, com aletas diretoras ou direcionadores do escoamento;
- Sistema propulsor, que proporciona uma velocidade na câmara de ensaio de 40m/s, aproximadamente, para a condição de túnel em vazio. O sistema propulsor é composto por um ventilador axial de 6 pás, com diâmetro de 1,50m, montado diretamente no eixo do motor elétrico de 125 Hp, com suporte direcionador do escoamento (*straightener*);
- Segundo canto, com aletas ou pás direcionadoras;
- Transição de seção circular para retangular;
- Segunda junta de lona;
- Retorno composto pelo segundo difusor, trecho de seção constante, terceiro e quarto canto com pás diretoras;
- Câmara de acondicionamento do escoamento (*settling chamber*): composta unicamente pela colméia, com células de 0,075m de diâmetro (circulares) e 0,45m de comprimento, e uma tela “Otis” com abertura quadrada de 0,025m (malha 100);
- Convergente com uma relação de contração igual a 1: 4,9.

Observar na Fig. 2 que as mesas de ensaio desse túnel se encontram localizadas: duas na câmara de ensaio (M I e M II), uma no primeiro difusor (M III) e outra no retorno (M IV)

As telas protetoras, cuja função, entre outras, é evitar que pedaços de um modelo acertem o sistema propulsor, no caso deste túnel estão localizadas no início do primeiro e terceiro canto.

A velocidade do vento, neste túnel, é controlada com um regulador mecânico de vazão, de pás radiais, localizadas na seção do ventilador, e está sendo acrescido o controle eletrônico através de um inversor de frequência variável.

Os túneis de retorno fechado, também chamados de túneis tipo Prandtl ou Göttingen, apresentam as seguintes vantagens e desvantagens (BARLOW et al., 1999; LOREDO-SOUZA et al., 2005):

Vantagens:

- Por meio do uso de direcionadores de escoamento, nas mudanças de direção do eixo do túnel, e telas a qualidade do escoamento pode ser mais bem controlada. Mais ainda, o escoamento torna-se independente do clima e de outras atividades que possam ser realizadas no ambiente que guarda o túnel;
- Menos energia é requerida para uma dada dimensão da câmara de ensaio e velocidade;
- Menos barulhento;
- A câmara de ensaio encontra-se perto da pressão atmosférica, ainda no caso de túnel com câmara de ensaio fechada.

Desvantagens:

- O custo de construção do túnel é mais elevado;
- Requer maior área para a sua localização;
- O túnel se contamina com fumaça e/ou corantes, gases traçadores, etc.;
- A temperatura dentro do túnel não permanece constante (cresce gradativamente).

2.4 Túneis de vento de retorno aberto

Na Fig. 3 é apresentado o circuito aerodinâmico do Túnel de Vento de Camada Limite, Jacek Piotr Gorecki, do Laboratório de Aerodinâmica de las Construcciones (LAC) da Universidad Nacional del Nordeste (UNNE), Chaco, Argentina. Acompanhando o percurso do ar, desde sua entrada até sua saída do túnel, o circuito deste túnel de retorno aberto inclui as seguintes partes:

- Lábios ou bocal de ingresso ou boca de sino, para orientar o escoamento;

- Câmara de acondicionamento do escoamento(*settling chamber*): composta por uma tela tipo “mosquiteiro”, cuja função é filtrar o ar, uma colméia com células de 0,10m x 0,10m x 0,60m de profundidade, e uma tela “Otis” com abertura quadrada de 0,0025m. Ambas as telas se apóiam na colméia;
- Convergente com uma relação de contração igual a 4: 1;
- Câmara de ensaio de seção transversal retangular (largura x altura: 2,40m x 1,80m) e uma relação altura/comprimento igual a 12,66. A câmara possui duas mesas de ensaio e um forro móvel para compensar o gradiente de pressão longitudinal;
- Tela protetora (tela “Otis” com abertura quadrada de 0,025m);
- Transição de seção retangular a circular;
- Primeira junta flexível para evitar a transmissão de vibrações geradas pelo conjunto propulsor;
- Regulador mecânico de vazão, de aletas radiais;
- Sistema propulsor, que proporciona uma velocidade na câmara de ensaio de 20m/s, aproximadamente, para a condição túnel em vazio. O sistema propulsor é composto por um ventilador axial (tipo Aerofólio, diâmetro: 2,25m, velocidade de rotação: 720rpm, salto de pressão estática: 40mm de coluna de água) e motor elétrico externo de 125 HP;
- Segunda junta flexível;
- Difusor, com uma relação de área aproximadamente igual a 2 e ângulo total de 6,8°;

As vantagens e desvantagens dos túneis de vento de retorno aberto em relação aos de retorno fechado (BARLOW et al., 1999; LOREDO-SOUZA et al., 2005) são relacionadas abaixo:

Vantagens:

- Custo da construção tipicamente muito menor;
- Menores exigências de espaço para localizar o túnel;
- O túnel não se contamina com fumaça e corantes, gases traçadores, etc., se ao menos a saída do túnel é externa (em contacto com a atmosfera).
- A temperatura dentro do túnel permanece praticamente constante.

Desvantagens:

- Dependendo da relação entre o tamanho do túnel e do ambiente onde está localizado, pode ser necessário o uso de várias telas no ingresso do túnel para obter uma boa qualidade de escoamento na câmara de ensaio. O mesmo é válido quando o ingresso

ou a saída do túnel é externa, onde o vento e o tempo frio podem afetar as condições de operação do túnel;

- Para um dado tamanho e velocidade do túnel, o de circuito aberto consome maior quantidade de energia;
- Em geral, os túneis de circuito aberto tendem a ser barulhentos;
- A seção de trabalho está normalmente acima (túnel tipo soprador, ou seja, com o propulsor no início do túnel) ou abaixo da pressão atmosférica (túnel tipo succionador, ou seja, como ventilador na saída do túnel), o que requer vedações elaboradas em todas as portas e mesas de ensaio para evitar vazamentos.

Segundo Barlow et al. (1999), devido ao seu baixo custo inicial, um túnel de retorno aberto é freqüentemente ideal para escolas e universidades, onde o túnel será empregado preferencialmente para ensino e pesquisa, sem uma elevada taxa de ocupação.

2.5 Simulação da camada limite atmosférica (CLA)

As técnicas de simulação da camada limite atmosférica (CLA), com atmosfera em equilíbrio neutro, podem ser classificadas em: métodos passivos e ativos, ou então, de crescimento natural ou acelerado. Por sua vez, a CLA simulada pode ser de espessura total ou parcial.

As descobertas, nos anos 60, de Jensen e Frank (apud BLESSMANN, 1990) dão origem à técnica de simulação de crescimento natural da CLA que consiste em cobrir o piso do túnel de vento com um material de rugosidade adequada. A camada limite (CL) que cresce sobre tal superfície, com gradiente longitudinal de pressões nulo, é semelhante à CLA. Entretanto, o crescimento é relativamente lento, dependendo da rugosidade.

Mesmo em túneis longos, como o da Figura 3, os maiores fatores de escala obtidos naturalmente são da ordem de 1/500. Assim, foi necessário introduzir algum dispositivo que acelere o crescimento da CL para atingir escalas maiores (COOK, 1990), mas sem afetar significativamente suas características. Nasceram assim, as técnicas de simulação da CLA de crescimento acelerado, conhecidas na literatura como métodos de rugosidade, barreira e dispositivo de mistura (*rugosity, barrier and mixing device*)(COOK, 1990). Dentre esses métodos destacam-se os de Counihan (1969) e Standen et al. (1969).

Os dispositivos de simulação empregados pelo método de Counihan (Fig. 4) são: um gerador de vorticidade (misturador) disposto verticalmente, uma barreira e a superfície altamente rugosa. O papel da rugosidade é o mesmo que no método de simulação da CLA de crescimento natural; ela representa a rugosidade da superfície terrestre no protótipo. A

rugosidade é o componente mais importante, pois define as propriedades médias e flutuantes do vento na CLA simulada. A barreira e o gerador de vorticidade são a parte “artificial” da simulação. A barreira fornece um déficit de quantidade de movimento ao nível do piso do túnel, o qual é misturado na altura total da CLA simulada pelo gerador de vorticidade. No caso ideal, o escoamento na seção de testes a sotavento da rugosidade deveria ter as características de uma CL desenvolvida naturalmente sobre um comprimento de rugosidade muito maior que o existente, e sem qualquer outra característica adicional imposta pela barreira e o dispositivo de mistura.

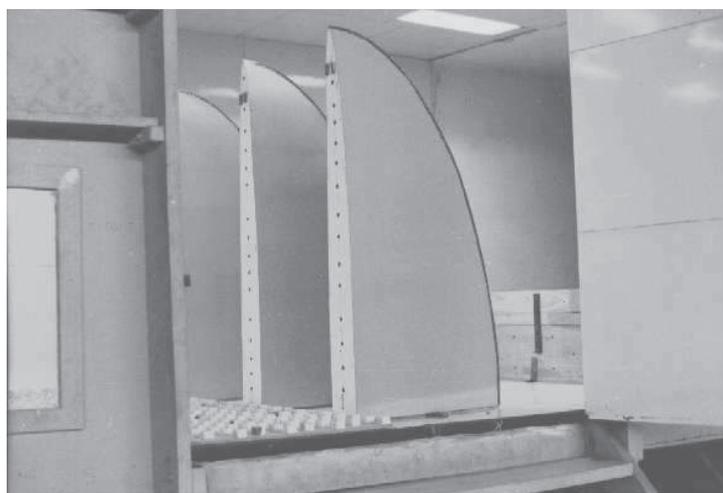


Figura 4 – Equipamentos para simulação da CLA (LOREDO-SOUZA et al. 2004)

As técnicas de simulação da CLA de crescimento acelerado podem ser empregadas para simular a espessura total da CLA, simulação de espessura total, ou para simular a camada superficial, simulação de espessura parcial. As escalas atingidas nas simulações de espessura total são da ordem de 1/500, razão pela qual são empregadas em estudos de edifícios muito altos, estudos topográficos, dispersão sobre longas distâncias, etc. Entretanto, as escalas atingidas nas simulações da CLA de espessura parcial, da ordem de 1/200 a 1/300, permitem o estudo de edificações baixas, por exemplo.

Os processos citados acima, método de simulação da CLA passivo, tem em comum o fato de empregar corpos sólidos para a reprodução das características do vento natural. Todos eles, em menor ou maior medida, causam uma diminuição da velocidade média obtida no túnel. As técnicas conhecidas como métodos de simulação da CLA ativos, que parece ter sido iniciadas em 1971, procuram reproduzir a estrutura do vento natural por meios puramente

aerodinâmicos. Mais precisamente, com jatos de ar lançados perpendicularmente ao vento gerado no túnel, a partir de seu piso.

2.6 Projeto de túneis de vento

Barlow et al. (1999) afirmam que o primeiro passo no projeto de um túnel de vento é determinar o tamanho e a forma da câmara de ensaios, em função do uso a ser dado ao túnel. A área da seção transversal da câmara de ensaio basicamente determina o tamanho total do túnel. As decisões básicas a serem adotadas pelo projetista de um túnel de vento de baixa velocidade são:

- Número de Reynolds (Re) mínimo a ser atingido no túnel;
- Tamanho e forma da câmara de ensaio;
- Tipo de retorno: fechado ou aberto
- Tipo de câmara de ensaio aberta ou fechada

Segundo Christohe (1987) (apud GORECKI, 1998) os principais requerimentos de projeto de um túnel de vento são:

- Similaridade física;
- Qualidade do escoamento;
- Instrumentação;
- Desempenho e eficiência energética;
- Efetividade operacional.

Cermak (1981) e Plate e Cermak (apud BARLOW et al., 1999) indicam cinco requisitos para testes em túneis de vento de camada limite:

- 1 - Reprodução numa escala geométrica adequada o relevo e as edificações;
- 2 - Atingir o número de Reynolds do protótipo;
- 3 - Simular adequadamente as propriedades cinemáticas do vento (médias e flutuantes) na camada limite atmosférica;
- 4 - Atingir dentro da câmara de ensaio um gradiente de pressão nulo, como acontece no mundo real;
- 5 - Atingir o Número de Rossby do protótipo.

Essas condições permitem deduzir algumas exigências de projeto de um túnel de vento de camada limite atmosférica, em equilíbrio neutro, a saber segundo mensagem pessoal (PALUCH, 2006):

- Normalmente, são dois os números de Reynolds (Re) relevantes no ensaio de uma edificação em túnel de vento de camada limite atmosférica (CLA): o Reynolds associado ao escoamento e o associado ao modelo ensaiado. As escalas geométricas são, em geral, maiores do que $1/200$, as velocidades em modelo e protótipo são da mesma ordem, e a viscosidade coincidente. Surge assim, a impossibilidade de reproduzir os elevados Re do mundo real em túneis de baixa velocidade. Contudo, podem-se obter escoamentos semelhantes sem atingir o Re do protótipo, já que as características do escoamento, na CLA simulada ou no escoamento em torno de sólidos angulosos, tornam-se independentes do Re , a partir de um valor mínimo do mesmo. Para assegurar que a CLA simulada sobre uma superfície rugosa seja totalmente turbulenta, e, por conseguinte, independente do Re , deve-se verificar que as velocidades da corrente livre no túnel de vento sejam maiores do que 1m/s . Em sólidos angulosos, para Re maiores que 3000 , o escoamento independe do Re . Entretanto, em sólidos com superfícies arredondadas a separação da sua CL, e, por conseguinte, as características do escoamento em torno do modelo, dependem principalmente do Re , da turbulência do escoamento e da rugosidade superficial do modelo. Para contornar esse problema, a rugosidade da superfície do modelo é amplificada para que a separação do escoamento aconteça em pontos homólogos, e assim, a forma do escoamento em torno do modelo é a mesma que aparece em torno da edificação real. Entretanto, o uso dessa técnica só é possível, se o túnel de vento for projetado para que sejam atingidos Re , associados ao modelo curvo, da ordem de 2×10^5 , ou mais. O anterior condiciona tanto o tamanho da seção transversal da câmara de ensaio como as velocidades a serem atingidas na mesma.
- O número de Rossby considera o efeito de rotação da terra sobre os ventos. A rotação produz uma mudança na direção do vento da ordem de 5° sobre uma altura de 180 m . Reproduzir em túneis de vento essa mudança de direção altera em forma pouco significativa os resultados dos ensaios. Por conseguinte, o número de Rossby do mundo real não é normalmente reproduzido.
- As modernas técnicas de simulação do vento natural, com camada limite atmosférica em equilíbrio neutro, conhecidas como “método de rugosidade, barreira e dispositivo de mistura” (vide item 2.5), exigem uma câmara de ensaio com relação comprimento/altura da ordem de 10 ;

- O gradiente longitudinal de pressão, normalmente encontrado num túnel de vento, e incrementado pela necessidade de simular a CLA, ou seja, uma camada limite muito espessa, pode ser compensado usando um “forro móvel” que se desloque verticalmente, proporcionando um incremento da seção transversal do túnel. Uma outra alternativa é fazer as paredes laterais da câmara de ensaio do túnel levemente divergentes.
- No *50th Euromech Colloquium* (HUNT et al., 1975), Plate e Cermak tentaram definir qual seria o melhor *design* de um túnel de vento para simular a camada limite atmosférica (CLA). Esse túnel, segundo Plate, deve possuir uma câmara de ensaio de aproximadamente 10m de comprimento, uma seção transversal de 2,00m x 1,50m (largura x altura), um forro móvel para ajustar o perfil longitudinal de pressão, e sua máxima velocidade de cerca de 10m/s. Mais ainda, uma sobre-pressão na câmara de ensaio seria desejável, mas um retorno fechado não é necessário porque níveis muito baixos de turbulência não são particularmente importantes na engenharia do vento. Segundo Cermak, o túnel ideal deveria possuir uma câmara de ensaio de 20m de comprimento e uma largura de ao menos 3m, para evitar efeitos de interferência das paredes laterais com o escoamento separado em torno do modelo de edificação. Finalmente, a velocidade do túnel deverá ser maior do que 10m/s para permitir a medição de pressões flutuantes.

Em 1981, Cermak afirma que um túnel de vento, capaz de reproduzir a CLA em equilíbrio neutro, deve possuir as seguintes características:

- Câmara de ensaio com as seguintes características: comprimento de 12 a 20m, largura de 2 a 4m, altura de 2 a 4m;
- O gradiente longitudinal de pressões deve ser possível de ser controlado;
- Características do escoamento: velocidade média do ar de 2 a 30m/s com uma variação espacial e temporal no início da câmara menor do que 1% e uma intensidade de turbulência também menor do que 1%;
- O túnel pode ser de circuito aberto ou fechado, usando ar à pressão atmosférica como fluido;

No *International Symposium: Experimental Determination of Wind Loads on Civil Engineering Structures, New Delhi*, Cermak (1990) afirma que túneis de vento de baixa velocidade podem reproduzir satisfatoriamente as características da camada limite atmosférica para estudos da ação do vento em edificações e estruturas. Segundo o autor, a câmara de

ensaio do túnel deve ser suficientemente comprida para reproduzir camadas limites turbulentas plenamente desenvolvidas, de 1,0m de altura, aproximadamente, para um amplo âmbito de rugosidades superficiais. Para atingir esses requerimentos, a câmara de ensaio deve possuir um comprimento de 15m ou mais, uma altura de 2 a 3m e uma largura de 2 a 5m.

2.7 Considerações energéticas

Para manter as condições desejadas no escoamento, tais como a velocidade U_c na seção de ensaio do túnel, de área A_c , precisa-se manter em todo o circuito do túnel a vazão de volumétrica Q , igual a:

$$Q = U_c A_c \quad (2.1)$$

com U_c em (m/s), A_c em (m²) e Q em (m³/s).

O bombeamento dessa vazão Q implica em vencer as perdas de carga ou de energia mecânica, isto é, a dissipação de energia mecânica e transformação em calor, nos diversos trechos do circuito do túnel. A soma das perdas de energia ao longo do túnel, que podem ser interpretadas como quedas de pressão estática Δp_i nos diferentes trechos i do túnel, ou então, como quedas na linha piezométrica, deve ser igual ao ganho de pressão fornecido pelo ventilador do túnel, Δp_v , ou seja,

$$\Delta p_v = \sum_{i=1}^n \Delta p_i \quad (2.2)$$

com Δp_i e Δp_v em (Pa) ou em (mmca).

As perdas de carga ao longo do circuito do túnel costumam ser calculadas, assim como em hidráulica, utilizando a aproximação do escoamento unidimensional. Essas perdas são o resultado:

- do atrito superficial nas paredes: são as chamadas perdas distribuídas, principalmente nos trechos retos, ou nas variações suaves de seção, ao longo da tubulação do túnel;
- dos deslocamentos ou efeitos do arrasto de pressão: são as chamadas perdas concentradas ou localizadas, que ocorrem nas mudanças bruscas de seção ou direção da corrente, e também nos difusores, na telas de turbulência e nas esquinas;
- de perdas de quantidade de movimento, como por exemplo, num jato livre numa câmara de ensaio aberta, ou na descarga livre para atmosfera num túnel de retorno aberto.

A perda de carga em forma adimensional k_i , num trecho i do túnel, é definida como a relação entre a queda de pressão estática Δp_i e a pressão dinâmica no ingresso do trecho q_i :

$$k_i = \frac{\Delta p_i}{\frac{1}{2} \rho_i U_i^2} = \frac{\Delta p_i}{q_i} \quad (2.3)$$

onde:

ρ_i : massa específica do ar no trecho i do túnel, em (kg/m³);

U_i : velocidade do ar no mesmo trecho i , em (m/s);

Δp_i e q_i em (Pa) ou em (mmca).

O k_i , conhecido também como coeficiente de perda de carga na seção ou trecho i do túnel, pode ser entendido como a relação entre a perda de energia nesse trecho e a energia cinética que ingressa no mesmo trecho do túnel.

As perdas distribuídas costumam ser apresentadas em termos do coeficiente f de atrito de Darcy – Weisbach, definido por

$$\Delta p_i = f \frac{l_i}{D_i} \frac{1}{2} \rho_i U_i^2 \quad (2.4)$$

onde:

l_i : comprimento do trecho i do túnel, em (m);

D_i : diâmetro hidráulico do trecho i do túnel, em (m).

A potência aerodinâmica P_A a ser fornecida pelo ventilador para manter o salto de pressão Δp_v é:

$$P_A = \Delta p_v Q = \eta_v P_m = \sum_{i=1}^n \Delta p_i Q = K \frac{1}{2} \rho_c U_c^3 A_c \quad (2.5)$$

onde:

η_v : rendimento do ventilador, adimensional;

P_m : potência do motor de acionamento, em (W);

ρ_c : massa específica do ar na seção de ensaio do túnel, em (kg/m³);

K : coeficiente de perda de carga do conjunto do circuito, referido às condições na seção de ensaio, ou seja,

$$K = \frac{\sum_{i=1}^n \Delta p_i}{\frac{1}{2} \rho_c U_c^2} = \frac{\sum_{i=1}^n \Delta p_i}{q_c} \quad (2.6)$$

onde q_c é a pressão dinâmica na seção de ensaio em (Pa) ou em (mmca).

O coeficiente de perda geral K pode ser calculado a partir dos coeficientes de perda locais k_i , referidos à pressão dinâmica local q_i :

$$K = \frac{\sum_{i=1}^n k_i q_i}{q_c} \quad (2.7)$$

Finalmente, a energia relativa E_R de um túnel de vento é uma medida da sua eficiência energética. Esse coeficiente compara a potência (“vazão de energia cinética”), P_c , disponível na seção de ensaio,

$$P_c = \frac{1}{2} \rho_c U_c^2 Q = \frac{1}{2} \rho_c U_c^3 A_c \quad (2.8)$$

com a “vazão de perdas”, ou então, com a potência aerodinâmica P_A , fornecida pelo ventilador, para vencer essas perdas de energia,

$$E_R = \frac{P_c}{P_A} = \frac{1/2 \rho_c U_c^2 Q}{\Delta p_v Q} = \frac{1/2 \rho_c U_c^2 Q}{\sum_{i=1}^n \Delta p_i Q} = \frac{1}{K} \quad (2.9)$$

A energia relativa é maior do que 1, tipicamente entre 3 e 7. No caso de túneis de vento do tipo jato livre o coeficiente E_R é menor do que um. Segundo Gorecky (1998) a energia relativa é definida pela configuração geométrica do túnel, principalmente pela razão de contração do convergente, pelo número de Reynolds a ser atingido no túnel, e pela qualidade aerodinâmica dos elementos que contribuem para o fator de perda de carga geral K do túnel.

2.8 Regras gerais de projeto

Nas seguintes seções serão apresentadas as regras de projeto dos diferentes trechos que normalmente compõem um túnel de vento de camada limite de retorno aberto, assim como, os coeficientes de perda de carga associados a essas seções do túnel.

2.8.1 Lábios de ingresso ou bocal (Bell mount)

Os lábios de ingresso colaboram na obtenção de um escoamento uniforme (uniformidade espacial e temporal), assim como, na redução das perdas de carga do escoamento no ingresso do túnel. A função desses lábios é orientar o ingresso do escoamento

ao túnel, evitando a formação de redemoinhos ou vórtices estacionários (pseudo-lábios), onde se produz dissipação de energia e turbulência adicional.

No caso do túnel da Fig. 3 os lábios foram projetados com seção transversal em forma de elipse, com o semi-eixo maior horizontal, de 30cm, e o semi-eixo menor de 10cm (Fig. 5). Segundo Guirguis (1996), o lábio de ingresso, constituído por dois arcos de circunferências, deve ter um raio interno igual a $1/3$ e o raio externo igual a $1/4$ do diâmetro hidráulico do túnel como indicado na Fig. 6.

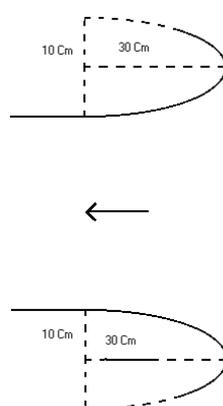


Figura 5 – Lábio feito a partir de uma elipse (PALUCH 2006(mensagem pessoal))

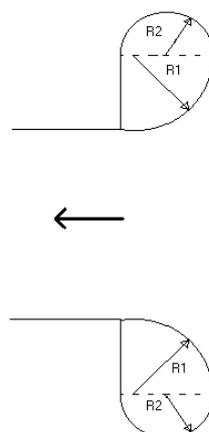


Figura 6 – Lábio feito a partir de duas circunferências (GUIRGUIS 1996)

2.8.2 Câmara de estabilização do escoamento (*settling chamber*)

A câmara de estabilização do escoamento normalmente é composta por uma colméia seguida de telas de uniformização. O número e o coeficiente de perda de carga total k_t das telas dependem dos níveis máximos de turbulência admitidos no início da câmara de ensaio.

2.8.3 Colméia

A função da colméia é forçar a que todo o escoamento possua uma mesma direção (escoamento paralelo). Por conseguinte, a colméia é eficiente em remover a componente lateral da velocidade, tanto o valor médio como o valor flutuante (componente lateral da turbulência).

Em geral as células da colméia têm diâmetro (d) da ordem de 0,7 a 1,5% do diâmetro (D) da seção em que a colméia está instalada, e relação comprimento/diâmetro das células $l/d = 6$ a 8. Com número de Reynolds relativamente reduzido o escoamento dentro das células não chega a ficar plenamente desenvolvido e permanece na faixa laminar ou de transição. Segundo Lumley (1964, apud GORECKY, 1998) ou ainda Lumley e McMahon (1967, apud GORECKY, 1998) obtém-se os melhores resultados com colméias de células suficientemente longas, $l/d=15$, e de seção suficientemente pequena para permitir que o escoamento nos tubos correspondentes fique plenamente desenvolvido. O número de Reynolds, baseado no comprimento dos tubos, deve ser maior do que 10^5 .

Dependendo do número de Reynolds, os valores mínimos do coeficiente de perda de carga k_c das colméias (Fig. 7), de tubos curtos, são de cerca de 0,20 para tubos hexagonais, 0,22 para os quadrados e 0,30 para os circulares; e no caso de tubos longos de 0,5 a 0,6.

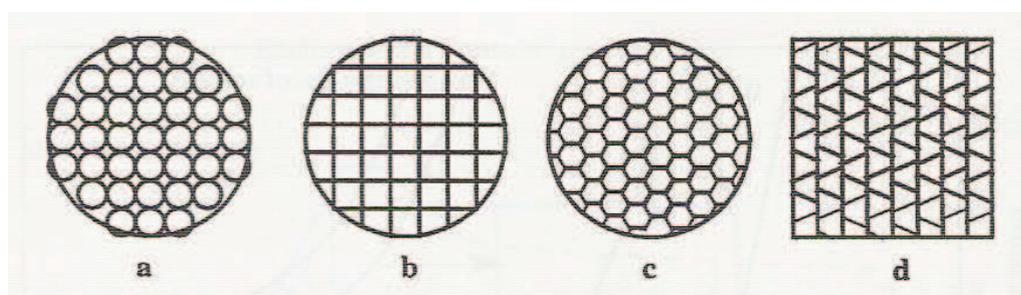


Figura 7 – Geometria das células em colméias (BARLOW et al. 1999)

2.8.4 Telas de uniformização(*screens*)

A tela uniformizadora (Fig. 8), como indica seu nome, produz um campo de velocidades mais uniforme. Uma tela com um coeficiente de perda $k_t = 2,0$ a $2,5$ cancela praticamente todas as não uniformidades do perfil de velocidades médias longitudinais, reduz também para menos de $0,1$ o valor inicial da componente longitudinal da turbulência, e para $0,3$ o da componente transversal. Uma tela também refrata o escoamento incidente na direção da perpendicular à tela no ponto de incidência.

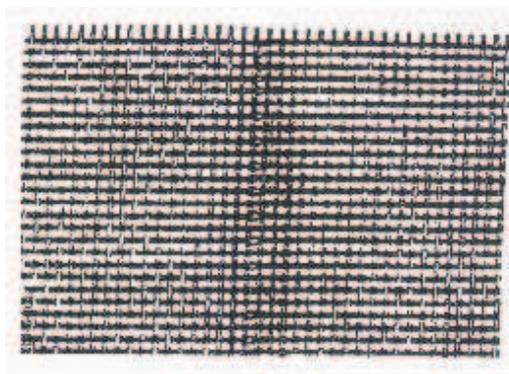


Figura 8 – Tela de uniformização, utilizada em túneis de vento (JAARSMA 1996)

Para um dado campo de diferenças de velocidades moderada, (PRANDTL 1933, apud BARLOW et al., 1999) o uso de uma tela com coeficiente de perda k_t reduz as diferenças em:

$$\frac{1}{1 + k_t} \quad (2.10)$$

Entretanto, o uso de n telas com coeficiente de perda de carga k_t , uma atrás da outra, conduz a uma queda de pressão dada por:

$$\Delta p_t = nk_t q_t \quad (2.11)$$

e as diferenças de velocidades são reduzidas a

$$\frac{1}{(1 + k_t)^n} \quad (2.12)$$

O anterior mostra claramente que o uso de n telas com coeficiente de perda k_t moderado é mais eficiente que o emprego de uma só tela com $k_t = n.k_t$.

Do ponto de vista geométrico uma tela caracteriza-se pela dimensão, ou passo, l da malha quadrada e pelo diâmetro d dos arames de seção circular. Pode-se então, definir a porosidade da tela β como a relação entre a área dos vazios e a superfície total, ou seja,

$$\beta = \frac{(l-d)^2}{l^2} = \left(1 - \frac{d}{l}\right)^2 \quad (2.13)$$

ou então, o seu complemento, a solidez σ , definida como a relação entre a superfície projetada dos arames e a superfície total da tela

$$\sigma = \frac{l^2 - (l-d)^2}{l^2} = 1 - \beta \quad (2.14)$$

Para as telas o número de Reynolds pode ser avaliado por:

$$\text{Re} = \frac{Ud}{\beta\nu} \quad (2.15)$$

onde U/β é a velocidade média do escoamento através da tela em (m/s); d o diâmetro dos arames em (m) e ν a viscosidade cinemática do ar em (m²/s); o coeficiente de perda de carga k_t resulta (WIEGHARDT,1952)

$$k_t = 6,5 \times (1 - \beta) \times \beta^{-2} \text{Re}^{-1/3} \quad \text{e } 60 < \text{Re} < 600 \quad (2.16)$$

O coeficiente de perda k_t decresce com o aumento da velocidade até $\text{Re} = 600$, a partir do qual, resulta independente do Reynolds, e passa a depender unicamente de β estabilizando-se em torno a (COLLAR 1939, apud METHA et al, 1979)

$$k_t = 0,9(1 - \beta) / \beta^2 \quad (2.17)$$

Numa distância de 20 a 30 malhas após a passagem pela tela a turbulência residual volta à isotropia. Esta será então a distância entre duas telas ou entre a colméia e uma tela. Segundo Metha et al. (1979) a distância ótima entre a última tela e o início do convergente é aproximadamente 0,2 vezes o diâmetro da seção da câmara de estabilização (*settling chamber*).

Para garantir a estabilidade do escoamento através de uma tela, mantendo bem separadas as esteiras de cada malha, a porosidade deve ser maior que 0,57 (BARLOW et al. 1999).

As telas de segurança, empregadas para proteger o ventilador, possuem uma elevada porosidade β . Segundo Marcinowski (apud GORECKY, 1998) as telas “Otis”, com malha 25mm e arame 2,0mm ($\beta = 0,8464$), na faixa 5-20m/s, possuem um $k_t = 0,30$.

As telas uniformizadoras não podem apresentar emendas nem costuras visíveis.

As telas uniformizadoras funcionam como verdadeiros filtros da corrente de ar, retendo partículas de pó, fiapos, insetos, etc. Por isso a sua instalação precisa prever a possibilidade de sua desmontagem ou de acesso para limpeza.

2.8.5 Convergente ou bocal convergente (*nozzle*)

As principais funções de um convergente são (METHA et al., 1979) (Fig. 9):

- a) Incrementar a velocidade média do escoamento até o valor correspondente à câmara de ensaio, permitindo que a colméia e as telas sejam localizadas num setor do túnel com baixa velocidade, reduzindo assim, as perdas de carga;
- b) Reduzir as variações de velocidade média e as componentes flutuantes da velocidade (turbulência).

O parâmetro mais importante que define os efeitos indicados anteriormente é a relação de contração c , definida como o quociente entre a área da seção transversal do túnel no ingresso do convergente e a área de saída. Os fatores de redução das variações de velocidade são:

- Para a componente longitudinal da velocidade média do vento (BATCHELOR 1970, apud METHA et al., 1979) $= 1/c$;
- Para as componentes transversais da velocidade média do vento (BATCHELOR 1970, apud METHA et al., 1979) $= \sqrt{c}$;
- Para o valor RMS da componente longitudinal flutuante da velocidade do vento (PRANDTL, apud BARLOW et al., 1999) $= 1/c$;
- Para o valor RMS da componente transversal flutuante da velocidade do vento (PRANDTL, apud BARLOW et al., 1999) $= 1/\sqrt{c}$.



Figura 9 – Convergente, colméia e lábios, vista externa de um túnel de vento (FAUTH 2006)

Uma análise dimensional indica que a pressão estática cai continuamente, e, por conseguinte, a velocidade aumenta, à medida que o ar se move, desde o ingresso, na direção da saída do convergente. O anteriormente exposto indica que em princípio não devem existir problemas de instabilidade (deslocamentos) da camada limite (CL) já que o gradiente de

pressões é favorável à sua formação ao longo de todo o convergente. Entretanto, uma análise potencial de um convergente axi-simétrico mostra que a velocidade do ar nas proximidades da parede, na entrada e na saída do convergente, é menor (e a pressão maior) que a indicada pela análise unidimensional. Se o gradiente adverso de pressões, no ingresso e/ou na saída, torna-se suficientemente severo se produz a separação da CL, e com isto, é favorecido um aumento da turbulência na câmara de ensaio, um incremento na potência requerida e um aumento no ruído gerado pelo túnel. Sempre é possível evitar a separação da CL num convergente aumentando seu comprimento, mas isso conduz a um aumento do tamanho do túnel, custos e espessura da CL na saída da contração.

Um projeto eficiente de um convergente é aquele que evita a separação da CL, com um comprimento aceitável da contração, e que na saída as não uniformidades não ultrapassam os limites toleráveis para uma dada aplicação. Em túneis de vento de CLA são aceitas, fora da CL natural do túnel, não uniformidades da ordem de $\pm 2\%$ para as velocidades médias e 1% para a intensidade de turbulência.

Adota-se, em geral, um comprimento do bocal de contração da ordem de 1,0 a 1,5 vezes o diâmetro da entrada. Segundo Gorecky (1998), túneis de baixa velocidade ($< 40\text{-}50\text{m/s}$) e de CLA não requerem relações de contração c muito elevadas: convergentes suaves com c entre 2,5 e 6 são usualmente adequados.

Para o caso de um convergente sem simetria axial há um problema adicional: a formação de correntes secundárias nas proximidades das quinas o que pode provocar a separação da CL (METHA et al, 1979). Por conseguinte, contrações retangulares devem ser mais compridas que as de simetria axial, da ordem de 30% (WOLF, 1994), para reduzir o gradiente de pressão adverso.

No caso de contrações bidimensionais, as vezes preferidas em túneis com câmara de ensaio baixas e largas, como os empregados para simular a CLA, também podem surgir fortes escoamentos secundários. Mais ainda, uma contração bidimensional requer aproximadamente 25% a mais no comprimento para atingir o mesmo grau de uniformidade do escoamento que num convergente com simetria axial.

Segundo Metha et al. (1979) as contrações podem ser projetadas a olho ou por aplicação de métodos teóricos, analíticos ou numéricos.

Os métodos numéricos consistem em: (a) estimar a geometria das paredes; (b) aplicar a teoria do escoamento potencial para detectar as zonas com gradiente adverso de pressões e o grau de uniformidade do escoamento na saída da contração; (c) testar a separação da CL empregando algum critério e reiniciar o processo se os resultados não foram satisfatórios.

Se o convergente for projetado a olho, devem ser considerados os seguintes aspectos (METHA et al. 1979):

- A forma da contração não é muito importante, exceto, nas proximidades da entrada e saída;
- A suavidade do contorno é o fator mais importante;
- O raio de curvatura na saída da contração deve ser menor que na entrada;
- A contração se deve unir ao resto do túnel segundo uma geometria tão suave que ao menos a primeira e segunda derivadas do contorno nas extremidades deve ser aproximadamente zero.

A seguir são apresentados alguns métodos para definir a geometria de uma contração, encontrados na bibliografia consultada:

- O contorno do convergente, $r_w(x)$, com simetria axial, proposto por Witoszinski (apud Byrkin et al., 1996) responde à seguinte equação (Fig. 10):

$$r_w(x) = \frac{r_{w2}}{\sqrt{\left\{ 1 + \left[\left(\frac{r_{w2}}{r_{w1}} \right)^2 - 1 \right] \frac{[1 - 3.(s)^2]^2}{[1 - (s)^2]^3} \right\}}} \quad (2.18)$$

$$\text{com } 0 \leq s \leq l/\sqrt{3}$$

onde:

$$s = \sqrt{3} \times l$$

x : abscissa medida sobre o eixo da contração a partir da entrada da contração, em (m);

l : comprimento do convergente, em (m);

r_{w1} : raio da contração na sua entrada, em (m);

r_{w2} : raio da contração na sua saída, em (m).

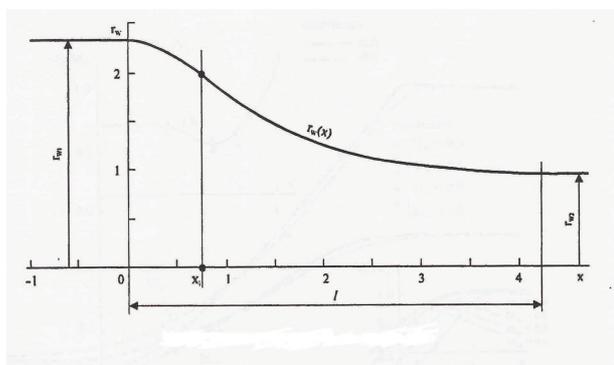


Figura 10 – Contorno de WITOSZINSKI, $r_w(x)$, $c=5,4$, onde r_{w1} é o raio de entrada, o r_{w2} é o raio de saída, l é o comprimento da parte curva (BYRKIN et al. 1996)

- Para contrações com simetria axial o contorno proposto por Boerger (apud WOLF, 1994) conduz ao convergente mais curto, para um dado grau de uniformidade do escoamento na saída, e sem perigo de separação da CL. A Fig.11 mostra uma comparação dos contornos propostos por Witoszynski e por Boerger para relações de contração c iguais a 5,5 e 16,29. Como pode ser observado na Fig. 11, o contorno de Boerger se parece a uma taça com uma leve expansão na saída da contração. A geometria de Boerger proporciona contrações cerca de 30% mais curtas que as de Witoszynski. Lamentavelmente, na bibliografia consultada não está disponível a formulação empregada por Boerger.

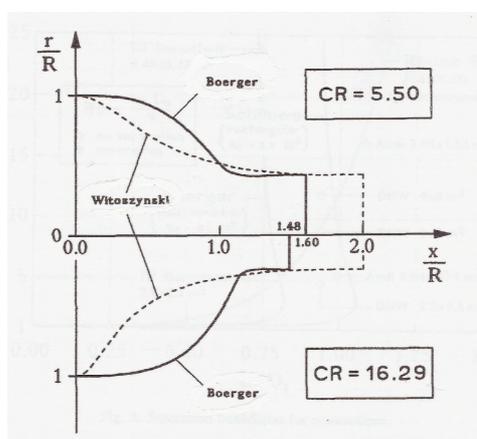


Figura 11- Contorno do convergente tipo Boerger e Witoszynski (WOLF 1995)

- Bell e Metha (1988) propõem como contorno de uma contração uma geometria que responde a um polinômio de quinto grau que satisfaz a condição de que a primeira e segunda derivadas do contorno são iguais a zero tanto na entrada como na saída do convergente (Fig. 12).

$$h(x) = (-10 \times \xi^3 + 15 \xi^4 - 6 \xi^5) \times (H_1 - H_0) + H_1 \quad (2.19)$$

onde:

$$\xi = x/l$$

$h(x)$: altura da contração na abscissa x , medida a partir do eixo do convergente, em (m);

x : abscissa medida sobre o eixo do convergente e a partir da sua entrada, em (m);

l : comprimento da contração, em(m);

H_1 : altura da contração na entrada, em(m).

H_0 : altura da contração na sua saída, em(m).

Como pode ser observado na Fig. 12 o polinômio de quinto grau, da Eq.(2.19), conduz a uma curva simétrica, com idêntico raio de curvatura tanto no ingresso como na saída da contração, o qual é considerado por Metha e Bradshaw (1979) uma característica indesejável.

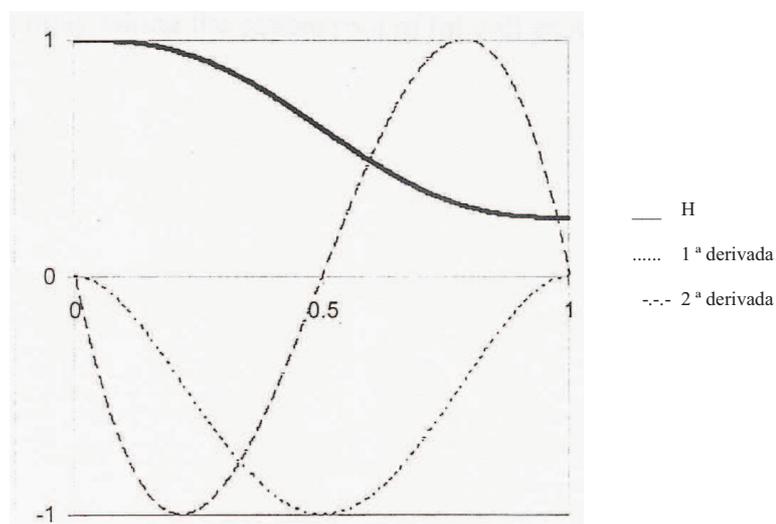


Figura 12 - Polinômio de quinta ordem, com a primeira e segunda derivada iguais a zero nas extremidades, (BRASSARD 2003)

- A sugestão de Ghilarducci et al. (1998) consiste em gerar a contração mediante dois arcos de elipses tangentes e reversos entre si. Usando a nomenclatura dos autores, os arcos são definidos pelo comprimento da contração L , as coordenadas (p, h) do ponto

de máxima inclinação, o valor da tangente no ponto de tangência T , e a relação de contração r . Na entrada, a altura do convergente é sempre igual a um.

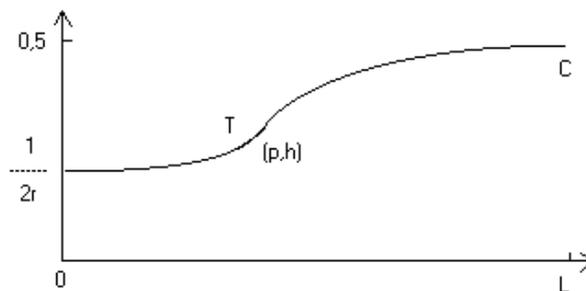


Figura 13 – Perfil do convergente formado por duas elipses tangentes, (GUILARDUCCI et al. 1998)

Em termos destes parâmetros, as equações dos arcos são:

$$Y_1 = a - c \times \sqrt{1 - \frac{x^2}{b^2}} \quad \text{para } 0 \leq x \leq p \quad (2.20)$$

$$Y_2 = d - e \times \sqrt{1 - \frac{(x-L)^2}{f^2}} \quad \text{para } p \leq x \leq L \quad (2.21)$$

onde:

$$a = \frac{1 - 4h^2r^2 + 4hpTr^2}{4r(1 - 2hr + pTr)} \quad (2.22)$$

$$b^2 = \frac{p(1 - 2hr + 2pTr)^2}{4rT(1 - 2hr + pTr)} \quad (2.23)$$

$$c = a - \frac{1}{2r} \quad (2.24)$$

$$d = \frac{4h^2 + 4Th(L-p) - 1}{4T(L-p) + 8h - 4} \quad (2.25)$$

$$e = \frac{1 - 2d}{2} \quad (2.26-a)$$

$$f^2 = \frac{e^2(L-p)}{T(h-d)} \quad (2.26-b)$$

Os autores sugerem para p , h e T :

$$p = \frac{L}{(r+1)} \quad (2.27)$$

$$h = \frac{1}{(r+1)} \quad (2.28)$$

$$T = \frac{2 \times (r-1)}{r \times L} \quad (2.28)$$

- Então, a forma da contração fica definida exclusivamente pelo seu comprimento, L , e relação de contração, r .
- Observar que todos os parâmetros definidos pelas equações anteriores são adimensionais, baseados nas relações da elipse.

No caso de tubos convergentes, como por exemplo uma contração, não haverá separação da CL se o tubo for com variação suave de seção. Então, a perda de carga resulta essencialmente pelo atrito entre o ar e as paredes do túnel. Como a seção varia, e com ela a pressão dinâmica, tanto Δp_c como o coeficiente k_c resultarão de uma ponderação ao longo do comprimento (vide Eq. 2.4)

$$\Delta p_c = \int_0^l f(x) \frac{dx}{D(x)} \frac{1}{2} \rho U^2(x) = k_c \frac{1}{2} \rho U_e^2 \quad (2.29)$$

sendo x é a distância medida desde a entrada do tubo, onde $U(x) = U_e$, e l é o seu comprimento.

Considerando um valor médio de f e que pela equação da continuidade

$$\left(\frac{U(x)}{U_e} \right)^2 = \left(\frac{D_e}{D(x)} \right)^4 \quad (2.29)$$

onde D_e é o diâmetro hidráulico na entrada do tubo, resulta:

$$\Delta p_c = f_{\text{médio}} D_e^4 \frac{1}{2} \rho U_e^2 \int_0^l \frac{dx}{D^5(x)} = k_c \frac{1}{2} \rho U_e^2 \quad (2.30)$$

$$k_c = f_{\text{médio}} D_e^4 \int_0^l \frac{dx}{D^5(x)} \quad (2.31)$$

Em geral a integração da eq. (2.31) será numérica. Se aceitarmos a aproximação do tubo convergente por um tubo cônico a equação anterior permite uma integração imediata

$$k_c = \frac{f_{\text{médio}}}{4} \frac{l}{D_e - D_s} \left[\left(\frac{D_e}{D_s} \right)^4 - 1 \right] \quad (2.32)$$

onde:

D_e e D_s : diâmetro hidráulico do tubo convergente na saída e na entrada, respectivamente em (m);

l : comprimento do tubo, em (m);

f_{med} : valor médio do coeficiente f de atrito de Darcy – Weisbach, adimensional.

2.8.6 Câmara de testes (*test section*)

A câmara de ensaio de um túnel de vento da CLA é normalmente de seção transversal retangular, com largura maior que sua altura (Fig. 13).

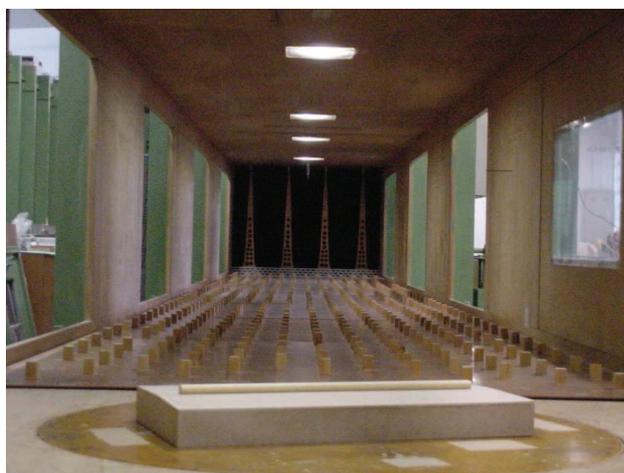


Figura 14 – Câmara de ensaio do túnel de vento da UFRGS, com o modelo de um pavilhão industrial e os dispositivos de simulação da CLA (SILVANI 2005)

No item 2.6 foram apresentadas, segundo diferentes autores, as dimensões que deve possuir a câmara de ensaio para obter o melhor *design* de um túnel de vento de CLA. Cabe, então, perguntar: quais são as dimensões mínimas da seção transversal da câmara de ensaio de

um túnel de CLA que permita reproduzir numa escala geométrica adequada o relevo e as edificações a serem ensaiadas? Provavelmente, as dimensões mínimas não sejam muito menores que as do túnel de vento *Joaquim Blessmann*, da UFRGS.(PALUCH 2006(comunicação pessoal))

O anteriormente exposto se baseia nos seguintes aspectos:(PALUCH 2006(comunicação pessoal))

- Considerando que: (a) a escala do modelo deve ser o mais próxima à escala da simulação da CLA; (b) as escalas das simulações da CLA, de espessura parcial, num túnel de vento com 1m de altura são da ordem de 1/300 (BLESSMANN, 1982); (c) a altura dos modelos não deve ultrapassar, em muito, cerca de 50% da altura da câmara de testes; se deduz que num túnel de vento, com uma câmara de ensaio de 1m altura, se consegue ensaiar adequadamente um modelo de 50cm de altura, de um edifício esbelto, chaminé, torre, etc., de 150m de altura, assim como, um modelo de 5cm de altura, correspondente a um pavilhão industrial de 10m de altura. Observar que modelos com as dimensões indicadas anteriormente possuem uma escala geométrica adequada, já que são de relativamente fácil construção, instrumentação e possuem escalas geométricas semelhantes à CLA simulada.
- Considerando que o comprimento (maior dimensão em planta) dos modelos isolados não pode ultrapassar, em muito, 50% da largura da câmara de ensaio, para reduzir a níveis aceitáveis a interferência entre as paredes laterais do túnel e o escoamento em torno ao modelo, se deduz que num túnel de vento, com uma câmara de ensaio de 1m de largura, se consegue ensaiar adequadamente um modelo de 50cm de comprimento, correspondente a um pavilhão industrial de 100m x 50m x 10m (comprimento x largura x altura). Observar novamente, que o modelo com a dimensão indicada anteriormente possui uma escala geométrica adequada, já que satisfaz os requisitos indicados no parágrafo anterior.

Finalmente, também poderíamos perguntar: qual deveria ser a velocidade máxima, em vazio (sem simuladores da CLA), a ser atingida nesse túnel, com câmara de ensaio de dimensões mínimas: 1m x 1m (altura x largura)? Essa velocidade máxima é da ordem de 30m/s, aproximadamente.(PALUCH 2006(comunicação pessoal))

O anteriormente exposto se justifica considerando os seguintes aspectos: no túnel de vento *Joaquim Blessmann*, da UFRGS, que possui uma velocidade em vazio de 40m/s, Paluch (1994) ensaiou um modelo de pavilhão industrial com cobertura curva, com as dimensões e proporções indicadas na Tabela 1, obtendo um Re máximo

$$\text{Re} = \frac{Ud}{\nu} = 2,6 \times 10^5 \quad (2.33)$$

onde:

U : velocidade no topo do modelo = 23,8m/s;

d : duas vezes o raio de curvatura do telhado = $2.r = 0,1812\text{m}$;

ν : viscosidade cinemática do ar nas condições do ensaio = $1,6586 \cdot 10^{-5} \text{m}^2/\text{s}$.

Esse Re é maior que o mínimo necessário (2×10^5) para que utilizando uma rugosidade no telhado (areia, por exemplo), com altura relativa (altura média da rugosidade / duas vezes o raio de curvatura da cobertura) da ordem de 1×10^{-3} a 2×10^{-3} , sejam atingidas condições de escoamento no telhado independentes do Re. Então, a velocidade máxima que deveria ser atingida no túnel de vento com câmara de ensaio de dimensões mínima (1m x 1m) resulta

$$U_{\text{max}} = \frac{2 \times 10^5}{2,6 \times 10^5} 40 \text{m/s} \approx 30 \text{m/s} \quad (2.34)$$

Um túnel de vento com câmara de ensaio de 1m x 1m e velocidade máxima, em vazio, de 30m/s, atinge um Re máximo

$$\text{Re} = \frac{UD}{\nu} = 2 \times 10^6 \quad (2.35)$$

onde:

U : velocidade máxima do ar na câmara de ensaio sem simuladores = 30m/s;

D : diâmetro hidráulico da câmara de ensaio = 1m;

ν : viscosidade cinemática do ar a $20^\circ\text{C} = 15 \times 10^{-6} \text{m}^2/\text{s}$

O resultado anterior poderia ser empregado para deduzir a velocidade de projeto de um túnel no caso de adotar uma câmara de ensaio com dimensões maiores, ou então, para uma dada velocidade de projeto deduzir as dimensões da câmara. (PALUCH 2006 (comunicação pessoal))

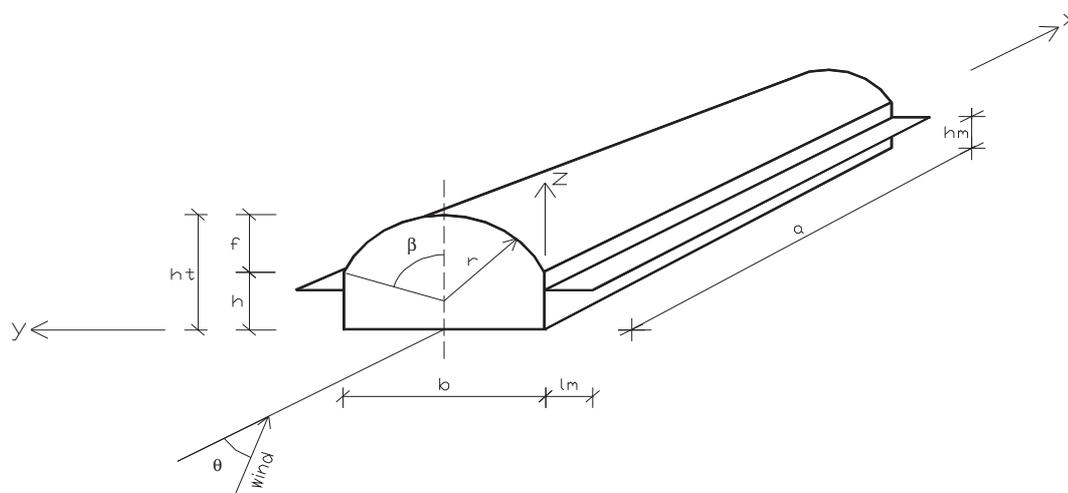


Figura 15– Dimensões do pavilhão ensaiado por Paluch (1994)

Tabela 1 – Dimensões e proporções do pavilhão industrial (vide Fig. 14).

DIMENSÕES (mm)			PROPORÇÕES		θ ($^{\circ}$)
a x b x h	f	r	a x b x h	f / b	
320 x 160 x 16	48	90,6	2 x 1 x 0,10	0,30	61,9

No projeto da câmara de ensaio deve ser previsto: o sistema de iluminação, as portas de acesso, os painéis “vidrados” e as mesas de ensaio.

Num túnel de vento de CLA a câmara de ensaio possui normalmente pelo menos duas mesas de ensaio. Uma mesa localizada no “início” da câmara, para ensaios com escoamento uniforme e suave ou uniforme e turbulento. A outra mesa, localizada no “fim” da câmara, é utilizada para ensaios com simulação da CLA.

A mesa para ensaios com escoamento uniforme deve estar localizada, com relação à saída da contração, a pelo menos meio diâmetro hidráulico da câmara de ensaio, já que o escoamento precisa dessa distância mínima para se tornar o suficientemente desenvolvido. Por sua vez, a segunda mesa deve estar o suficientemente afastada da saída da câmara para que a esteira do modelo não sofra interferência.

Para tubos de seção circular, rugosos, em regime turbulento, Colebrook e White (1938, apud GORECKI, 1998) indicaram as expressões

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 2,0 \times \log_{10} \left[\frac{\varepsilon/D}{3,7} + \frac{2,51}{\text{Re} \times \sqrt{f}} \right] \quad (2.36)$$

onde:

f : coeficiente f de atrito de Darcy – Weisbach, adimensional;

ε : rugosidade granular equivalente das paredes do tubo, em (m);

D : diâmetro do tubo, em(m);

Re: Número de Reynolds referido ao diâmetro do tubo D .

A expressão (2.36) serviu de base para estabelecer o conhecido diagrama de Moody (1944, apud GORECKI, 1998) (Fig.15).

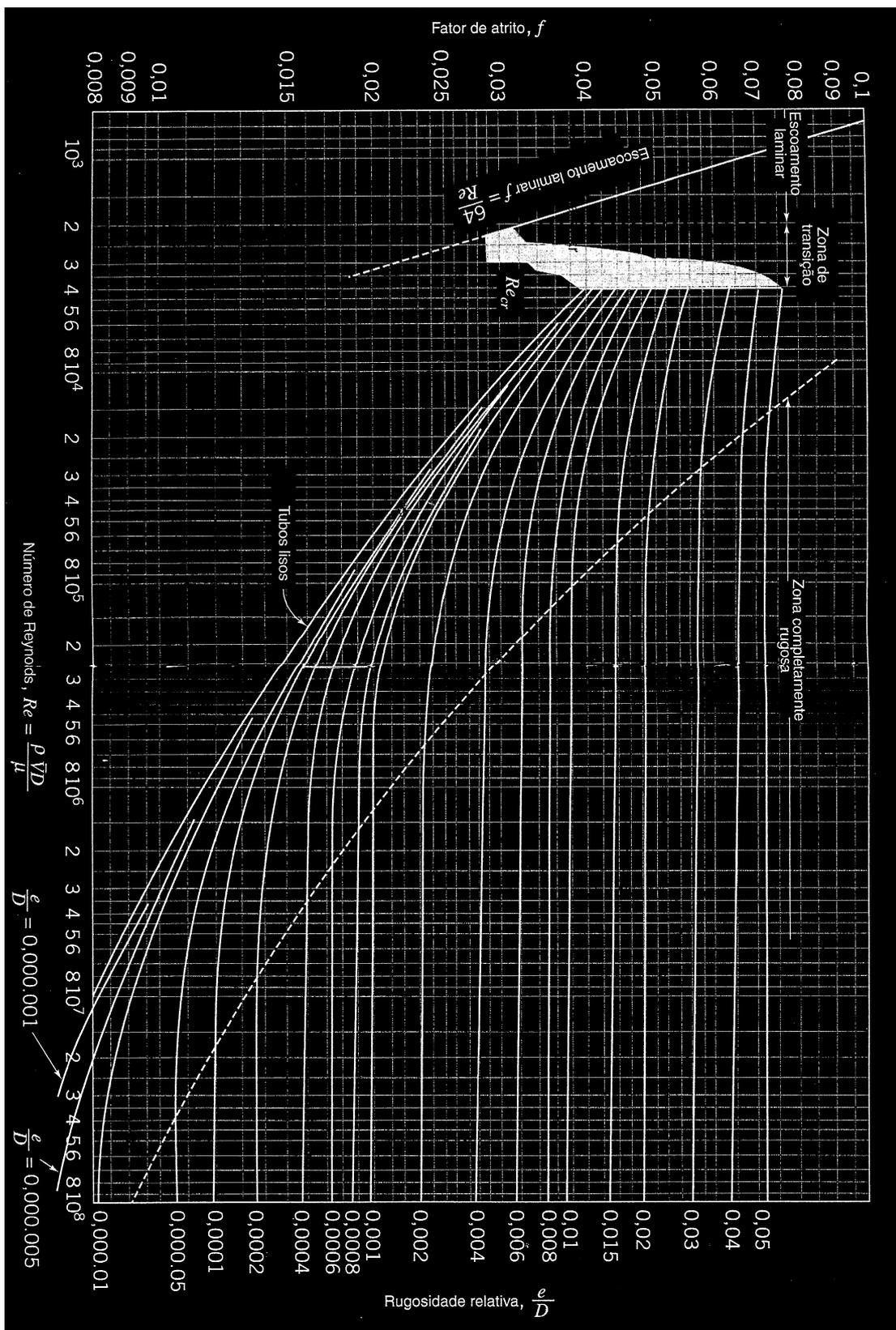


Figura 16 – Diagrama de Moody (FOX e MCDONALD 2005)

Tanto a Eq. (2.36) como o diagrama de Moody, podem ser utilizados para seções não circulares desde que o Re passe a ser definido em termos do diâmetro hidráulico D_h , em (m),

$$D_h = \frac{4 \times A}{P} \quad (2.37-a)$$

onde:

A : área da seção reta, em (m²);

P : perímetro da seção reta, (m).

Para uma seção circular temos obviamente $D_h = D$. Enquanto que para uma seção retangular de lados a e b , em m, resulta

$$D_h = \frac{2a.b}{(a+b)} \quad (2.37-b)$$

O coeficiente de atrito superficial f permite definir para a câmara de ensaio, de comprimento l_c e diâmetro hidráulico D_{hc} , um coeficiente de perda de carga k_c , vide Eq. (2.4)

$$k_c = f \frac{l_c}{D_{hc}} \quad (2.38)$$

2.8.7 Difusor (*diffuser*)

A principal função do difusor (Fig.17) é reduzir a velocidade do escoamento, transformando por tanto, energia cinética ou de velocidade em energia de pressão. A presença de um difusor torna o túnel mais eficiente desde o ponto de vista energético, já que reduz o salto de pressão estática, Δp_v , a ser fornecido pelo ventilador.

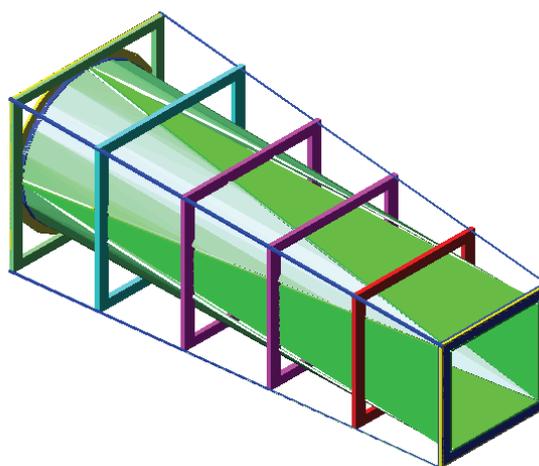


Figura 17 – Difusor de saída de um túnel de vento

O ventilador, no caso de um túnel de vento de retorno aberto, pode estar localizado antes ou após o difusor. Se estiver antes, é preciso agregar uma seção de túnel que permita a transição de seção retangular a circular. No caso do túnel da Fig. 3, essa transição num plano horizontal é um convergente e num plano vertical um difusor. Observar que essa transição, ainda que possua duas paredes divergentes, não é um difusor, propriamente dito, já que a relação de áreas é aproximadamente igual a 1. Quando o ventilador está localizado no final do túnel, o difusor e a transição de seção constituem uma única peça (Fig. 16).

Em geral os difusores de saída possuem um ângulo de abertura total que não excede 5° - 6° , e uma relação de área (área da seção reta de saída / área da seção reta de entrada) não maior que 2 a 3. O ângulo e a relação de áreas foram escolhidos para evitar descolamentos e instabilidades do escoamento no difusor.

As condições de estabilidade do escoamento no difusor (estacionaridade do escoamento) dependem da relação de área, do ângulo de abertura e das condições do escoamento na entrada e saída do difusor.

O gradiente adverso de pressões num difusor conduz à separação do escoamento das paredes do mesmo se for projetado muito comprido.

O escoamento num difusor permanece estável com ângulos de abertura total pequenos, 5° a 6° ; com ângulos maiores, da ordem de 15° , aparecem descolamentos (separação do escoamento das paredes do difusor) de caráter intermitente; com cerca de 20° ocorre um descolamento permanente unilateral: o escoamento passa a biestável, podendo a região descolada bascular para um lado ou para o outro; com ângulos maiores ainda, de uns 50° a 60° , a corrente passa a formar um jato completamente separado das paredes. Tais separações podem produzir vibrações, oscilações nas cargas do ventilador, oscilações na velocidade do escoamento na câmara de ensaio e aumento nas perdas de carga.

Os difusores ampliam qualquer perturbação de velocidade existente na entrada, razão pela qual o rendimento dos mesmos depende muito dessas condições. Camada limite espessa na câmara de ensaio e a esteira dos modelos são fatores muito desfavoráveis, razão pela qual é sugerido o emprego de uma tela no ingresso do difusor para atingir condições de escoamento não intermitente.

O rendimento, η_d , de um difusor é definido como:

$$\eta_d = \frac{P_s - P_e}{q_e - q_s} \quad (2.39)$$

onde:

p_e, p_s : pressão estática na entrada e saída do difusor, respectivamente, em (N/m²);

q_e, q_s : pressão dinâmica na entrada e saída do difusor, respectivamente, em (N/m²).

Um difusor ideal, com um rendimento de 100%, transforma toda a energia cinética em energia de pressão.

O coeficiente de perda de carga, k_d , num difusor, considera os efeitos combinados do atrito nas paredes e dos descolamentos do ar (perda por expansão), resultando

$$k_d \approx 1 - \eta_d \quad (2.40)$$

Difusores, corretamente projetados, têm rendimento η_d da ordem de 0,75 depois de uma seção de ensaio aberta, 0,85 a 0,90 depois de uma seção de ensaio fechada, e 0,90 a 0,93 se o perfil de velocidades na entrada do difusor tiver uma CL bem fina.

As perdas diretas de quantidade de movimento ocorrem: (a) no caso de seções de ensaio abertas em que o jato livre arrasta o ar ambiente, (b) no caso de descarga livre para a atmosfera, nos túneis de retorno aberto, e ainda (c) nos respiros e nos vazamentos.

Num túnel de circuito aberto a descarga do ar para atmosfera ambiente implica em coeficiente de perda local $k_{des} = 1,0$.

2.8.8 Sistema propulsor

O sistema propulsor de um túnel é composto pelo ventilador (axial ou centrífugo), um motor elétrico e o sistema de regulação de velocidade do ar, que pode ser mecânico ou elétrico.

Os túneis de retorno aberto acionados por um ventilador localizado na “saída” do túnel, são do tipo sucção, ou seja, com câmara de ensaio com pressão estática menor que a atmosférica. Os túneis com rotor no ingresso do túnel são do tipo soprador, ou seja, com câmara de ensaio a pressão maior que a atmosférica.

Os túneis abertos do tipo soprador, diferentemente do tipo sucção, não precisam que sua câmara de ensaio seja hermética (sem vazamentos de ar). A única vantagem do túnel aberto do tipo sucção é que o ar que ingressa nesse tipo de túnel, proveniente da edificação que aloja o túnel, pode estar menos “perturbado” que o ar que sai do soprador (ventilador). Isso é particularmente verdadeiro se no túnel tipo soprador for usado um ventilador axial, dada a dificuldade em remover a rotação (*swirl*) que esse tipo de ventilador gera no escoamento. Esse efeito é quase irrelevante se for usado no túnel soprador um ventilador

centrífugo. Entretanto, o escoamento que sai do ventilador centrífugo é turbulento e não uniforme.

A maior parte dos túneis de vento abertos, do tipo sucção, emprega ventiladores axiais. O ventilador pode ou não possuir aletas ou pás de pré-rotação (*pré-rotation vanes*). Essas pás fixas são projetadas para provocar uma rotação oposta à gerada pelo ventilador de maneira que o efeito de rotação após o rotor seja nulo. Como essas pás podem não ser adequadas para todas as velocidades de rotação do ventilador, freqüentemente são adicionadas pás anti-rotação (*antswirl vanes*) ou retificadoras (*straighteners vanes*) após o ventilador (Fig. 17).

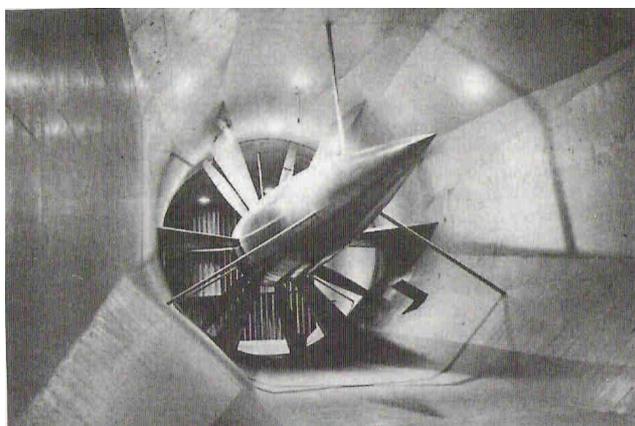


Figura 18 – Ventilador e carenagem instaladas com as janelas direcionadoras e anti-rotativas são também parte do conjunto (BARLOW et al. 1999)

Se não forem empregadas aletas de pré-rotação, necessariamente devem ser agregadas ao túnel aletas retificadoras, após o ventilador. No caso de aletas de pré-rotação ajustáveis, estas são empregadas, também, como regulador de velocidade (regulador mecânico (Fig.3)).

Ventiladores centrífugos são empregados para túneis de vento aberto do tipo soprador. O escoamento que sai dele é turbulento e normalmente uniforme (Fig. 18). Entretanto, podem ser apropriados para túneis de “baixo custo”.

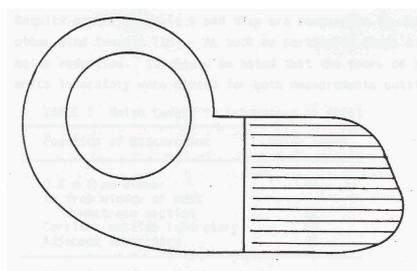


Figura 19 – Ventilador centrífugo e o perfil de velocidades na sua saída (STATHOPOULOS 1984)

Os ventiladores são projetados e construídos por fábricas especializadas. A seleção é feita em função do tipo de ventilador, vazão e salto ou ganho de pressão estática a ser proporcionado pelo rotor.

O motor elétrico é o tipo usual de propulsão utilizado em túneis de vento. Dentre eles:

- Motores alimentados por corrente contínua, com velocidade constante, ou com controle da rotação por variação da corrente elétrica, feita por retificadores controlados de silício;
- Motores de indução, com rotação constante, ou com controle de velocidade feito por inversores de frequência variável;
- Motores universais, com velocidade constante, ou com controle de velocidade feita com retificadores controlados de silício.

Em um sistema propulsor com controle elétrico (automático) tem-se uma velocidade do ar mais precisa que no caso de controle mecânico.

3-TÚNEL DE VENTO PARA A UNIVERSIDADE DE PASSO FUNDO

3.1 Condicionantes dos projetos

Durante o desenvolvimento deste trabalho foram projetados dois túneis de vento de CLA. O projeto da primeira versão do túnel foi realizado de maneira a satisfazer as seguintes condições ou restrições:

- 1) Considerando a baixa disponibilidade de espaço e a falta de recursos financeiros na FEAR/UPF o túnel deve ser de baixo custo e com dimensões mínimas.
- 2) A seção transversal da câmara de ensaio deve possuir dimensões que permitam ensaiar numa escala geométrica adequada as edificações e seu entorno imediato;
- 3) A seção transversal da câmara de ensaio e a velocidade do túnel devem permitir atingir Números de Reynolds, associados a modelos curvos, da ordem de 2×10^5 ;
- 4) A relação altura / comprimento da câmara de ensaio do túnel deve ser da ordem de 8, ou mais, para permitir uma adequada reprodução da CLA empregando os modernos métodos de simulação: rugosidade, barreira e dispositivo de mistura;
- 5) A câmara de ensaio deve permitir compensar o gradiente longitudinal de pressões;
- 6) Na condição de túnel em vazio, ou seja, sem dispositivos de simulação, as não uniformidades do escoamento na câmara de ensaio não devem ultrapassar $\pm 2\%$ para as velocidades médias e 1% para a intensidade de turbulência.

Para satisfazer os requerimentos indicados anteriormente foi projetado um túnel de vento de retorno aberto, do tipo sucção, sem difusor de saída, com câmara de ensaio de seção transversal retangular, com 1,50m de largura, 1,0m de altura e 8,0m de comprimento. Na condição de túnel em vazio, a velocidade de projeto adotada é 25m/s. Para compensar o gradiente longitudinal de pressões as paredes laterais da câmara de ensaio são levemente divergentes, com um ângulo total de divergência igual a $0,6^\circ$.

Para satisfazer a condição de baixos níveis de não uniformidade na câmara de ensaio, na condição de túnel em vazio, o projeto prevê a construção de um convergente, com relação

de contração igual a 4, e uma câmara de estabilização com colméia e telas de uniformização, com k_t total da ordem de 2.

O segundo túnel de vento projetado nesta dissertação foi concebido com o intuito de reduzir ainda mais seu tamanho e seu custo. Para atingir esse objetivo foi concebido um túnel de vento de retorno aberto, do tipo soprador, com ventilador centrífugo e câmara de ensaio com dimensões e velocidade o mais próximas possível ao primeiro projeto. Para reduzir o tamanho e o custo do túnel, com relação ao primeiro túnel, o difusor com grande ângulo de divergência, a contração e o difusor de saída (de pequeno ângulo de divergência), que normalmente fazem parte de um túnel tipo soprador, foram descartados. Para fazer possível essa solução, que reduz tamanho e custo, em detrimento da qualidade do escoamento e da eficiência energética do túnel, as dimensões e a velocidade na saída do ventilador centrífugo escolhido devem ser o mais próxima possível das dimensões e velocidade desejadas na câmara de ensaio. Para melhorar a qualidade do escoamento que sai do ventilador centrífugo foi projetada uma câmara de estabilização com uma colméia e duas telas com k_t total da ordem de 2.

3.2 Projeto da primeira versão do túnel de vento de CLA

O primeiro projeto do túnel de vento de CLA desenvolvido neste trabalho é um túnel do tipo aspirado, com ventilador axial na saída.

3.2.1 Circuito aerodinâmico e geometria da primeira versão do túnel de vento de CLA

A seguir é apresentado o circuito aerodinâmico e a geometria (forma e dimensões) da primeira versão do túnel de vento de CLA, elaborado nesta dissertação:

- Lábios de ingresso ou boca de sino: a geometria adotada é a indicada em Guirguis (1996), segundo a Fig. 5, com $R_1 = 0,811\text{m}$ e $R_2 = 0,616\text{m}$.
- Câmara de estabilização do escoamento: composta por uma colméia e duas telas uniformizadoras em gavetas removíveis. A colméia é constituída por células circulares com diâmetro interno $d = 40\text{mm}$ e comprimento $l = 0,30\text{m}$. As duas telas possuem diâmetro do arame $d = 2\text{mm}$, e passo ou malha $l = 12\text{mm}$, resultando então $\beta = 0,6944$. O espaçamento entre telas e entre a primeira tela e a colméia foi adotado igual a $0,36\text{m}$. Entretanto, o espaçamento entre a última tela e o início do

convergente resulta igual a 0,48m. O comprimento total da câmara de estabilização resulta igual a 1,5m.

- Convergente: o perfil adotado é o sugerido por Witoszinski, (apud Byrkin et al., 1996), conforme a Eq. 2.18, com um comprimento de $l = 3,00\text{m}$ e uma relação de contração $c = 4,0$.
- Câmara de ensaio: de seção retangular, com 1,50m de largura e 1,00m de altura no início, e de 1,60m de largura e 1,00m de altura na saída da câmara. A câmara é projetada com as paredes laterais levemente divergentes (ângulo total de divergência igual a $0,6^\circ$, aproximadamente) para compensar o gradiente longitudinal de pressão. O comprimento da câmara é 8,00m. Resulta, então, uma relação comprimento / altura da câmara igual a 8.
- O ventilador axial adotado permite atingir uma velocidade de 24,3m/s, na seção de testes, na condição de túnel em vazio. Foram projetadas duas mesas de ensaio de 1,00m: uma delas localizada a 1,00m da saída do convergente e a outra a 1,00 do ingresso à transição de seção. Na seção de saída da câmara foi prevista uma tela “Otis” de proteção, com malha 25mmm e arame 2,0mm ($\beta = 0,8464$).
- Transição de seção retangular (1,60m x 1,00m) a circular (1,60m de diâmetro): com um ângulo de divergência total igual a $11,4^\circ$, num plano vertical, seu comprimento resulta igual a 3,00m. Observar, que esta transição não é difusor já que a relação de áreas é igual a 1,25.
- Junta de lona para evitar a transmissão de vibrações geradas pelo conjunto propulsor;
- Ventilador axial Otam, tipo Aerofoil, vazão: 37,5 m³/s, velocidade de rotação: 886 rpm, ganho de pressão estática: 49,8mm de coluna de água. O diâmetro da seção do ventilador (1,60m) igual ao diâmetro de saída da transição de seção, foi escolhido a partir da adoção de um ventilador comercial que satisfaz as exigências de vazão e ganho de pressão a ser fornecido ao ventilador. O projeto não prevê o uso de aletas anti-rotação e/ou aletas de pré-rotação. No caso que a rotação provocada pelo ventilador axial não seja amortecida até a câmara de ensaio, será necessário agregar um conjunto de aletas anti-rotação. O ventilador será acionado por um motor elétrico montado sobre o eixo do ventilador de 60 CV, 8 pólos, tipo 60 – TFVE, com controle de velocidade feito por inversores de frequência variável da Danfoss, tipo VLT – 5052.

- Em detrimento da eficiência energética do túnel o projeto não prevê o uso de um difusor, com o que se reduz significativamente o comprimento total da instalação.

3.2.2 Projeto executivo da primeira versão do túnel de vento de CLA

Nas pranchas, Fig. 19 (TV1- 000) a Fig. 30 (TV1- 010), é apresentado o projeto executivo do primeiro túnel de vento. Nessas pranchas, além da geometria do túnel, são apresentados os materiais a serem empregados na construção do túnel, suas especificações, etc.

3.2.3 Estimativa da performance da primeira versão do túnel de vento de CLA

O seguinte projeto estará sujeito às seguintes condições iniciais:

a)-condições atmosféricas:

- pressão, de 941mbar ou 706 mm de Hg;
- temperatura média, de 20°C;
- massa específica do ar, $\rho = 1,19 \text{Kg} / \text{m}^3$;
- viscosidade dinâmica do ar, $\mu = 1,84 \times 10^{-5} \text{m}^2 / \text{s}$;
- viscosidade cinemática do ar, $\nu = 1,55 \times 10^{-5} \text{m}^2 / \text{s}$;
- velocidade do som no ar, $v = 343,2 \text{m} / \text{s}$.

b)–seção de testes de seção retangular:

- velocidade do fluxo, $V = 24,3 \text{m/s}$;
- medidas da largura , $l_1 = 1,50 \text{m}$, altura $l_2 = 1,00 \text{m}$;
- medida do comprimento, $L = 8 \text{m}$;
- área inicial da seção transversal, $A = 1,50 \text{m}^2$;
- diâmetro hidráulico, da seção:

$$D_h = 1,20 \text{m}$$

c)-cálculos preliminares:

- vazão volumétrica:

$$Q = 36,45 \text{m}^3 / \text{s}$$

- número de Reynolds, pela equação (2.33), tem-se:

$$R_e = 1,24 \times 10^6$$

- pressão dinâmica, pela equação (2.6), tem-se:

$$q = 351,34Pa$$

- número de Mach, tem-se:

$$M = \frac{24,3m/s}{343,2m/s} = 0,0708$$

d)–perdas de carga calculadas a partir das informações obtidas na revisão bibliográfica:

- lábios de entrada ou boca de sino, pelo fator médio de atrito de Darcy – Weisbach e Colebrook e White (1938 apud GORECKI, 1998), para uma rugosidade relativa do MDF de 3×10^{-3} e um número de Reynolds de $1,2 \times 10^6$, a $f \approx 0,0262$, pelas equações (2.36 e 2.38), tem-se: $k = 0,0136$.

- laminador de fluxo ou colméia, o qual retira os vórtices do escoamento, mantendo-os em única direção, a razão entre o diâmetro hidráulico é igual a 7,5, com um comprimento de 30 cm, um diâmetro de 40 mm para cada tubo de PVC, com parede de 1,6 mm de espessura, uma porosidade de 83,43%, com 3461 tubos, instalados na câmara de estabilização, antes das telas e do convergente, um $k = 0,30$, segundo Lumley (1964 apud GORECKY, 1998), Prandtl (1933), Loredo-Souza et al. (2005), Stathopoulos et al. (1984), Mehta e Brandshaw (1979), Loehrke e Nagib (1976), Vickery (1974), Holmes (1977), Greenway e Wood (1979), Lumley e McMahon (1967, apud GORECKY, 1998);

- tela de arame retificadora, a qual melhora sensivelmente o perfil da velocidade, corrigindo a direção do fluxo, a intensidade da componente de turbulência, da componente transversal. Calcula-se, $k = 1,93$, pelas equações (2.10), (2.12), (2.13), (2.14), (2.15) e (2.17), segundo Loredo-Souza et al. (2005), Stathopoulos et al. (1984), com o método aproximado de Davis (1963), chegando-se a um diâmetro do arame de 2,00 mm, uma malha de 12 mm e uma porosidade β_s de 0,6944 e σ_s de 0,3056;

- convergente, com taxa de contração de 4 vezes, tipo Witoszinsky, segundo Souza et al. (2005), admite-se, uma rugosidade relativa (ϵ / D) de 3×10^{-3} , com as possíveis ondulações da madeira tipo MDF, a ser utilizada, pelo fator médio de atrito de Darcy – Weisbach e Colebrook e White (1938 apud GORECKI, 1998), a $f \approx 0,0262$, após sete iterações, assim, pelas equação (2.36 e 2.38), tem-se: $k = 0,260$.

- câmara de estabilização, segundo Souza et al. (2005), admite-se, uma rugosidade relativa (ϵ / D) de 3×10^{-3} , com as possíveis ondulações da madeira tipo MDF, a ser utilizada, com um número de Reynolds de $Re = 1,00 \times 10^6$, pelo fator médio de atrito de Darcy –

Weisbach e Colebrook e White (1938 apud GORECKI, 1998), a $f \approx 0,0263$, assim, pelas equação (2.38), tem-se: $k = 0,0161$.

- seção de testes, segundo Souza et al. (2005), admite-se, uma rugosidade relativa (e / D) de 3×10^{-3} , com as possíveis ondulações da madeira tipo MDF, a ser utilizada, com um número de Reynolds de $Re = 1,9 \times 10^6$, pelo fator médio de atrito de Darcy – Weisbach e Colebrook e White (1938 apud GORECKI, 1998), a $f \approx 0,0262$, após sete iterações, assim, pelas equação (2.36 e 2.38), tem-se: $k = 0,18$.

- seção do adaptador de saída, com ângulo total de 2,8 graus, com área de entrada de $1,6 \text{ m}^2$ e área de saída de $2,01 \text{ m}^2$, uma razão entre as áreas de 1,26, um comprimento de 3,00 m, de seção quadrada de $l_1 = 1,00 \text{ m}$ e $l_2 = 1500 \text{ mm}$ na entrada e um diâmetro de 1,60 m na saída, pelo fator médio de atrito de Darcy – Weisbach e Colebrook e White (1938 apud GORECKI, 1998), a $f \approx 0,0262$, assim, pelas equação (2.36 e 2.38), tem-se: $k = 0,10$.

- junta anti-vibração, com $D = 1,60 \text{ m}$ e comprimento de 0,10 m, pelo fator médio de atrito de Darcy – Weisbach e Colebrook e White (1938 apud GORECKI, 1998), a $f \approx 0,0262$, assim, pelas equação (2.38), tem-se: $k = 0,002$.

- seção do ventilador, com $D = 1,60 \text{ m}$ e comprimento de 1,00 m, com hélice e motor com base, pelo fator médio de atrito de Darcy – Weisbach e Colebrook e White (1938 apud GORECKI, 1998), a $f \approx 0,0263$, assim, pelas equação (2.38), tem-se: $k = 0,0164$.

e)-somatório dos coeficientes de perda k:

$$k_{total} = 2,82.$$

f)-a potência aerodinâmica do túnel de vento a ser fornecida pelo ventilador axial, será:

$$P = k_{total} \times q \times Q = 36.113,88 \text{ ou } 36,11 \text{ kW}$$

g)-considerando para o ventilador comercial, um rendimento de 0,8 ou 80%, tem-se:

$$P_{ef} = \frac{P}{0,8} = 45,14 \text{ kW}$$

h)-a diferença de pressão que o ventilador axial deverá fornecer, será:

$$\Delta p_v = \frac{P_v}{Q} = k_{total} \times q = 990,77 \text{ Pa} \text{ ou } 99,08 \text{ mm de coluna de água;}$$

i)- a potência do ventilador em Cv será:

$$P_v = 61,33 \text{ Cv mínimos ou } P_v = 60 \text{ Cv comercial, com } f_s = 1.02;$$

j) – a eficiência:

$$E_f = \frac{1}{K} = 0,355 \approx 0,36$$

k)- a tabela 4, estão indicados os coeficientes de perda de carga local (k_i) referidos à pressão dinâmica local (q_i), os coeficientes de perda de carga (k_i), referidos à pressão dinâmica de referência (q_{ref}), correspondente à seção de testes, como também o coeficiente total (k_{total}).

Tabela 2 – Coeficientes de perda da primeira versão do túnel de vento de CLA

Item	Função	Comprimento L_i (m)	Área A_i (m ²)	K_i	q_i/q_{ref}	K_i	
1	Lábios ou boca de sino	0,50	5,99	0,002	0,105	0,0136	
2	Colméia	0,30	5,99	0,30	0,105	0,30	
3	Telas	-	5,99	1,60	0,046	1,93	
4	Câmara de estabilização	2,50	5,99	0,03	0,087	0,0161	
5	Convergente	3,05	5,99	0,069	1,00	0,260	
6	Seção de testes	8,00	1,50	0,18	1,00	0,180	
7	Adaptador	3,00	1,50	0,066	0,589	0,100	
8	Junta anti-v.	0,10	2,01	0,002	0,589	0,002	
9	Ventilador	1,00	2,01	0,017	0,589	0,0164	
						k_{total}	2,82

Para o túnel em vazio obtém-se nas condições de referência, um coeficiente de perda total $k_{total} = 2,82$.

3.2.4 Linha piezométrica da primeira versão do túnel de CLA

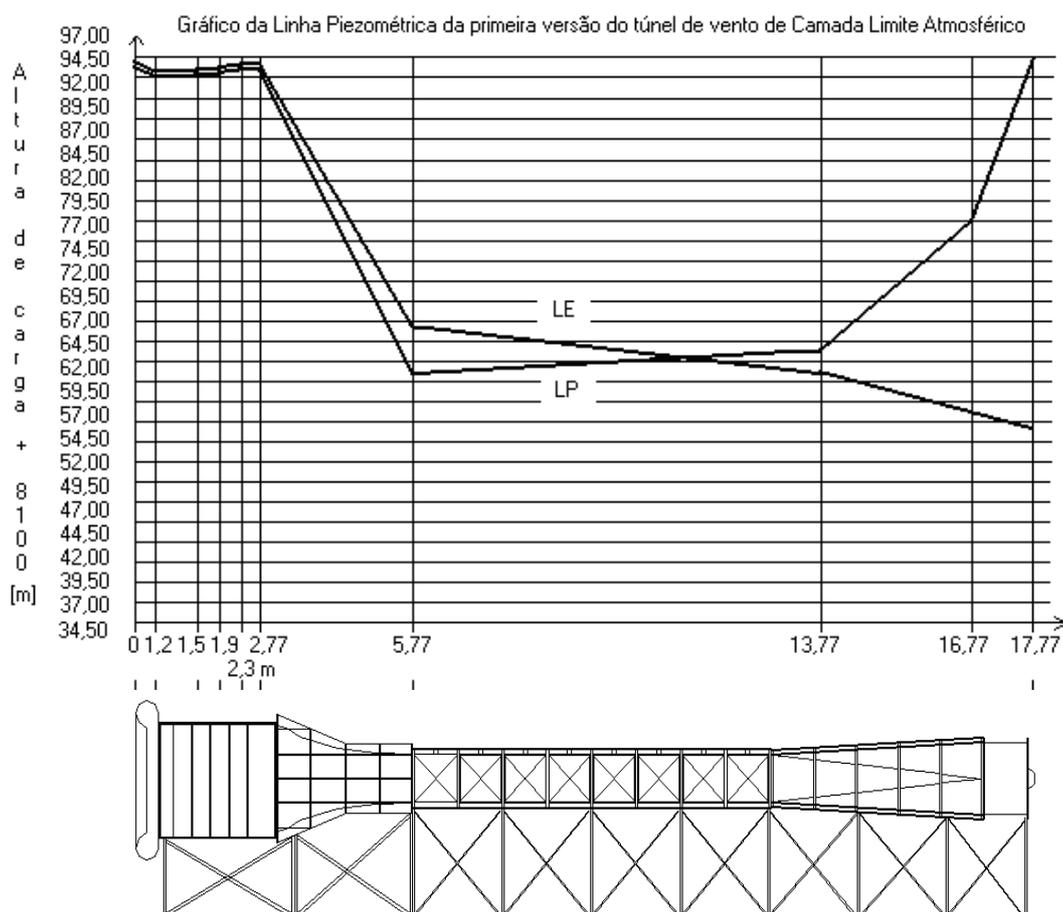


Figura 20 – Linha piezométrica da primeira versão do túnel de vento de CLA(contorno ilustrativo)

Tabela 3 – Dados da curva piezométrica do túnel

d [m]	P [N/m ²]	ΔP [N/m ²]	V [m/s]	LE [m]	LP [m]	$V^2/2g$
0,00	95.592,40	0,00	7,75	8.196,91	8.196,28	0,63
1,23	95.591,95	0,45	7,75	8.193,37	8.192,74	0,63
1,26	95.583,95	8,00	7,70	8.193,73	8.193,11	0,62
1,62	95.555,95	28,00	6,98	8.193,79	8.193,28	0,51
1,98	95.534,70	21,25	6,98	8.194,39	8.193,88	0,51
2,46	95.528,98	5,72	6,08	8.194,39	8.194,01	0,38
5,46	95.465,74	63,24	24,30	8.166,15	8.160,00	6,15
13,46	95.496,74	31,00	22,80	8.160,15	8.163,61	6,15
16,46	95.516,34	19,60	18,65	8.156,38	8.180,41	3,62
17,56	95.592,40	76,06	18,65	8.152,76	8.197,23	3,62

No gráfico da curva piezométrica, nota-se que possui um leve aumento na altura de carga na entrada, após o escoamento passar pelas telas, diminuindo significativamente em seguida após a passagem pelo convergente, tendo um leve aumento na seção de testes, continuando a aumentar no adaptador de saída e um grande aumento no ventilador que recupera a pressão para atmosférica. Isso ocorre porque em um túnel aspirado, a pressão na sua entrada é a atmosférica e essa é rebaixada em cada seção, proporcional a suas quedas de pressão devido às perdas de carga nas mesmas, desde a entrada do túnel até a seção do ventilador que recupera a pressão em sua saída que é a mesma do próprio túnel de vento de CLA do tipo aspirado. Nota-se ainda que nos valores do eixo vertical, foram descontados 8.100 metros da altura de carga devido o pouco espaço disponível. Os valores do eixo horizontal correspondem ao comprimento das seções do túnel de vento de CLA e conseqüentemente a todo o seu comprimento.

Na tabela acima, nota-se as pressões com a inserção dos valores de pressão da atmosfera na região de Passo Fundo. Os dados possuem as mesmas características do gráfico, pois, se trata de um túnel de vento aspirado.

3.2.5 Orçamento da primeira versão do túnel de vento de CLA

Tabela 4 – Orçamento da primeira versão do túnel de vento de CLA

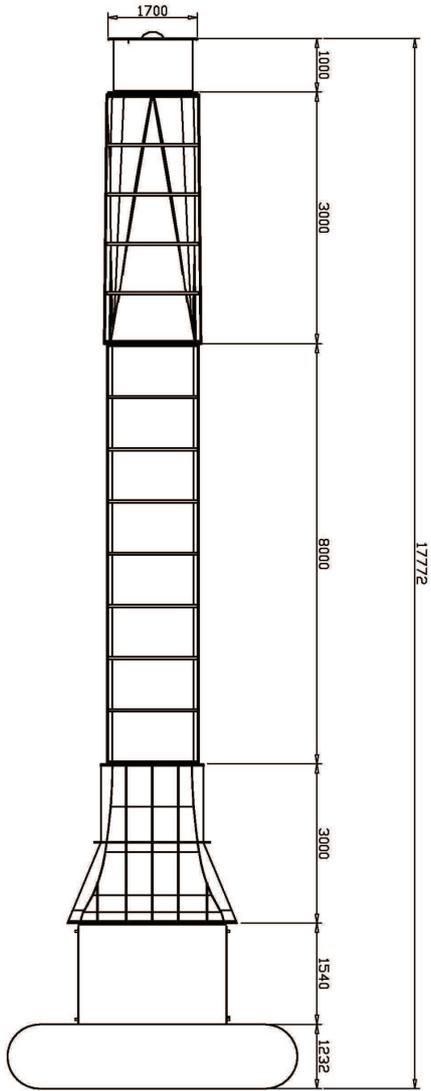
Quantidade	Material	Fornecedor	Preço unitário	Preço Total
2	Latas de verniz para madeira pigmentado	Garbelotto	128,40	256,80
10	Chapas de MDF de 6 mm de espessura	Garbelotto	56,40	564,00
56	Chapas de MDF de 20 mm de espessura	Garbelotto	142,80	7.996,80
65	Barrotes de 3m de madeira 100mmx50mm	Madeira Ianinski	24,20	152,06
6	Cx. parafusos 50mm x3,5mm cb.chata aço	Garbeloto	33,00	198,00
1	Cx. parafusos 20mm x3,0mm cb.chata aço	Garbelotto	19,00	19,00
30	Barras, 6m cantoneira, ferro 25mmx25mm	Gerdau S.A.	19,45	584,65

1	Inversor de frequência var. mod.VLT5052	Danfoss	24.858,00	24.858,00
2	Kg var.solda ferro 2,5mm tipo OK	Marekis	8,00	16,00
250	Parafusos 25mm x 6mm,milim.c/porca aço	Zamil	0,20	50,00
1	Kg de arruelas 15mm x 6,4mm, aço	Zamil	27,95	27,95
2	Latas 18 Kg. de cola madeira	Garbeloto	124,00	248,00
1	Vent.axial, AVR_AL 1600,com motor 60Cv	Otam	17.493,00	17.493,00
250	Arruelas de pressão 11,5mm x 2mm	Zamil	0,037	9,25
10	Cx.sexavada ponto luz no teto fer. 150mm	Águaluz	1,50	15,00
10	Lâmpadas flúor.20W c/reator eletr., calha	Águaluz	33,00	330,00
¼	Rolo condutor 1,5 mm ² , cor preta, flexível	Eletropasso	40,00	10,00
¼	Rolo cond. 1,5 mm ² , cor vermelho, flexível	Eletropasso	40,00	10,00
¼	Rolo condutor 1,5 mm ² , cor azul, flexível	Eletropasso	40,00	10,00
6	Barras eletroduto 20mm aço leve zinc.rosca.	Eletropasso	13,90	83,40
1	Interruptor simples c/ espelho	Águaluz	3,50	3,50
11	Cx. 100mm x50mm, al. saída reta 20mm	Eletropasso	5,00	55,00
2	Chapas de policarbonato cristal 4mm	Maffini	1350,00	2700,00
3	Eletroduto de 50mm, PVC rígido c/rosca	Eletropasso	53,00	159,00
4	Luvas p/eletroduto 50mm PVC rígido	Eletropasso	4,90	19,60
3	Curvas p/eletroduto 50mm PVC rígido	Eletropasso	20,70	63,00
20	m ² tela arame de 0,72 mm, mal.12 mm	VTM	20,00	400,00
6,2	m de lona corrugada emborrachada p/junta	Casa da Borracha	30,00	186,00
37	Tubo de ferro retangular 50mm x 30mm x2	Gerdau S.A.	46,00	1702,00
52	Parafusos 35mm x 6mm c/porca, rosca pol.	Zamil	0,22	11,44
217	Horas de serviço de marceneiro/serralheiro	Douglas	40,00	8.680,00
307	Barras de tubo de PVC, 40 mm, leve	Marcon	15,40	4.727,80
11	Chapas de flexível	Garbeloto	60,00	660,00

*****	Total	*****	*****	74.459,61

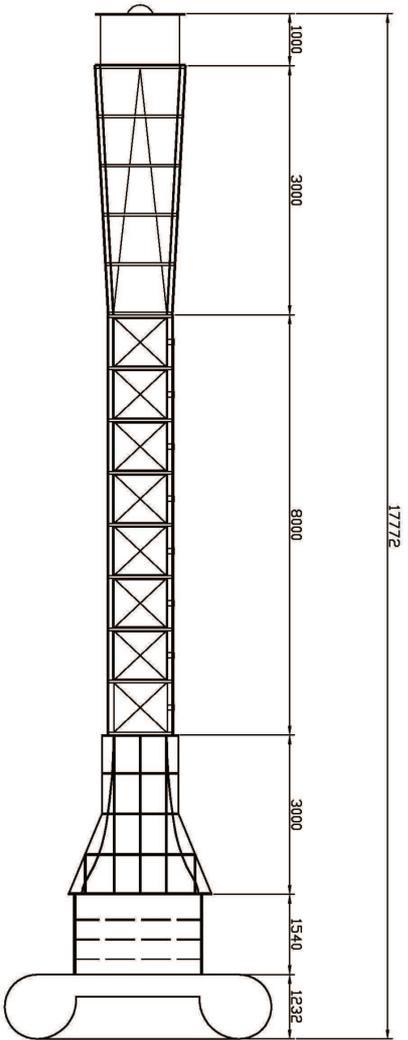
3.2.6 Desenhos do projeto da primeira versão do túnel de vento de CLA

Os desenhos do projeto da primeira versão do túnel de CLA encontram-se nas folhas seguintes.



NOTAS
 01 - Os conj. serão unidos com orelhas e paraf. M10x25mm

Nome	Universidade de Passo Fundo	UPF
Proj.	12/11/05	
Disc.	Mestrado em Engenharia	
Visto	Moacyr Fauth da Silva Jr.	
Escala	Projeto Túnel de vento	
145	Projeto Vista superior do tunel de vento	Número TVI-000

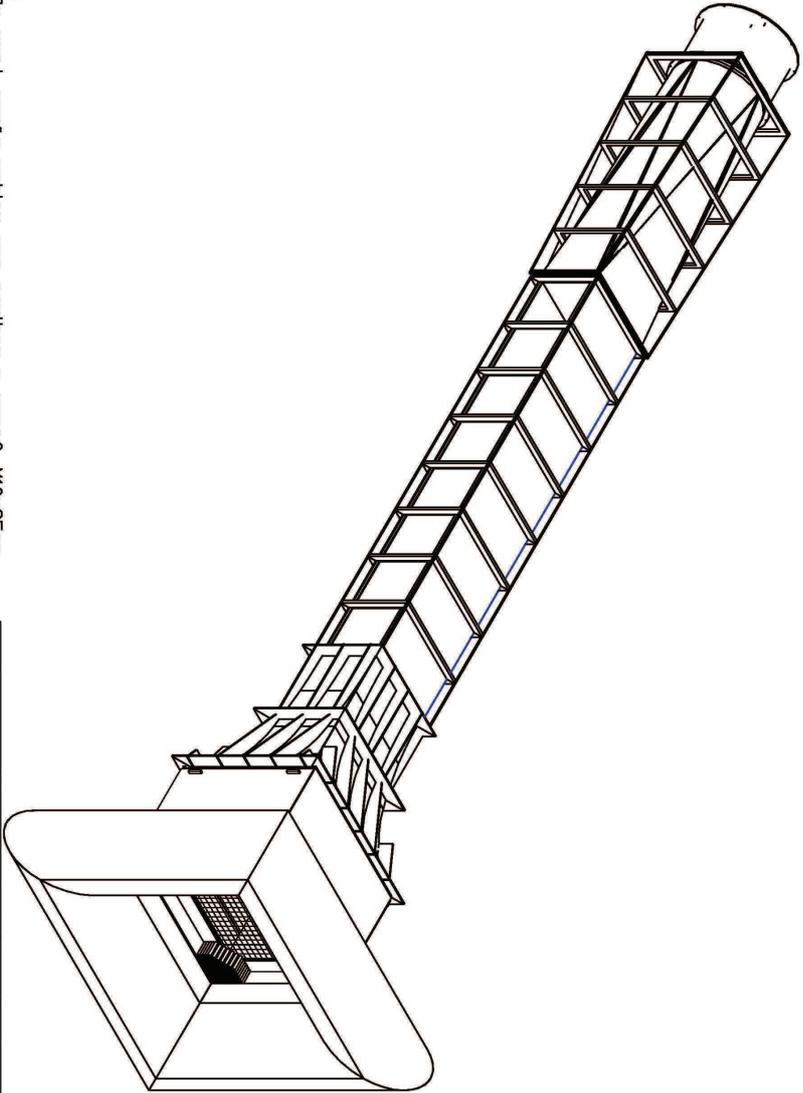


NOTAS
Estrutura de sustentação de ferro tubular de 40 x 20 ESC. 1/90



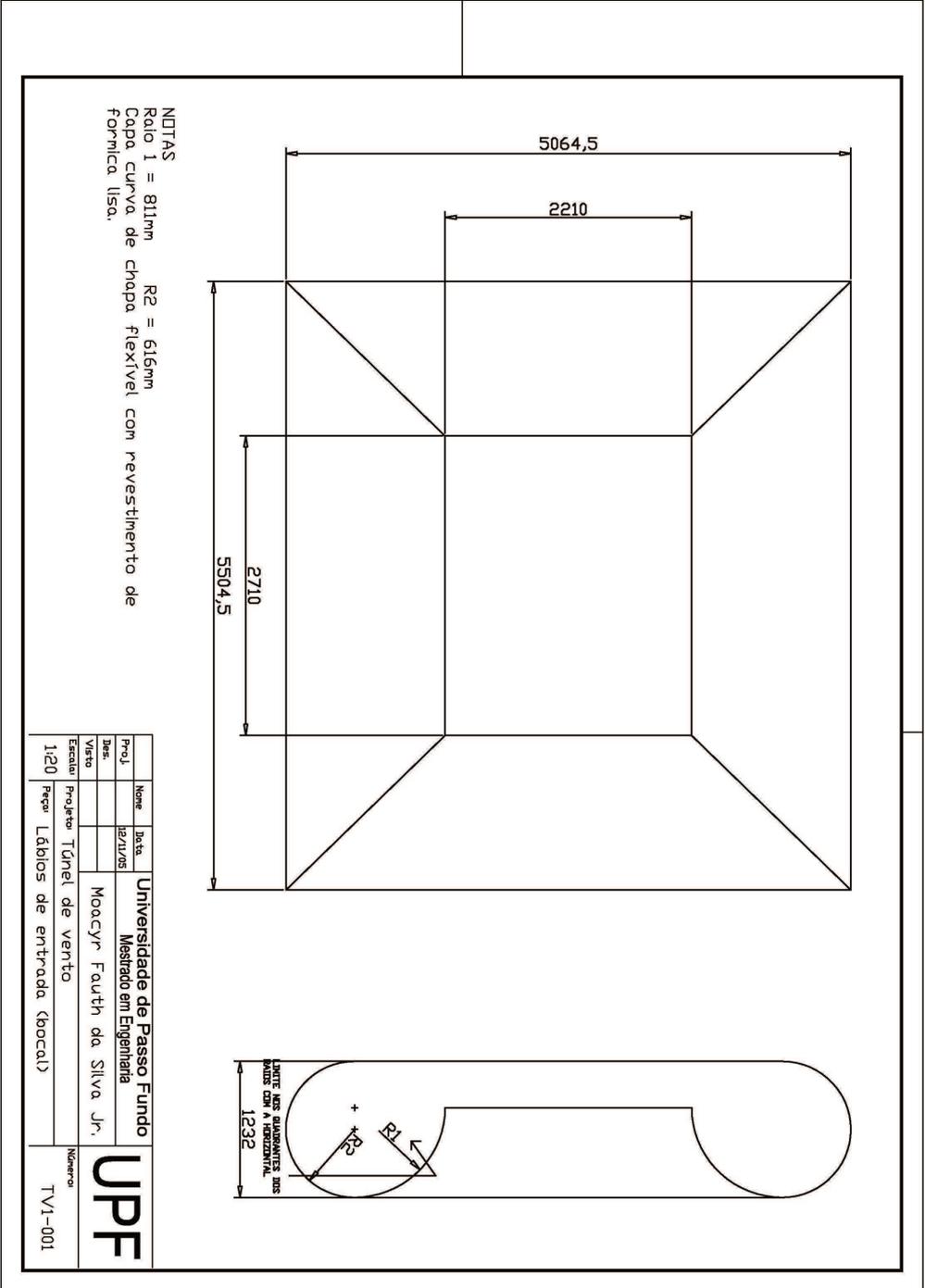
01 - Os conj. serão unidos com orelhas e paraf. M10x25mm

Nome	Universidade de Passo Fundo	UPF
Proj.	12/11/05	
Data	Moacyr Fauth da Silva Jr.	Número TVI-000A
Vista	Projeto Túnel de vento	
Escala	1/45	
Projeto	Túnel de vento	
Revisão	Vista lateral túnel de vento	



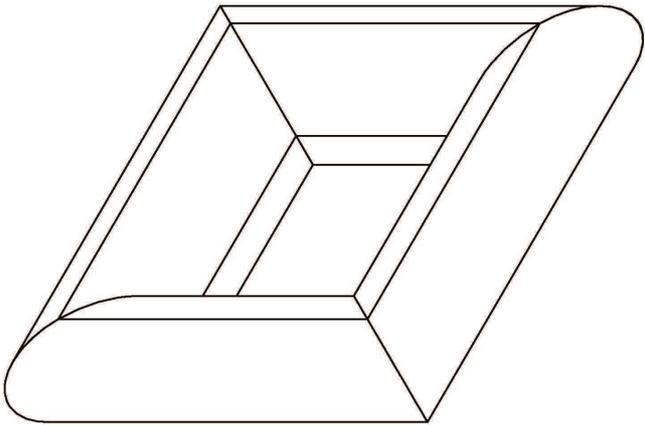
NOTAS
01 - Os conj. serão unidos com orelhas e paraf. M10x25mm

Proj.	Nome	Data	Universidade de Passo Fundo
Des.		12/11/05	Mestrado em Engenharia
Vista			Moacyr Fauth da Silva Jr.
Escala	Projeto	Túnel de vento	
1:45	Pequ	Vista lateral túnel de vento	
			Número UPF TV1-0003



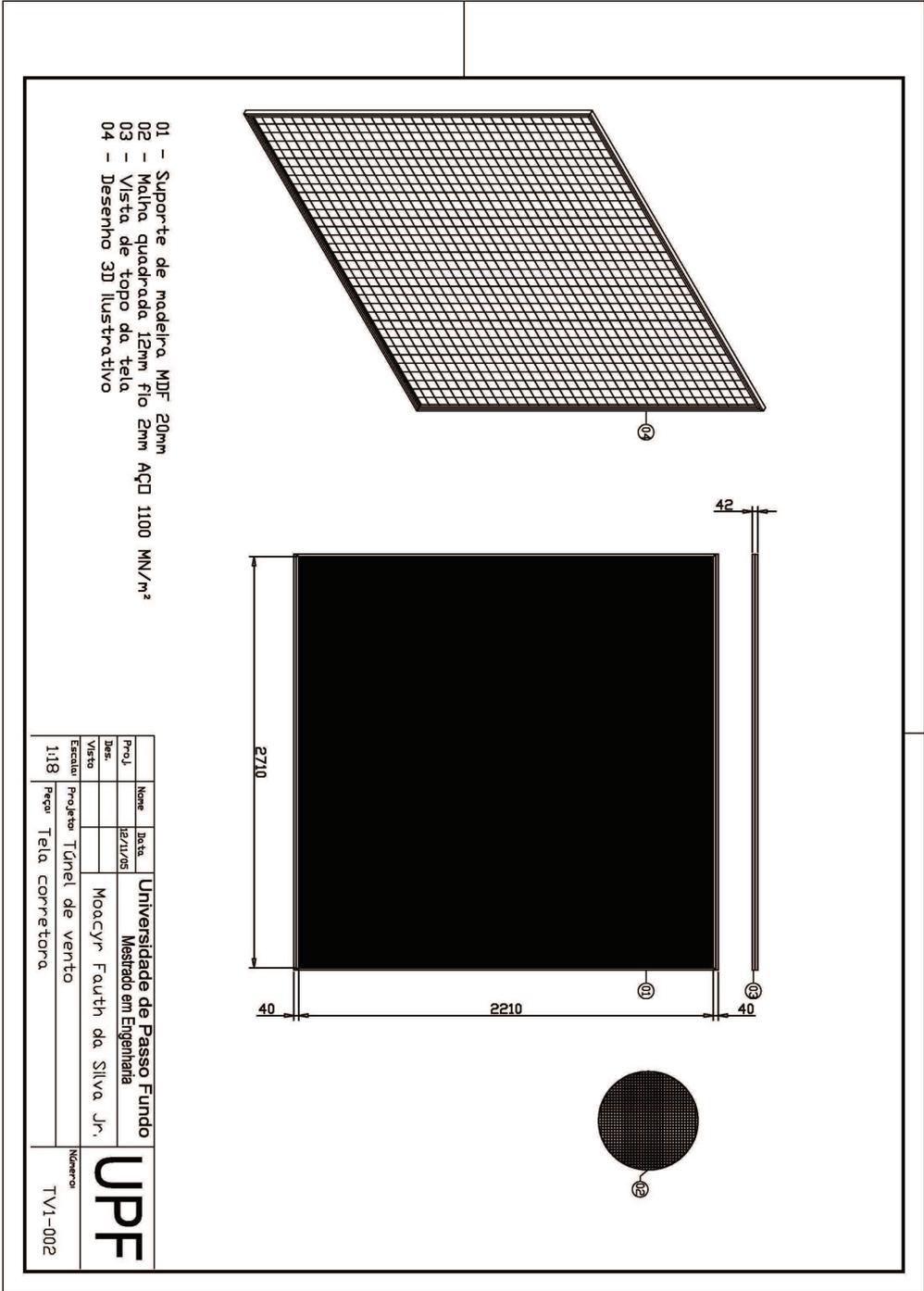
NOTAS
 Raio 1 = 811mm R2 = 616mm
 Capa curva de chapa flexível com revestimento de
 formica lisa.

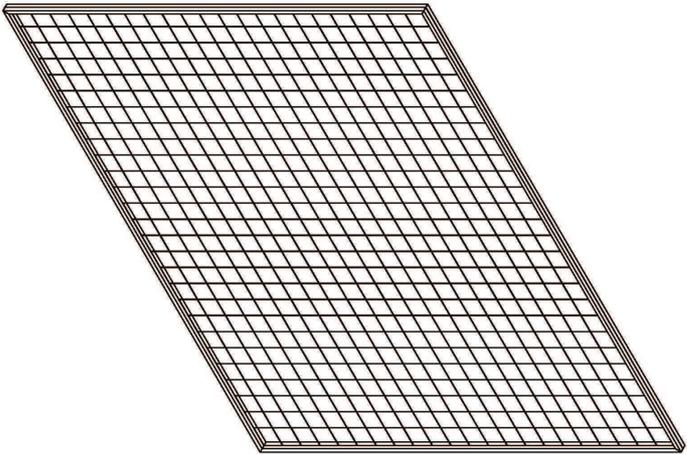
Proj.	Nome	Data	Universidade de Passo Fundo	
Des.		12/11/2015	Mestrado em Engenharia	
Visto			Moacyr Fauth da Silva Jr.	
Escala	Projeto	Túnel de vento	UPF	
1:20	Peça	Lábios de entrada (bocal)	Número TV1-001	



NOTAS
 Raio 1 = 811mm R2 = 616mm
 Capa curva de chapa flexível com revestimento de
 formica lisa.

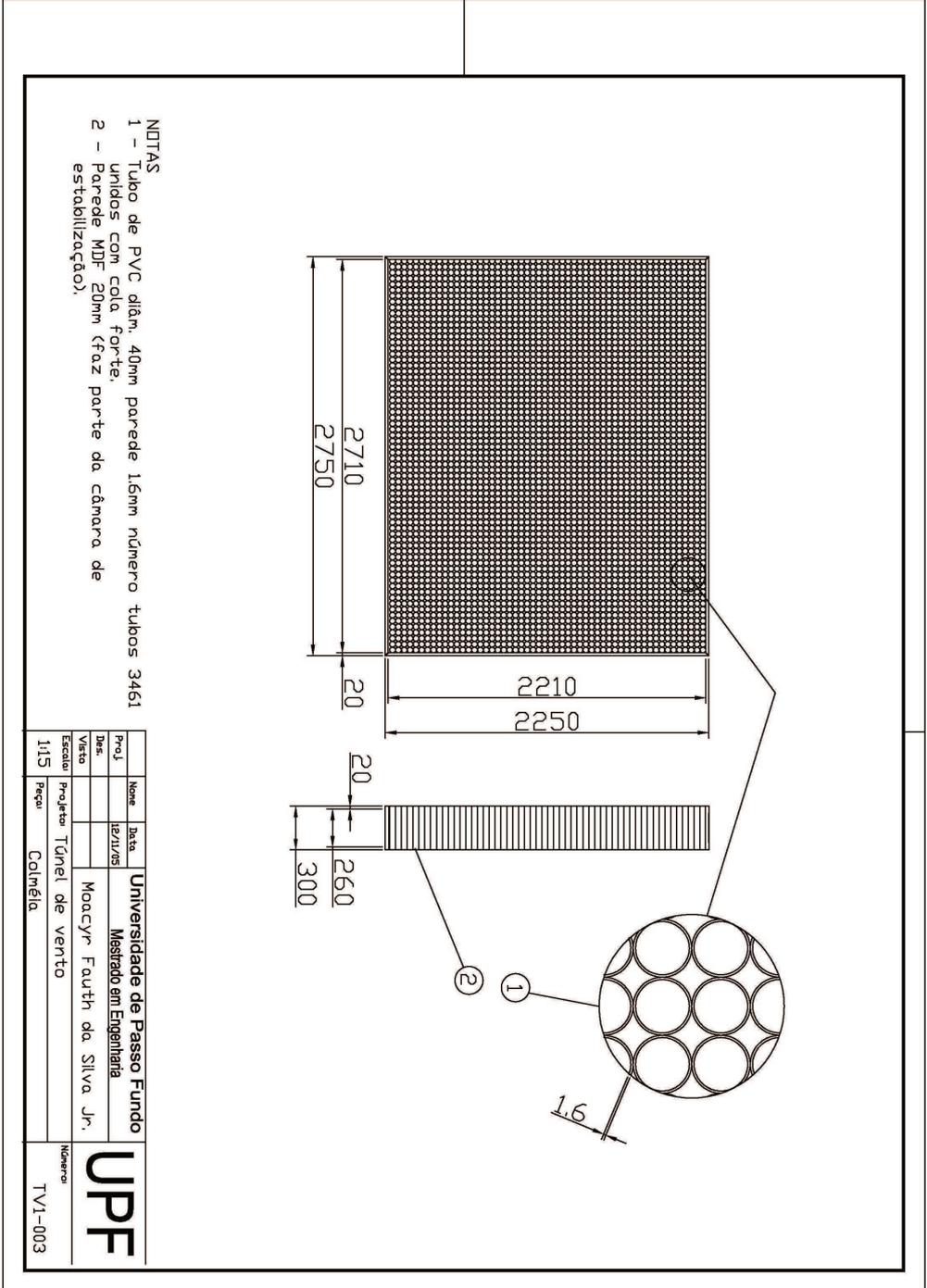
Nome	Inst.	Universidade de Passo Fundo	UPF
Proj.	12/21/05		
Data		Moacyr Fauth da Silva Jr.	
Visto		Projeto Túnel de vento	
Escala	1:24	Pequ. Lábios de entrada (bocal)	Número TV1-001A

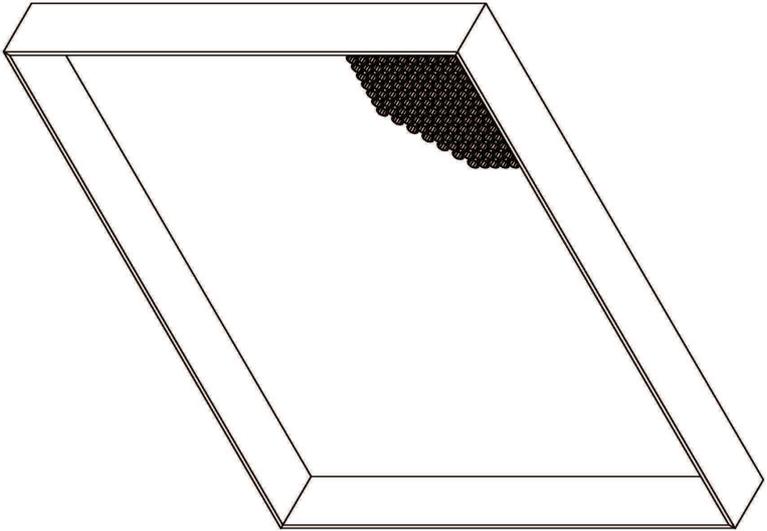




- 01 - Suporte de madeira MDF 20mm
- 02 - Malha quadrada 12mm Fio 2mm Aço 1100 MN/m²
- 03 - Vista de topo da tela
- 04 - Desenho 3D Ilustrativo

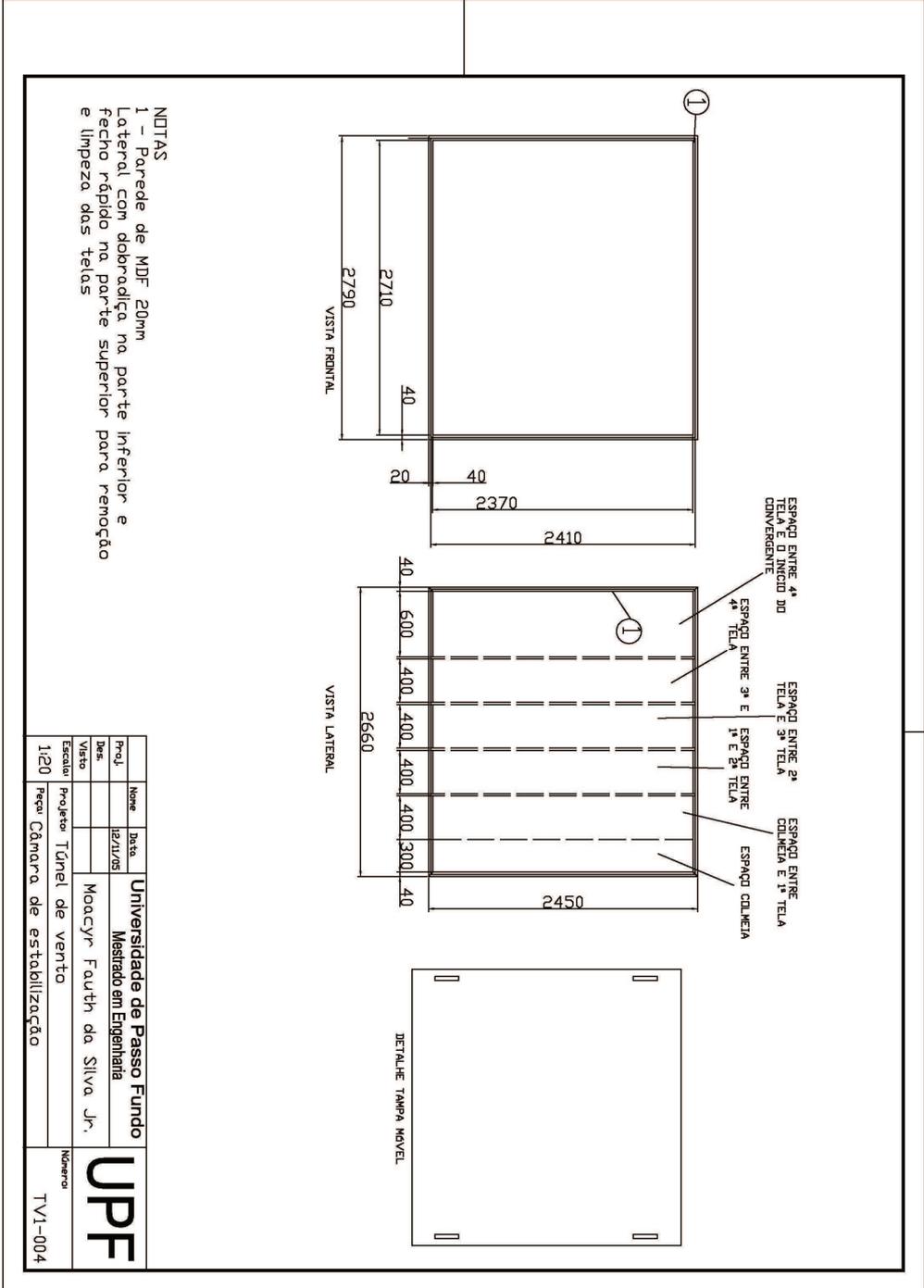
Proj.	Nome	Data	Universidade de Passo Fundo
Des.		12/11/05	Mestrado em Engenharia
Visto			Moacyr Fauth da Silva Jr.
Escala	Projeto	Túnel de vento	
1:18	Recur	Tela corretora	
			Número
			UPF
			TVI-002A





- NOTAS
- 1 - Tubo de PVC diâ. 40mm parede 1,6mm número tubos 3461 unidos com cola forte.
 - 2 - Parede MDF 20mm (faz parte da câmara de estabilização).

Proj	Nome	Data	Universidade de Passo Fundo
Des	le/ivis		Mestrado em Engenharia
Visão			Moacyr Fauth da Silva Jr.
Escala	Projeto	Túnel de vento	
1:15	Peça	Colméia	Número UPF TV1-003A

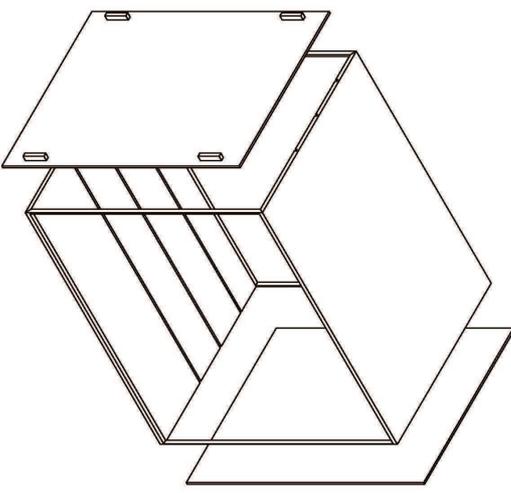


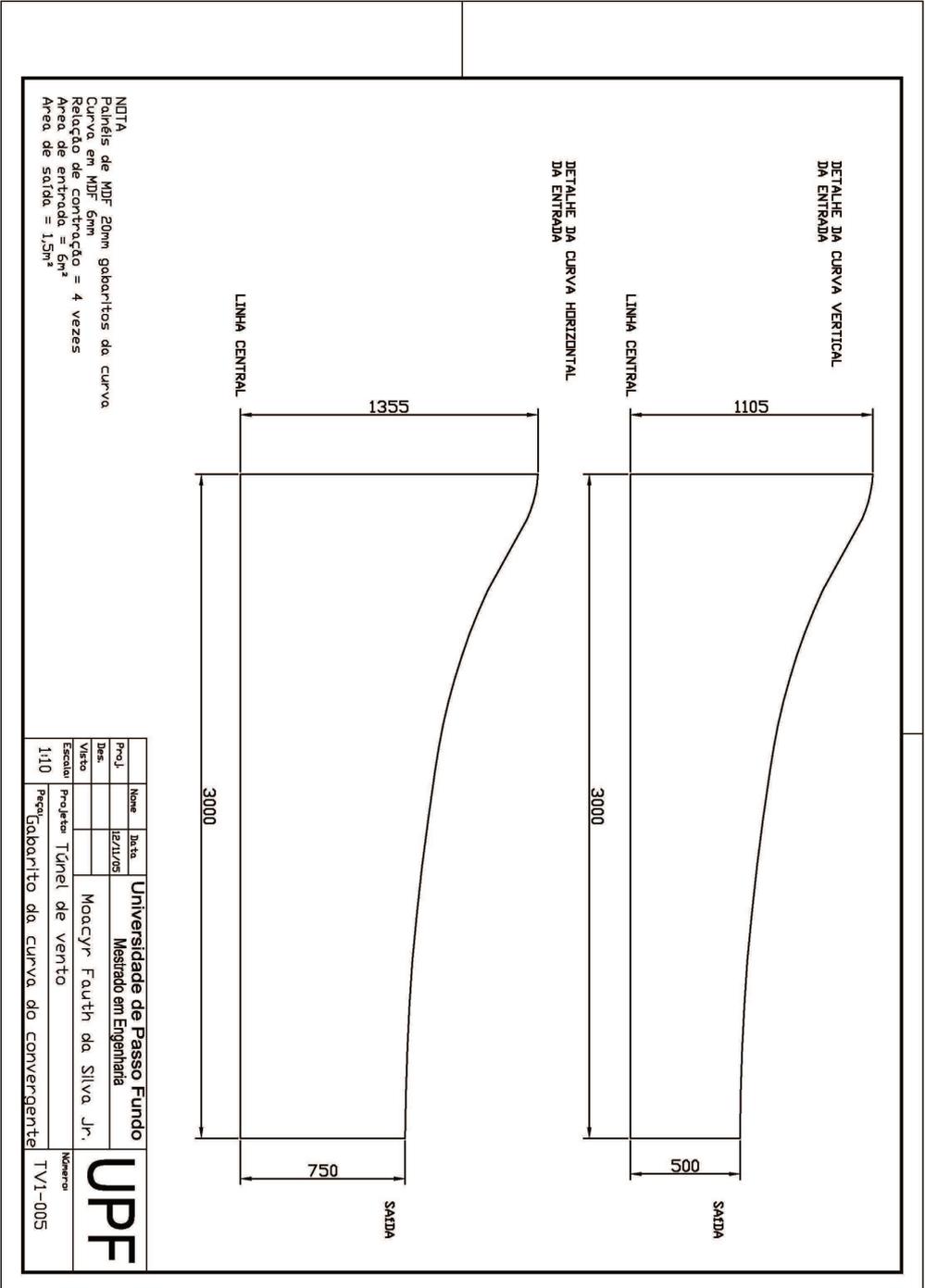
NOTAS
 1 - Parede de MDF 20mm Lateral com dobradiça na parte inferior e fecho rápido na parte superior para remoção e limpeza das telas

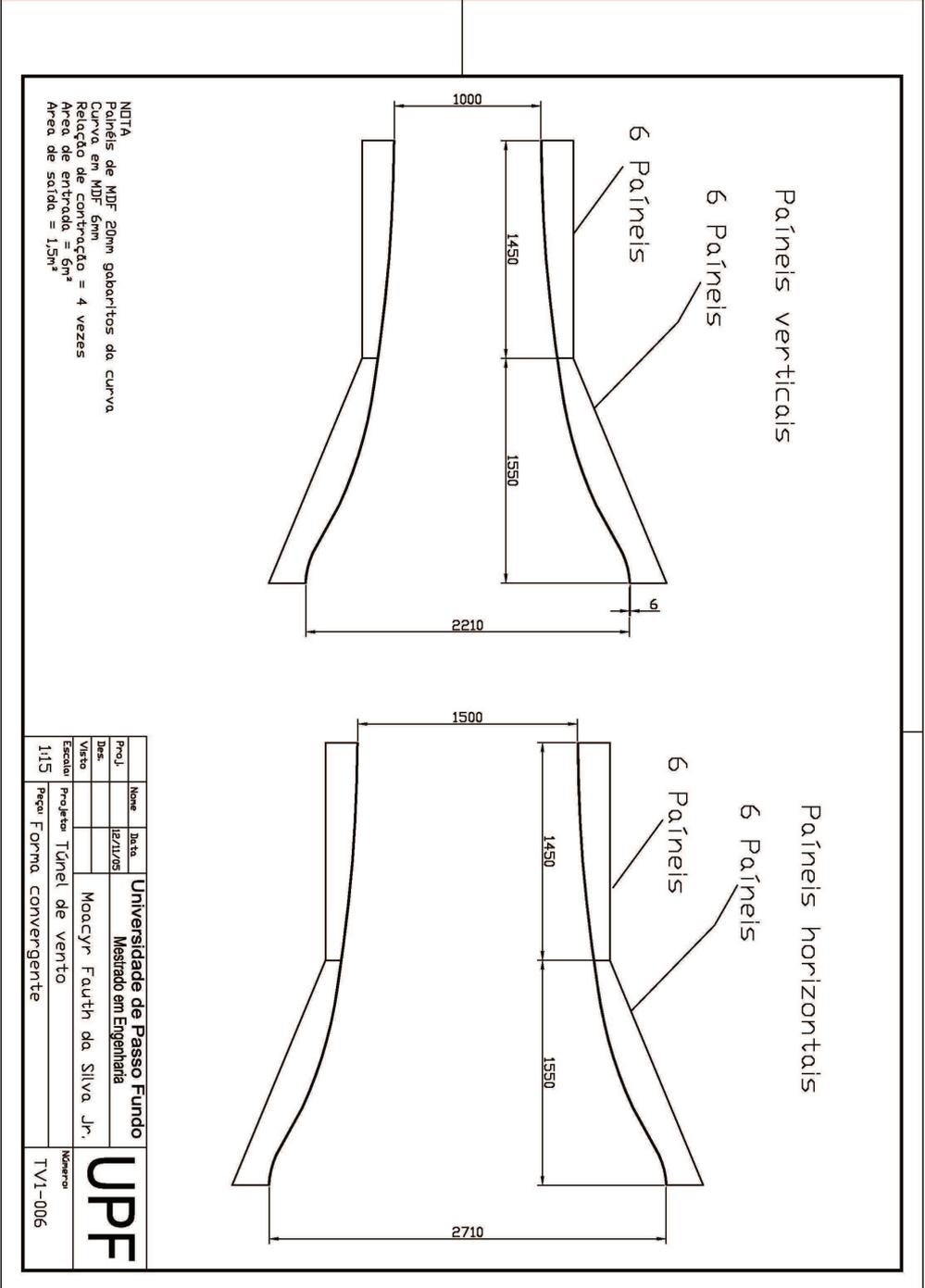
Proj.	Nome	Inst.	Universidade de Passo Fundo
Des.	12/11/05		Mestrado em Engenharia
Visto			Moacyr Fauth da Silva Jr.
Escala	Projeto	Túnel de vento	
1:20	Peça	Câmara de estabilização	

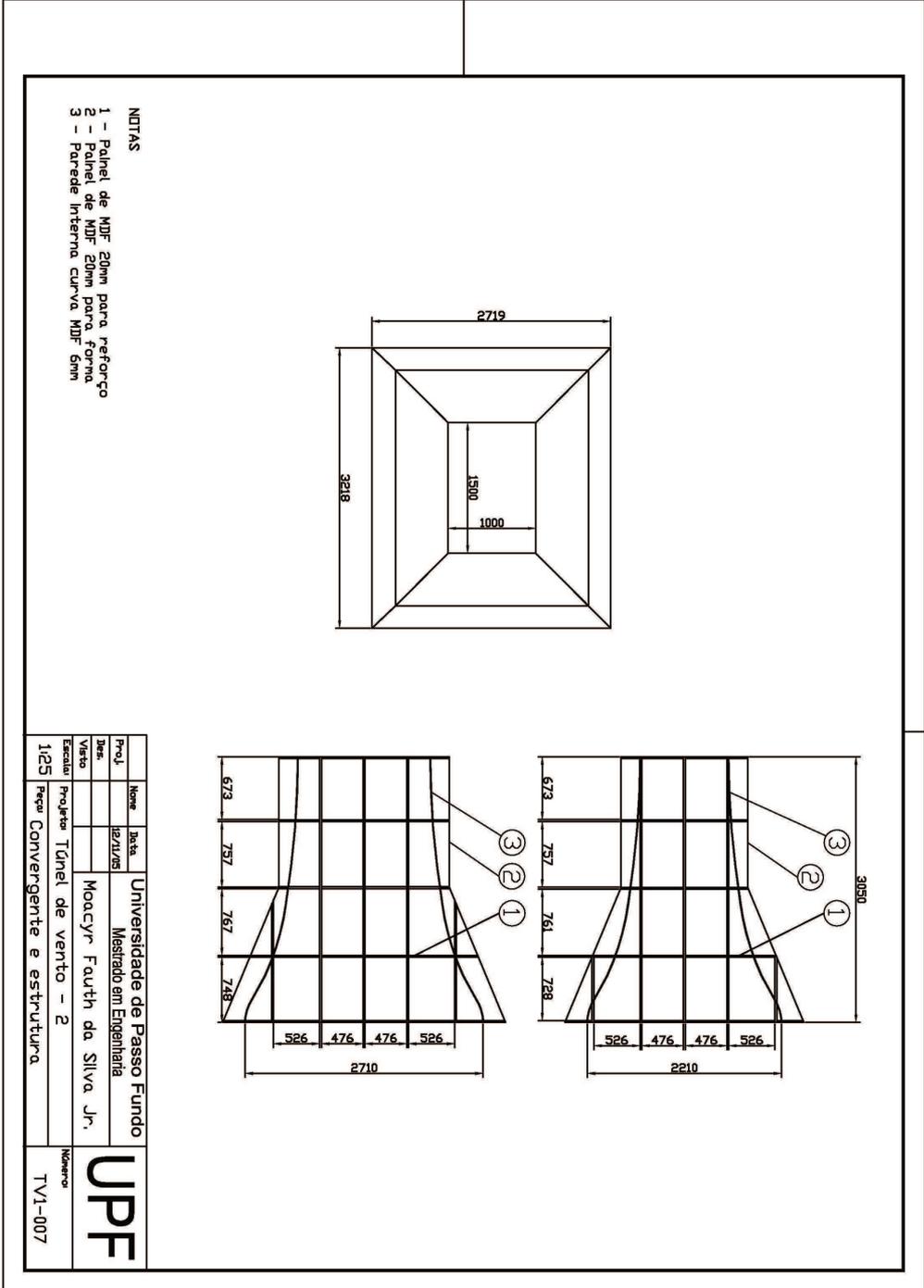
UPF

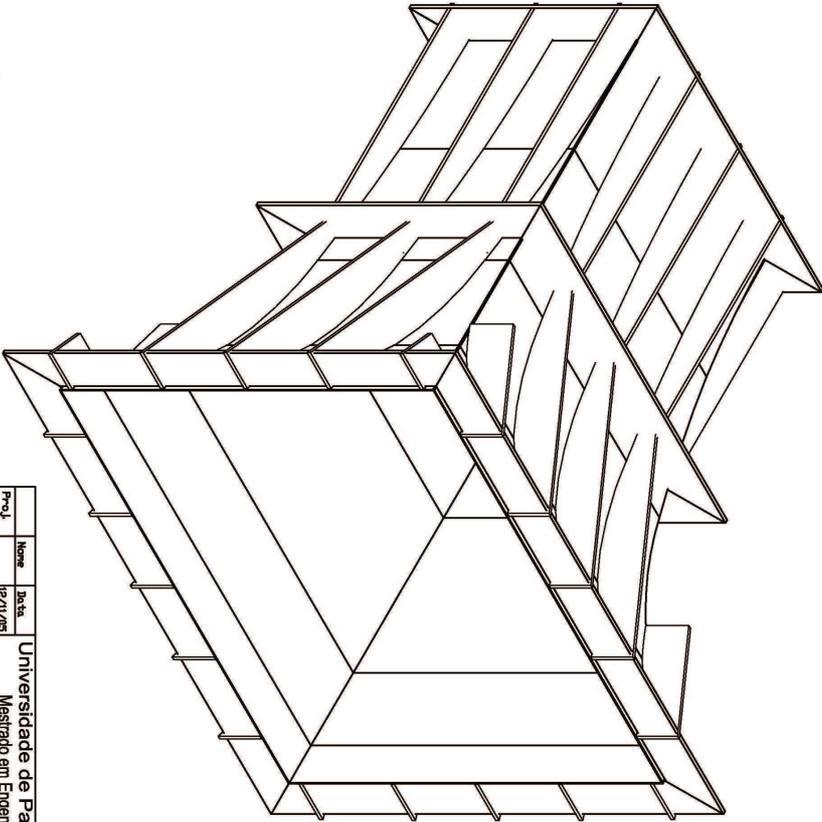
Número
 TV1-004

<p>NOTAS</p> <p>1 - Parede de MDF 20mm Lateral com dobradiça na parte inferior e fecho rápido na parte superior para remoção e limpeza das telas</p>				<p>Nome</p> <p>Universidade de Passo Fundo</p>	
				<p>Data</p> <p>12/11/05</p>	
<p>Proj.</p> <p>12/11/05</p>		<p>Mestrado em Engenharia</p>		<p>UPF</p>	
<p>Des.</p>		<p>Moacyr Fauth da Silva Jr.</p>		<p>Número</p> <p>TV1-004A</p>	
<p>Visão</p>		<p>Projeto Túnel de vento</p>		<p>1:20</p>	
<p>Escala</p>		<p>Peça Câmara de estabilização</p>			







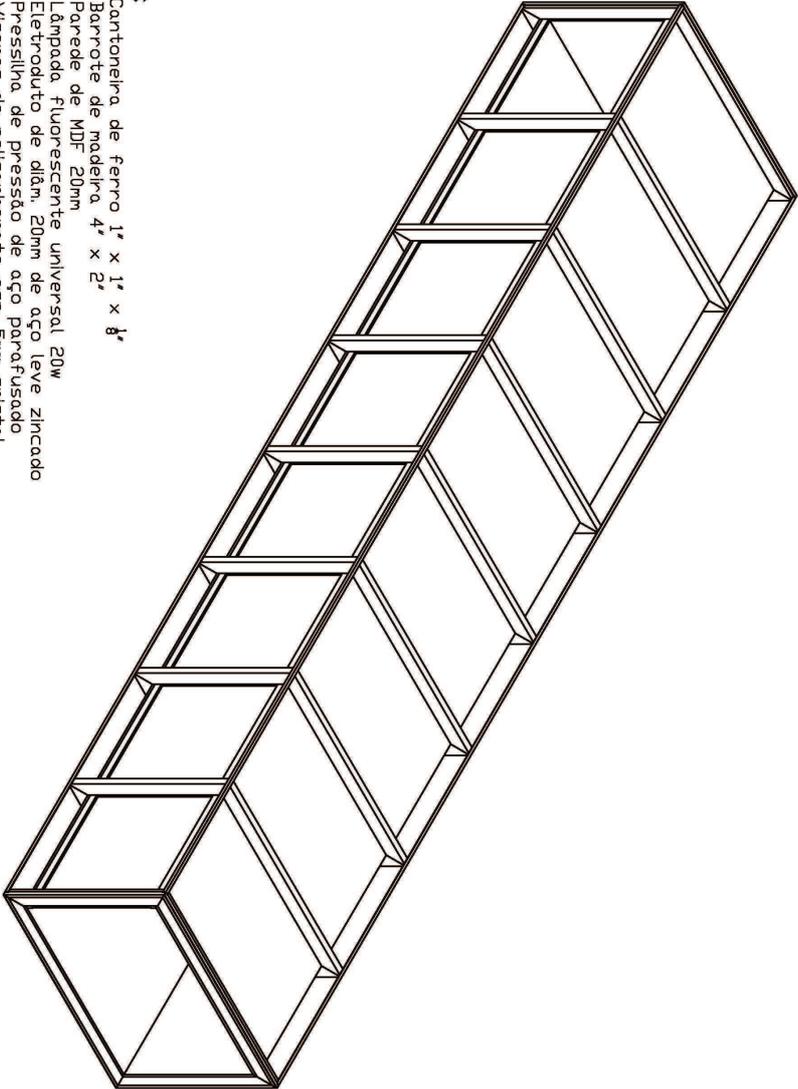


- NOTAS
- 1 - Painel de MDF 20mm para reforço
 - 2 - Painel de MDF 20mm para forma
 - 3 - Parede interna curva MDF 6mm

Proj.	Nome	Data	Universidade de Passo Fundo
Des.	IBRAMS		Mestrado em Engenharia
Auto.			Moacyr Fauth da Silva, Jr.
Escaliv.	Projeto	Túnel de vento - 2	
145	Projeto	Convergente e estrutura	

UPF

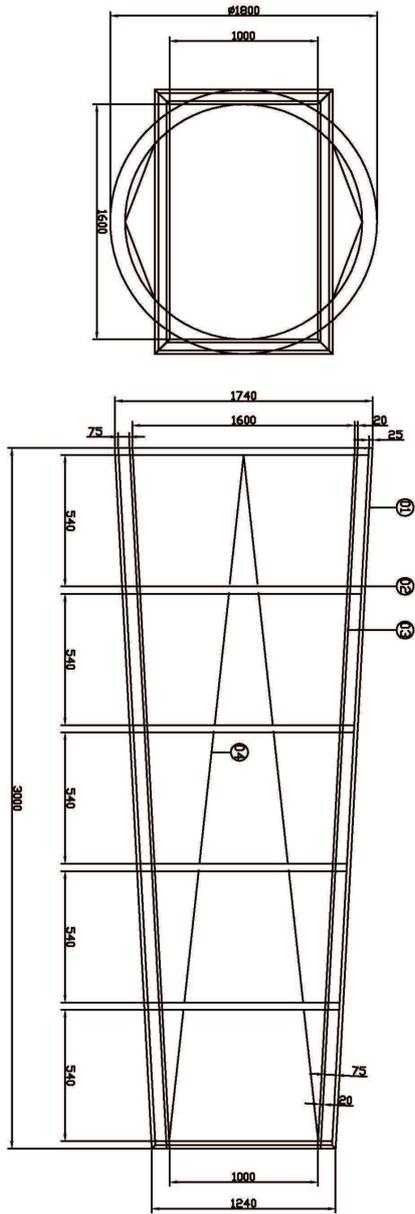
Número
TV1-007A



NOTAS

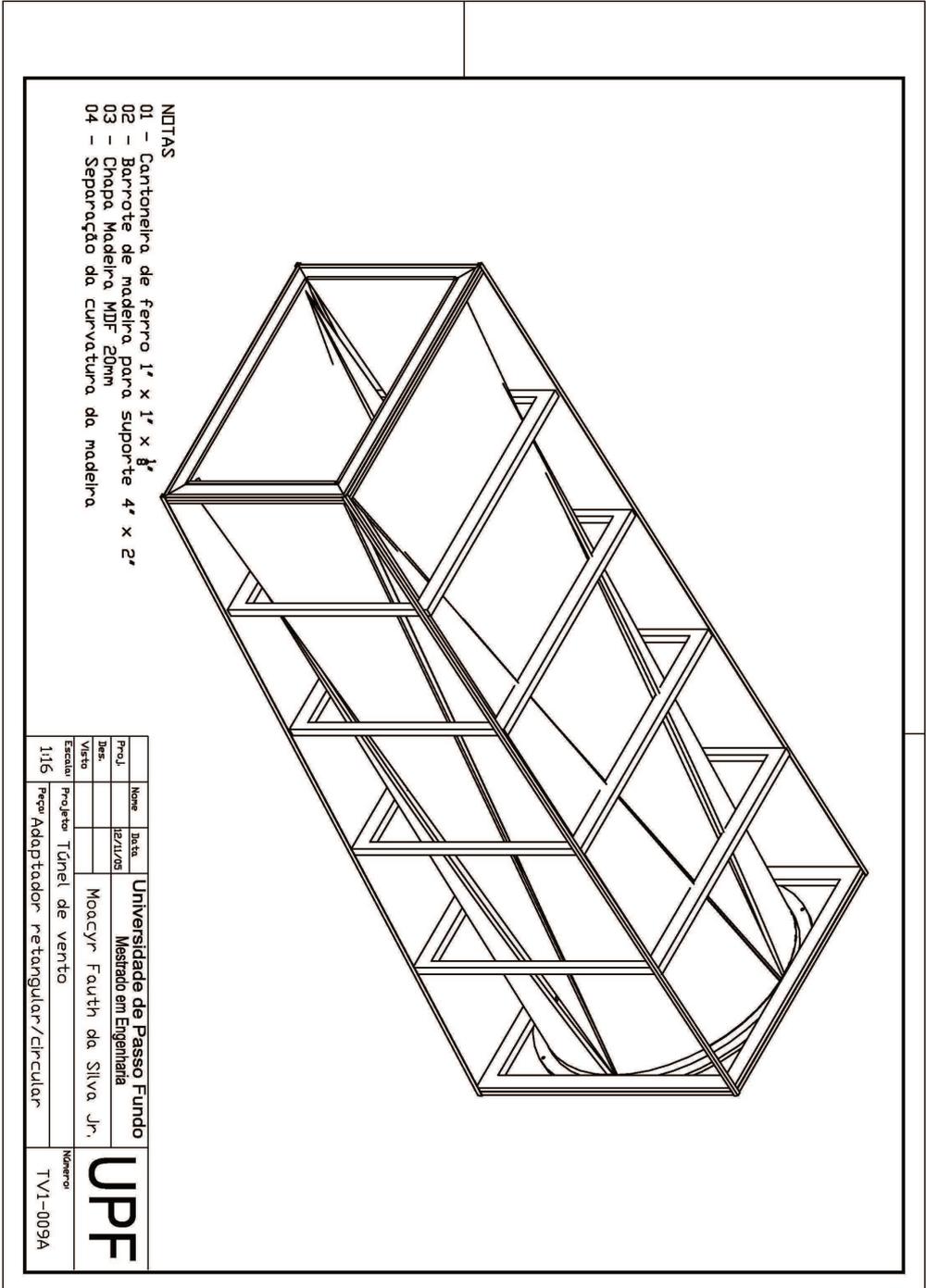
- 01 - Cantoneira de ferro 1" x 1" x 1/8"
- 02 - Barrote de madeira 4" x 2"
- 03 - Parede de MDF 20mm
- 04 - Lâmpada fluorescente universal 20W
- 05 - Eletroduto de diam. 20mm de aço leve zincado
- 06 - Pressilha de pressão de aço para-fusado
- 07 - Visores de policarbonato esp. 5mm cristal
incolar com 920mm x 920mm
- 08 - Detalha do encaixe do visor na lateral
- 09 - Mesa giratória localizada no início e fim da seção
- 10 - Caixa de ponto de iluminação longa de 100 x 100 x 150
Largura de saída aumentada para 1600mm devido a um
ângulo de 0,3º em cada parede do início por o final.

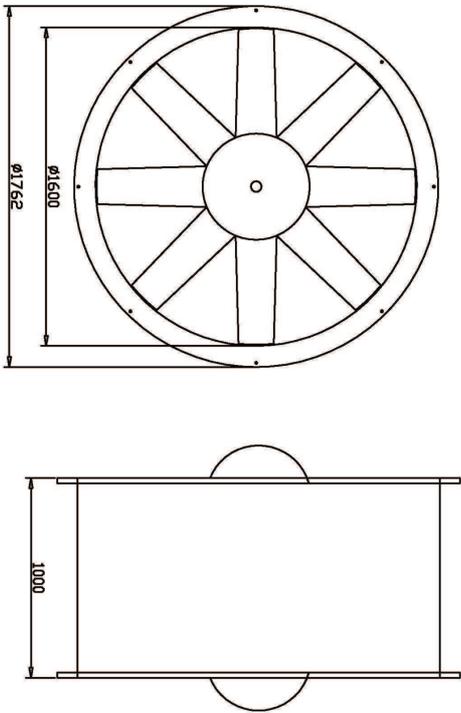
Proj.	Nome	Instituição	UPF Universidade de Passo Fundo Mestrado em Engenharia
Des.			
Visto			Moacyr Fauth da Silva Jr.
Escala	Projeto	Túnel de vento	
1:15	Papel	Barricada de teste	Numero TV1-008A



- NOTAS**
- 01 - Cantoneira de ferro 1' x 1' x 1/8"
 - 02 - Barrote de madeira para suporte 4' x 2"
 - 03 - Chapa Madeira MDF 20mm
 - 04 - Separação da curvatura da madeira

Nome	Universidade de Passo Fundo	UPF
Data	12/11/05	
Proj.	Mestrado em Engenharia	Número TVI-009
Des.	Moacyr Fauth da Silva Jr.	
Visão		
Escala	Projeto Túnel de vento	
1:16	Peça Adaptador retangular/circular	

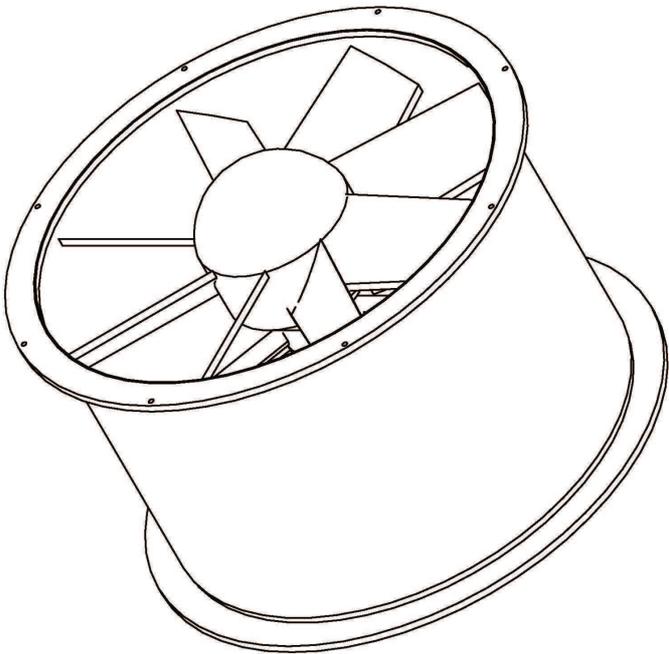




PAS ILUSTRATIVAS

Notas
 Estrutura em Chapa de ferro e ventilador adquirido e montado pelo fabricante
 Ventilador Axial modelo AVR-AL ARRANJ0 4 TAM. 1600 HHH 0tam
 Peso 453 Kg s/ motor

Proj.	Nome	Data	Universidade de Passo Fundo Mestreado em Engenharia	UPPF
Des.		12/11/05		
Visão				
Escala	Projeto	Túnel de vento	Moacyr Fauth da Silva Jr.	Número TV1-010
1:10	Peço	Ventilador		



Notas
 Estrutura em Chapa de ferro e ventilador adquirido e montado pelo fabricante
 Ventilador Axial modelo AVR-AL ARRANJ0 4 TAM, 1600 HMM Dtam
 Peso 453 Kg s/ motor

Proj.	Nome	Data	Universidade de Passo Fundo Mestrado em Engenharia
Des.	18/11/05	Moacyr Fauth da Silva Jr.	
Visto			
Escala	Projeto	Túnel de vento	UPF Número TV1-010A
1:10	Peça	Ventilador	

3.3 Projeto da segunda versão do túnel de vento de CLA

O projeto da segunda versão do túnel de vento de CLA desenvolvido neste trabalho é um túnel do tipo soprado, com ventilador centrífugo na entrada.

3.3.1 Circuito aerodinâmico e geometria da segunda versão do túnel de vento de CLA

A seguir é apresentado o circuito aerodinâmico e a geometria (forma e dimensões) do projeto da segunda versão do túnel de vento de CLA, elaborado nesta dissertação:

- Ventilador centrífugo Otam, tipo Aerofoil, velocidade de rotação: 754 rpm, ganho de pressão estática: 80mmca. As dimensões na seção de saída do ventilador são 1,50 m de largura e 1,00m de altura. A velocidade média do ar na saída é 16m/s, para uma vazão de 37,5m³/s. O ventilador foi escolhido de tal maneira que satisfaça as exigências de vazão e salto de pressão a ser fornecido ao túnel, e que sua seção e velocidade de saída fossem o mais próximas das dimensões e velocidade desejadas na câmara de ensaio (dimensões desejadas: 1,50m x 1,00m; velocidade de projeto desejada: 25m/s). O ventilador será acionado por um motor elétrico de 75 Cv, 4 pólos, tipo 75 - TFVE, com controle de velocidade feito por inversores de frequência variável, Danfoss, modelo 5062.
- Junta de lona para evitar a transmissão de vibrações geradas pelo conjunto propulsor;
- Câmara de estabilização do escoamento: composta por uma colméia e duas telas uniformizadoras, alojadas em gavetas removíveis. A colméia está constituída por células circulares com diâmetro interno $d = 40$ mm e comprimento $l = 0,30$ m. As duas telas, possuem diâmetro do arame $d = 2$ mm, e passo ou malha $l = 12$ mm, resultando então $\beta = 0,6944$. O espaçamento entre telas e entre a primeira tela e a colméia, foi adotado igual a 0,36 m. A câmara possui mais duas gavetas para os dispositivos de simulação (grelhas, etc.). O comprimento total da câmara de estabilização é 2,22 m.
- Câmara de ensaio: de seção retangular, com 1,50m de largura e 1,00m de altura no início, e de 1,60 m de largura e 1,00 m de altura na saída da câmara. A câmara é projetada com as paredes laterais levemente divergentes (ângulo total de divergência igual a 0,6°, aproximadamente), para compensar o gradiente

longitudinal de pressões. O comprimento da câmara é 9,00m. Resulta, então, uma relação comprimento / altura da câmara igual a 9. O ventilador centrífugo adotado permite atingir uma velocidade de 16 m/s, na condição de túnel em vazio. Foram projetadas duas mesas de ensaio de 1,00 m: uma delas localizada a 3,00 m do início da câmara e a outra a 1,50 m da saída. Na seção de saída da câmara foi prevista uma tela “Otis” de proteção, com malha 25mm e arame 2,0mm ($\beta=0,8464$).

3.3.2 Projeto executivo da segunda versão do túnel de vento de CLA

Nas pranchas, Fig. 30 (TV2- 001) a Fig. 38 (TV2- 007), é apresentado o projeto executivo do segundo túnel de vento. Nessas pranchas, além da geometria do túnel, são apresentados os materiais a serem empregados na construção do túnel, suas especificações, etc.

3.3.3 Estimativa da performance da segunda versão do túnel de CLA

O seguinte projeto estará sujeito às seguintes condições iniciais:

a)-condições atmosféricas:

- pressão, aproximadamente de 941mbar ou 706 mm de Hg;
- temperatura média, cerca de 20°C;
- massa específica do ar, $\rho = 1,19\text{Kg} / \text{m}^3$;
- viscosidade dinâmica do ar, $\mu = 1,84 \times 10^{-5} \text{ m}^2 / \text{s}$;
- viscosidade cinemática do ar, $\nu = 1,55 \times 10^{-5} \text{ m}^2 / \text{s}$;
- velocidade do som no ar, $v = 343,2 \text{ m} / \text{s}$.

b)–seção de testes de seção quadrada:

- velocidade do fluxo, $V = 24,3 \text{ m/s}$;
- medidas da largura , $l_1 = 1,00 \text{ m}$, altura $l_2 = 1,50 \text{ m}$;
- medida do comprimento, $L = 9 \text{ m}$;
- área inicial da seção transversal, $A = 1,50 \text{ m}^2$;
- diâmetro hidráulico, determinado por semelhança de área, pela equação (2.38):

$$D_h = 1,20\text{m}$$

c)-cálculos preliminares:

- vazão volumétrica:

$$Q = 1,5m^2 \times 24,3m/s = 36,45m^3/s$$

- vazão de massa, pela equação (86), tem-se:

$$m' = 1,19Kg/m^3 \times 1,5m^2 \times 24,3m/s = 43,38kg/s$$

- número de Reynolds, pela equação(2.35), tem-se:

$$R_e = 2,00 \times 10^6$$

- pressão dinâmica, pela equação (2.6), tem-se:

$$q = 333,63N/m^2$$

- número de Mach, tem-se:

$$M = \frac{24,3m/s}{343,2m/s} = 0,0708$$

- Junta anti-ruído flexível, segundo Souza et al. (2005), admite-se, uma rugosidade relativa (ϵ / D) de 3×10^{-3} , com as possíveis ondulações da lona, a ser utilizada, com um número de Reynolds de $Re = 1,94 \times 10^6$, pelo fator médio de atrito de Darcy – Weisbach e Colebrook e White (1938 apud GORECKI, 1998), a $f \approx 0,027$, pelas equações (2.36 e 2.38), tem-se: $k = 0,005$.

- colméia, o qual retira os vórtices do escoamento, mantendo-os em única direção, a razão entre o diâmetro hidráulico é igual a 7,5, com um comprimento de 30 cm, um diâmetro de 40 mm para cada tubo de PVC, com parede de 1,6 mm de espessura, uma porosidade de 83,43%, com 870 tubos, instalados na câmara de estabilização, antes das telas e do convergente, um $k = 0,30$, segundo Lumley (1964 apud GORECKY, 1998), Prandtl (1933), Souza et al. (2005), Stathopoulos et al. (1984), Mehta e Brandshaw (1979), Loehrke e Nagib (1976), Vickery (1974), Holmes (1977), Greenway e Wood (1979), Lumley e McMahon (1967, apud GORECKY, 1998);

- tela de arame retificadora, a qual melhora sensivelmente o perfil da velocidade, corrigindo a direção do fluxo, a intensidade da componente de turbulência, da componente

transversal. Calcula-se, $k_{total} = 1,93$, pelas equações (2.10), (2.12), (2.13), (2.14), (2.15) e (2.17), segundo Souza et al. (2005), Stathopoulos et al. (1984), com o método aproximado de Davis (1963), chegando-se a um diâmetro do arame de 2,00 mm, uma malha de 12 mm e uma porosidade β_s de 0,6944 e σ_s de 0,3056;

- câmara de estabilização, segundo Souza et al. (2005), admite-se, uma rugosidade relativa (e / D) de 3×10^{-3} , com as possíveis ondulações da madeira tipo MDF, a ser utilizada, com um número de Reynolds de $Re = 2,0 \times 10^6$, pelo fator médio de atrito de Darcy – Weisbach e Colebrook e White (1938 apud GORECKI, 1998), a $f \approx 0,0262$, pelas equações (2.36) e (2.38), tem-se: $k = 0,051$.

- seção de testes, segundo Souza et al. (2005), admite-se, uma rugosidade relativa (e / D) de 3×10^{-3} , com as possíveis ondulações da madeira tipo MDF, a ser utilizada, com um número de Reynolds de $Re = 2,0 \times 10^6$, pelo fator médio de atrito de Darcy – Weisbach e Colebrook e White (1938 apud GORECKI, 1998), a $f \approx 0,027$, após sete iterações, assim, pelas equação (2.38), tem-se: $k = 0,20$.

- descarga direta para a atmosfera, $k = 1,00$.

e)-somatório dos coeficientes de perda k:

$$k_{total} = 3,48.$$

f)-a potência aerodinâmica do túnel de vento a ser fornecida pelo ventilador axial, será:

$$P = k_{total} \times q \times Q = 42.319,63 \text{ ou } 43,32 \text{ kW}$$

g)-considerando para o ventilador comercial, um rendimento de 0,8 ou 80%, tem-se:

$$P_{ef} = \frac{P}{0,8} = 52,90 \text{ kW}$$

h)-a diferença de pressão que o ventilador centrífugo deverá fornecer, será:

$$\Delta p_v = \frac{P_v}{Q} = k_{total} \times q = 1161,03 Pa \text{ ou } 116,10 \text{ mm de coluna de água};$$

i)- a potência do ventilador em Cv será:

$$P_v = 71,90 \text{ Cv mínimos ou } P_v = 75 \text{ Cv comercial};$$

j)- a tabela 4, estão indicados os coeficientes de perda de carga local (k_i) referidos à pressão dinâmica local (q_i), os coeficientes de perda de carga (k_i), referidos à pressão dinâmica de referência (q_{ref}), correspondente à seção de testes, como também o coeficiente total (k_{total}).

Tabela 5 – Coeficientes de perda da segunda versão do túnel de vento de CLA

Item	Função	Comprimento L_i (m)	Área $A_i(m^2)$	K_i	q_i/q_{ref}	K_i
1	Junta anti-ruído	0,50	1,50	0,005	1,00	0,004
2	Colméia	0,30	1,50	0,30	1,00	0,30
3	Telas	-	1,50	1,60	1,00	1,93
4	Câmara de estabilização	2,50	1,50	0,057	1,00	0,051
5	Seção de testes	8,00	1,50	0,20	1,00	0,197
6	Desc. P/atm.	---	1,50	1,00	1,00	1,00
K_{total}						3,48

Para o túnel em vazio obtém-se nas condições de referência, um coeficiente de perda total $K_{total} = 3,16$.

3.3.4 Linha piezométrica da segunda versão do túnel de vento de CLA

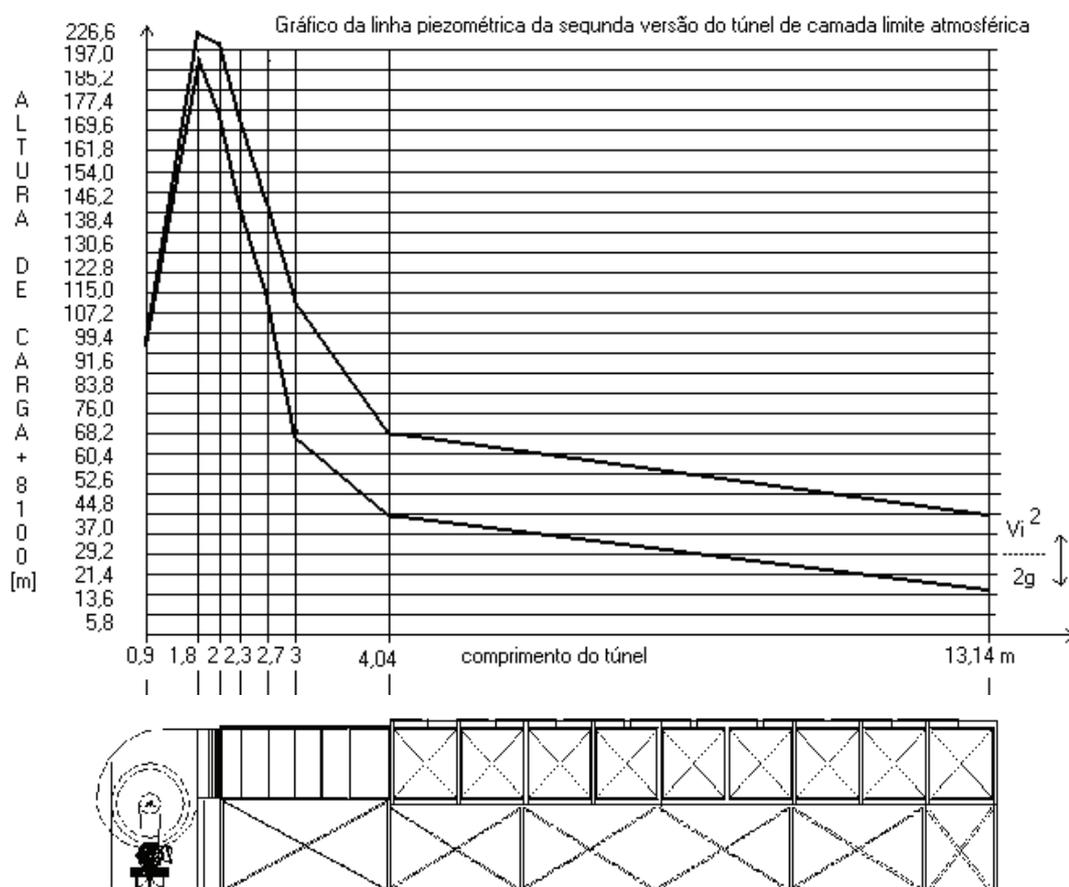


Figura 31 – Linha piezométrica da segunda versão do túnel de vento de CLA

Tabela 6 – Dados do gráfico da curva piezométrica da segunda versão do túnel de vento de CLA

d [m]	P [N/m ²]	ΔP [N/m ²]	V [m/s]	LE [m]	LP [m]	$V^2/2g$
0,90	95.592,40	0,00	-----	8.196,91	8.196,28	-----
1,80	96.478,40	886,00	24,3	8.326,60	8.296,47	30,12
2,00	96.476,43	1,47	24,3	8.298,00	8.267,87	30,12
2,30	96.376,34	100,69	24,3	8.269,40	8.239,27	30,12
2,66	96.072,87	303,47	23,58	8.240,71	8.212,34	28,37
3,02	95.787,65	285,22	22,86	8.213,69	8.187,03	26,66
4,04	95.772,59	15,06	22,88	8.168,58	8.141,72	26,66
13,14	95.713,54	59,05	22,15	8.141,44	8.116,41	25,03

No gráfico piezométrico, a linha superior é a linha de energia e a linha inferior é a linha piezométrica. No gráfico foram descontados 8100m da linha de curva por não haver espaço suficiente.

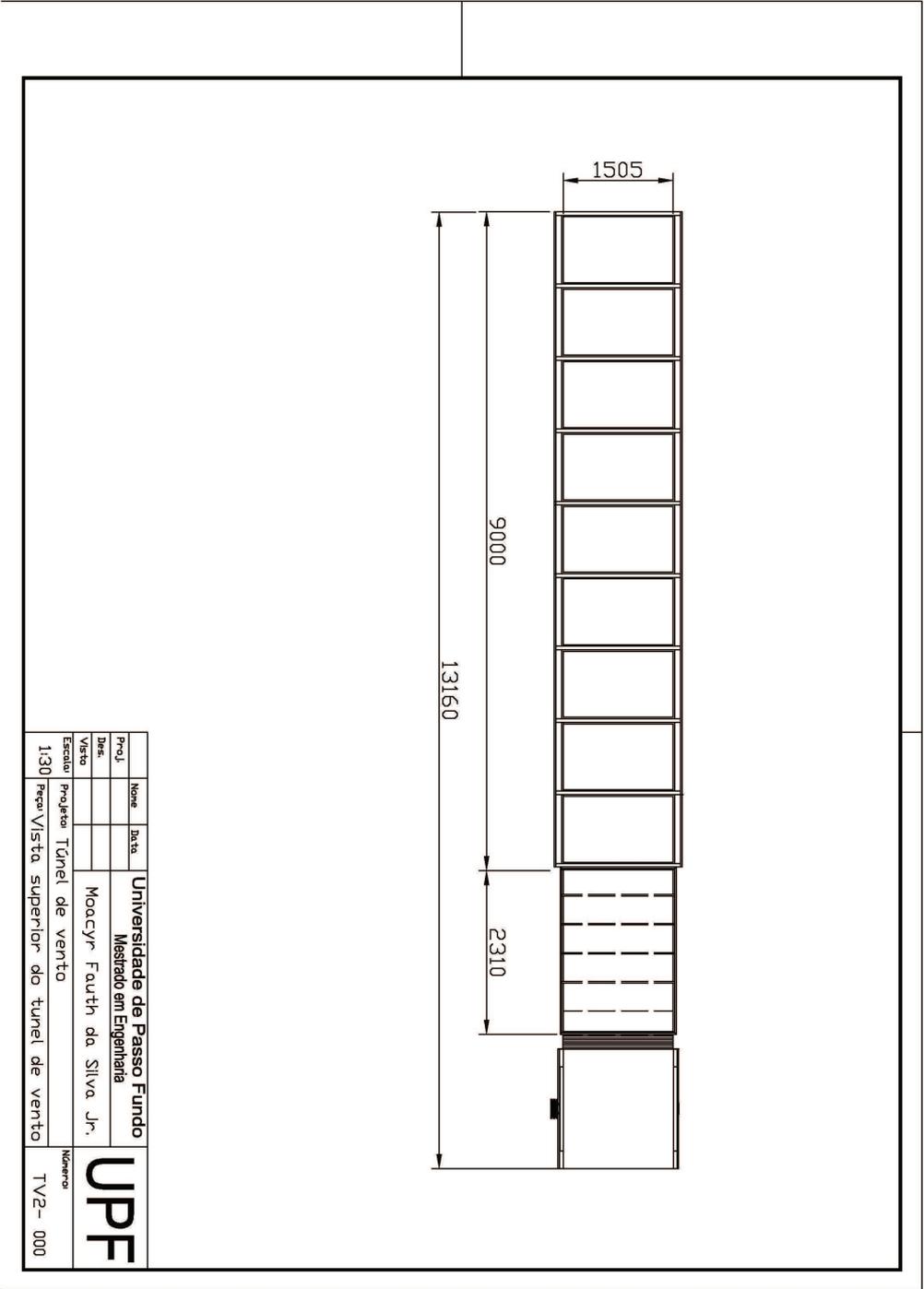
3.3.5 Orçamento da segunda versão do túnel de vento de CLA

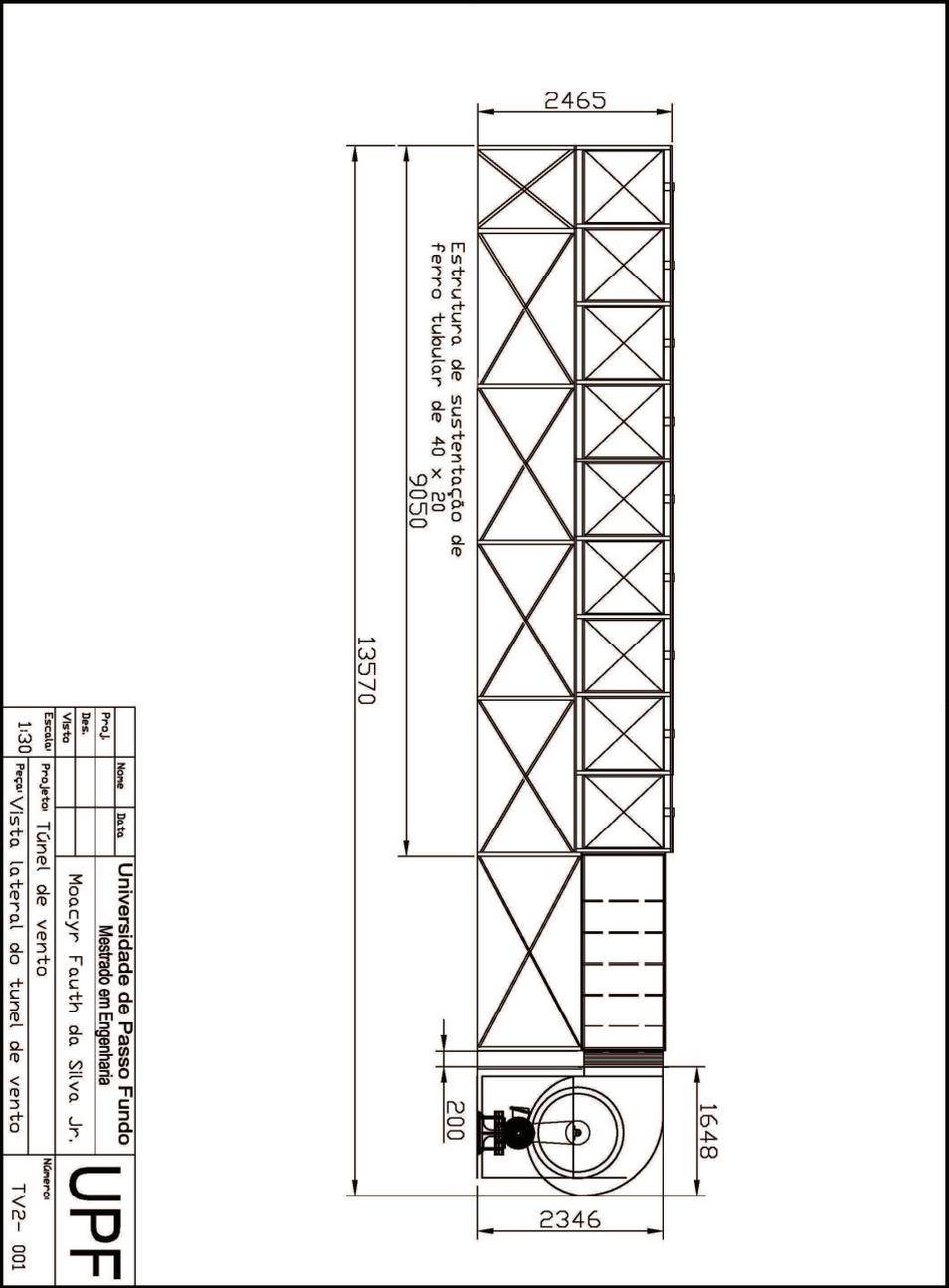
Tabela 7 – Orçamento da segunda versão do túnel de vento de CLA

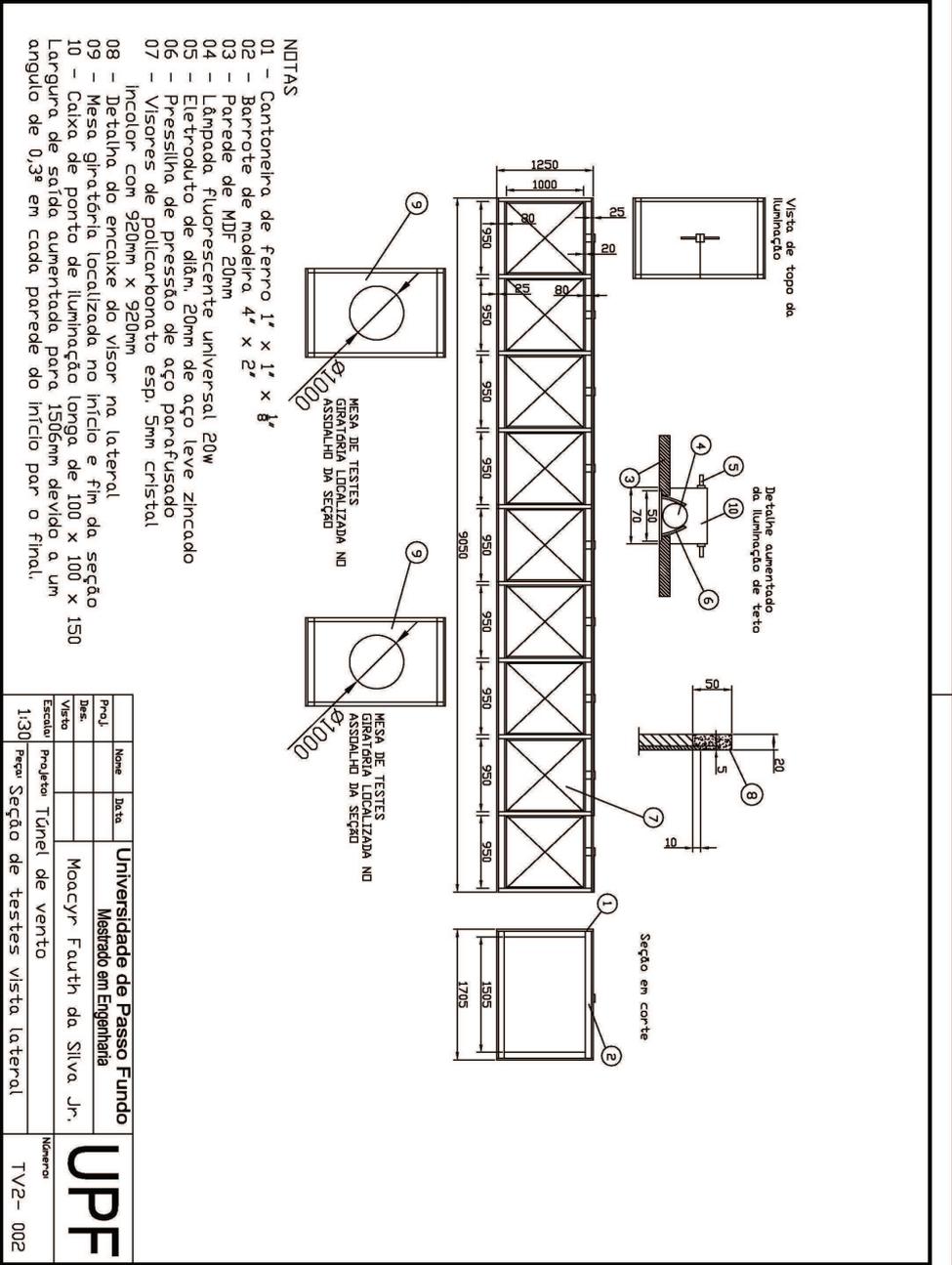
Quantidade	Material	Fornecedor	Preço unitário	Preço Total
2	Latas de verniz para madeira	Garbelotto	128,40	256,80
20	Chapas de MDF de 20 mm de espessura	Garbelotto	142,80	2.856,00
28	Barrotes de 3m de madeira 100mmx50mm	Madeira Ianinski	24,20	677,60
6	Cx. parafusos 50mm x3,5mm cb.chata aço	Garbeloto	33,00	198,00
1	Cx. parafusos 20mm x3,0mm cb.chata aço	Garbelotto	19,00	19,00
20	Barras, 6m cantoneira, ferro 25mmx25mm	Gerdau S.A.	23,34	466,80
1	Inversor de frequência Var. mod.VLT5062	Danfoss	29.830,00	29.830,00
2	Kg var.solda ferro 2,5mm tipo OK	Marekis	8,00	16,00
250	Parafusos 25mm x 6mm,milim. c/porca aço	Zamil	0,20	50,00
1	Kg de Arruelas 15mm x 6,4mm, aço	Zamil	27,95	27,95
2	Latas 18 Kg. de cola madeira	Garbeloto	124,00	248,00
1	Ventilador com motor 75Cv, duplo tipo RLD	Otam	26.879,00	26.879,00
250	Arruelas de pressão 11,5mm x 2mm espelho	Zamil	0,037	9,25
10	Cx.sexavada ponto luz no teto ferro 150mm	Águaluz	1,50	15,00
10	Lâmpadas flúor.20W c/reator eletrôn., calhas	Águaluz	33,00	330,00
1/4	Rolo condutor 1,5 mm ² , cor preta, flexível	Eletropasso	40,00	10,00
1/4	Rolo cond. 1,5 mm ² , cor vermelho, flexível	Eletropasso	40,00	10,00
1/4	Rolo condutor 1,5 mm ² , cor azul, flexível	Eletropasso	40,00	10,00
6	Barras eletroduto 20mm aço leve zinc.rosca.	Eletropasso	13,90	83,40
1	Interruptor simples c/ espelho	Águaluz	3,50	3,50
11	Cx. 100mm x50mm, alum. Saída reta 20mm	Eletropasso	5,00	55,00
2	Chapas de policarbonato cristal 4mm	Maffini	1350,00	2700,00
3	Eletroduto de 50mm, PVC rígido c/rosca	Eletropasso	53,00	159,00
4	Luvas p/eletroduto 50mm PVC rígido	Eletropasso	4,90	19,60
3	Curvas p/eletroduto 50mm PVC rígido	Eletropasso	20,70	63,00
3	m ² tela corretora ar. de 0,72 mm, mal.12 mm	VTM	20,00	60,00
6,2	m de lona corrugada emborrachada p/junta	Casa das Borrachas	30,00	186,00
32	Tubo de ferro retangular 50mm x 30mm x2	Gerdau S.A.	46,00	995,00
52	Parafusos 35mm x 6mm c/porca, rosca pol.	Zamil	0,22	11,44
120	Horas de serviço de marceneiro e serralheiro	Douglas	40,00	4.800,00
32	Barras de tubos de PVC, 40 mm, liso	Marcon e filhos	15,40	492,80
40	TOTAL	*****	*****	71.537,30

3.2.6 Desenhos da segunda versão do túnel de vento de CLA

Os Desenhos da segunda versão do túnel de vento encontram-se nas seguintes folhas.



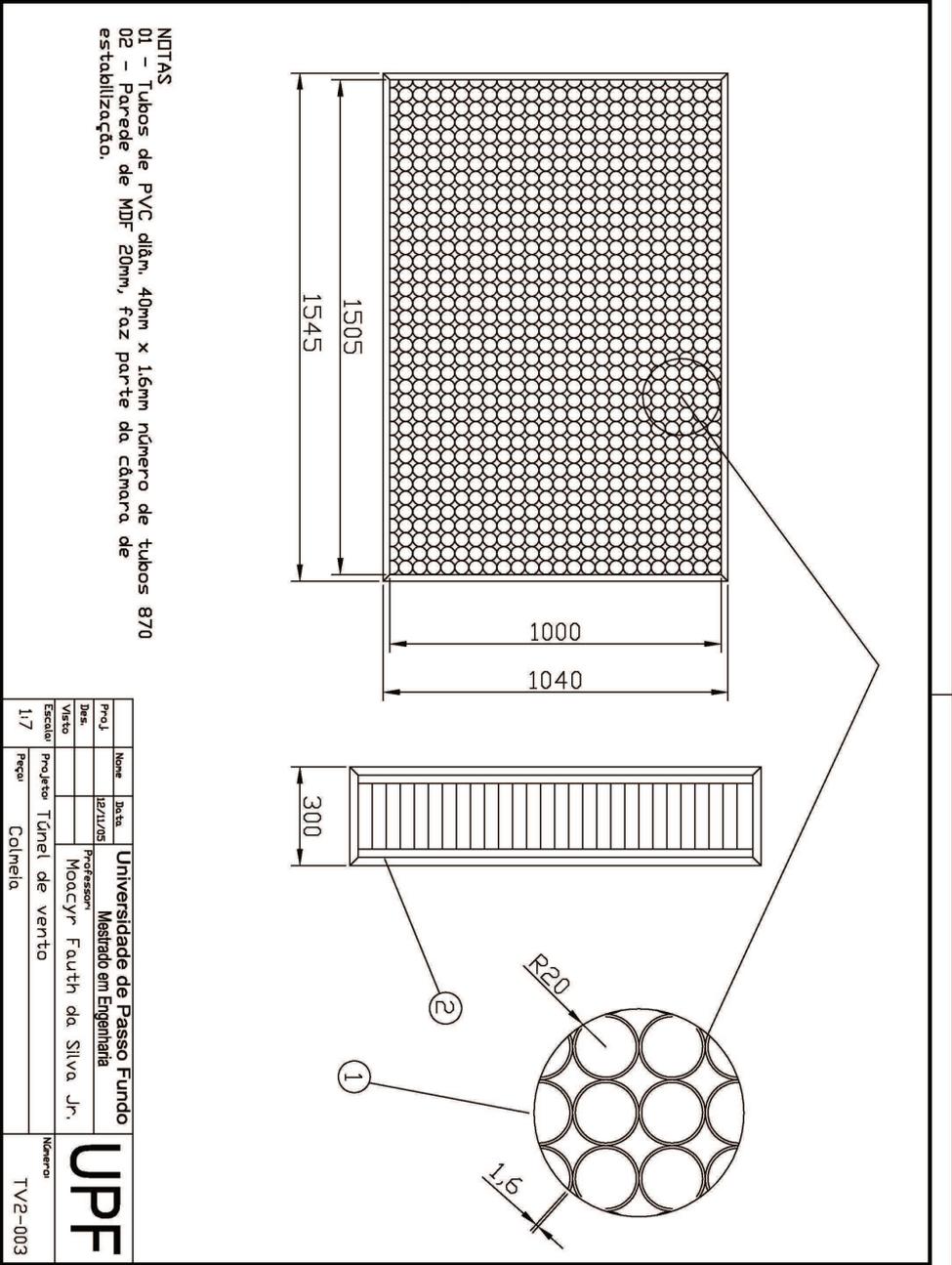


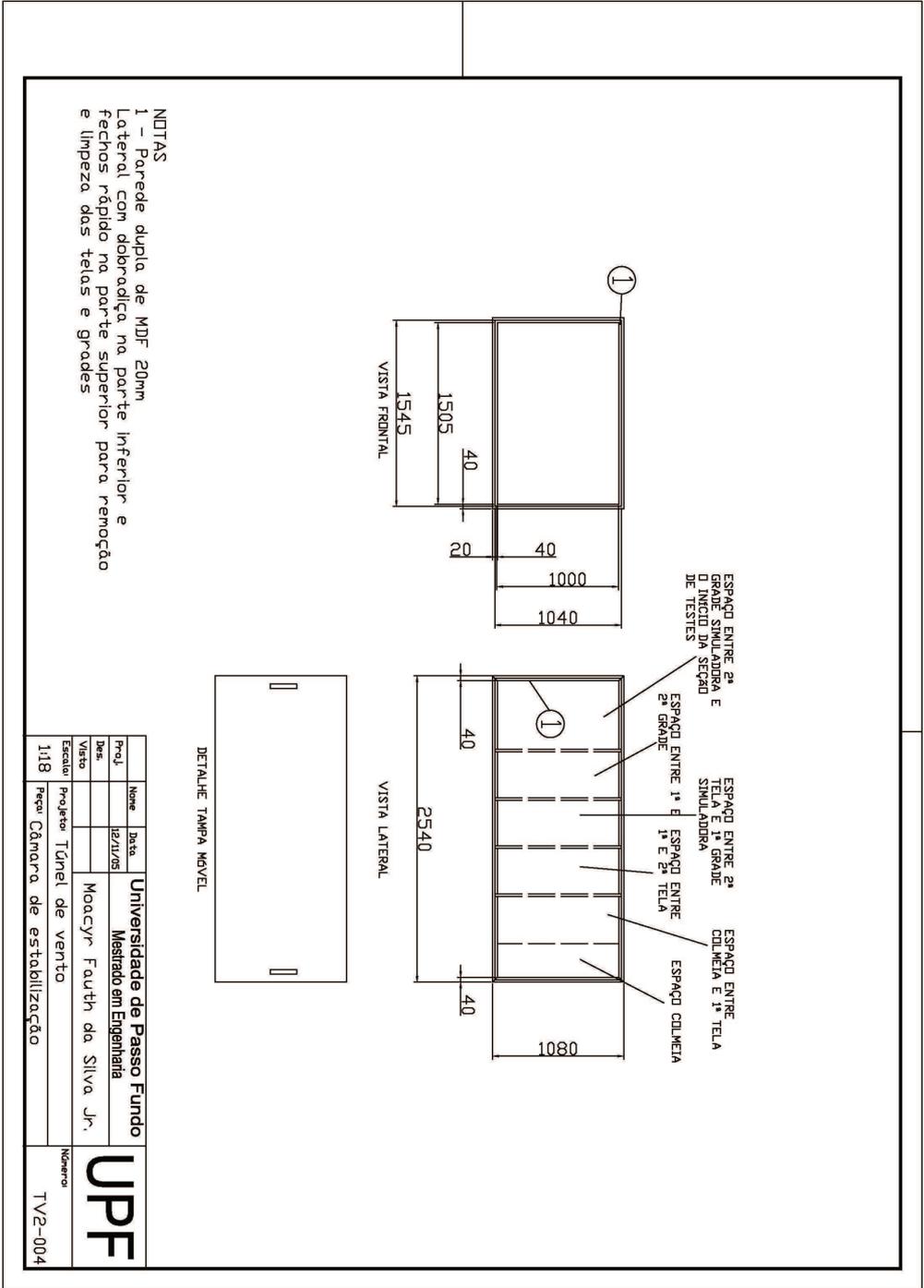


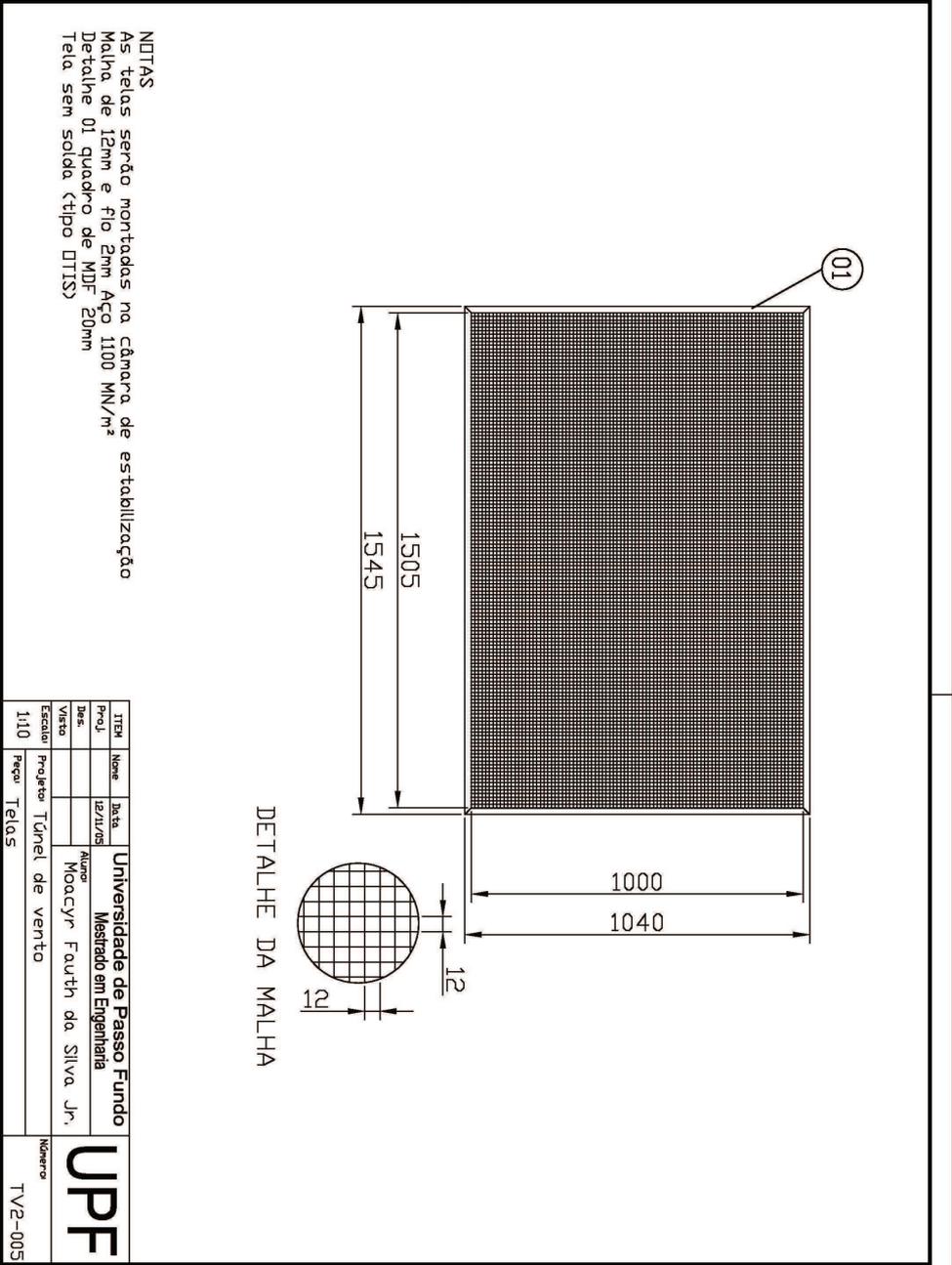
NOTAS

- 01 - Cantoneira de ferro 1" x 1" x 8"
 - 02 - Barrote de madeira 4" x 2"
 - 03 - Parede de MDF 20mm
 - 04 - Lâmpada fluorescente universal 20W
 - 05 - Eletroduto de diâm. 20mm de aço leve zincado
 - 06 - Pressilha de pressão de aço parafusado
 - 07 - Visores de policarbonato esp. 5mm cristal
 - 08 - Incalor com 920mm x 920mm
 - 09 - Detalha do encaixe do visor na lateral
 - 10 - Mesa giratória localizada no início e fim da seção
- Caixa de ponto de iluminação longa de 100 x 100 x 150
 Largura de saída aumentada para 1506mm devido a um
 ângulo de 0,3º em cada parede do início por o final.

Proj.	Nome	Data	Universidade de Passo Fundo Mestrado em Engenharia	UPF
Des.			Moacyr Fauth da Silva Jr.	
Visão				
Escala	Projeto	Túnel de vento		
1:30	Projeto	Seção de testes vista lateral		Numero TV2- 002



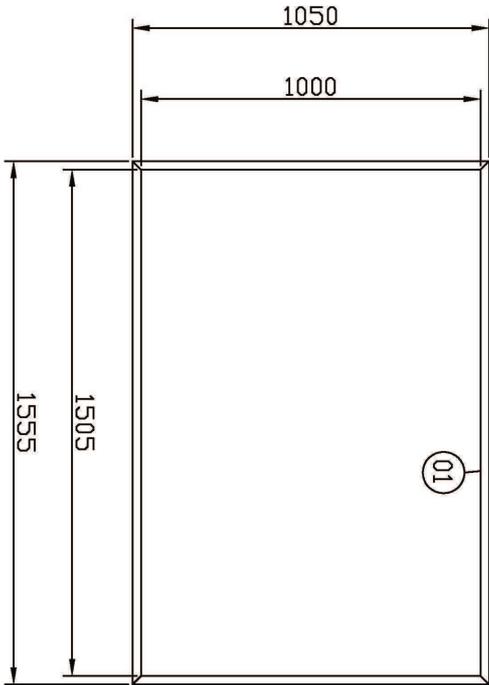




NOTAS
 As telas serão montadas na câmara de estabilização
 Malha de 12mm e fio 2mm Aço 1100 MN/m²
 Derivado 01 quadro de MDF 20mm
 Tela sem solda (tipo DTIS)

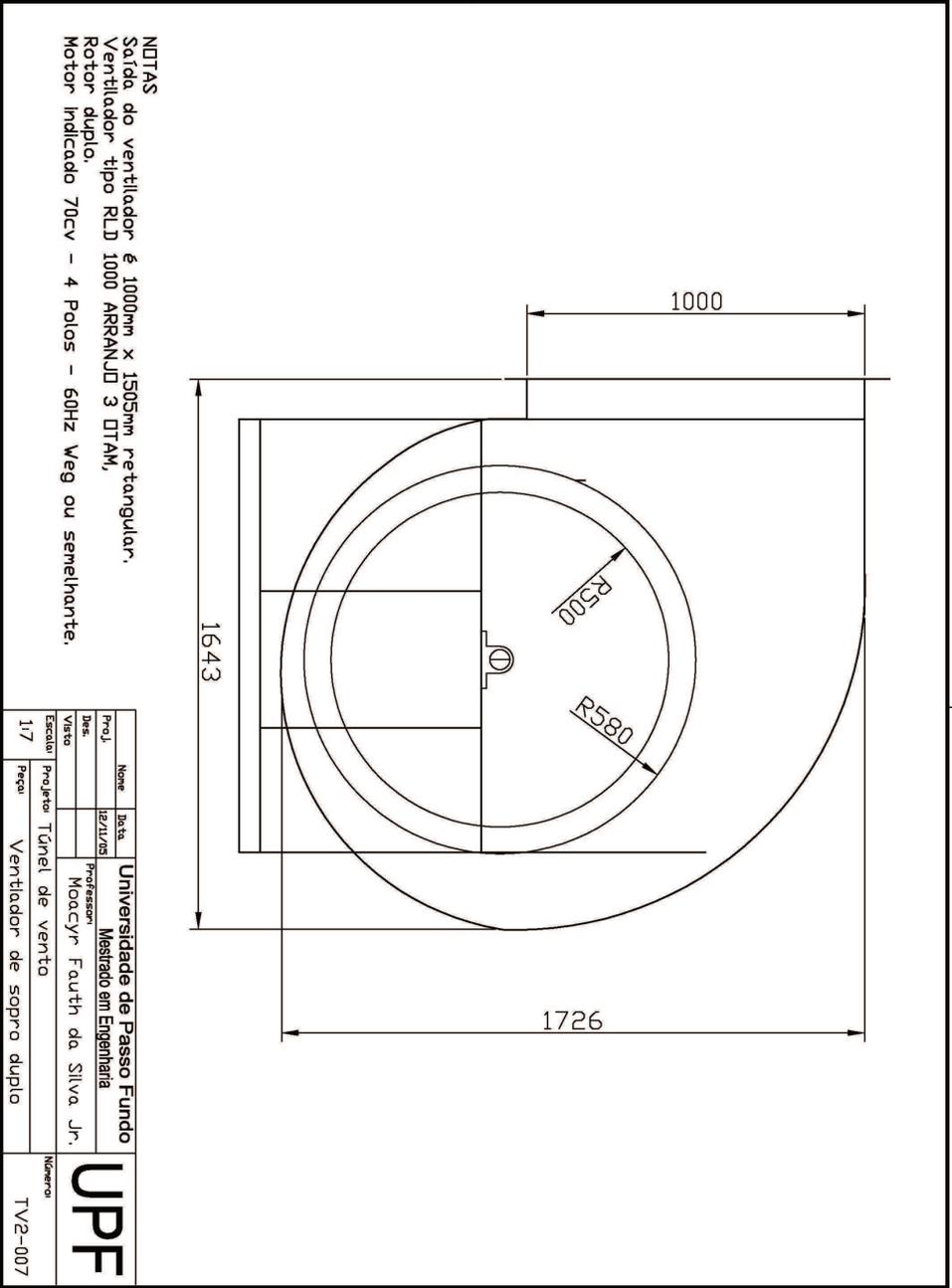
ITEM	Nome	Data	Universidade de Passo Fundo
Proj.		12/11/05	Mestrado em Engenharia
Des.			Moacyr Fauth da Silva Jr.
Visto			
Escala	Projeto	Túnel de vento	
1:10	Paço	Telas	
			Numero
			TV2-005

UPF



NOTAS
 01 - Quadro de cantoneira de ferro 1" x 1" x 3/8"
 02 - Junta flexível de lona emborrachada corrugada esp. 3mm

Nome	Universidade de Passo Fundo	Número
Data	12/11/05	
Prof.º	Professor	UPF
Data	12/11/05	
Visto	Moacyr Fauth da Silva Jr.	TV2-006
Escala	1:7	
Projeto	Túnel de vento	
Peça	Junta anti-vibração	



3.3.7 Comparativo de custos dos dois túneis projetados

Tabela 8 - Comparativo de custos das duas versões do túnel de vento

Custo do primeiro túnel de vento proposto	R\$ 74.459,61
Custo do segundo túnel de vento proposto	R\$ 71.537,30
Diferença entre as duas versões de túneis	R\$ 2.922,31

Verifica-se na tabela 8 acima que o segundo túnel possui um custo menor que o primeiro túnel, essa diferença embora pequena, há uma diferença maior no tamanho das duas versões dos túneis de vento de CLA. O túnel de vento de CLA da segunda versão é de menor tamanho que o túnel de vento de CLA da primeira versão. Assim, a real economia, além do custo é a de espaço físico para a segunda versão do túnel de vento, com uma diferença de 4m a menos, apesar de que o consumo de energia elétrica desse túnel ser maior e a qualidade do escoamento ser pior que a o do túnel de vento de CLA da primeira versão. O custo do ventilador centrífugo da segunda versão do túnel de CLA é maior que o ventilador axial da primeira versão do túnel de vento de CLA, diminuindo a diferença no custo entre as duas versões de túneis de vento de CLA.

Portanto, com uma visão financeira e por espaço físico não disponível, escolhe-se a segunda versão de túnel de vento. Com uma visão de um escoamento de melhor qualidade, de economia de energia elétrica e com uma diferença de apenas 3,92% acima em relação ao outro túnel de vento de CLA, não tendo problemas com espaço físico, escolhe-se a primeira versão do túnel de vento de CLA.

4-CONCLUSÕES

O presente estudo sobre como projetar túneis de camada limite atmosférica, foi levantada a bibliografia sobre túneis de vento e suas partes, seus cálculos e procedimentos de projeto para se obter a informação necessária a fim de conseguir fazer os projetos propostos do túnel de vento de camada limite atmosférico da FEAR.

O projeto das duas versões do túnel de vento de camada limite atmosférico contempla os objetivos da pesquisa, que, sem dúvida, foram atingidos, pois, a partir de uma revisão bibliográfica montou-se um documento com as especificações das diferentes partes de túneis de vento de camada limite atmosférico; definiram-se um circuito aerodinâmico e a geometria (forma e tamanho) de, ao menos duas alternativas de túnel de vento, estabeleceram-se dois projetos do túnel de vento de camada limite atmosférico, seus cálculos, resultados e considerações, incluindo os desenhos das partes do túnel de vento e o orçamento. Desta forma, escolheram-se as duas versões do túnel de vento do tipo aberto. Isso foi decidido em razão da maior vantagem desse tipo de túnel de vento que é o preço menor em relação ao outro tipo, o de circuito fechado e também seu tamanho reduzido.

A primeira versão do túnel de vento possui um bocal ou lábios na entrada para adaptar a entrada do túnel e direcionar o escoamento do ar para dentro do câmara de estabilização. Nesta há uma colméia, logo na entrada do túnel, sendo seguida por duas telas corretoras, situadas, situadas antes da entrada do convergente. Em seguida há o convergente, que foi feito a partir da curva do padrão de Witoszinsky. Este está montado em uma estrutura de madeira com gabaritos, para a conformação do MDF, adotado para a montagem da curva do convergente. A saída do convergente foi acoplada à seção de testes que possui duas mesas de 1000 mm de diâmetro. Na saída da seção de testes há uma transição adaptadora da seção retangular para seção circular a fim de adaptar o ventilador. A razão por que se fez dessa forma é para evitar a necessidade de acrescentar ao túnel, direcionadores para retirar o efeito redemoinho do ventilador dentro da seção de testes do túnel de vento.

A segunda versão possui: um ventilador centrífugo de sopro duplo, uma junta anti-vibração, uma câmara de estabilização que abriga a colméia e as duas telas corretoras que tratam o escoamento reduzindo a turbulência antes de entrar na seção de testes que faz a descarga direta para a atmosfera.

Portanto, sugere-se que para estudos futuros a partir das características dos túneis de vento projetados, desenvolvam-se os tipos de testes e suas limitações.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BARLOW B.J.; RAE W. H.; POPE A. **Low Speed Wind Wúnel Testing**. USA: John Willey & Sons, Inc., 1999.

BLESSMAN, J. **Aerodinâmica das Construções**. 2ª Edição. Porto Alegre: Sagra. 1990.

BLESSMANN, J. **O vento na engenharia estrutural**. Porto Alegre: Editora da Universidade/UFRGS, 166 p., 1995.

BRASSARD, D. **Transformations of Polinomial for a Contraction Wall Profile**. Lakehead University, Ontário, Canada; 2003.

BYRKIN, A. P. et al., **Aerodynamic Design of Nozzles for Subsonic and Transonic Wind Tunnels**. Symposium on Aerodinamics of Wind tunnel Circuits and Their Components. Moscou, Russia, 1996. CP-585.

CERMAK, J.E.. **Wind-tunnel design for physical modeling of atmospheric boundary layers**. Special Volume on Advances in Fluid Mechanics, ASCE, J. Eng. Mech. **107** No. EM3 pp. 623–642,1981.

COLAR, A.R. **The Design of Wind tunnel Fans**. ARC R&M 1889, Aug. 1940.

COUNIHAN, J. **Adiabatic Atmospheric Boundary Layers: A Review and Analysis of Data from the Period 1880-1972**. Atmos. Environ, 1975.

FOX R. W. e MCDONALD A. T. **Introdução à Mecânica dos Fluidos**.5.ed., Trad.: Koury e França . Livros Técnicos e Científicos Editora S.A: Rio de Janeiro, 2001.506 p.

GHILARDUCCI, T., et al., **Diseño y optimización de la contracción de un Túnel de Viento de Baja Velocidad**.Universidad Tecnológica Nacional-Faculdad Regional de Haedo, 1998.

GORECHY, J. P. **Aerodinâmica: Teoria, experimentação e computação**. Palestra/16p./1993.

GREENWAY, M. E.; WOOD, C.J. **The Oxford University 4m x 2m Industrial Aerodynamics Wind Tunnel**. Journal of Industrial Aerodynamics, 4, p. 43-70, 1979.

GUIRGUIS N. M., **Construction and Testing of a Wind Tunnel for In-Door Investigation of Environmental effects on Buildings**. Cairo, 1996.

HUNT J. C. R.; FERNHOLZ H. **Wind –Tunnel Simulation of the Atmospheric Boundary Layer**. A Report on Euromech 50, J. Fluid Mech., v. 70, part 3, p. 543-559, 1975.

JAARSMA, F. **General Design aspects of Low Speed Wind Tunnel**. Symposium on Aerodinamics of Wind tunnel Circuits and Their Components. Moscou, Russia, 1996. CP-585.

JEARY et al.. **Full scale measurements of wind effects on tall buildings**. Department of Building and Construction, City University of Hong Kong, Tat Chee Avenue, Kowloon, Hong Kong, China. . Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 74—76 741—750 (1998). Available online 7 January 2000.

LOREDO - SOUZA, et al. **Simulação da camada limite atmosférica em túnel de vento**. Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, RS, 2004.

LOREDO - SOUZA, et al. **Projeto do túnel de vento FAU-UFRJ**. Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, LAC. Porto Alegre, RS, 2005.

MEHTA R. D. e BRANDSHAW P. **Design Rules for Small Low Speed Wind Tunnels**. The Aeronautical Journal of the Royal Aeronautical Society, Paper No. 718, nov.1979, p. 443-449.

NIEMANN, H. J. **The boudary layer Wind tunnel: an experimental tool in building aerodynamics and environmental engeneering**. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 48, 145161 Elsever. Germany, 1993.

PALUCH, M.Re: **Mensagem pessoal**. Mensagem recebida por e-mail por fauth@upf.br em set. 2006.

PRANDTL, L. **Attaining a Steady Stream in Wind Tunnels**. NACA TM 726, oct. 1933.

RIERA e DAVENPORT. **Wind Effects on Buildings and Structures**. Proceedings of the Jubileum Conference on Wind Effects on Buildings and Structures/Porto Alegre/Brasil/25-29 may 1998. A.A. Balkema/Rotherdam/Brookfield/1998.

SILVANI, M.. **Subsídios para o Projeto de Ventilação Natural em pavilhões Industriais**. Dissertação de Mestrado. Universidade de Passo Fundo (UPF), Passo Fundo, RS, 73 p., 2005.

STATHOPOULOS T. **Design and Fabrication of a Wind Tunnel for Building Aerodynamics**. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, v.16. Amsterdam, 1984, p. 361-376.

VIKERY B. J. **The Design and Performance of a Low-Cost Boudary Layer Wind Tunnel, Proceed**. Of the Second USA – Japan Research Seminar On Wind Effects on Structures, september, p. 99-104, 1974.

WOLF, T. **Design of a variable contraction for a full-scale automotive Wind tunnel.** Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 56. Germany, 1994.

<http://www.ufrgs.br/lac/tunel.htm> - acesso em abril de 2006.

<http://www.ctie.monash.edu.au/hargrave/wenham.html>- acesso em abril de 2006.