

Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Escola de Engenharia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – PPGEC

Simulação Experimental da Interação Vento-Chuva

Henrique Luiz Rupp

Porto Alegre
Outubro de 2010

R946s Rupp, Henrique Luiz
Simulação experimental da interação vento-chuva / Henrique Luiz Rupp. –
2011.

Dissertação(mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
Escola de Engenharia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil.
Porto Alegre, BR-RS, 2010.

Orientador: Prof. Dr. Acir Mércio Loredo-Souza

1. Estruturas (Engenharia). 2. Túnel de vento - Ensaios. 3. Interação vento-
chuva 4. Patologia – Construção civil I Loredo-Souza Acir Mércio orient

Henrique Luiz Rupp

**SIMULAÇÃO EXPERIMENTAL DA INTERAÇÃO VENTO-
CHUVA**

DISSERTAÇÃO APRESENTADA AO PROGRAMA DE PÓS-
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL DA UNIVERSIDADE
FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL, COMO PARTE DOS REQUISITOS
PARA OBTENÇÃO DO TÍTULO DE MESTRE EM ENGENHARIA.
ORIENTAÇÃO: PROF. DR. ACIR MÉRCIO LOREDO-SOUZA.

Porto Alegre
Outubro de 2010

HENRIQUE LUIZ RUPP

**SIMULÇÃO EXPERIMENTAL DA INTERAÇÃO VENTO-
CHUVA**

Esta dissertação de mestrado foi julgada adequada para a obtenção do título de **MESTRE EM ENGENHARIA**, Estruturas, e aprovada em sua forma final pelos professores orientadores e pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Porto Alegre, 22 de outubro de 2010.

Prof. Acir Mércio Loredou-Souza
Ph.D., University of Western Ontario, Canada
Orientador

Prof. Luis Carlos Pinto da Silva Filho
Coordenador do PPGEC/UFRGS

BANCA EXAMINADORA

Prof. Adrián Roberto Wittwer (UNNE)
D.Sc. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil

Prof^a. Ângela Borges Masuero (UFRGS)
D.Sc. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil

Prof. José Luis Vital de Brito (UNB)
D.Sc. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil

Eng. Mário Gustavo Klaus Oliveira
D.Sc. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil

Aos meus pais, meus irmãos;
Minha esposa e meu filho,
dedico este trabalho.

AGRADECIMENTOS

A minha esposa, Aline e ao meu filho Bernardo, por me apoiarem e entenderem as minhas ausências durante o período do mestrado.

A meus pais, Paulo José e Valéria Rupp, que me apoiarem e darem todo suporte necessário.

A minha irmã, Fernanda e meu irmão, Paulo, pelo apoio e companheirismo durante os este período.

Aos meus tios Claudio e Alice A. Pfaffenzeller, pelo apoio em Porto Alegre.

Ao meu orientador, Professor Acir Mércio Loredou-Souza pela amizade, confiança, sugestões, apoio durante todo o período deste curso de mestrado em Porto Alegre e principalmente não desistir de mim, mesmo quando eu já havia desistido.

Aos amigos Eng. Gustavo J. Z. Núñez, Eng. Elvis A. Carpeggiani, Eng. Leandro I. Rippel e Paulo Francisco Bueno por demonstrarem pra mim desde a época em que fui bolsista de iniciação científico LAC, a importância da busca de conhecimento.

Ao amigo Eng. Aloísio M. Fin, por ter me indicado para vaga de bolsista de iniciação científica, durante a graduação, permitindo com que eu descobrisse e participasse de pesquisas do LAC.

A toda a equipe técnica e amigos do Laboratório de Aerodinâmica das Construções, Paulo, Gustavo, Elvis, Fabrício, Karin, Fernando, Mario, Emerson e bolsistas, Guilherme, Maria Cristina e Miguel.

Aos professores do PPGECC que transmitiram conhecimento necessário para o desenvolvimento deste trabalho.

Aos Eng. Roberto A. Etges e Rogério Spode, da Etges engenharia, pelo incentivo a iniciar o mestrado.

Ao Eng. Frederico L. F. Beck, da Beck Engenharia Ltda., pelo incentivo, amizade e apoio durante o período ao qual fui aluno do mestrado.

Sumário

<i>LISTA DE FIGURAS</i>	
<i>LISTA DE GRÁFICOS</i>	
<i>LISTA DE SIMBOLOS</i>	
<i>RESUMO</i>	
<i>ABSTRACT</i>	
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 Considerações gerais	1
1.2 Revisão bibliográfica	2
1.3 Objetivo do trabalho	8
2 CARACTERISTICAS DE CHUVA E VENTO	9
2.1 Vento natural	9
2.2 Tipos de ventos	10
2.2.1 Ciclones extratropicais	11
2.2.2 Ciclones tropicais	11
2.2.3 Tormentas eletricas	13
2.2.4 Linhas de tormentas	14
2.2.5 Tornados	14
2.2.6 Ventos regionais	15
2.3 Turbulência	15
2.4 Chuvas	16
2.5 Formação da chuva	16
2.6 Tipos de chuva	17
2.6.1 Chuvas ciclônicas	18
2.6.2 Chuvas orográficas	18
2.6.3 Chuvas convectivas	18
2.7 Chuvas dirigida	19
2.8 Medições de chuvas	29
2.8.1 Pluviômetros	29
2.8.2 Pluviógrafos	30

3 PROGRAMA EXPERIMENTAL.....	32
3.1 Ensaio em Túnel de vento.....	32
3.1.1 Túnel de vento Professor Joaquim Blessmann.....	32
3.2 Determinação da velocidade do vento no túnel.....	35
3.3 Simulação de características do vento natural.....	37
3.4 Simulação da chuva.....	40
3.5 Simulação física da interação chuva-vento.....	42
3.6 Projetos dos modelos e técnica experimental.....	44
3.7 Medição da deposição de chuva.....	48
4 ANÁLISE DOS RESULTADOS	50
4.1 Estudo do escoamento.....	50
4.2 Comparativos dos perfis de velocidade e turbulência.....	52
4.3 Observações referentes ao escoamento.....	64
4.4 Interação chuva-vento.....	64
5 CONCLUSÕES	89
5.1 Trabalhos futuros.....	90
REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA.....	91

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Influência do vento na direção da chuva e na exposição das paredes (a) situação sem vento; (b) situação com vento.....	20
Figura 2.2 – Prováveis padrões de escoamento de ar e trajetória das gotas de chuva (a) ao redor do edifício; (b) em projeção vertical.....	21
Figura 2.3 – Parábola de chuva incidente.....	22
Figura 2.4 – Chuva dirigida em túnel de vento	23
Figura 2.5 – Sistema de forças atuantes sobre uma gota de chuva.....	24
Figura 2.6 – Mapa brasileiro de chuva dirigida para o ano de 2004.....	28
Figura 3.1 – Vista externa da câmara de ensaios do túnel de vento Prof. Joaquim Blessman.	33
Figura 3.2 – Planta baixa do circuito dos aerodinâmico do túnel de vento Prof. Joaquim Blessmann.	35
Figura 3.3 – (a) Vista superior dos transdutores de 64 canais do Scanivalve e (b) Manoair e mangueiras de conexão aos anéis piezométricos.....	36
Figura 3.4 – Dispositivos de geração de camada limite do túnel de vento Prof. Joaquim Blessmann $p=0,23$	38
Figura 3.5 – Características do vento deslizante e turbulento simulado com o expoente $p=0,23$	39
Figura 3.6 – Dispositivos de simulação de chuva no interior do túnel de vento Prof. Joaquim Blessman	42
Figura 3.7 – Fotografia do Ginásio no Rio de Janeiro utilizado no estudo.....	44
Figura 3.8 – Fotografia do Ginásio no Rio de Janeiro utilizado no estudo.....	44
Figura 3.9 – Vista superior do ginásio.	45
Figura 3.10 – Vista lateral do ginásio	45
Figura 3.11 – Referência para ângulo de incidência do vento.	46
Figura 3.12 – Fotografia do modelo do ginásio ensaiado na Fase I.	47
Figura 3.13 – Fotografia do modelo do ginásio ensaiado na Fase II.....	47
Figura 3.14 - Fotografia do papel TeeJet seco utilizado em ensaio da Fase II	49
Figura 3.15 – Fotografia do papel TeeJet molhado após ensaio da Fase II	49
Figura 4.1 – Croqui esquemático com a localização dos perfis verticais de velocidades do Ginásio	50

Figura 4.2 – Croqui esquemático com a localização dos perfis verticais de velocidades do Ginásio.	51
Figura 4.3 – Perfil 1 vertical das velocidades médias normalizadas – Vento 0°.....	52
Figura 4.4 – Perfil 1 vertical das intensidades normalizadas da turbulência – Vento 0°.....	53
Figura 4.5 – Perfil 2 vertical das velocidades médias normalizadas – Vento 0°	53
Figura 4.6 – Perfil 2 vertical das intensidades normalizadas da turbulência – Vento 0°.....	54
Figura 4.7 – Perfil 1 vertical das velocidades médias normalizadas – Vento 30°.....	55
Figura 4.8 – Perfil 1 vertical das intensidades normalizadas da turbulência – Vento 30°.....	56
Figura 4.9 – Perfil 2 vertical das velocidades médias normalizadas – Vento 30°	57
Figura 4.10 – Perfil 2 vertical das intensidades normalizadas da turbulência – Vento 30°.....	57
Figura 4.11 – Perfil 3 vertical das velocidades médias normalizadas – Vento 180°.....	58
Figura 4.12 – Perfil 3 vertical das intensidades normalizadas da turbulência – Vento 180° ...	59
Figura 4.13 – Perfil 4 vertical das velocidades médias normalizadas – Vento 180°	59
Figura 4.14 – Perfil 4 vertical das intensidades normalizadas da turbulência – Vento 180° ...	60
Figura 4.15 – Perfil 3 vertical das velocidades médias normalizadas – Vento 210°.....	61
Figura 4.16 – Perfil 3 vertical das intensidades normalizadas da turbulência – Vento 210° ...	61
Figura 4.17 – Perfil 4 vertical das velocidades médias normalizadas – Vento 210°	62
Figura 4.18 – Perfil 4 vertical das intensidades normalizadas da turbulência – Vento 210° ...	63
Figura 4.19 – Vista lateral ginásio modelo configuração I.	65
Figura 4.20 – Vista lateral ginásio modelo configuração II.....	65
Figura 4.21 – Vista lateral ginásio modelo configuração III	66
Figura 4.22 – Modelo estudado Fase II – Configuração I : Sem Placas. Sem Vento.....	67
Figura 4.23 – Modelo estudado Fase II - Configuração II : Placas Horizontais. Sem Vento.	68
Figura 4.24 - Modelo estudado Fase II - Configuração III : Placas Inclinadas. Sem Vento...	69
Figura 4.25 – Modelo estudado Fase II - Configuração I : Sem Placas - Vento 0°.....	70
Figura 4.26 - Modelo estudado Fase II - Configuração I : Sem Placas - Vento 0°.....	71
Figura 4.27 – Modelo estudado Fase II - Configuração I : Sem Placas - Vento 0°.....	72
Figura 4.28- Modelo estudado Fase II - Configuração I : Sem Placas - Vento 30°.....	73
Figura 4.29 - Modelo estudado Fase II - Configuração I : Sem Placas - Vento 180°.....	74
Figura 4.30 – Modelo estudado Fase II - Configuração I : Sem Placas - Vento 180°.....	75
Figura 4.31 – Modelo estudado Fase II - Configuração I : Sem Placas - Vento 210°.....	76
Figura 4.32 – Modelo estudado Fase II - Configuração II : Placas Horizontais- Vento 0° ..	77
Figura 4.33 – Modelo estudado Fase II - Configuração II : Placas Horizontais- Vento 0° ..	78
Figura 4.34 – Modelo estudado Fase II - Configuração II : Placas Horizontais- Vento 30°..	79

Figura 4.35 – Modelo estudado Fase II - Configuração II : Placas Horizontais- Vento 180°.	80
Figura 4.36 – Modelo estudado Fase II - Configuração II : Placas Horizontais- Vento 180°.	81
Figura 4.37 – Modelo estudado Fase II - Configuração II : Placas Horizontais- Vento 210°.	82
Figura 4.38 - Modelo estudado Fase II - Configuração III : Placas Inclínadas- Vento 0°.....	83
Figura 4.39 – Modelo estudado Fase II - Configuração III : Placas Inclínadas- Vento 0°	84
Figura 4.40 – Modelo estudado Fase II - Configuração III : Placas Inclínadas- Vento 30° .	85
Figura 4.41 – Modelo estudado Fase II - Configuração III : Placas Inclínadas- Vento 180°.	86
Figura 4.42 - Modelo estudado Fase II - Configuração III : Placas Inclínadas- Vento 180°.	87
Figura 4.43 - Modelo estudado Fase II - Configuração III : Placas Inclínadas- Vento 210°.	88

LISTA DE SÍMBOLOS

LETRAS ROMANAS MAIÚSCULAS

A	Área da seção transversal
H	Altura do modelo
H_R	Altura real da edificação
H_M	Altura do modelo simulado em túnel de vento
I_1	Intensidade de turbulência da componente longitudinal do escoamento
L_1	Macro escala da componente longitudinal da turbulência
P_{am}	Pressão atmosférica
Re	Número de Reynolds
S_1	Fator topográfico
S_2	Fator de rugosidade do terreno, dimensões da edificação e altura sobre o solo
S_3	Fator estatístico
T	Intervalo de tempo de amostragem
T	Temperatura
V_t	Velocidade da gota
V	Velocidade do vento
\bar{V}	Velocidade média do vento
V_0	Velocidade básica do vento
V_k	Velocidade projeto

V_R	Velocidade real do vento
V_M	Velocidade do vento a ser utilizada no ensaio
V_{ref}	Velocidade de referência do vento

LETRAS ROMANAS MINÚSCULAS

g	Aceleração da gravidade
k_o	Relação entre a pressão dinâmica e a variação da pressão de referência
p	Expoente da curva de potência
$p(t)$	Pressão instantânea no local
\bar{p}	Pressão média para um tempo de amostragem T
p_{max}	Pressão máxima instantânea num tempo de amostragem T
p_{min}	Pressão mínima instantânea num tempo de amostragem T
q	Pressão dinâmica de referência
t	Tempo
z_{ref}	Altura de referência

LETRAS GREGAS MAIÚSCULAS

Δp_a	Varição da pressão entre dois anéis piezométricos do convergente
--------------	--

LETRAS GREGAS MINÚSCULAS

θ	Ângulo de incidência do vento
ρ_{agua}	Massa específica da água

ρ_{ar} Massa específica do ar

LISTA DE SIGLAS

CLA	Camada Limite Atmosférica
CPTEC	Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos
LAC	Laboratório de Aerodinâmicas das Construções
UFRGS	Universidade Federal do Rio Grande do Sul
OMM	Organização Meteorológica Mundial

LISTA DE ABREVIATURAS

ICDa	Índice de Chuva Dirigida Anual
RMS	Root Mean Square (Raiz quadrada do valor quadrado médio)

RESUMO

RUPP, H. L., Simulação Experimental da Interação Vento-Chuva.

Simultâneas ocorrências da ação combinada de chuva e vento em diferentes tipos de estruturas têm sido observadas ao redor do mundo nos últimos 20 anos. Este mecanismo tem despertado curiosidade aos engenheiros e pesquisadores devido às suas conseqüências nefastas para as edificações. Nestes últimos vinte anos passou-se a procurar uma maneira de simular, o mais fielmente possível, este tipo de ação combinada de chuva e vento. Isto ocorreu devido ao fato de que a busca por soluções dos problemas relacionados à ação combinada de vento e chuva basearem-se em métodos empíricos (tipo tentativa e erro). Este tipo de problema, que aos olhos mais descuidados pode parecer pequeno, pode provocar desde pequenos problemas de infiltração de água em edificações até o comprometimento da vida útil de uma estrutura devido o ataque da água, agente corrosivo.

O melhor conhecimento do fenômeno através de ensaios experimentais permitirá a engenheiros a identificação deste tipo de problema já na fase de projeto e conseqüentemente a medida paliativa ao mesmo. Para estudo deste fenômeno foi utilizado um modelo ginásio existente na cidade do Rio de Janeiro, que apresentava problema de penetração de chuva devido à ação combinada de chuva e vento.

Foram utilizados dois modelos em escala reduzida do ginásio supracitado. O primeiro modelo, construído em escala 1/150 foi instrumentado com sensores de fio-quente para identificar as características do escoamento sobre a estrutura, e um segundo modelo na escala 1/64, instrumentado com um papel especial sensível a água, onde foram realizados os ensaios combinando a ação de chuva e vento. Os ensaios utilizando o modelo em escala 1/150 foram realizados para ângulos de incidência do vento variando de 15° em 15°. Visando o estudo do comportamento da interação chuva e vento, foram realizados três grupos de ensaios. Num primeiro grupo de ensaios, o modelo foi apenas exposto à chuva e os locais onde existia percolação de água identificados. Após o modelo foi novamente ensaiado, desta vez com a ação combinada de chuva e vento, para duas configurações de dispositivos protetores.

A partir da análise dos resultados, pode-se concluir que a simulação experimental do processo de interação vento-chuva é possível, e que mais ensaios são necessários para o entendimento do processo.

Palavras-chave: túnel de vento, chuva, vento, patologia, infiltração.

ABSTRACT

RUPP, H. L., Experimental Simulation of the Wind-Rain Interaction.

Simultaneous occurrences of the combined action of rain and wind in different types of structures have been observed around of the world in the last 20 years. This mechanism has been causing curiosity to engineers and researchers due to their jeopardizing consequences to constructions. In these last twenty years people has been seeking for a way to simulate, the most faithfully possible, this type of combined action of rain and wind. This happened due to the fact that the search for solutions to the problems related to the combined action of wind and rain were based on empirical methods (trial and error type). This kind of problem, that may seem small to the most careless eyes, may cause since small water infiltration problems in buildings, up to the own safety of the structure due to the action of water, a corrosive agent.

The better knowledge of the phenomenon through experimental tests will allow engineers the problem identification already in the design phase and consequently a palliative solution to it. For the study of this phenomenon, a model of an existent gymnasium in city of Rio de Janeiro was used.

Two reduced scale models of the gymnasium were used. The first model, built in a 1/150 scale was instrumented with hot-wire probes to identify the flow characteristics, and the second model, in the scale 1/64, was instrumented with a special water sensitive paper, where the tests were accomplished combining the rain and wind action. The tests for the model in scale 1/150 were performed for wind incidences intervals of 15°. With the aim of study the behavior of the wind-rain interaction, three groups of tests were performed. After that, the model was again tested for two configurations of protective devices.

From the analysis of the results, it is possible to conclude that the experimental simulation of the wind-rain interaction process is possible, and that more tests are necessary to understand the process.

Key-words: wind tunnel, rain, wind, pathology, infiltration.

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS

Os avanços tecnológicos aplicados na engenharia permitiram que os profissionais da área inovassem no projeto das novas edificações, não importando se estas eram comerciais, industriais ou residenciais. Nesta linha, estes profissionais vêm buscando realizar projetos cada vez mais arrojados.

Ao mesmo tempo, pode-se observar também, que cada vez mais as “forças da natureza” tem se manifestado de formas mais violentas, causando grandes desastres e destruição por diversas áreas em todo o planeta. Mais especificamente em nosso país, o qual tem sofrido principalmente com a combinação entre chuva e vento. Esta combinação, que ocorre com certa frequência no nosso cotidiano, pode, dependendo de sua intensidade, destruir ou impossibilitar o uso da edificação.

A simulação destes fenômenos de forma combinada em laboratório não é usualmente realizada por pesquisadores devido à sua complexidade. Como consequência, não há disponibilidade de informações suficientes para o projeto adequado da edificação para resistir às manifestações patológicas daí decorrentes. O resultado prático é que os problemas acabam sendo constatados somente após a edificação estar concluída, sendo sua solução por diversas vezes mais complexa e mais custosa do que seria necessário.

Uma das preocupações mais frequentes está relacionada à penetração da água da chuva em edificações, quando dirigida pelo vento. Existem algumas indicações empíricas para o projeto de fachadas (baseadas na experiência prática de determinados profissionais), porém muitas vezes sem a devida comprovação científica. Para que os problemas decorrentes desta última afirmação possam ser diminuídos ou eventualmente saneados, mais pesquisa é necessária nesta área. Visando contribuir para isto, o presente trabalho tem o intuito de descrever uma tentativa de simulação experimental da interação vento-chuva, utilizando-se um modelo reduzido de um ginásio de esportes (localizado no Rio de Janeiro e que

apresentava problemas de penetração de água da chuva pela ação do vento), o qual foi ensaiado em túnel de vento.

1.2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Apesar do alto de grau de entendimento dos diversos fenômenos meteorológicos relacionados à chuva e ao vento separadamente, a interação vento-chuva, ou mais especificamente, a chuva-dirigida pelo vento, não teve a mesma atenção por parte dos pesquisadores. Isto é muito mais sério quando seus efeitos tornam-se importantes, tais como os problemas que podem causar ao envelope de uma edificação. As dúvidas associadas ao projeto de uma edificação em relação à chuva-dirigida pelo vento são inúmeras. Não somente é a migração da água através do envelope da edificação um problema complexo, envolvendo diferenciais de pressão, capilaridade, etc., como também o é a falta de conhecimento a respeito da distribuição da chuva através desta superfície externa. Sabe-se pouco além de que é fortemente afetada pelos detalhes arquitetônicos da edificação e pelas características da vizinhança de entorno, as quais afetam os padrões de escoamento do vento e, conseqüentemente, o grau de impacto no envelope da edificação.

Os problemas associados à chuva conduzida pelo vento têm sido estudados por alguns autores [Lacy, 1965 ; Ishizaki et al, 1970; Couper, 1972; Robinson e Baker, 1975], embora em grande parte dos casos somente em escala natural. Algumas tentativas computacionais de entendimento do fenômeno foram tentadas, tais como o trabalho de Choi (1993).

Choi (1993) propõem um método analítico para a predição da intensidade de chuva-dirigida pelo vento nas faces de uma edificação usando técnica de dinâmica dos fluidos computacional. Neste método, a intensidade é calculada em função da intensidade da chuva não obstruída, tamanho da gota da chuva, da força da velocidade do vento e estatísticas máximas da co-ocorrência de chuva e vento.

Em todos os estudos anteriores visando um método analítico para determinação da intensidade da chuva conduzida, existia uma grande variação de parâmetros, sendo muitos destes de difícil controle e medição.

O método apresentado por Choi (1994) pode ser dividido em três passos: cálculo do padrão de escoamento do vento no entorno da edificação, cálculo da trajetória para gotas de chuva de diferentes tamanhos e cálculo da intensidade da chuva conduzida.

Os parâmetros apresentam variação em diversos pontos da edificação. O vento ocasiona um aumento na intensidade da chuva conduzida no quarto superior da edificação em relação à sua altura, assim como nas partes laterais em relação à parte central da fachada da edificação (em relação à sua largura).

A trajetória das gotas de chuva é função de sua força de arrasto; o coeficiente de arrasto é função do número de Reynolds que por sua vez é função do diâmetro da gota. O aumento do raio da gota gera a diminuição da intensidade de chuva-dirigida no quarto superior e aumento nos quartos abaixo.

Os efeitos da distribuição do tamanho das gotas de chuva caindo na fachada da edificação é a soma de todos os tamanhos de pingo de chuva. A distribuição dos pingos de chuva varia de tempestade a tempestade e também varia com a intensidade da mesma.

Segundo Choi, os efeitos de geometria da edificação estão diretamente ligados à área de vento bloqueada pela edificação. Os valores globais são menores para edificações mais largas do que para edificações mais estreitas. Em relação à altura de edifícios mais largos, pode-se observar que no quarto superior o aumento da intensidade é inversamente proporcional ao diâmetro da gota de chuva.

Quanto maior a velocidade do vento, mais inclinada à trajetória da gota e maior a intensidade de chuva dirigida pelo vento encontrada na face frontal da edificação.

Choi (1994) observou também a velocidade máxima do vento durante as chuvas, e constatou que para um determinado período de retorno, a velocidade máxima do vento é menor em chuvas de grande intensidade do que a velocidade máxima ocorrida em chuva de baixa intensidade.

Em outro trabalho também escrito por Choi (1994), este investiga as características da co-ocorrência de chuva e vento e o índice de chuva-dirigida tendo como base os dados coletados em quatro estações existentes na cidade de Sydney, Austrália. Observa-se que as características das chuvas conduzidas são muito diferentes. Para um determinado local a

chuva conduzida é também diferente para diferentes direções de incidência. A investigação também revelou que para todas as amostras existe uma direção em que a chuva conduzida é predominante sobre as demais. Embora o índice de chuva conduzida anual possa indicar severidade global na chuva conduzida pelo vento em algum local, pode não mostrar o verdadeiro quadro. Isto por causa das fortes variações direcionais da chuva conduzida. Além disso, normalmente é requerida informação sobre chuva conduzida para um edifício com orientação específica. O índice de chuva conduzida direcional, ou seja, que o índice apresentado na direção predominante de chuva conduzida é mais preciso e mais satisfatório.

O fator de co-ocorrência para o índice de chuva conduzida na direção dominante também é observado para ser mais estável. Este valor encontrado para Sydney é 1,12. Baseado neste valor, a quantia de chuva conduzida pode ser obtida como 0,228 vezes o índice de chuva conduzida para a direção dominante. Se o direcional do índice de chuva conduzida não é obtido, este pode ser aproximado proporcionando o índice de chuva conduzida anual de acordo com as frequências da ocorrência de vento durante os períodos de chuva em várias direções.

Os pesquisadores Baskaran e Brown (1995) em seu trabalho argumentam que as duas grandes dificuldades em ensaios de chuva conduzida em túnel de vento, são a determinação da pressão para a realização de ensaios de vento e chuva conduzida e a quantidade de *spray* de água a ser utilizado a fim de representar a chuva em uma edificação.

Após verificar diferentes normas de diferentes países, constatou-se que as normas Britânica, Canadense e Dinamarquesa tentaram quantificar a quantidade de chuva através de um índice de chuva conduzida, sendo que este teria dois usos principais: para engenheiros e arquitetos exporia a severidade do local proposto para a edificação e como um indicador da condição para qual espécie de parede deveria ser ensaiado em laboratório de teste.

Os autores apresentam uma relação para definir a quantidade de chuva baseada em dois trabalhos. Ambos baseiam-se na correlação entre o índice de chuva dirigida e a taxa de chuva dirigida em uma superfície vertical.

Primeiro Lacy (1965) propõe que a quantidade de chuva, para um ensaio de chuva conduzida numa parede vertical, é igual a 206 vezes o índice de chuva-dirigida da região onde executará a edificação.

Recentemente Henriques (1992) propôs a relação em que 1 índice de chuva-dirigida é igual a 100 l/m^2 de chuva-dirigida numa parede.

No Canadá, Welsh (1989) divide o índice de chuva conduzida em três regiões de intensidade: (1) região de abrigo com índice de chuva conduzida máximo igual a 3, (2) região moderada com índice de chuva conduzida máximo igual a 7, e (3) região severa com índice de chuva conduzida máximo igual a 13. Aplicando estes dados nas relações estabelecidas por Lacy (1965), observa-se que a taxa constante de chuva conduzida proposta pela norma Americana (ASTM E 547) para ensaios, não é apropriada para representar todas as condições dinâmicas locais para chuva e vento dirigido.

Antes da elaboração de ensaios de modelo em túnel de vento, Surry [1994] realizou um trabalho pioneiro a fim de identificar informações que permitissem realização de ensaios em túnel de vento com a obtenção de resultados pertinentes.

Observando os dados existentes, a velocidade do vento ocorrida durante as chuvas excedia o limiar da taxa de chuva. As velocidades do vento são determinadas através de medições em um ou dois minutos durante uma hora qualquer enquanto os dados coletados sobre chuvas são baseados em medições de seis horas, sendo que este fato aumentava o número de variáveis. Para gerar uma melhor aproximação foram usados os dados de chuva por hora coletados no verão e a velocidade máxima definida através da distribuição de velocidade do vento. Ajustados estes dados foram identificados parâmetros que afeta a interação entre chuva, vento e edificação, sendo os mais importantes os abaixo citados:

- 1) Quão próximo a área é do limite do edifício e sua altura em relação ao chão;
- 2) A geometria da edificação e a vizinhança que o cerca;
- 3) A direção do vento em relação à área considerada;
- 4) Tempo. Ambos, vento e taxa de chuva são tempestuosos; seus valores de pico excedem significativamente seus valores de média sobre uma hora.

Com base nos resultados obtidos, Surry conclui que:

- a) existem significativas diferenças entre a rosa dos ventos tradicional e a utilizada em momentos de chuva;

-
- b) a velocidade média do vento durante a chuva é superior a velocidade média do vento medida, no entanto a velocidade máxima durante a chuva é menor que a velocidade máxima medida;
 - c) que a utilização da velocidade do vento medida em um ou dois minutos a cada hora para aproximar do médias horárias ocasiona uma maior divergência entre os valores extremos;
 - d) que os dados existentes sobre pressão de vento e chuva fornecem base útil para investigação de edificações existentes porém existem muitas incertezas que necessitam de uma maior investigação. Em particular a área molhada de uma edificação em relação às definições de taxas de chuvas, já que estes podem ser significativamente alterados pelos dados sobre pressão do vento e chuva. Sugere-se também uma melhor avaliação da relação vento e chuva.

Após os estudos acima, simulação física da interação vento-chuva usando modelos reduzidos em túnel de vento de camada limite foi desenvolvida somente em 1994 [Surry et al, 1994], no *Boundary Layer Wind Tunnel Laboratory* da *University of Western Ontario*, Canadá.

Conforme o trabalho de Surry (1994) problemas envolvidos na simulação em escala reduzida são diversos e significativos, sendo alguns deles comentados a seguir:

- a) A chuva possui uma variada gama de propriedades em termos de intensidade e dimensão das gotas. Para uma mesma tempestade, a intensidade da precipitação pode variar bastante. Além disso, a estatística relacionada à combinação vento-chuva tem recebido pouca atenção se comparada aos dois fenômenos isolados. Isto torna a interpretação dos resultados oriundos da modelagem em escala reduzida um delicado problema, especialmente em termos das características de longo prazo relacionadas à chuva conduzida pelo vento.
- b) A interação entre as gotas d'água carregadas pelo vento e os padrões de escoamento em torno da edificação requerem a satisfação de certas leis de semelhança para garantir que a interação está modelada adequadamente. Esta modelagem é adicional à própria modelagem da camada limite atmosférica.

-
- c) Produzir um modelo de queda de chuva requer o emprego de dispositivos tipo aspersores ou *sprays* que propiciem uma distribuição dos tamanhos das gotas conforme os requerimentos da modelagem. Uma complicação prática é a evaporação das gotas durante sua queda.
 - d) São necessárias técnicas especiais para determinar a distribuição da deposição de água sobre a superfície da edificação.
 - e) Após a água atingir a edificação, haverá migração sob ação da gravidade, do próprio vento, de tensões superficiais ou mesmo por capilaridade. Alguns detalhes destes processos estão além da capacidade física de modelagem e, portanto, requerem outras abordagens.

O trabalho concentrou-se no itens b, c e d e tinha como objetivo :

- projetar, desenvolver e provar a técnica para simular chuva conduzida num modelo em escala;
- projetar, desenvolver e provar a técnica de medição da quantidade de chuva modelada nas varias áreas da superfície da edificação;
- demonstrar a técnica utilizando uma edificação em escala real;
- explorar os efeitos do formato e detalhes geométricos nos locais onde padrões de deposito de água.

Gerando a seguinte conclusão:

- que a chuva-dirigida teve simulação eficiente na escala 1:64;
- os padrões de área molhada numa edificação retangular sugerem que a taxa de “molhagem” é de 20 a 30 vezes maior que nas áreas centrais da mesma;
- alta resolução das medidas médias de pressão indica que existem gradientes muito elevados perto das extremidades das edificações, até mesmo para vento normal a uma face;

- análises preliminares indicam que os dados de pressão instáveis, indicando gradientes instáveis podem ser significativamente maiores que os gradientes médios.

1.3 OBJETIVO DO TRABALHO

Este trabalho tem como principal objetivo simular fisicamente uma situação de interação vento-chuva sobre uma edificação. Especificamente, utilizado um modelo reduzido de um ginásio de esportes, o qual foi submetido a um escoamento turbulento de ar simulando as principais características do vento natural, conjuntamente com um escoamento de água simulando um caso usual de chuva. Os ensaios foram realizados no túnel de vento *Prof. Joaquim Blessmann* do Laboratório de Aerodinâmica das Construções da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

2 CARACTERÍSTICAS DE CHUVA E VENTO

2.1 VENTO NATURAL

Adotando as definições apresentadas por Blessmann (1995), o vento natural tem como causa de formação o aquecimento não uniforme da atmosfera, principalmente a partir da energia solar absorvida de pela crosta terrestre e irradiada para a atmosfera sob forma de calor.

Para engenharia estrutural é de interesse conhecer a velocidade média do vento e as flutuações em torno desta média. A velocidade média é determinada para intervalos de tempo entre 10 minutos e 1 hora. As flutuações instantâneas em torno da média são designadas por rajadas. Na prática, as rajadas são determinadas como médias sobre pequenos intervalos de tempo, da ordem de segundos, pois o anemômetro não consegue medir valores realmente instantâneos.

Estas flutuações têm sua origem tanto na agitação (turbulência) do escoamento médio causada pela rugosidade natural e artificial de superfície terrestre, como nos processos de convecção causados por gradientes térmicos. Em tormentas de origem ciclônica e de longa duração, com ventos de alta velocidade, a rugosidade da superfície terrestre causa uma turbulência tão intensa que a mistura entre camadas adjacentes de ar impede a convecção. O gradiente térmico vertical pode ser considerado adiabático e, conseqüentemente, a estabilidade é neutra. As flutuações são quase exclusivamente causadas por agitação mecânica do ar, com a formação de um grande número de turbilhões ou redemoinhos.

A estabilidade de ciclones de grandes dimensões (e, conseqüentemente, de longa duração), tanto os tropicais como os extratropicais, em seu estágio maduro, pode, portanto, ser considerado como neutra.

Os ciclones extratropicais originam os ventos fortes que apresentam o melhor equilíbrio dinâmico com a rugosidade da superfície terrestre. São os ventos fortes mais bem estudados e servem de base para a maioria das normas sobre forças causadas pelos ventos.

Pelo que foi visto, também os ciclones tropicais de grandes dimensões, em seu estágio maduro, podem, para fins de engenharia estrutural, ser considerados como atendendo as

especificações das normas de vento no que se referem à variação da velocidade média com a altura e as características da turbulência, ambos fortemente influenciados pela rugosidade da superfície terrestre.

Há tormentas que contêm componentes importantes origem térmica, com ventos de características consideravelmente afastadas das indicadas, tais como furacões em seus estágios iniciais, linhas de tormentas e trovoadas (“thunderstorm”), estas últimas também conhecidas pelo nome de tormentas elétricas. As trovoadas, em algumas regiões situadas em latitudes temperadas, podem causar ventos de velocidades superiores as de ventos de origem ciclônica.

Também se aplica o conceito de vento em equilíbrio dinâmico com a rugosidade da superfície terrestre a ventos locais causados ou influenciados pela costa marítima ou por encostas de montanhas. Muito menos aos tornados, movimentos turbilhonares muito intensos e localizados, de origem térmica.

Até que ponto os valores indicados nas normas de vento podem ser aplicados a ventos como os acima citados, é um problema ainda não resolvido e que necessita estudos e pesquisas adicionais. Estudos probabilísticos de Nanni e Riera para trovoadas no Rio Grande do Sul mostram que estas originam velocidades extremas maiores que os ciclones extratropicais, velocidades estas medidas a 10 m acima do terreno. Lembramos porem, que a velocidade média do vento nas trovoadas cresce menos rapidamente com a altura do que nos ciclones extratropicais.

2.2 TIPOS DE VENTO

Em seu livro, Blessmann (1995) apresenta os tipos de ventos de superfície mais localizados e de alta velocidade, que são os que interessam à engenharia civil. Estes são transcritos de Blessmann (1995) nos textos a seguir.

2.2.1 CICLONES EXTRATROPICAIS

São movimentos circulatórios de ar em torno de um centro de baixa pressão, originados ou pela ação mecânica de cadeias de montanhas sobre correntes atmosféricas de grandes dimensões ou pela interação de massas de ar ao longo de frentes. Estas tormentas, em seu estado “maduro”, são conhecidas como “sistemas de pressão plenamente desenvolvidos” ou simplesmente tormentas EPS (“extend mature pressure systems” ou “extratropical pressure systems”). São caracterizadas por uma atmosfera verticalmente estável e sopram mantendo uma velocidade média razoavelmente constante por até algumas dezenas de horas. Atingem grandes dimensões, que em geral variam de algumas centenas a alguns poucos milhares de quilômetros de diâmetro.

Em geral, uma frente quente move-se lentamente e não causa condições violentas de tempo. Frentes frias podem mover-se mais rapidamente e causam condições de tempo mais severas, como trovoadas e tornados. Perturbações na velocidade, temperatura e pressão causam ondas na superfície frontal que se propagam como ondas em um meio contínuo. Em casos extremos estas ondulações aumentam de amplitude, enrolam-se em forma de vórtices, dando origem aos ciclones ou tormentas extratropicais.

As tormentas extratropicais de maiores dimensões e duração são as associadas ao mecanismo de transferência de calor do equador para os pólos através de sistemas de baixa pressão (ciclones) de grandes dimensões. A diferença de temperatura produz o escoamento básico na direção norte-sul, enquanto que a rotação da Terra gera o movimento na direção leste-oeste e determina o sentido da circulação do ciclone (sentido horário no hemisfério sul). Estes ciclones formam-se ao longo de frentes frias polares e constituem a fonte mais comum de ventos fortes em latitudes temperadas.

2.2.2 CICLONES TROPICAIS

São semelhantes na forma aos ciclones extratropicais, porém são mais intensos e mais localizados. Formam-se a partir do ar úmido e quente existente sobre grandes extensões de água com temperatura acima de 27°C, em regiões tropicais dos oceanos. Sua energia provém do calor latente liberado pela condensação do vapor e originam-se entre as latitudes 5° e 30°, tanto norte como sul. Não se formam próximo ao Equador, pois aí a força de Coriolis é

pequena (nula sobre o equador) e não pode iniciar o movimento circulatório de grandes massas de ar.

Este movimento circulatório conduz o ar úmido e quente para seu centro, forçando-o então a subir, expandir-se e esfriar-se. Com isto, o vapor d'água, contido em grande quantidade no ar inicialmente quente e úmido, é condensado. Este processo continua enquanto houver ar úmido e quente, aumentando constantemente as dimensões do ciclone. A violência dos ciclones tropicais deve-se às enormes quantidades de energia liberada pela continua condensação.

O Centro de um ciclone tropical é uma zona de baixa pressão. O sentido de giro, para que olha de cima para baixo, é, conforme já foi exposto anteriormente, horário no hemisfério sul e anti-horário no hemisfério norte. Ao menos durante sua formação os ciclones tropicais deslocam-se de leste para oeste. Formam-se no oceano Indico e no Pacífico, tanto ao norte como ao sul. No oceano Atlântico, formam-se apenas no norte do Equador, pois ao sul as condições não são favoráveis.

Ao se adentrarem nos continentes, as perdas por atrito aumentam e, além disso, cessa a fonte de energia, fazendo com que, paulatinamente, os ciclones tropicais se desfaçam e poucos dias depois de alcançarem à costa. Também podem desfazer por entrarem em zonas mais frias dos oceanos.

Nos primeiros 150 km sobre a terra a velocidade diminui, via de regra, entre 30 e 40%.

Ciclones tropicais com velocidades de ventos próximos à superfície (“ventos de superfície”) iguais ou superiores a 120 km/h recebem nomes especiais.

Os furacões têm uma ação destrutiva considerável, tanto pela ação direta do ventos de superfície (que podem alcançar 250km/h – 70m/s – ou mais) como pelas violentas chuvas que os acompanham.

Embora possa se indicar 1000 km como uma dimensão típica dos ciclones tropicais, ventos de velocidades destrutivas raramente atingem uma distancia acima de 100 km, a partir de seu centro, onde se situa o “olho”, com um diâmetro e torno de 20 km.

2.2.3 TORMENTAS ELÉTRICAS

Conhecidas também com as designações de trovoadas ou tormentas TS. São caracterizadas por uma atmosfera verticalmente instável, isto é, com gradiente térmico vertical considerado. Aparecem violentos movimentos verticais de ar, com formação de nuvens a grandes alturas, às vezes acima de 22 km.

A força ascensional que movimentada verticalmente o ar pode ter sua origem no aquecimento da superfície terrestre, em uma frente fria, na diferença de temperatura entre a terra e mar ou no movimento de ar subindo a encosta de montanhas.

Três estágios podem ser caracterizados no desenvolvimento de uma tempestade elétrica:

1º estágio – Formação de uma nuvem cumulus, pela elevação de ar quente e úmido até uma altura de cerca de 8 km, sendo a temperatura do ar circundante menor que a do ar ascendente. Trata-se de um caso de equilíbrio instável da atmosfera: o ar úmido continua subindo.

2º estágio – A nuvem transforma-se em uma cumulonimbus, com uma altura de 12 km ou mais. As baixas temperaturas aí existentes (abaixo do ponto de congelamento da água) originam gotas de água, cristais de neve e partículas de gelo. Chega um momento em que estas gotas, cristais e partículas não podem se manter em equilíbrio com as correntes ascendentes de ar, e começa a precipitação. Chuva, neve e gelo, ao caírem esfriam o ar e a precipitação é intensificada. A fricção destes elementos com o ar origina correntes descendentes de ar, ao mesmo tempo em que continuam correntes ascendentes de ar quente.

A chegada ao solo das correntes descendentes é geralmente brusca e caracterizada por rajadas violentas de chuva torrencial. Este estágio (estágio maduro) geralmente dura de 5 a 30 minutos.

3º estágio – As correntes descendentes aumentam em área transversal até tomarem conta de toda nuvem. Como não há mais ar quente e úmido subindo, a precipitação diminui e cessa.

A fricção causada pela chuva e gelo origina cargas elétricas positivas e negativas, em diversas partes da nuvem. Quando a diferença de potencial elétrico entre as partes de uma nuvem, ou entre nuvens, ou entre nuvem e solo torna-se suficiente alta, resultam descargas

elétricas (raios). O súbito aquecimento do ar causado por estas descargas causa sua rápida expansão, originando uma intensa vibração no ar (trovão).

2.2.4 LINHAS DE TORMENTA

As linhas de tempestade (“squall lines”) são linhas de instabilidade de grande extensão na direção transversal à direção de movimento de uma frente fria, com tempestades em diversos estágios de desenvolvimento.

Originam-se quando uma frente fria de movimento rápido desloca-se contra uma massa de ar quente, úmido e de instabilidade acentuada. Esta situação origina, a cerca de 300 km adiante da frente, uma linha de tempestades de grande violência, com ventos excepcionalmente fortes.

Podem ocorrer entre os paralelos de 20° e 50°, em ambos os hemisférios.

2.2.5 TORNADOS

São temporais violentos, com um múltiplo poder de destruição: pelas altas velocidades horizontais dos ventos tangentes ao movimento de circulação, pela depressão e altas velocidades verticais em seu núcleo (“olho”) e pelos verdadeiros projéteis que arremessa. Estes projéteis são formados por detritos e objetos que o tornado apanha em sua trajetória ou por escombros de edificações, veículos, árvores pequenas construções, etc., danificados e/ou absorvidos pelo tornado e lançados com violência mais adiante.

Os tornados são movimentos ciclônicos que concentram uma quantidade enorme de energia em uma pequena região. Seu diâmetro geralmente situa-se entre 100 e 3000 m (300 pode ser considerado um diâmetro típico), com velocidade horizontais tangenciais que podem ultrapassar 400 km/h (alguns autores indicam 500 km/h ou mesmo mais).

Na maioria das vezes os tornados desenvolvem-se a partir de trovoadas muito violentas, principalmente nas originadas em frentes frias. Movem-se com uma velocidade entre 30 e 100 km/h (8 a 28m/s) com uma trajetória entre 10 e 30 km (valores típicos). O

movimento giratório começa na nuvem de tormenta (cumulonimbus) e gradualmente vai crescendo para baixo, terminando por tocar a superfície terrestre.

Devido à força centrífuga que lança o ar para longe do centro de rotação, a pressão no núcleo é muito baixa, podendo estar a mais de 200 mbar (2×10^4 n/m²) abaixo da pressão atmosférica nas vizinhanças. Lembramos que a pressão atmosférica normal é de 1013,2 mbar (760 mm de mercúrio), sendo 1mbar= 100 Pa. Em torno deste núcleo pode ocorrer condensação da umidade, formando um “funil” visível do tornado, com uma cor branca ou cinza claro. À medida que o tornado se desloca, o funil e a região externa vizinha a ele tornam-se escuros (cinza escuro ou preto), em virtude do pó e escombros levantados do solo.

As pressões extraordinariamente baixas do núcleo de tornado podem fazer uma edificação que esteja com suas aberturas fechadas (mantendo assim a pressão interna aproximadamente igual à pressão atmosférica existente fora do tornado) literalmente explodir, pela diferença de pressão entre o interior da edificação e o núcleo do tornado.

Além disso, o núcleo funciona como uma chaminé, com uma “tiragem” em que a corrente de ar ascendente pode atingir de 150 a 300 km/h (42 a 83 m/s). Esta tiragem ergue do solo o que resta de edificações explodidas pelo tornado (tijolos, vidros, portas, janelas, telhas, etc.) ou por ele danificadas, bicicletas, motocicletas, pequenos animais, pedaços de árvores, etc., transportando-os por dezenas ou mesmo algumas centenas de metros. Em tornados de extrema violência o mesmo acontece com carros, árvores, animais maiores casas; caminhões, vagões e locomotivas tem sido tombados.

2.2.6 VENTOS REGIONAIS

São ventos em que condições locais peculiares originam características próprias, pela influência de vales, montanhas, desníveis bruscos no terreno, etc. Citamos, sem entrar em detalhes: minuano, zonda, bora, fohen.

2.3 TURBULÊNCIA

A turbulência pode ser identificada como flutuações irregulares da velocidade do vento. A turbulência exerce grande influência sobre o escoamento em torno de cilindros,

principalmente no que diz respeito ao desprendimento de vórtices ou às transições dos regimes. A turbulência caracteriza-se, em geral, pelos parâmetros intensidade longitudinal da turbulência, I_1 , e escala longitudinal da turbulência, L_1 , que representa o comprimento na direção do vento incidente, dos maiores turbilhões presentes no escoamento (Ribeiro, 1989).

O conhecimento das propriedades da turbulência é necessário tanto para o cálculo da resposta dinâmica das estruturas às rajadas de vento, como para a simulação correta do vento em túneis de vento. O estudo destas propriedades é feito através da teoria estatística da turbulência (Blessmann, 2005), determinando-se:

- a) distribuição de probabilidade de cada uma das três componentes de flutuações;
- b) intensidade de turbulência de cada uma destas componentes. Trata-se de uma medida adimensional da energia cinética contida na respectiva componente de flutuações, dada pela relação entre a parcela flutuante e a parcela média de velocidade;
- c) correlações espaciais das flutuações em pontos distintos. Elas permitem determinar à macro escala da turbulência;
- d) espectro de potência (densidade espectral da variância) das flutuações. Indica a distribuição, em frequência, da energia cinética contida nestas flutuações;
- e) espectro cruzado, que estuda flutuações em dois pontos.

2.4 CHUVA

Adotando as definições apresentadas por Villela e Mattos (1975), chuva é o termo usado para definir um dos tipos de precipitações que são as formas de umidade emanadas da atmosfera e depositadas na superfície terrestre.

2.5 FORMAÇÕES DAS CHUVAS

A umidade atmosférica é o elemento básico para a formação das chuvas; embora seja necessária, ela não é suficiente, pois outros requisitos são também necessários como, por

exemplo, um mecanismo de resfriamento do ar, a presença de núcleos higroscópicos, para que haja condensação, e um mecanismo de crescimento das gotas.

A formação da precipitação segue o seguinte processo: ar úmido das camadas baixas da atmosfera é aquecido por condução, torna-se mais leve que o ar das vizinhanças e sofre uma ascensão adiabática. Nessa ascensão ele expande e se resfria na razão de 1° C por 100 m (expansão adiabática seca) até atingir a condição de saturação (nível de condensação). A partir desse nível, em condições favoráveis, não possuem massa suficiente para vencer a resistência do ar, sendo, portanto mantidas em suspensão até que, por um processo de crescimento, ela atinja tamanho suficiente para precipitar.

Os processos de crescimento das gotas mais importantes são os de coalescência e de difusão do vapor, segundo Villela e Mattos.

O processo de coalescência é aquele no qual as pequenas gotas das nuvens aumentam seu tamanho e devido o contato com outras gotas através da colisão, provocada pelo deslocamento das gotas, devido a movimentos turbulentos do ar, as forças elétricas e ao movimento Browniano. Quando as gotas atingem o tamanho suficiente para vencer a resistência do ar, elas se deslocam em direção ao solo; nesse movimento de queda as gotas maiores adquirem maior velocidade do que as gotas menores.

O processo de difusão do vapor é aquele no qual o ar após o nível de condensação continua evoluindo, provocando difusão do vapor supersaturado e sua conseqüente condensação em torno das gotículas que aumentam seu tamanho.

2.6 TIPOS DE CHUVAS

O esfriamento dinâmico ou adiabático é a principal causa da condensação e é o responsável pela maioria das chuvas. Assim sendo, o movimento vertical das massas de ar é um requisito importante para a formação das chuvas, que podem ser classificadas de acordo com as condições que produzem o movimento vertical do ar. Nesse sentido existem três tipos principais, que são: ciclônico, orográfico e convectivo.

2.6.1 CHUVAS CICLÔNICAS

As chuvas ciclônicas estão associadas com o movimento de massas de ar de regiões de alta pressão para regiões de baixa pressão. Essas diferenças de pressão são causadas por aquecimento desigual da superfície terrestre.

A chuva ciclônica pode ser classificada como frontal ou não frontal. Qualquer baixa barométrica pode produzir chuva não frontal com o ar sendo elevado devido a uma convergência horizontal em áreas de baixa pressão. A chuva frontal resulta da ascensão do ar quente sobre o ar frio na zona de contato entre duas massas de ar de características diferentes. Se a massa de ar se move de tal forma que o ar frio é substituído por ar mais quente, a frente é fria.

As chuvas ciclônicas são de longa duração e apresentam intensidade de baixa a moderada, espalhando-se por grandes áreas.

2.6.2 CHUVAS OROGRÁFICAS

As chuvas orográficas resultam da ascensão mecânica de correntes de ar úmido horizontal sobre barreiras naturais, tais como montanhas.

2.6.3 CHUVAS CONVECTIVAS

As chuvas convectivas são típicas das regiões tropicais. O aquecimento desigual da superfície terrestre provoca o aparecimento de camadas de ar com densidades diferentes, o que gera uma estratificação térmica da atmosfera em equilíbrio instável. Se esse equilíbrio por qualquer motivo (vento, superaquecimento) for quebrado uma ascensão brusca e violenta de ar menos denso, capaz de atingir grandes altitudes. Essas chuvas são de grande intensidade e curta duração, concentrada em pequenas áreas.

2.7 CHUVA DIRIGIDA

Uma abrangente revisão bibliográfica é feita por Poyastro (2011) e descrita a seguir.

A maioria das chuvas em centros urbanos é de baixa intensidade. A associação do vento a incidência de chuva é um fator importante quando se pretende estudar a conservação e/ou degradação do ambiente construído (Lima; Morelli, 2005). O vento é o encarregado de impulsionar a água da chuva para os obstáculos situados fora da vertical de sua trajetória com ar em calma (Petrucci,2000).

A chuva dirigida é uma grande fonte de umidade que afeta a desempenho higrométrico e a durabilidade das fachadas e coberturas das edificações. Entre os danos causados pela umidade proveniente da chuva estão infiltrações, eflorescências, bolores, goteiras e manchas (Giongo et. al.,2008).

Chuva dirigida refere-se à ação conjunta da chuva e do vento incidentes nas edificações quando se dá a precipitação (Silva; Giralt,1995).

A previsão da distribuição de pressões de vento em um edifício não é imediata, pois a forma, a topografia e altura, além de outros fatores, participam do processo. A chuva, não obedecendo às mesmas leis da distribuição de pressões de vento (embora esse seja um dos principais agentes na distribuição de chuvas nas paredes verticais), contribui para o agravamento da situação (Perez,s/d).

As chuvas que caem na horizontal, razoavelmente conhecidas, não oferecem grandes problemas às coberturas. As variáveis básicas que intervêm, causando problemas, são: a velocidade do vento, o tamanho e a quantidade de gotas de chuva. De forma geral, as maiores velocidades de vento ocorrem perto das regiões de maiores chuvas incidentes da edificação (Perez,s/d).

Com base na figura 2.1, Thomaz (1990) apud Vieira (2005), apresenta a influencia da do vento na direção da chuva e na exposição das paredes. O autor observa que sem o vento, a chuva cairia verticalmente e pouco molharia as paredes da edificação. Com a ação combinada da chuva e do vento as fachadas são atingidas em diferentes graus, dependendo da intensidade e direção do vento atuante.

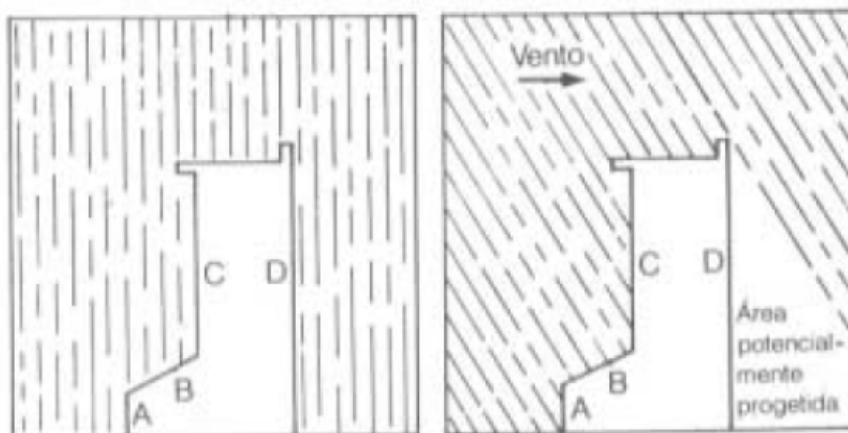


Figura 2.1 – Influência do vento na direção da chuva e na exposição das paredes (a) situação sem vento;(b) situação com vento (THOMAZ, 1990 apud VIEIRA, 2005)

O autor acrescenta ainda que, observando a figura 2.1, à interação vento-chuva incidente apresenta uma inclinação, atingindo a edificação de maneira diferenciada. Com o vento as superfícies A, B e C são atingidas pela água da chuva enquanto a superfície D aumenta em decorrência da contribuição da água incidente sobre a superfície C.

Logo, o que interessa observar, é a chuva dirigida pelo vento em um ângulo com a vertical, de tal forma que incide sobre as superfícies verticais dos edifícios, já que na ausência de vento (situação rara) ou em situações de vento em calma ou pouca velocidade (0 a 1 m/s) a chuva descende praticamente paralelamente à fachada (Petrucci,2000).

Estudos envolvendo dispositivos para medir a chuva são bastante antigos. O primeiro deles, desenvolvido em 1816, relatado por Van Mook (2002) citado por Lima e Morelli (2005), apresentava um aparato, denominado “vectopluiometer” e media na realidade, a quantidade de chuva quantidade de chuva que caía na horizontal e a capturada, por um orifício no aparato, na vertical. O autor desenvolveu aparatos para medir chuva dirigida e é um dos últimos estudos relatados sobre o tema, incluindo simulações computacionais inclusive com tamanhos e formatos de gotas diferenciados.

Prováveis padrões de escoamento do ar e ao redor dos edifícios e prováveis trajetórias das gotas de chuva podem ser visualizados na figura 2.2(a). Padrões similares de comportamento do escoamento do ar e gotas de chuva foram observados para uma projeção

vertical da face de um edifício, conforme ilustra a figura 2.2(b) (Verhoef,1988 apud Petrucci, 2000).

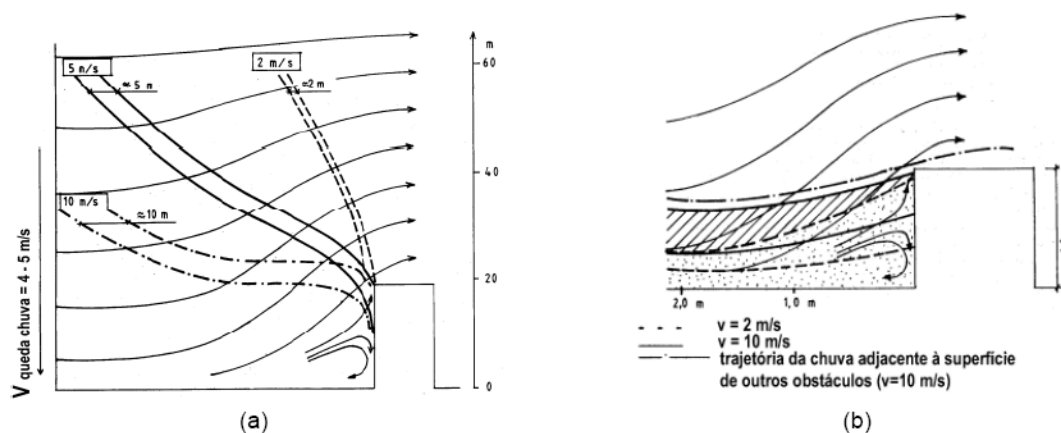


Figura 2.2 – Prováveis padrões de escoamento de ar e trajetória das gotas de chuva: (a) ao redor do edifício e (b) em projeção vertical (VERHOEF, 1988 apud PETRUCCI,2000)

As gotas de chuva conduzidas pelo vento podem ser inábeis para seguir a mudança na direção do escoamento (gotas pequenas podem mais facilmente ser defletidas para o edifício por correntes de ar do que gotas grandes) e, ao invés, ferem a face do edifício explicando o maior umedecimento de algumas de suas zonas, tais como os cantos externos (topo e esquinas) e elementos salientes da face para barlavento (Petrucci, 2000).

O fluxo de ar muda de trajetória abruptamente nos cantos e topo da face à barlavento, dessa forma, os índices de chuva incidente são maiores nas alturas mais elevadas, uma vez que a máxima concentração de chuva incidente encontra-se próxima aos cantos superiores dos edifícios, concentrando-se secundariamente ao longo dos cantos das laterais. Observa-se também a que os valores elevados de chuva incidente nos cantos laterais e beirados dos edifícios se devem também a estes locais, serem os locais de maior incidência de vento. Por outro lado, sabe-se que a intensidade real de uma chuva dirigida geralmente não é proporcional à pressão do vento, por vários fatores (Perez s/d; Bonin, 1993).

Fenômenos observados em escala real demonstram o padrão típico de umedecimento pela chuva (em forma de uma parábola) de uma parede voltada para a chuva dirigida pelo vento (figura 2.3).

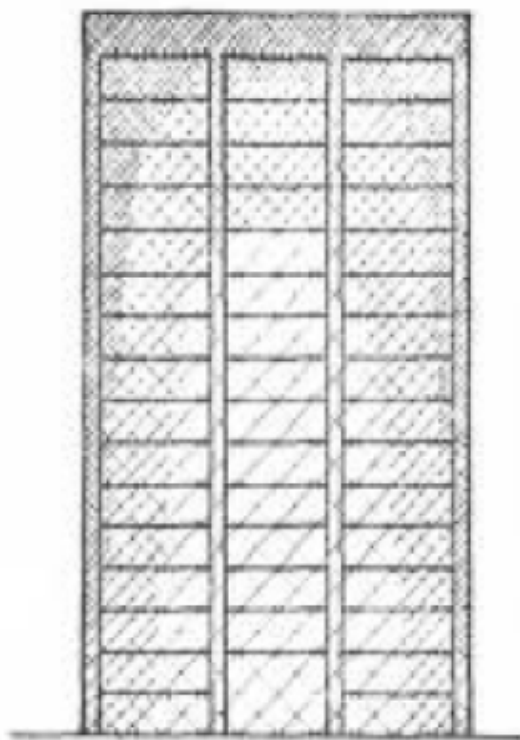


Figura 2.3 – Parábola de chuva incidente (BONIN, 1993)

Este fenômeno também foi verificado através de ensaios de modelos reduzidos de edificações colocados em túnel de vento de camada limite, no qual foram simuladas as características do vento natural e da chuva incidente, também em escala (figura2.4) (Surry, 1994).

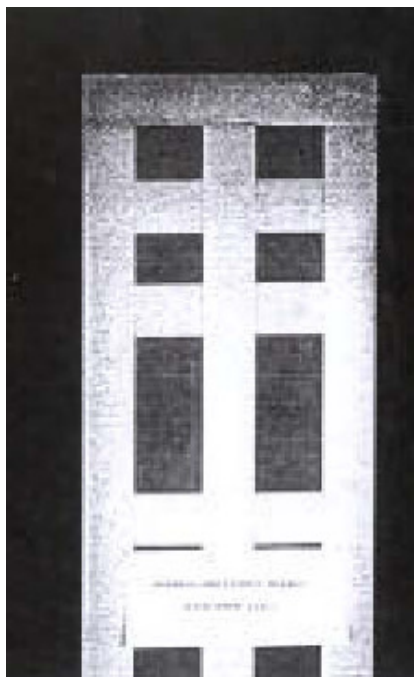


Figura 2.3 – Chuva dirigida em túnel de vento (SURRY ET AL.,1994)

Apesar da tendência que tem o vento de conduzir a chuva para os estágios mais altos do edifício, o efeito de vizinhança causado por edificações vizinhas tem igualmente o efeito de modificar a direção da chuva (Petrucci,2000).

Bauer (1987), com base nos estudos de Lacy (1977) e Mash (1977) define chuva dirigida como a chuva conduzida pelo vento de maneira a incidir sobre uma superfície vertical a um determinado ângulo. Blocken e Carmeliet (2000 e 2004) e Giongo (2008) corroboram ao definir que chuva dirigida é a chuva que tem um componente de velocidade horizontal em função do vento e que, portanto, incide obliquamente sobre as fachadas.

O ângulo no qual a chuva atua sobre a parede depende da combinação da velocidade do vento e do tamanho da gota de chuva, conforme figura 2.4 (BAUER,1987).

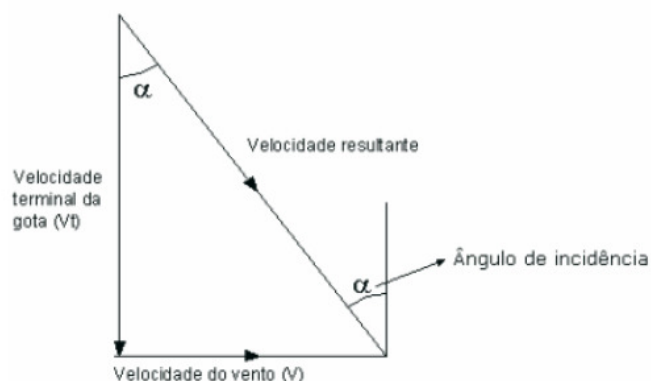


Figura 2.4 – Sistemas de forças atuantes sobre uma gota de chuva (BAUER, 1987)

Segundo Newman (1987) citado por Petrucci (2000) e Vieira (2005), a quantidade de chuva dirigida depende da quantidade total de chuva que cai em uma superfície horizontal e simultaneamente a velocidade e direção do vento no local. O autor ressalta que a exata relação entre esses parâmetros é complexa, pois dependera das relações entre taxa de precipitação, do tamanho das gotas de chuva e da velocidade terminal. Porém, com uma razoável aproximação, para locais abertos esses elementos se relacionam de acordo com a equação 2.1:

$$R_V = 200 * R_h * V * \cos \theta \quad (2.1)$$

Onde: R_v – precipitação através de um plano vertical desobstruído em espaço livre [mm];

R_h – precipitação no plano horizontal [mm];

V – velocidade do vento [m/s];

θ - ângulo entre a velocidade do vento e a normal ao plano vertical que esta sendo considerado.

Para o autor, estes índices são úteis como um guia comparativo das condições de exposição entre regiões (com relevância particular na avaliação de efeitos contínuos sobre os parâmetros), mas possuem limitações: tratam-se de índices que não indicam as diferenças nas direções preferenciais do vento e desconsideram que as velocidades do vento durante a chuva podem ser na média, mais altas que as velocidades médias anuais.

O termo chuva dirigida foi apresentado pelo Conseil International Du Bâtiment pour La Recherche L'Étude et al Documentation(CIB), em meados da década de 60, e representa a ação da precipitação soma ao vento incidente nas edificações. A proposta do CIB foi de apresentar um índice de chuva dirigida (DRI – *Drive Rain Index*, em inglês; ou ICDA, em português) como o produto total de chuvas pela velocidade do vento, esses valores sendo expressos por médias anuais (Addleson; Rice, 1991; Silva e Giralt, 1995; Lima; Morelli, 2005).

Lacy (1965, 1977), citado por diversos autores (Marsh, 1977; Silva e Giralt, 1995; Petrucci, 2000; Vieira, 2005; Lima; Morelli, 2005; Giongo, 2008), propõe o cálculo do índice de chuva dirigida anual, para avaliação das condições de exposição à chuva dirigida de locais em particular. Determina a relação como sendo resultado do produto da média anual de vento com o total de precipitação anual em um determinado local (equação 2.2).

$$ICDa = P * V / 1000 \quad (2.2)$$

Onde: ICDA – índice de chuva dirigida anual [m²/s];

P – precipitação pluviométrica total anual [mm];

V – velocidade média anual do vento [m/s].

Quando o ICDA é calculado a partir das médias anuais de vento e de precipitação pluviométrica, ele é denominado índice de chuva dirigida anual médio (ICDA médio). Pode-se também calcular o índice de chuva dirigida para diversas orientações do vento, dessa forma criam-se rosetas de índices de chuva dirigidas direcionais (ICDd) para uma determinada localidade. Esse índice direcional facilita a visualização e a análise da influencia de cada direção de vento quanto à exposição à chuva dirigida. Pode-se ainda calcular os índices mensais e sazonais para fazer uma comparação do comportamento da chuva dirigida em cada estação do ano (Giongo et al., 2008).

O índice de chuva dirigida, de acordo com a metodologia proposta por Lacy (1965), é classificado de acordo com faixas de agressividade:

- a) ICDA de 0 a 3 m²/s : exposição protegida ou branda;
- b) ICDA de 3 a 7 m²/s : exposição moderada;

c) ICDA acima de $7 \text{ m}^2/\text{s}$: exposição alta.

Conforme definido, o índice indica a quantidade total de chuva que irá ser dirigida em um ano sobre uma superfície vertical perpendicular ao vento. De acordo com Marsh (1977), para o valor de $1 \text{ m}^2/\text{s}$ do índice de chuva dirigida, corresponde a aproximadamente $200 \text{ l}/\text{m}^2$ de chuva incidente sobre uma superfície vertical.

Chand, Bhargava (2002) citados por Lima e Morelli (2005) e Giongo (2008), propõe uma quarta classificação de condição de exposição das edificações, a metodologia proposta por Lacy (1965). Trata-se da exposição severa que considera dados maiores que $11 \text{ m}^2/\text{s}$, e dessa forma confeccionaram um mapa de chuva dirigida para a Índia.

Marsh (1977), estudando as condições de exposição da edificação proposta por Lacy (1965), aponta correções aos valores propostos. De acordo com Marsh (1977), excluem-se para condições “exposição protegida” para áreas próximas a mar ou grandes estuários, situados a uma distância de 8 km, cujos valores devem ser corrigidos considerando-se sempre um grau de condição de exposição acima. No que diz respeito à condição de “exposição moderada”, excluem-se áreas onde o índice calculado seja maior ou igual a $5 \text{ m}^2/\text{s}$, a uma distância de 8 km do mar ou de grandes estuários.

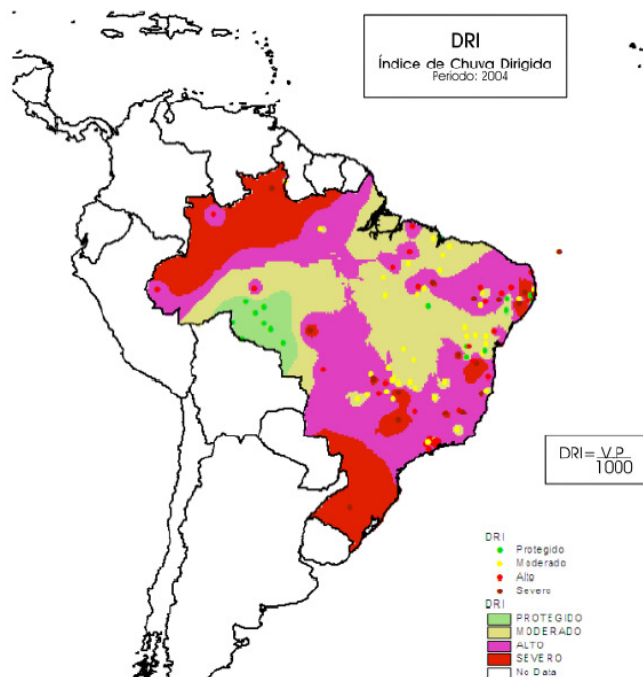
Aspectos do entorno de uma edificação ou de própria edificação não são considerados nas classificações de Lacy (1967) ou Marsh (1977). De acordo com Petrucci (2000), em áreas de exposição protegida ou moderada, edifícios altos que se destacam da vizinhança ou edifícios altos localizados em colinas ou elevações devem ser considerados com uma exposição de grau mais severo do que o indicado.

O índice de chuva dirigida é uma variável complexa, e, nem sempre, um baixo ICDA corresponde a baixas quantidades de chuva dirigida na realidade, pois no momento da chuva, a velocidade do vento é superior significativamente, e o vento incidente no momento da chuva difere significativamente do vento nos períodos sem chuva. O significado real do ICDA depende, principalmente, da topografia e do clima da região em estudo. O ICDA não dá indicativos reais de como as gotas de chuva incidem nas fachadas, sob a ação da turbulência no entorno da edificação. Cada gota de chuva, na realidade, tem sua trajetória e força, diferentes que provocam efeitos diferenciados nas fachadas (Lima; Morelli, 2005).

Outra proposta, bem mais completa, é apresentada pela Norma BS 8104 (BRITISH STANDARD, 1992), única Norma existente que relaciona a variável de chuva dirigida, onde são apresentados vários coeficientes de correção para o valor calculado de índice de chuva dirigida, em função da altura da edificação, forma da fachada, materiais, relevo, vegetação, direção do vento, entre outros. A Norma apresenta também para o Reino Unido, índices de chuva dirigida anual para diversas regiões do país.

O índice de chuva dirigida pode ser usado com duas finalidades: indicar ao projetista qual a intensidade de exposição do local onde vai ser construída a edificação e permitir que os pesquisadores comparem as condições reais de exposição das paredes e coberturas de uma edificação com as dos ensaios de estanqueidade à água da chuva (Perez, 1988).

O Brasil não dispõe de dados combinados de precipitação e vento para estabelecermos um zoneamento nacional de chuvas incidentes, como no caso dos países europeus (Perez, 1988). De acordo com Lima e Morelli (2005), com base nos mapas de vento e chuva que se tem disponíveis, pouco se pode inferir sobre aspectos relativos à chuva dirigida, ou a índices relacionados com este parâmetro. Os autores realizaram então um estudo onde foi elaborado um primeiro mapa para o índice de chuva dirigida para o Brasil, figura 2.5, apresentado mesmo com restrições, informações importantes sobre o parâmetro de chuva dirigida e considerações de macroclima específicas para o ano de 2004. Os dados de referência do mapa foram coletados no Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC), optando-se por trabalhar com dados referentes a todas as estações disponíveis para o ano de 2004. Os autores ressaltam a importância da obtenção de médias de um número maior de anos para que se permita a representatividade para o clima nacional na última década.



**Figura 2.5 – Mapa brasileiro de chuva dirigida para o ano de 2004
(LIMA;MORELLI,2005)**

Observa-se ainda na figura 2.5 que o Brasil apresenta na maioria do território nacional um grau de exposição classificado de alto a severo, em especial considerando-se a observação apresentada por Marsh (1977) de um acréscimo de um nível de exposição quando se consideram distâncias de até 8 km da costa. O extenso litoral apresenta nestas condições, grau de exposição alto a severo sendo que severo em sua maior parte. Nesta faixa também estão (segundo estimativas) mais de 60% das cidades nacionais (Lima;Morelli,2005).

Salienta-se que este mapa traz informações apenas sobre o grau de exposição para o ano de 2004, sem indicações de sentido preferencial de incidência da chuva dirigida relacionada. A consideração de sentido preferencial para um país com as dimensões do Brasil somente fará sentido no momento que se tenha monitoramento de ventos, chuvas horárias e com uma malha de estações que permita estudos de microclima, possibilitando inclusive a influencia do entorno construído no processo de chuva dirigida. Nas condições que o Brasil apresenta hoje, somente é possível apresentar estudos com a precisão apresentada anteriormente (Lima; Morelli, 2005).

2.8 MEDIÇÕES DE CHUVA

Sánchez (2000) refere-se à determinação da quantidade d'água “chovida” sobre a superfície do terreno. Essa medição não pode ser feita sobre toda a área de interesse, usualmente uma bacia hidrográfica, mas em alguns pontos previamente escolhidos, onde se instalam pluviômetros ou pluviógrafos, locais esses denominados estações ou postos pluviométricos. Salienta-se, pois, o caráter eminentemente pontual das medições de chuva, contrapondo-se a grande variabilidade espacial da chuva, o que torna difícil o problema da sua correta avaliação. Descrevemos com algum detalhe as duas categorias básicas de medidores, o pluviômetro, de leitura direta, e o pluviógrafo, registrador automático, bem como o tratamento e análise dos dados colhidos, buscando a geração de informação utilizável para efeitos de dimensionamento de obras de engenharia.

2.8.1 PLUVIÔMETROS

Um pluviômetro é constituído por um recipiente coletor de chuva que armazena água num depósito interno, captada através de uma boca horizontal de área padronizada em 200 cm² pela Organização Meteorológica Mundial (OMM), organismo das Nações Unidas que trata da padronização mundial das observações meteorológicas entre outras coisas (Sánchez, 2000). A altura de chuva se determina vertendo a água armazenada no aparelho numa proveta graduada em milímetros e décimos de milímetros, colocada sobre uma superfície horizontal.

A quantidade de chuva que entra no pluviômetro depende da exposição ao vento, da altura do instrumento e da altura dos objetos vizinhos ao aparelho. O efeito do vento altera a trajetória do ar no espaço circundante ao pluviômetro e causa turbulência nas bordas do instrumento, produzindo erros na observação final da chuva. A distância mínima dos obstáculos próximos (edificações, árvores, morros, etc.) deve ser igual a quatro vezes a altura desse obstáculo, devendo o local de instalação estar protegido do impacto direto do vento. Quando isso não ocorre, podem usar-se proteções (flexíveis ou rígidas) em torno do instrumento para reduzir as perturbações aerodinâmicas.

A altura da boca do pluviômetro sobre o solo deve ser de 1,50 m. No entanto, o local ideal para a medição da chuva seria exatamente no nível do solo, que é onde interessa o valor da chuva.

Na operação do instrumento apontam-se as seguintes fontes de erro que devem ser eliminadas ou minimizadas:

- perdas por evaporação da água contida no coletor;
- contagem incorreta do número de provetas resultantes, no caso de chuvas importantes;
- água derramada fora durante a transferência do coletor para a proveta;
- graduação da proveta não correspondente a área da boca do pluviômetro;
- leitura defeituosa da escala da proveta;
- anotação incorreta na caderneta do observador.

O pluviômetro é um aparelho totalizador, que marca a altura de chuva acumulada num dado período de tempo. Sua leitura é feita normalmente uma vez por dia (as 9 horas), gerando-se, então, serie de valores diários de precipitação.

2.8.2 PLUVIÓGRAFOS

Quando é necessária informação mais detalhada da chuva, como sua distribuição temporal ou variação de intensidades, usa-se o pluviógrafo, instrumento que registra esses valores, geralmente num gráfico de papel com coordenadas apropriadas. Existem três tipos básicos de pluviógrafos: de bóia, de massa e de cuba (ou caçamba) basculante.

O pluviógrafo de bóia armazena a água da chuva num pequeno reservatório que possui uma bóia flutuando na superfície, ligada por uma haste a pena que escreve sobre o gráfico arrolado num tambor que gira, impulsionado por um relógio. Quando chove, a água dentro do depósito faz subir verticalmente a bóia (e a pena) ate uma altura de chuva calculada em 10 mm. Neste instante, um sifão descarrega automática e instantaneamente o depósito, voltando à pena a posição zero, para iniciar outra subida. O traçado é contínuo, porem voltando a zero cada 10 mm de chuva.

O pluviógrafo de massa é uma balança que acumula a água num depósito que, ao aumentar de peso, desce e movimentada um braço e uma pena que escreve sobre um gráfico de papel arrolado num tambor giratório impulsionado por um relógio. O depósito descarrega automaticamente ao atingir 10 mm de chuva, graças a um sifão interno.

No sistema de cuba basculante, utiliza-se como sensor uma pequena cuba com dois compartimentos de 0,5 mm de chuva de capacidade, que recebem a água alternadamente. Quando cheio um deles, o próprio peso faz a cuba bascular, esvaziando-o e emitindo um impulso elétrico que pode ser aproveitado para acionar um sistema de registro gráfico (analógico) ou digital. O registro é discreto, em degraus de 0,5 mm de chuva (ou de 0,1 mm, também disponível) e apresenta a vantagem de que o sistema de registro não precisa estar no mesmo local que o sensor, sendo, portanto, ideal para telemetria, já que o sinal gerado pode ser transmitido à distância.

3 PROGRAMA EXPERIMENTAL

3.1 ENSAIOS EM TÚNEL DE VENTO

Diversos túneis têm sido construídos ou adaptados por laboratórios com a finalidade de aplicação na construção civil. Podemos citar os túneis para fins aeronáuticos e os que simulam a camada limite atmosférica (CLA) para estudar os efeitos do vento em edificações. Os túneis aerodinâmicos, para fins aeronáuticos, geram ventos uniformes de muito baixa turbulência e de velocidades mais altas que os túneis de vento aplicados à construção civil (Blessmann, 1990). Além disso, os túneis aeronáuticos são muito curtos para desenvolverem boas simulações de camada limite (Loredo-Souza et al., 2004).

Neste trabalho, os ensaios serão realizados no túnel vento de camada limite Professor Joaquim Blessmann do Laboratório de Aerodinâmica das Construções (LAC) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS)

3.1.1 TÚNEL DE VENTO PROFESSOR JOAQUIM BLESSMANN

O Túnel de Vento Professor Joaquim Blessmann é um túnel de camada limite e circuito fechado e está em operação desde 1977 (Blessmann, 1990). A (Figura 0.1) mostra uma foto recente do laboratório. O túnel tem viabilizado ao longo destes anos, o desenvolvimento de estudos de efeitos estáticos e dinâmicos em construções civis em geral, além de determinar características de ventos simulados entre outras pesquisas como: efeitos sobre usuários, efeitos sobre transeuntes (veículos e plantas), dispersão de poluentes, estudo de características da camada limite, ventilação interna, estudos hidráulicos por via aerodinâmica, etc.



Figura 0.1 - Vista da parte externa da câmara de ensaios do túnel de vento Professor Joaquim Blessmann, da UFRGS.

3.1.1.1 Características do túnel de vento

A seção de altas velocidades do túnel de vento Professor Joaquim Blessmann apresenta as características a seguir:

- a) relação comprimento/ altura $\cong 10,3$;
- b) dimensões médias = 1,30m x 0,90m x 9,32 (largura x altura x comprimento);
- c) velocidade máxima do escoamento com vento uniforme e suave sem a presença de modelos $\cong 44\text{m/s}$ (160 km/h);
- d) número de Reynolds do túnel = $2,6 \times 10^6$;
- e) motor elétrico que acionam as hélices do ventilador = 100HP.

3.1.1.2 Mesas para fixação dos modelos

O túnel de vento dispõe atualmente de quatro mesas giratórias (cada uma com suas aplicações específicas) para fixação dos modelos (Figura 0.2):

a) Mesa I,

- ensaios do tipo aeronáutico no piso do túnel, em camada limite de pequena espessura e escoamento de baixa turbulência; ensaios para a indústria da construção com geradores de turbulência na câmara de simuladores. Na Mesa I o modelo pode ser colocado tanto na vertical como na horizontal;

b) Mesa II,

- ensaios do tipo aeronáutico no eixo do túnel, ensaios para a indústria da construção civil com blocos colocados no piso e/ou geradores de turbulência na câmara de simuladores ou com jatos transversais;

c) Mesa III,

- esta mesa possui grande rigidez e foi construída especificamente para estudos dinâmicos em estruturas de grande alteamento, tais como torres, chaminés, mastros, etc.

d) Mesa IV,

- mesa utilizada para ensaios de modelos que necessitam ser reproduzidos em maior escala, ensaios para baixas velocidades do vento. Recentemente foi testado um modelo completo de ponte nesta mesa.

Mais informações sobre o túnel podem ser encontradas em (Blessmann, 1990).

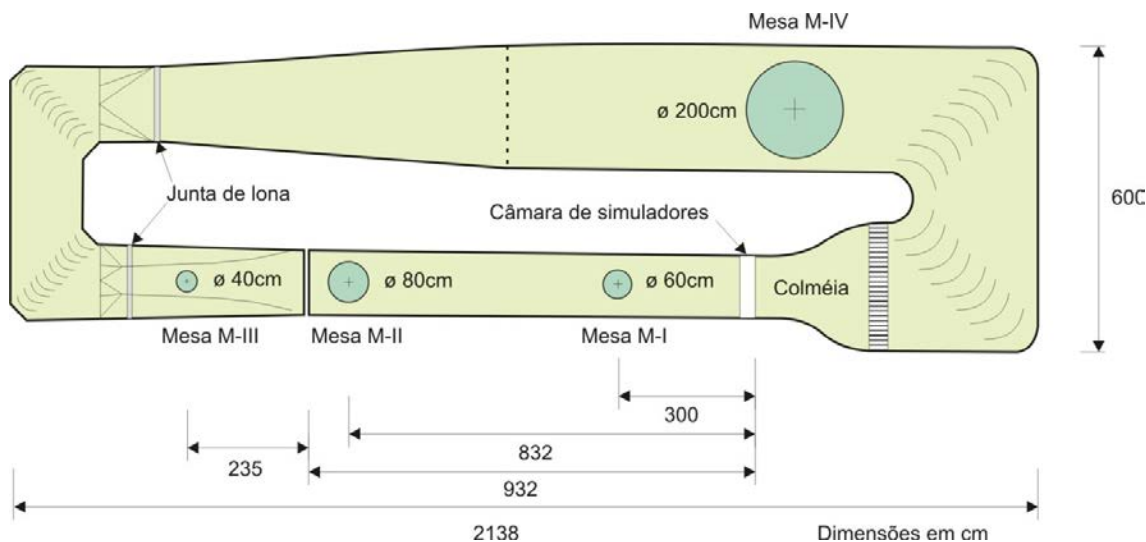


Figura 0.2 - Planta baixa do circuito aerodinâmico do túnel de vento Professor Joaquim Blessmann, da UFRGS.

3.2 DETERMINAÇÃO DA VELOCIDADE DO VENTO NO TÚNEL

A velocidade do vento no túnel pode ser determinada através do diferencial de pressão, Δp_a , obtido da leitura de dois anéis piezométricos situados na entrada da seção de trabalho. As leituras podem ser feitas com a utilização de um micromanômetro à água tipo Betz, por um multimanômetro, por transdutores de pressão (Manoair ou Scanivalve (Sistema de Aquisição de Dados de Pressão)). Neste trabalho utilizou-se para a medição dos valores de Δp_a o Scanivalve acompanhado de um micromanômetro Schiltknecht Manoair 500. A Figura 0.3 mostra os transdutores de pressão do Sistema Scanivalve e o Manoair.

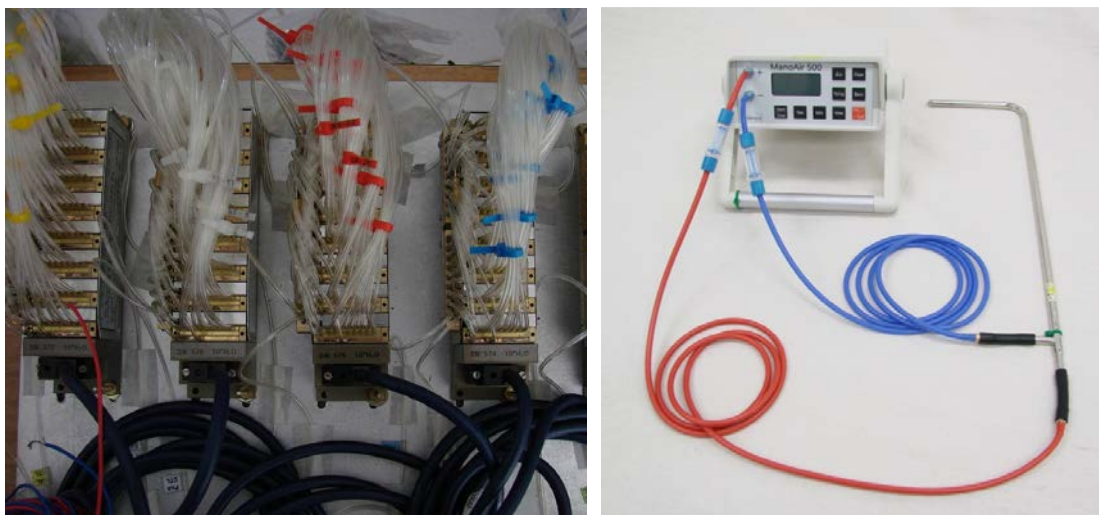


Figura 0.3 - (a) Vista superior dos transdutores de 64 canais do Scanivalve; (b) Manoir e mangueiras de conexão aos anéis piezométricos.

São determinados coeficientes k_o , que relacionam a pressão dinâmica q , em um determinado local do túnel e a diferença de pressão entre os anéis piezométricos do convergente do túnel. Para o cálculo da velocidade do escoamento ou pressão dinâmica em qualquer ponto do escoamento, basta fazer a leitura da pressão de referência no ponto da seção desejado. A velocidade do escoamento é dada por:

$$V = \sqrt{\frac{2q}{\rho_{ar}}} \quad (0.1)$$

Onde:

$$q = k_o \Delta pa \quad (0.2)$$

$$\rho_{ar} = 0,0474 \frac{P_{atm}}{T} \left[\frac{kgf \cdot s^2}{m^2} \right] \quad (0.3)$$

q é a pressão dinâmica ao longe = $\frac{1}{2} \rho_{ar} V^2$ [mmHg];

ρ_{ar} é a massa específica do ar;

T é a temperatura [K];

P_{atm} é a pressão atmosférica [mmHg];

Δpa é a variação de pressão entre os dois anéis piezométricos do convergente [mmH₂O];

k_o é a relação entre a pressão dinâmica entre um determinado ponto do túnel e a variação da pressão entre os anéis piezométricos (k_o , na mesa MI, no eixo do túnel, corresponde a 1,011 para vento suave e 1,088 para vento turbulento).

3.3 SIMULAÇÃO DE CARACTERÍSTICAS DO VENTO NATURAL

Para se obter uma escala apropriada do vento natural em túnel de vento pode-se cobrir certo comprimento do piso com materiais que representem o efeito de rugosidade adequada (simulando a rugosidade das edificações) ao escoamento. Conforme Blessmann (1990), esta técnica corresponde à principal fonte de turbulência em baixa altitude.

Outros dispositivos podem ser utilizados para simular uma ou mais características do vento natural, por exemplo, intensidade de turbulência, escala de turbulência, espectro, curva de auto-correlação, etc. Tais dispositivos podem ser telas curvas ou telas planas de malha variável, grelhas de malhas quadrada ou retangular, grelha única de malha variável ou diversas grelhas superpostas, telas uniformes e triângulos de diversas formas geométricas.

Outra técnica constitui-se na pela injeção de ar, paralelamente, perpendicularmente ou obliquamente à direção do escoamento, através de jatos de ar. Ao contrário das técnicas citadas acima que diminuem cerca de 80% (em casos extremos) a velocidade média do escoamento, a técnica da injeção de ar não provoca perdas na velocidade média.

As técnicas mencionadas acima ainda podem ser combinadas para melhor reproduzirem as características do vento natural (Figura 0.4).

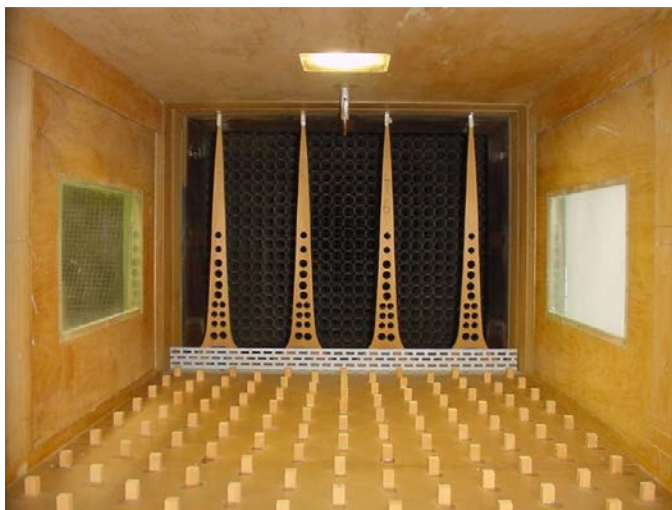


Figura 0.4 - Dispositivos de geração da camada limite do túnel de vento Prof. Joaquim Blessmann $p=0,23$ (Loredou-Souza et al., 2004)

Os modelos serão ensaiados na mesa M-II submetidos a ventos deslizantes e turbulentos com perfil potencial de velocidade média de expoente $p=0,23$ na *fase I* (medição das características do escoamento), e $p=0,22$ na *fase II* (simulação física de vento e chuva). As principais características deste vento simulado no ensaio podem ser vista na figura 3.5, sendo respectivamente, perfil vertical da velocidade média, em percentagem da velocidade média no eixo longitudinal do túnel (pontos experimentais e curva potencial teórica), intensidade (I_1) e macroescala (L_1) da componente longitudinal da turbulência.

O perfil da velocidade média é expresso, aproximadamente, pela lei potencial:

$$\frac{\bar{V}(z)}{\bar{V}_{ref}} = \left(\frac{x_{(z)}}{x_{ref}} \right)^p \quad (3.4)$$

Sendo:

$V(z)$ velocidade média na altura z ;

V_{ref} velocidade média em uma altura de referência (no túnel, $z_{ref} = 450$ mm – cota do eixo longitudinal do túnel);

p expoente da curva de potência.

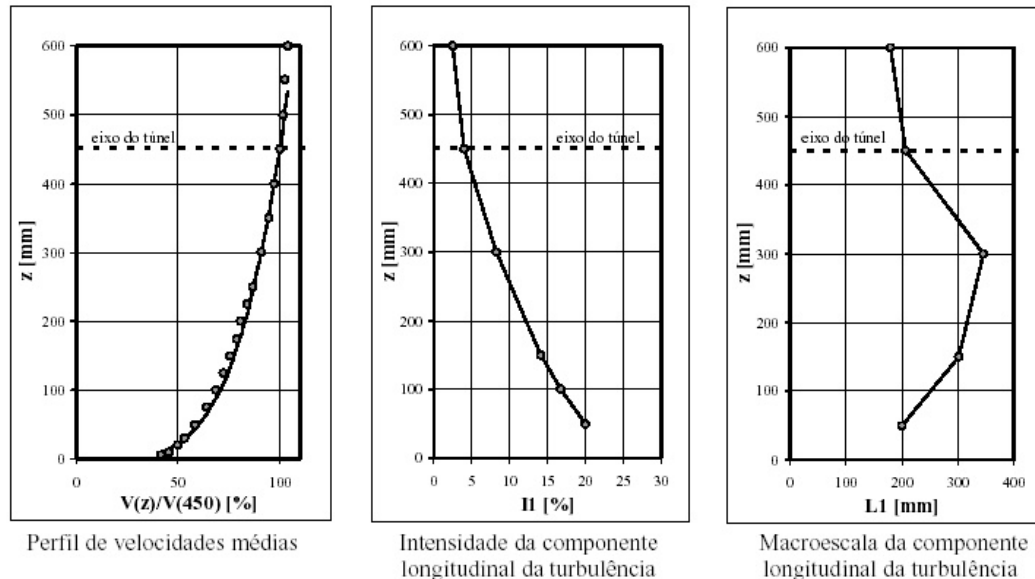


Figura 0.5 – Características do vento deslizante e turbulento simulado com o expoente $p=0,23$

O vento simulado com perfil potencial de velocidades médias de expoente $p=0,23$, corresponde a terreno com rugosidade entre as categorias III e IV da NBR-6123, e tem as seguintes características:

Categoria III – terreno plano ou ondulado com obstáculos, tais como sebes e muros, poucos quebra-ventos de árvores, edificações baixas e esparsas.

Exemplos:

Granjas e casas de campo, com exceção das partes com matos;

Fazendas com sebes e/ou muros;

Subúrbios a considerável distanciam do centro, com casas baixas e esparsas;

A cota média do topo dos obstáculos é considerada igual a 3,0 m.

Categoria IV – terreno coberto por obstáculos numerosos e pouco espaçados, em zona florestal, industrial ou urbanizado.

Exemplos:

Zonas de parques e bosques com muitas árvores;

Cidades pequenas e seus arredores;

Subúrbios densamente construídos de grandes cidades;

Áreas industriais plena ou parcialmente desenvolvidas.

A cota média do topo dos obstáculos é considerada igual a 10 m. Esta categoria inclui também zonas com obstáculos maiores e que ainda não possam ser considerados na categoria V.

3.4 SIMULAÇÃO DA CHUVA

A adimensionalização das equações do movimento das gotas de chuva interagindo com o escoamento do vento em torno de uma edificação [Raimondo e Haasz, 1978] revela que a simulação através de modelos reduzidos pode ser realizada se as seguintes condições de semelhança forem seguidas:

- 1) Simulação das características do vento natural;
- 2) Manutenção da razão constante entre a velocidade terminal da gota (V_t) e a velocidade do vento (V), definindo assim o ângulo de queda da chuva induzida pelo vento;
- 3) Manutenção do número de Froude (V^2/Hg – velocidade do vento, V [m/s], ao quadrado, dividida pela altura do modelo ou edificação, H [m], e pela aceleração da gravidade, g [m/s²]).

A adoção do ângulo correto de queda da chuva-dirigida pelo vento garante a qualidade da simulação sob condições estáveis. Este requerimento engloba um conjunto de diversos parâmetros, incluindo o coeficiente de arrasto da gota de chuva, sua forma e tamanho, pois todos estes contribuem para o eventual equilíbrio que determina V_t . Entretanto, o coeficiente de arrasto é fortemente dependente do número de Reynolds [Raimondo e Haasz, 1978] na gama operacional da modelagem (da ordem de 100). Isto implica em uma incerteza relacionada à simulação nas regiões de interesse próximas às arestas das edificações, onde as

gotas de chuva não estão em equilíbrio e suas trajetórias finais são determinadas por mudanças do arrasto em relação a seus valores de equilíbrio.

A simulação das características do vento natural é uma técnica bem desenvolvida no LAC e em diversos laboratórios de outros países, tendo sido descrita no 3.3. A fim de manter a razão entre a velocidade terminal da gota e a velocidade do vento, bem como o número de Froude adotou-se um escala para o modelo de 1/64 (eq. 3.5). Isto define a escala de velocidades como sendo 1/8 (eq.3.6), o que por sua vez define a distribuição das dimensões das gotas de chuva no modelo. Os requerimentos de modelagem admitem que a intensidade da precipitação em si não é um parâmetro importante [Surry et al, 1994].

$$\frac{H_M}{H_R} = \frac{1}{64} \quad (3.5)$$

Onde: H_R – altura real da edificação [m];

H_M – Altura do modelo simulado em túnel de vento [m].

$$\frac{V_M}{V_R} = \sqrt{\frac{H_M}{H_R}} = \frac{1}{8} \quad (3.6)$$

Onde : V_R – velocidade do vento [m/s]

V_M – Velocidade do vento a ser utilizada no ensaio [m/s].

O modelo da chuva foi criado utilizando-se um conjunto de aspersores escolhidos para reproduzir as dimensões das gotas (Figura 3.7). Um arranjo foi convenientemente disposto de forma a criar uma distribuição uniforme da chuva simulada. Fotografias dos simuladores no interior do túnel de vento são mostradas no Capítulo 4, sendo os ensaios correspondentes à *Fase II* realizados na mesa M-IV do túnel de vento.

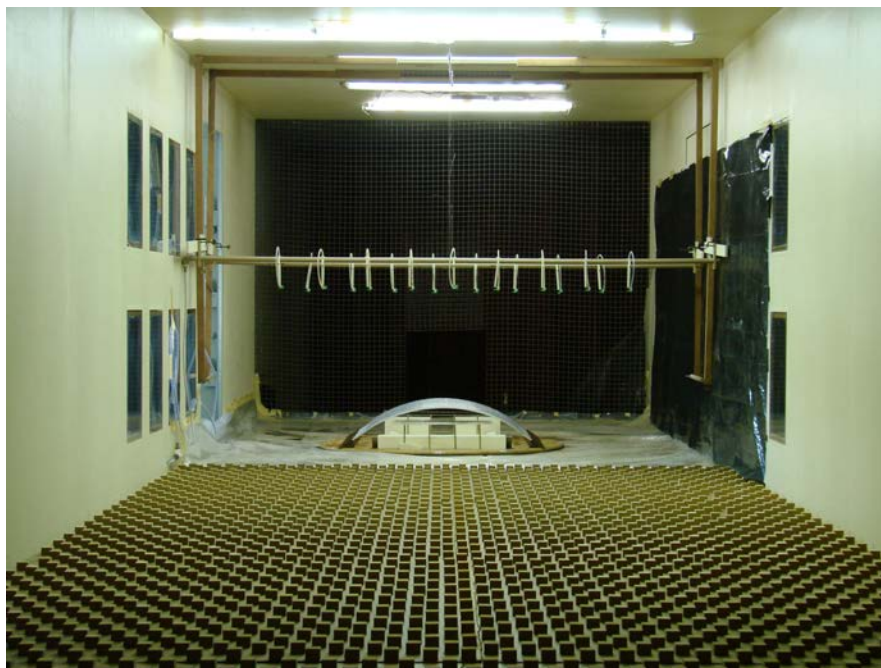


Figura 0.6 - Dispositivos de simulação de chuva no interior do túnel de vento Prof. Joaquim Blessmann

3.5 SIMULAÇÃO FÍSICA DA INTERAÇÃO VENTO-CHUVA

Apesar do alto de grau de entendimento dos diversos fenômenos meteorológicos relacionados à chuva e ao vento separadamente, a interação vento-chuva, ou mais especificamente, a chuva conduzida pelo vento, não teve a mesma atenção por parte dos pesquisadores. Isto é muito mais sério quando seus efeitos tornam-se importantes, tais como os problemas que podem causar ao envelope de uma edificação. As dúvidas associadas ao projeto de uma edificação em relação à chuva conduzida pelo vento são inúmeras. Não somente é a migração da água através do envelope da edificação um problema complexo, envolvendo diferenciais de pressão, capilaridade, etc., como também o é a falta de conhecimento a respeito da distribuição da chuva através desta superfície externa. Sabe-se pouco além de que é fortemente afetada pelos detalhes arquitetônicos da edificação e pelas características da vizinhança de entorno, a qual afeta os padrões de escoamento do vento e, conseqüentemente, o grau de impacto no envelope da edificação.

Os problemas associados à chuva conduzida pelo vento têm sido estudados por alguns autores [Lacy, 1965; Ishizaki et al, 1970; Couper, 1972; Robinson e Baker, 1975], embora em grande parte dos casos somente em escala natural. Algumas tentativas computacionais de

entendimento do fenômeno foram tentadas, tais como o trabalho de Choi [1993], porém a simulação física da interação vento-chuva usando modelos reduzidos em túnel de vento de camada limite foi desenvolvida somente em 1994 [Surry et al, 1994], no *Boundary Layer Wind Tunnel Laboratory* da *University of Western Ontario*, Canadá.

Os problemas envolvidos na simulação em escala reduzida são diversos e significativos, sendo alguns deles comentados a seguir:

A chuva possui uma variada gama de propriedades em termos de intensidade e dimensão das gotas. Para uma mesma tempestade, a intensidade da precipitação pode variar bastante. Além disso, a estatística relacionada à combinação vento-chuva tem recebido pouca atenção se comparada aos dois fenômenos isolados. Isto torna a interpretação dos resultados oriundos da modelagem em escala reduzida um delicado problema, especialmente em termos das características de longo prazo relacionadas à chuva conduzida pelo vento.

A interação entre as gotas d'água carregadas pelo vento e os padrões de escoamento em torno da edificação requerem a satisfação de certas leis de semelhança para garantir que a interação está modelada adequadamente. Esta modelagem é adicional à própria modelagem da camada limite atmosférica.

Produzir um modelo de queda de chuva requer o emprego de dispositivo tipo aspersores ou sprays que propiciem uma distribuição dos tamanhos das gotas conforme os requerimentos da modelagem. Uma complicação prática é a evaporação das gotas durante sua queda.

São necessárias técnicas especiais para determinar a distribuição da deposição de água sobre a superfície da edificação.

Após a água atingir a edificação, haverá migração sob ação da gravidade, do próprio vento, de tensões superficiais ou mesmo por capilaridade. Alguns detalhes destes processos estão além da capacidade física de modelagem e, portanto, requerem outras abordagens.

3.6 PROJETOS DOS MODELOS E TÉCNICA EXPERIMENTAL

Utilizou-se como referência um Ginásio real existente na cidade do Rio de Janeiro (Figuras 3.7, 3.8, 3.9 e 3.10). O ginásio em questão apresenta problemas de infiltração de água quando este era atingido pela ação combinada de chuva e vento.

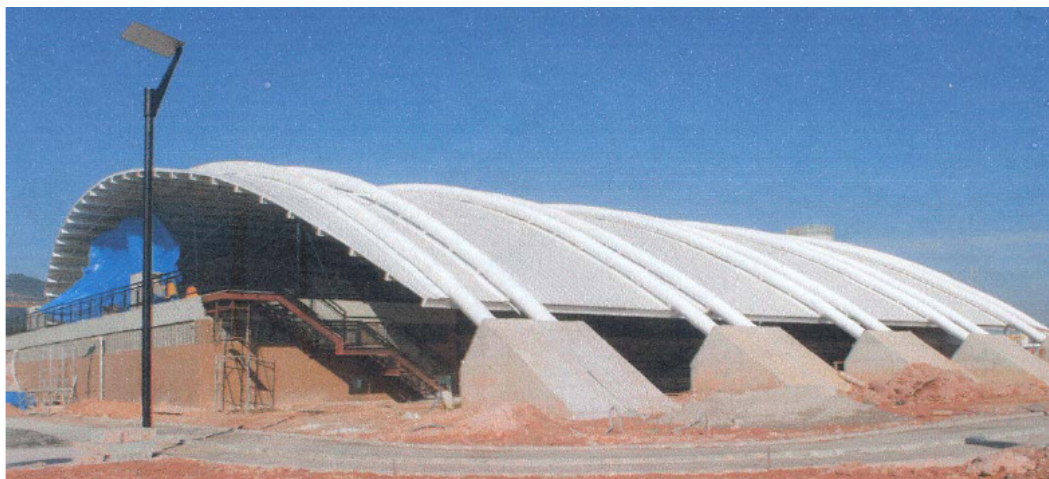


Figura 0.7 – Vista do Ginásio no Rio de Janeiro utilizado para estudo



Figura 0.8 – Ginásio no Rio de Janeiro utilizado para estudo

Foram construídos dois modelos reduzidos do ginásio, o primeiro (Fase I) em escala 1/150 (Figura 3.11) e o segundo (Fase II) em escala 1/64 (Figura 3.12). Foram simulados

todos os detalhes significativos da edificação real para que as condições de semelhança fossem preservadas, bem como reproduzidos os prédios mais significativos da vizinhança do ginásio.

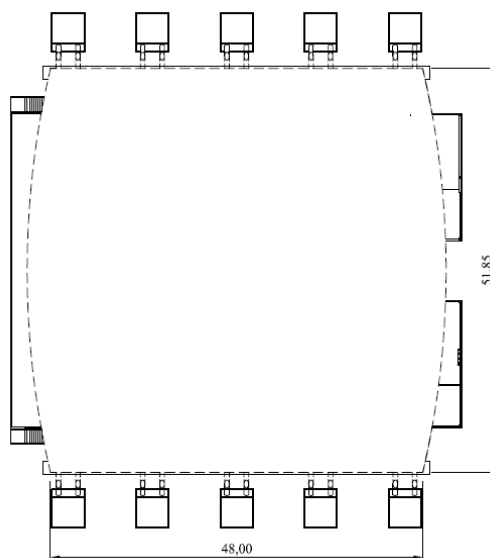


Figura 0.9 – Vista Superior do Ginásio (medidas em [m])

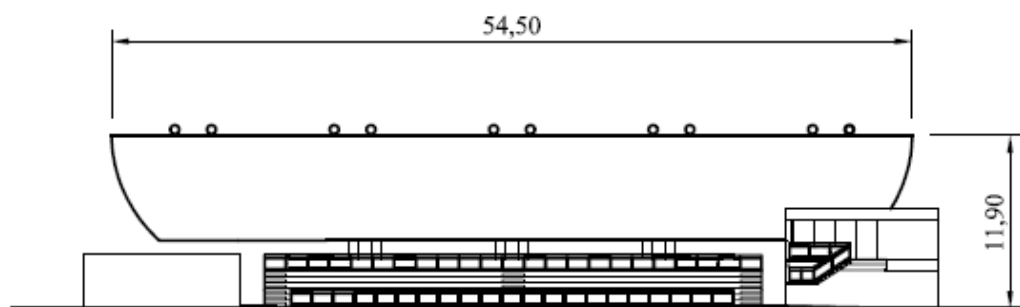


Figura 0.10 – Vista Lateral do Ginásio (medidas em [m])

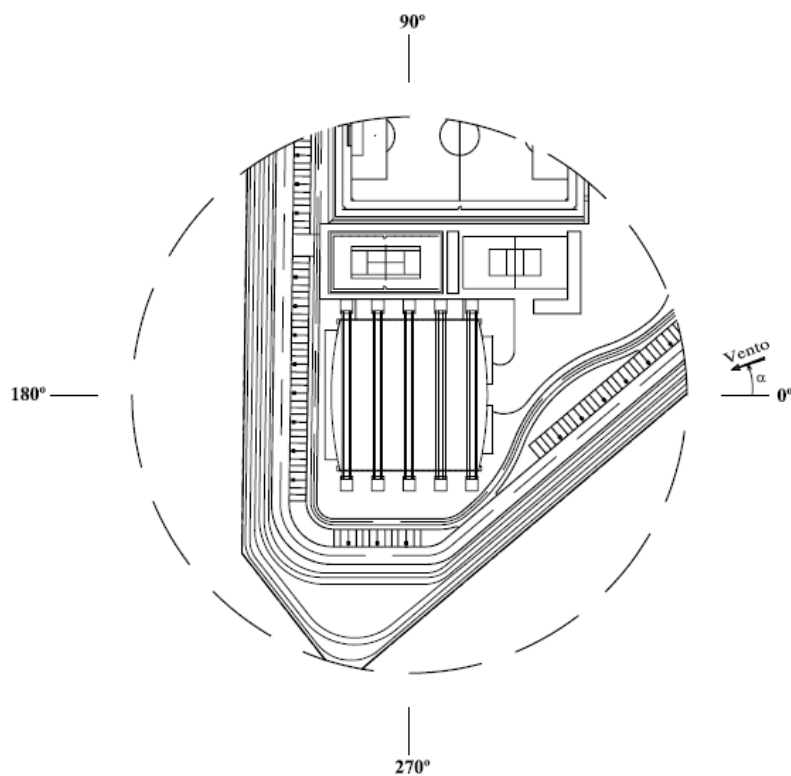


Figura 0.11 – Referência para o ângulo de incidência do vento

A *Fase I* (Figura 3.11) corresponde ao estudo realizado a fim de entender o escoamento devido ao vento em torno do Ginásio. Foram medidas as velocidades do vento em diversos pontos nas regiões próximas aos oitões do pavilhão. Os ensaios foram realizados na mesa M-II do túnel de vento, sendo as medições realizadas com sensores de fio-quente.



Figura 0.12 – Modelo do ginásio ensaiado na fase I

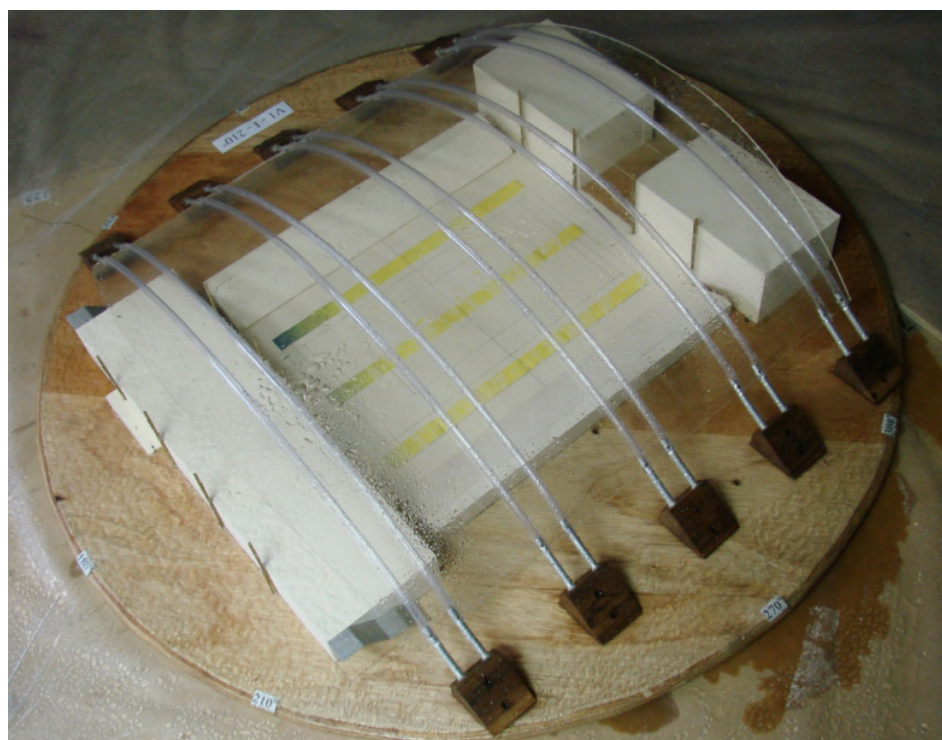


Figura 0.13 – Modelo do ginásio ensaiado na fase II

A *Fase II* (Figura 3.12) corresponde ao estudo da combinação das ações combinadas de chuva e vento no Ginásio em questão. Os ensaios foram realizados na mesa M-IV do túnel de vento.

3.7 MEDIÇÕES DA DEPOSIÇÃO DE CHUVA

Diversas técnicas foram avaliadas para a medição da deposição da chuva. Estas incluem sensores eletrostáticos e papéis sensíveis à água.

O princípio da técnica do sensor eletrostático baseia-se em inicialmente carregar as gotas de chuva com cargas eletrostáticas bem pequenas. O ginásio seria, então, instrumentado com sensores que mediriam as cargas elétricas transferidas a estes sensores no momento do impacto. Sabendo-se a relação carga/massa e a carga coletada, torna-se possível calcular a quantidade de água que atinge a superfície da edificação em função do tempo. As cargas das partículas são muito pequenas para afetar as trajetórias das gotas. Esta técnica tem sido usada em experimentos de pulverização agrícola (Inculet, 1987). Infelizmente, a carga em uma partícula não é proporcional à massa da partícula e, portanto, esta técnica é mais útil quando todas as gotas têm o mesmo tamanho.

Diversos tipos de papéis sensíveis à água foram testados. Entretanto, o mais preciso foi um papel fabricado na Suíça, importado de TeeJet (Figuras 3.11 e 3.12), uma divisão da Spraying Systems Co. (empresa com sede nos Estados Unidos). Este papel altera sua cor de amarelo para azul imediatamente após o contato com a água. Cobrindo-se partes selecionadas da edificação com este papel, obtém-se um panorama visual imediato sobre o processo referente à área molhada resultante da ação da chuva. Ao contrário do método eletrostático, este procedimento permite a simulação simultânea de todo o espectro de dimensões das gotas de chuva. Entretanto, os testes devem ser de curta duração para que os padrões referentes à área molhada possam ser identificados.

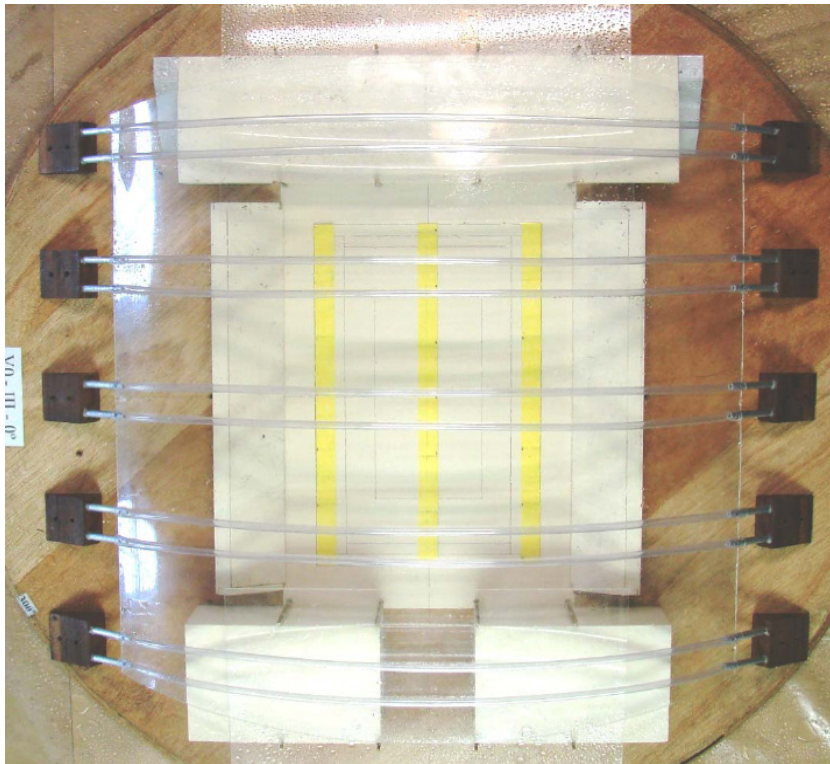


Figura 0.14 – Papel TeeJet seco utilizado na medição da Fase II

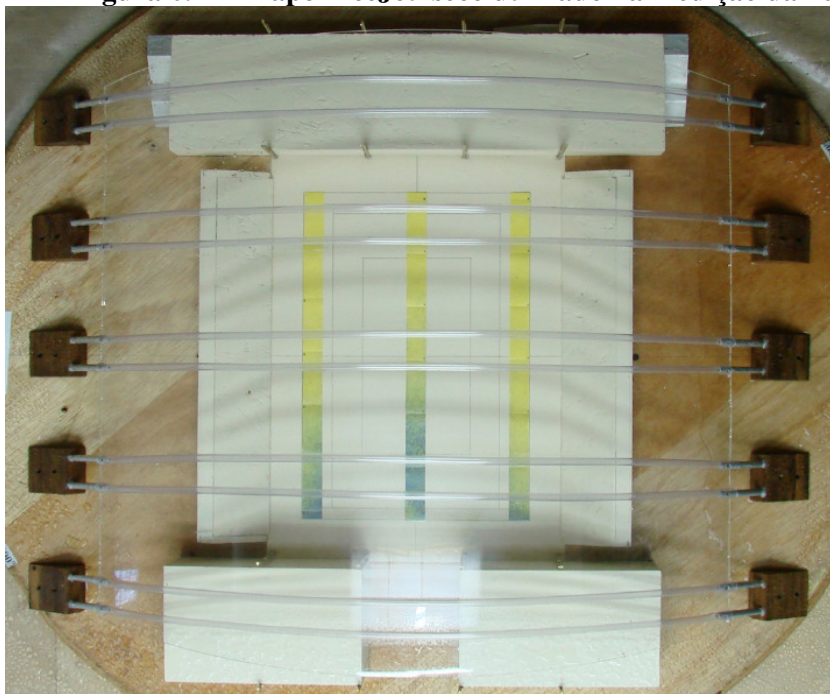


Figura 0.15 – Papel TeeJet molhado após ensaio da Fase II

4 ANALISE DOS RESULTADOS

4.1 ESTUDOS DO ESCOAMENTO

Esta etapa corresponde à *Fase I* do estudo e teve por finalidade o entendimento do escoamento devido ao vento em torno do Ginásio, nas zonas de penetração de chuva.

Foram medidas as velocidades do vento em diversos pontos nas regiões próximas aos oitões do pavilhão (Figuras 4.1 e 4.2).

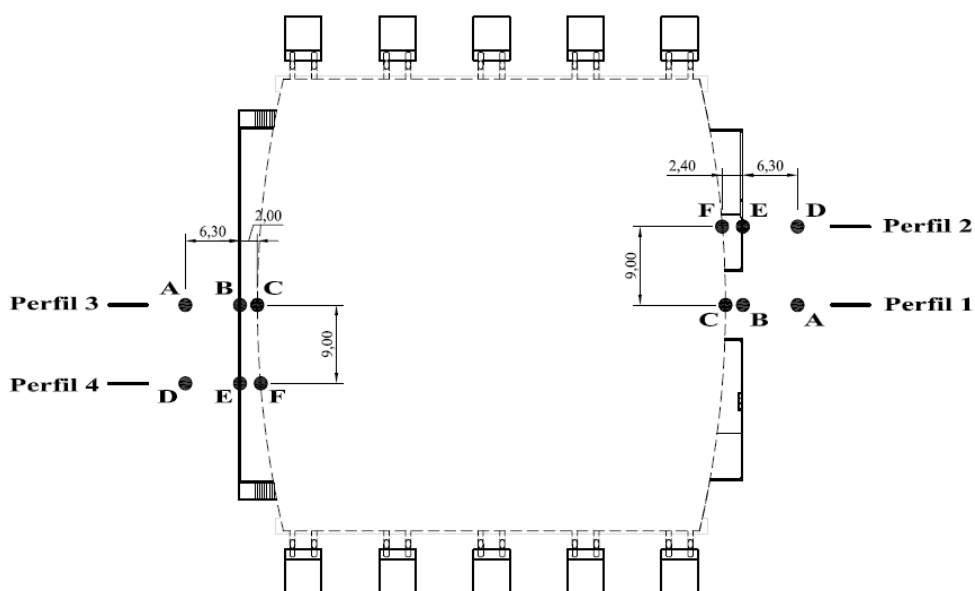


Figura 4.1 – Croqui esquemático com a localização dos perfis verticais de velocidades do Ginásio – Configuração I
Dimensões em [m]

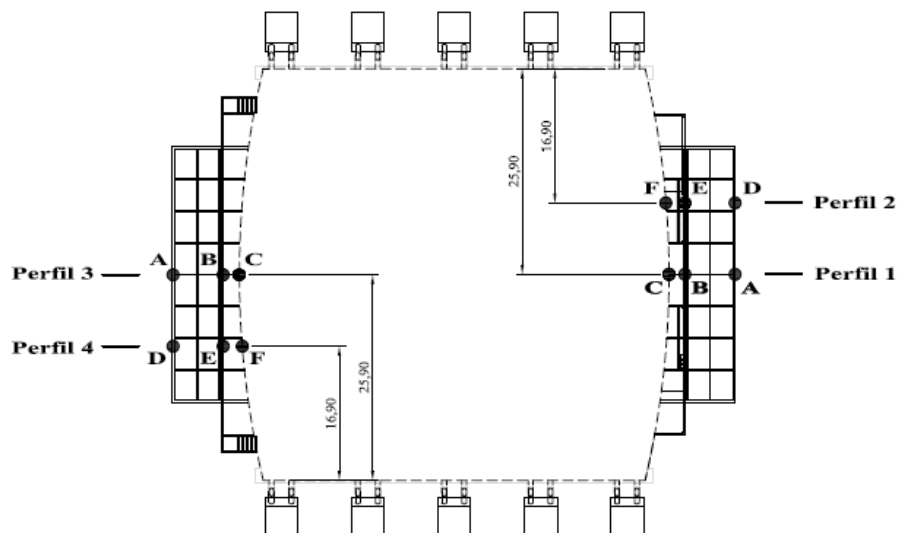


Figura 4.2 – Croqui esquemático com a localização dos perfis verticais de velocidades do Ginásio – Configurações II e III
Dimensões em [m]

Foram traçados 4 (quatro) perfis de velocidade e turbulência do vento. Os perfis 1 e 3 foram medidos posicionando o anemômetro de fio quente no eixo do modelo, os perfis 2 e 4 o anemômetro era posicionado a 9 m do eixo do modelo.

Para cada perfil foram realizadas medições em três pontos: o ponto A e D afastado 6,3 m da extremidade do modelo, ponto B e E afastado 2 m da extremidade do modelo e ponto C e F junto à extremidade do modelo.

Para cada ponto, a velocidade do vento era medida em diversas alturas. A altura do anemômetro era variada entre 1,2 e 1,6 m até a altura máxima.

Nas configurações II e III, a presença das placas impossibilita a medição do perfil de velocidade e turbulência na região abaixo das mesmas.

4.2 COMPARATIVOS DOS PERFIS DE VELOCIDADE E TURBULÊNCIA

Abaixo, a partir dos resultados obtidos nos ensaios realizados em Túnel de Vento, torna-se possível traçar gráficos comparativos dos perfis de velocidade e turbulência do vento para os ângulos de incidência de vento nas 3 (três) configurações ensaiadas.

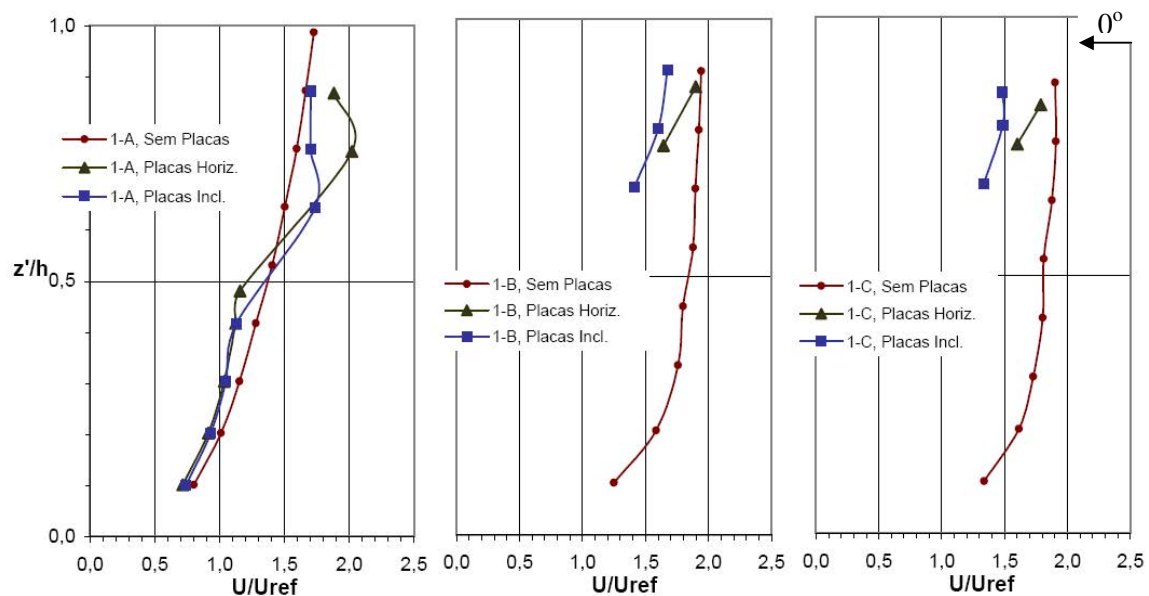


Figura 4.3 – Perfil 1 vertical das velocidades médias normalizadas – Vento 0°

Observando a figura acima, onde é apresentado o perfil 1 vertical das velocidades médias normalizadas com um ângulo de incidência de 0°, pode identificar a semelhanças de comportamento de velocidades para duas configurações com placas. Nos medições realizadas no ponto A, ponto de medição mais afastado do modelo, nota-se que a partir de uma relação entre alturas aproximadamente igual a 0,55 os modelos nas configurações II e III (com placas e placa inclinada a 5) passam a ter velocidade normalizada maiores que as do modelo na configuração I (sem placas). Conforme a medição aproxima-se do modelo, pontos B e C, a configuração I passa a ter sempre as maiores velocidades.

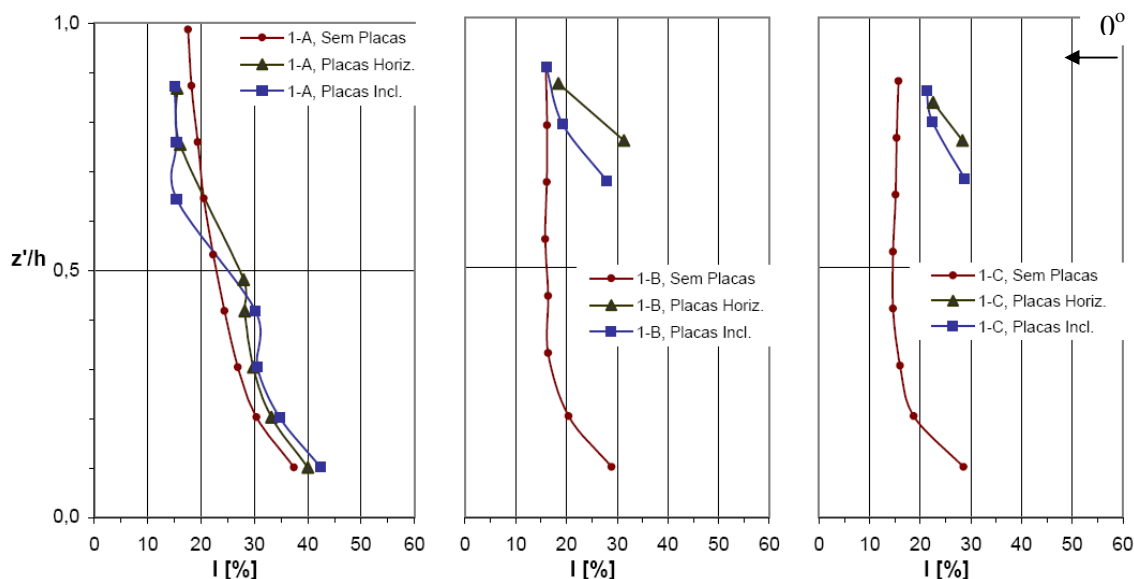


Figura 4.4 – Perfil 1 vertical das intensidades normalizadas da turbulência – Vento 0°

Observando as figuras do perfil vertical das intensidades da turbulência, constata-se que inicialmente para o ponto de medição mais afastado, a intensidade da turbulência para nos pontos mais altos é maior para a configuração I (sem placas) e de uma relação entre alturas variando entre 0,55 e 0,65, acontece uma inversão nos perfis de intensidade. Conforme a medição aproxima-se do modelo a intensidade da turbulência é maior para as configurações II e III.

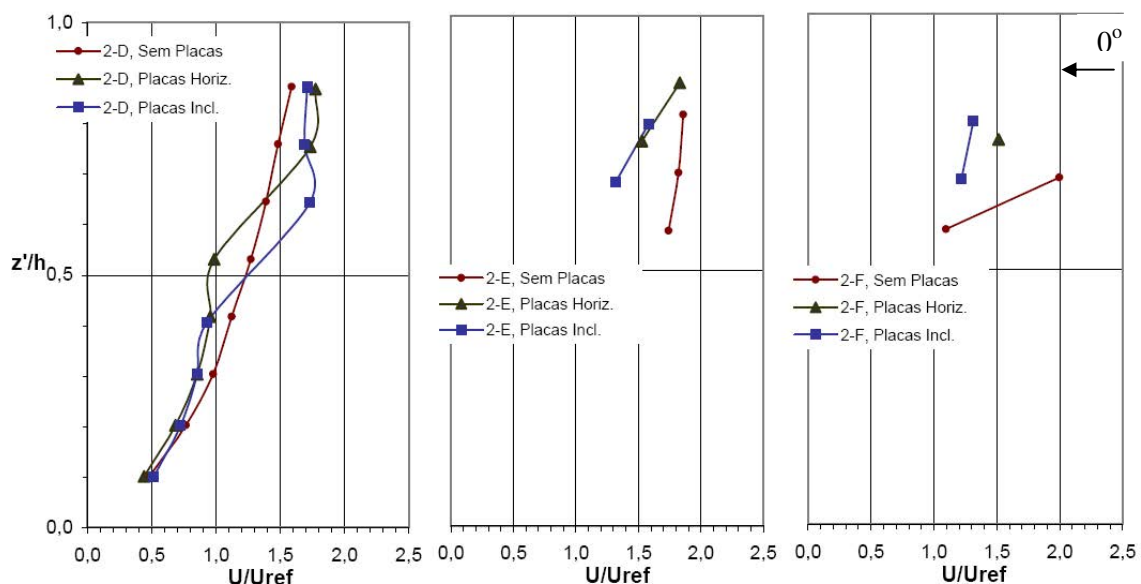


Figura 4.5 – Perfil 2 vertical das velocidades médias normalizadas – Vento 0°

O perfil 2 localizado a 9 m do eixo do modelo apresenta comportamento semelhante ao do perfil 1, pode-se ressaltar uma maior diferença entre as velocidades das configurações II e III no ponto de medição A.

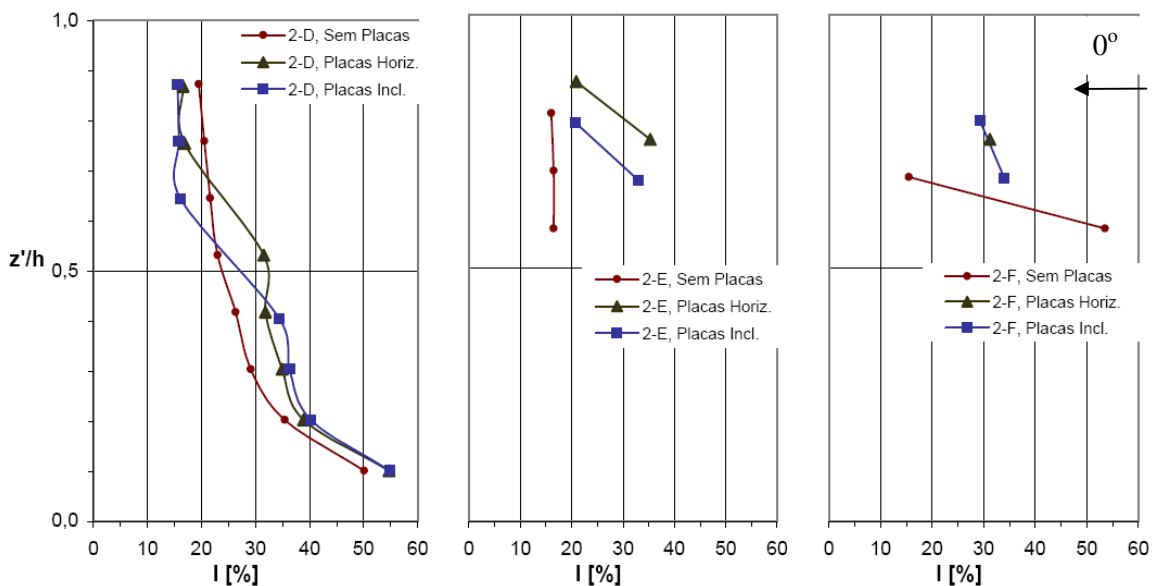


Figura 4.6 – Perfil 2 vertical das intensidades normalizadas da turbulência – Vento 0°

Assim como o perfil de velocidades, o perfil de intensidade da turbulência apresenta uma maior diferença entre o comportamento das configurações II e III para a medição mais afastada do modelo.

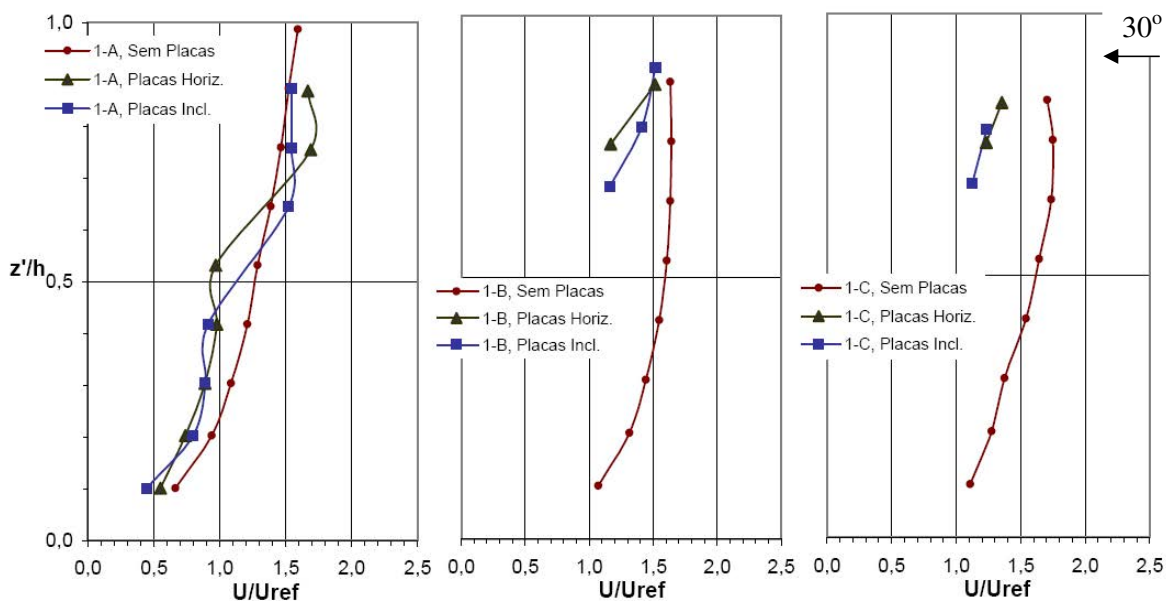


Figura 4.7 – Perfil 1 vertical das velocidades médias normalizadas – Vento 30°

A Figura 4.7 apresenta os resultados do perfil 1 vertical das velocidades médias normalizadas para o vento incidindo com um ângulo de 30°, é possível observar que a configuração I, sem placas, apresenta um comportamento mais semelhante com o perfil de velocidade do túnel de vento. Novamente, as configurações com placas (II e III) passam a ter uma velocidade normalizada maior que a configuração I a partir das alturas normalizadas 0,65 e 0,55 respectivamente. Conforme se aproxima do ginásio observa-se um comportamento semelhante ao relatado anteriormente, ou seja, a configuração I passa a ter sempre as maiores velocidades.

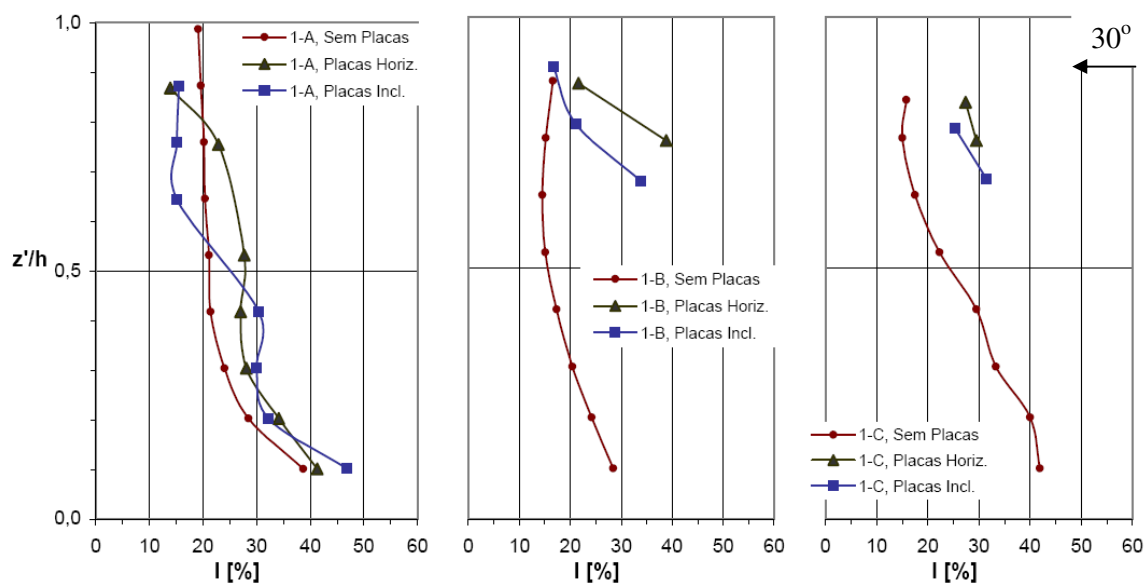


Figura 4.8 – Perfil 1 vertical das intensidades normalizadas da turbulência – Vento 30°

Na Figura 4.8, observa-se os resultados do perfil 1 vertical das intensidades normalizadas da turbulência para o vento incidindo com um ângulo de 30°, é possível constatar que enquanto as configurações I e III apresentam comportamento muito semelhante ao visto no perfil 1 vertical das intensidades normalizadas da turbulência para o ângulo de incidência do vento de 0° (Figura 4.4), já a configuração II passa a ter a maior intensidade de turbulência a partir de uma altura normalizada de 0,8. Conforme a medição aproxima-se do modelo observa-se a maior turbulência para as configurações com placas (II e III).

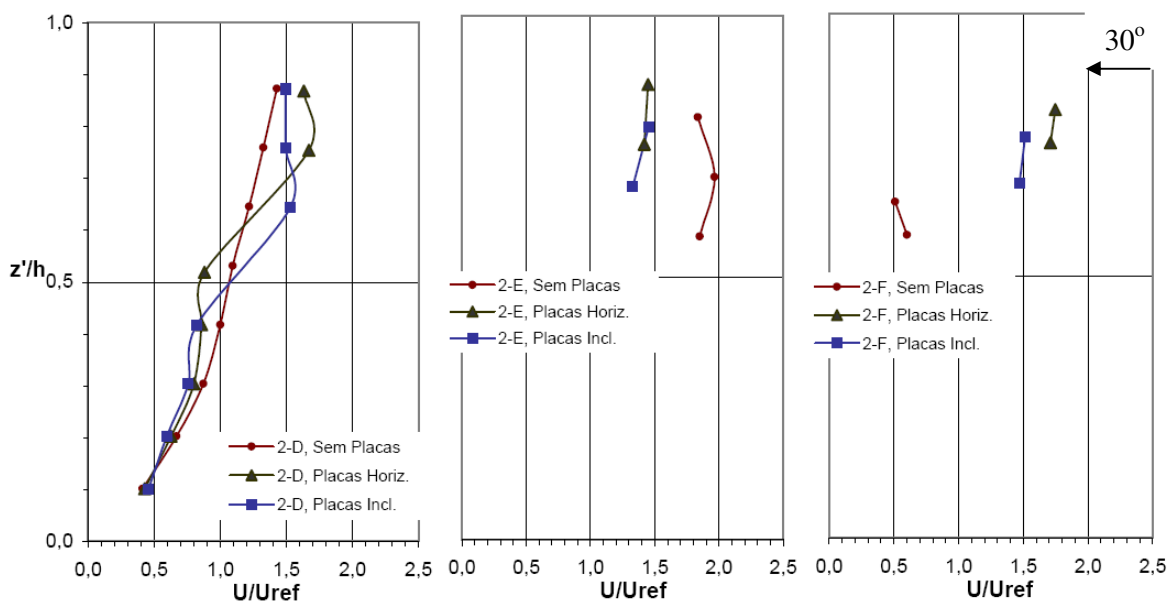


Figura 4.9 – Perfil 2 vertical das velocidades médias normalizadas – Vento 30°

A Figura 4.9 apresenta os resultados do perfil 2 vertical das velocidades médias normalizadas para o vento incidindo com um ângulo de 30°. Observando os resultados obtidos com vento incidindo a 0° e a 30°, podemos constatar que para o vento incidindo a 30°, os perfis 1 e 2 mantêm um comportamento praticamente idêntico ao contrario do que acontecia com vento incidindo a 0°.

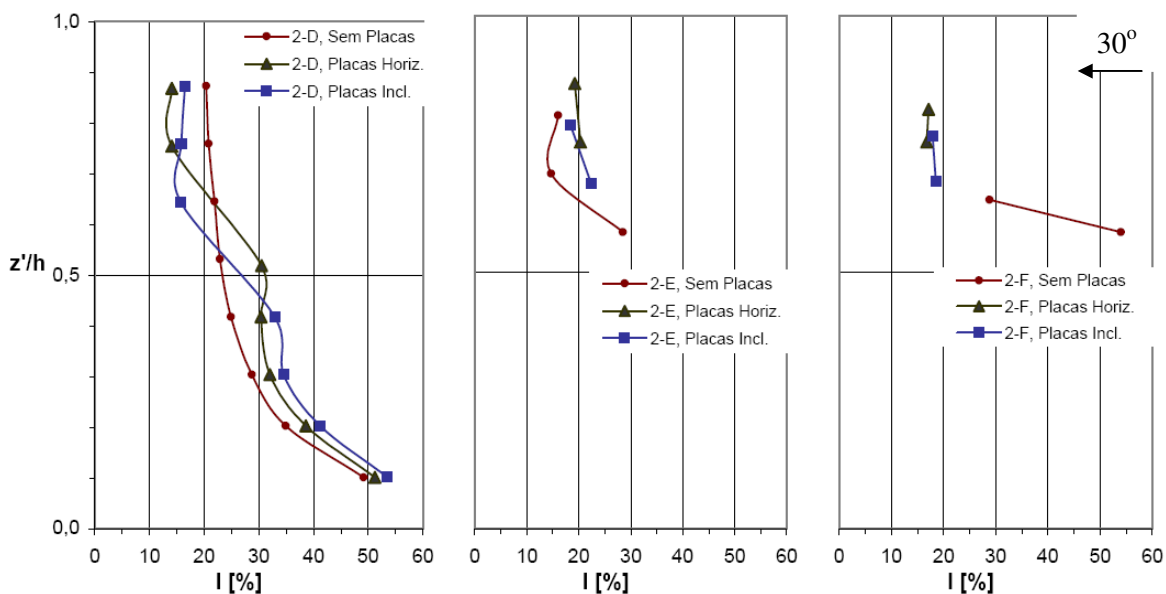


Figura 4.10 – Perfil 2 intensidade normalizada da turbulência – Vento 30°

A Figura 4.10, observa-se os resultados do perfil 2 vertical das intensidades normalizadas da turbulência para o vento incidindo com um ângulo de 30° a uma distância de 9 m do eixo. O comportamento dos perfis segue os padrões anteriormente apresentados, inclusive o perfil de turbulência da configuração II que volta a ter a maior intensidade de turbulência a partir de uma altura normalizada de aproximadamente 0,65.

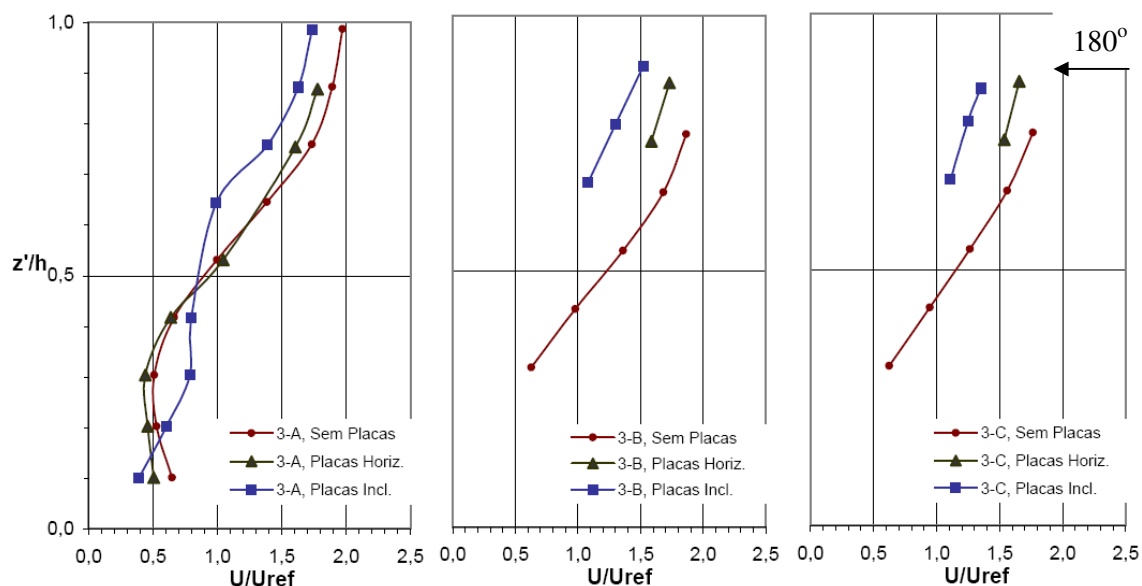


Figura 4.11 – Perfil 3 vertical das velocidades médias normalizadas – Vento 180°

A Figura 4.11, apresenta o perfil 3 de velocidade médias normalizadas para o vento incidindo com ângulo de 180° , ou seja, o vento incide sobre a parte de trás do modelo. Ao contrário da frente do modelo que apresenta uma abertura permanente, a parte de trás do modelo é fechada devido à existência de um palco para realização de show. Observa-se que, as configurações I (sem placas) e II (placas horizontais), apresentam comportamento praticamente idêntico.

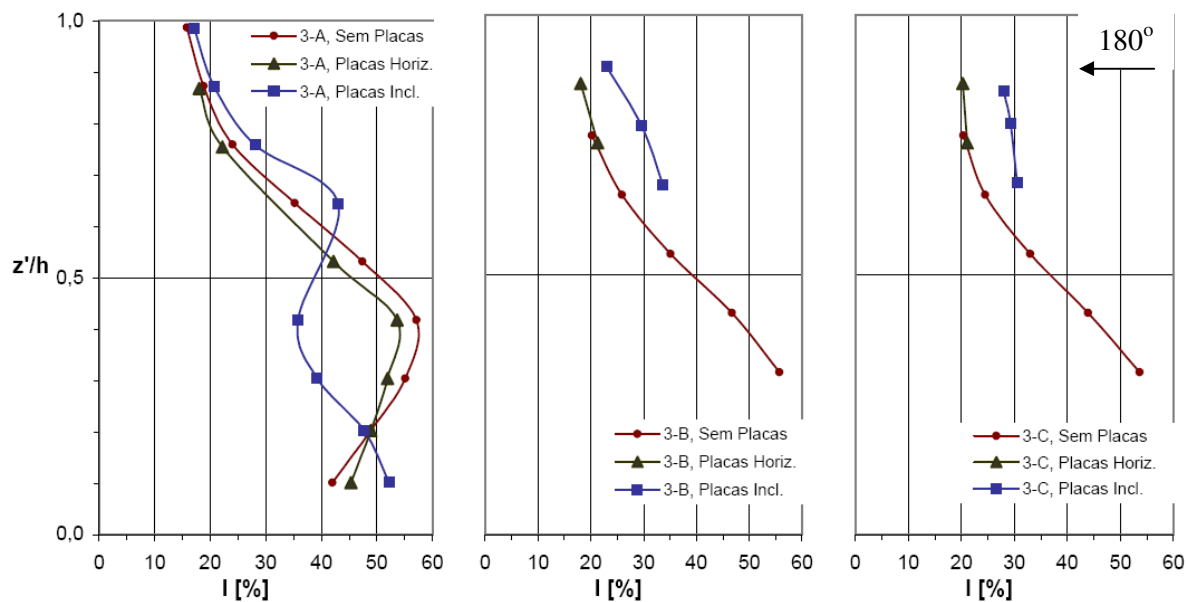


Figura 4.22 – Perfil 3 vertical das intensidades normalizadas da turbulência – Vento 180°

A Figura 4.11, observa-se os resultados do perfil 3 vertical das intensidades normalizadas da turbulência para o vento incidindo com um ângulo de 180°. Novamente chama a atenção o comportamento semelhante entre as configurações I e II.

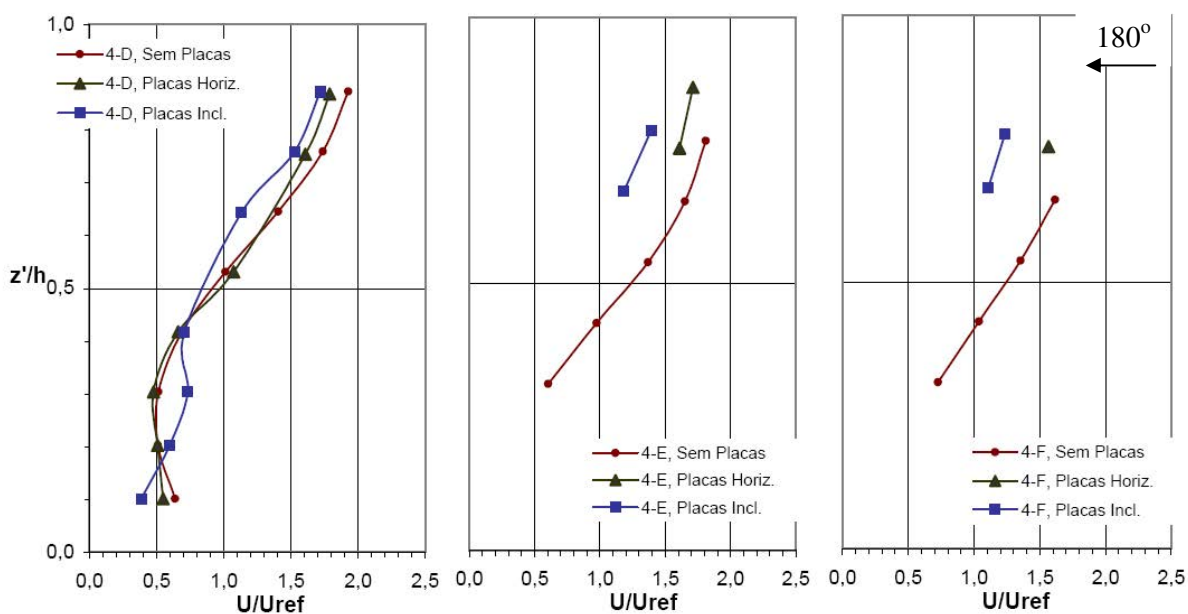


Figura 4.33 – Perfil 4 vertical das velocidades médias normalizadas – Vento 180°

A Figura 4.13, mostra os resultados do perfil 4 vertical das velocidades médias normalizadas para o vento incidindo com um ângulo de 180° . Observa-se que no perfil traçado a aproximadamente um terço da largura do modelo, há uma aproximação no comportamento do perfil da configuração III (placas inclinadas) com as configurações I e II, que para o perfil traçado no eixo do modelo já apresentavam comportamento próximos.

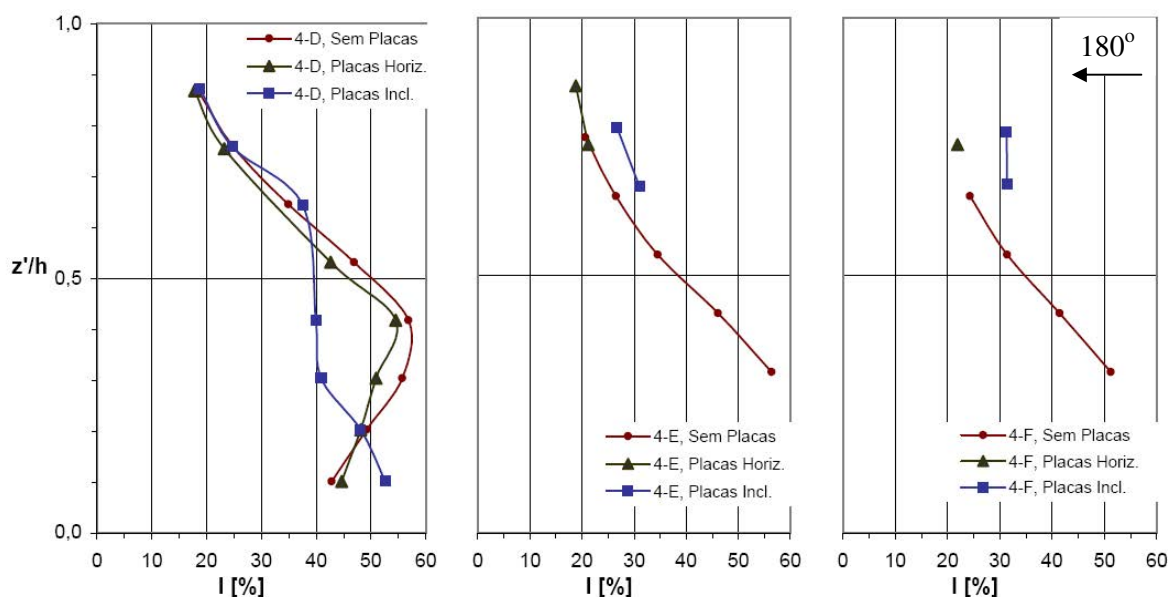


Figura 4.44 – Perfil 4 vertical das intensidades normalizadas da turbulência – Vento 180°

A Figura 4.14 tem-se o perfil 4 das intensidades normalizadas da turbulência para o ângulo de 180° , comparando com o perfis traçados no eixo do modelo Figura (4.12) e este traçado no terço do modelo, nota-se que a configuração III para altura normalizadas maiores apresenta um comportamento mais próximo as configurações I e II e conforme a altura diminui esse comportamento passa a ser muito diferente, sendo que esta apresenta uma intensidade de turbulência menor que as outras configurações.

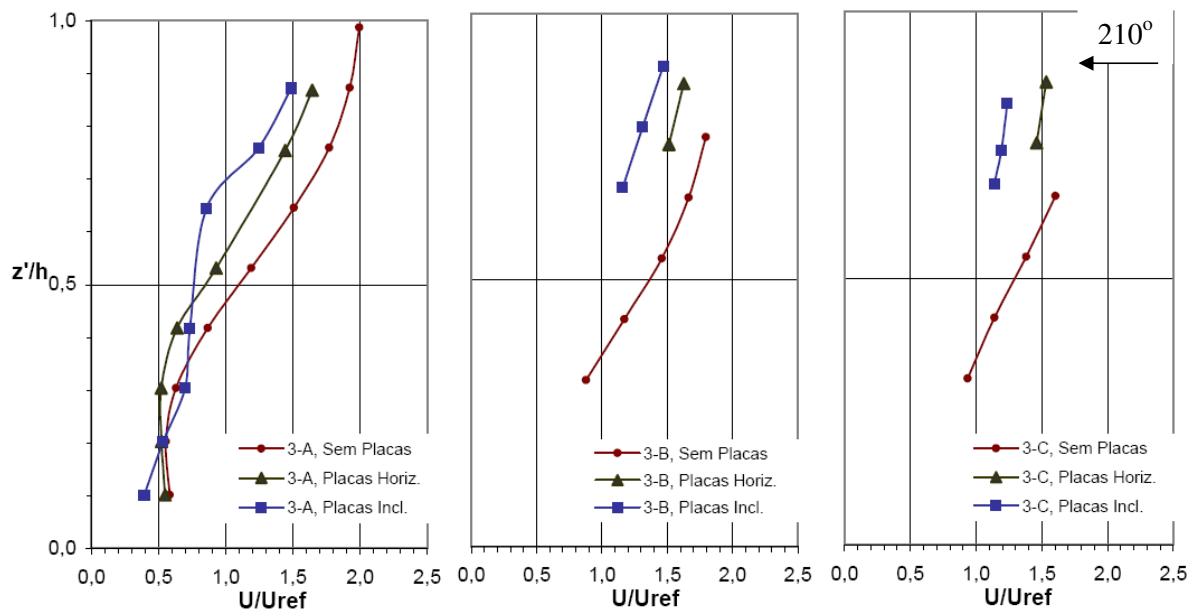


Figura 4.55 – Perfil 3 vertical das velocidades médias normalizadas – Vento 210°

A Figura 4.15, observa-se nos resultados, que para vento incidindo a 210°, o perfil 3 vertical da velocidade média normalizadas, apesar das 3 configurações terem perfis parecidos as configuração I e II não tem mais perfis tão próximos quanto os vistos para o ângulo de incidência de 180°.

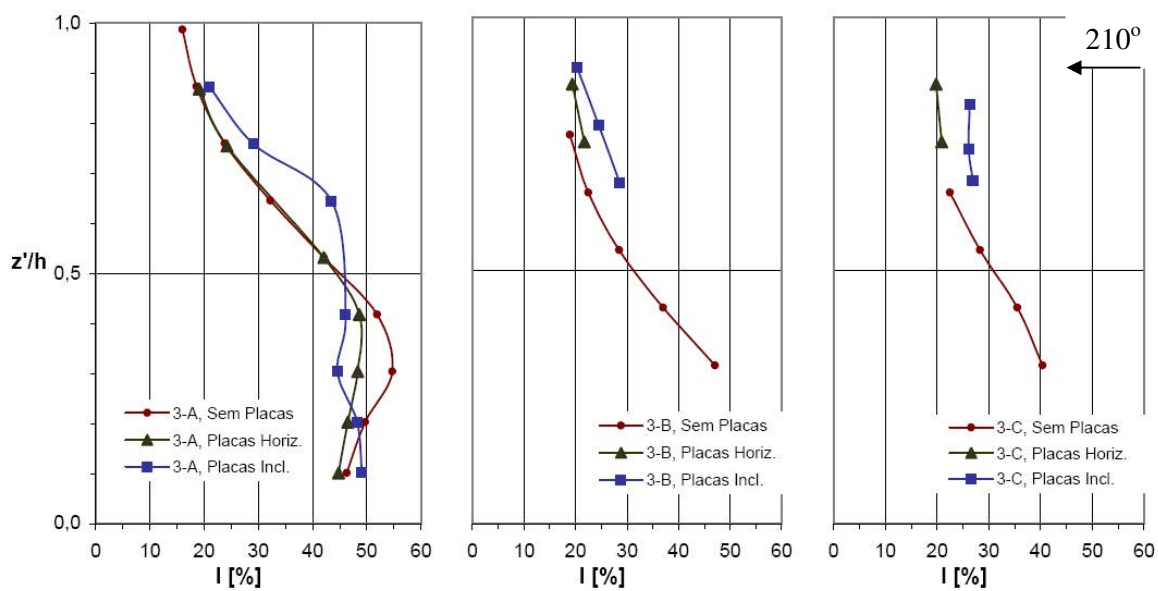


Figura 4.66 – Perfil 3 vertical das intensidades normalizadas da turbulência – Vento 210°

A Figura 4.16, observa-se os perfil 3 vertical das intensidades normalizadas da turbulência para o vento incidindo com um ângulo de 210° , a configuração III volta a ter um comportamento diferente das demais configuração para alturas normalizadas mais altas e a partir de uma altura aproximada de 0,5 esta configuração volta e ser comportar de maneira próxima as outras duas configurações.

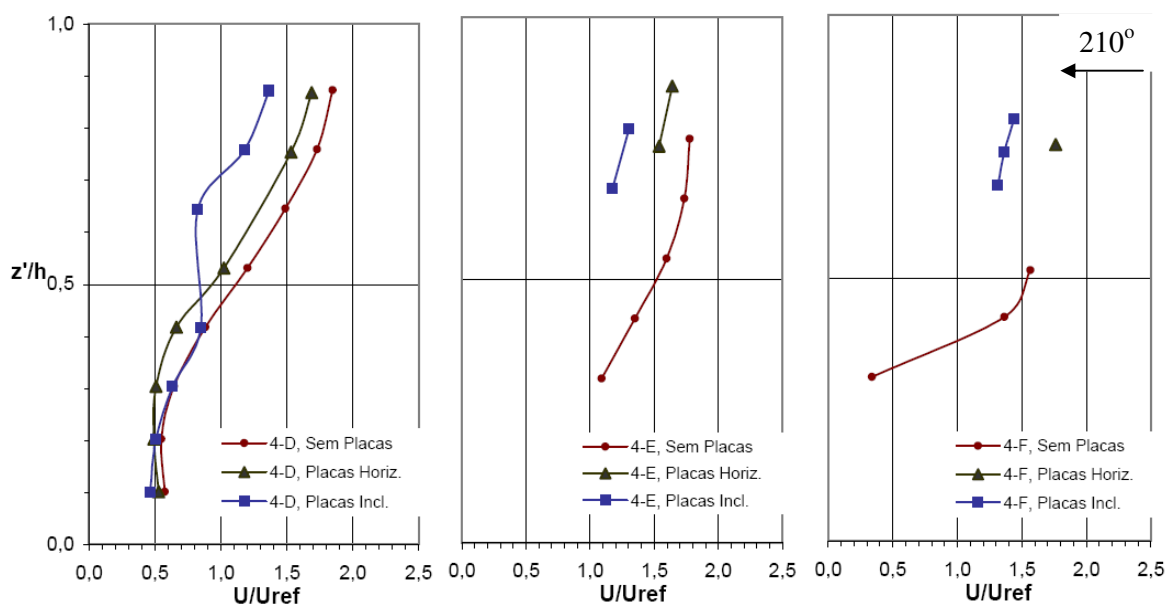


Figura 4.77 – Perfil 4 vertical das velocidades médias normalizadas – Vento 210°

A Figura 4.17, observa-se nos resultados, que para vento incidindo a 210° , o perfil 3 vertical da velocidade média normalizadas, apesar das 3 configurações terem perfis parecidos é possível constatar uma diferença maior entre o comportamento da configuração III e das demais.

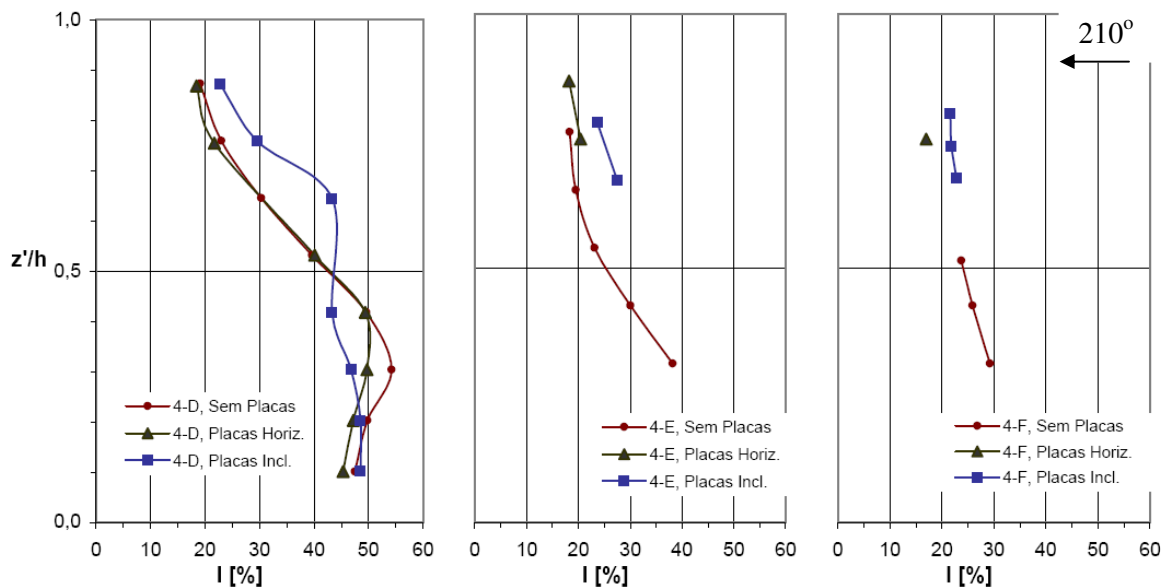


Figura 4.88 – Perfil 4 vertical das intensidades normalizadas da turbulência – Vento 210°

Observando a Figura 4.18, referentes ao ângulo de incidência do vento de 210° , são possíveis constatar assim como ocorreu no perfil 4 de velocidades médias normalizadas (Figura 4.17), as 3 configurações tem comportamentos próximos, porém novamente e possível uma maior diferença entre o comportamento da configuração III e as demais.

A partir das figuras para todos os ângulos ensaiados é possível identificar, que para os ensaios realizados com o vento incidindo na parte aberta (0° e 30°), que por sua vez é a entrada do ginásio, que as configurações com placas (II – horizontais e III – inclinadas) comportam-se de maneira muito semelhante, tanto no perfil de velocidade quanto na intensidade da turbulência.

Para os ângulos de incidência do vento 180° e 210° , onde este incide diretamente na região onde está localizado o palco (180° e 210°), portanto um local fechado, as figuras apresentam um comportamento muito próximo das configurações I (sem placas) e II (placas horizontais).

4.3 OBSERVAÇÕES REFERENTES AO ESCOAMENTO

É nítida e distinta a influência das placas nos valores médios das velocidades nos pontos ensaiados, por vezes causando um aumento, por outras uma diminuição destes valores. Entretanto, nenhuma grande alteração foi percebida, a não ser o fato de que os aumentos de velocidade causados pela presença das placas justificam algumas constatações encontradas na *Fase II* deste estudo (leve aumento da dispersão de “vapor d’água”, porém com grande diminuição da penetração de chuva localizada). Com relação à intensidade da turbulência, os comportamentos foram semelhantes. Destacam-se, porém, os valores muito elevados da intensidade da turbulência para certas regiões, chegando a quase 60%. Estes valores extremamente elevados também contribuem para explicar o carreamento do vapor d’água, porém também ocorrem sem a presença das placas.

4.4 INTERAÇÃO CHUVA-VENTO

Serão apresentados os resultados de 15 ensaios que visam entender a influência de distintas incidências do vento e chuva na eficiência da placa sugerida para proteção da penetração da água da chuva. Os ensaios podem ser divididos em quatro grupos:

1) Somente Chuva (sem Vento):

- 1.1) Sem vento e sem placas (Configuração I);
- 1.2) Sem vento e placas com inclinação 0° (Configuração II);
- 1.3) Sem vento e placas com inclinação 5° (Configuração III).

2) Chuva e Vento sem Placas (Configuração I):

- 2.1) Com vento a 0° e sem placas;
- 2.2) Com vento a 30° e sem placas;
- 2.3) Com vento a 180° e sem placas;
- 2.4) Com vento a 210° e sem placas.

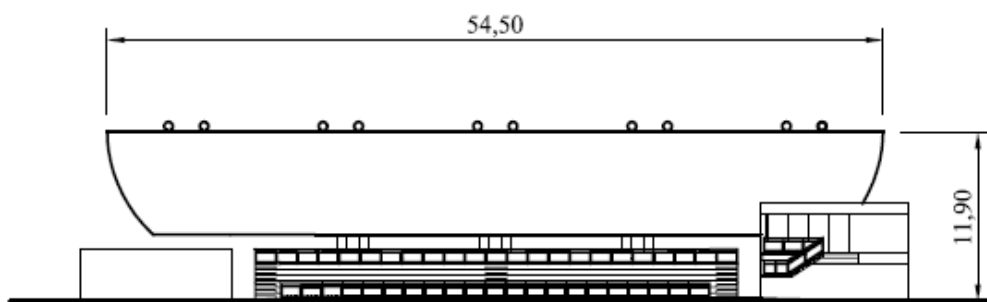


Figura 4.19 – Vista lateral ginásio modelo configuração I [m]

3) Chuva e Vento com Placas Horizontais (Configuração II):

- 3.1) Com vento a 0° e com placas a 0° ;
- 3.2) Com vento a 30° e com placas a 0° ;
- 3.3) Com vento a 180° e com placas a 0° ;
- 3.4) Com vento a 210° e com placas a 0° .



Figura 4.20 – Vista lateral ginásio modelo configuração II [m]

4) Chuva e Vento com Placas Inclinadas (Configuração III):

- 4.1) Com vento a 0° e com placas a 5° ;
- 4.2) Com vento a 30° e com placas a 5° ;
- 4.3) Com vento a 180° e com placas a 5° ;

4.4) Com vento a 210° e com placas a 5° .

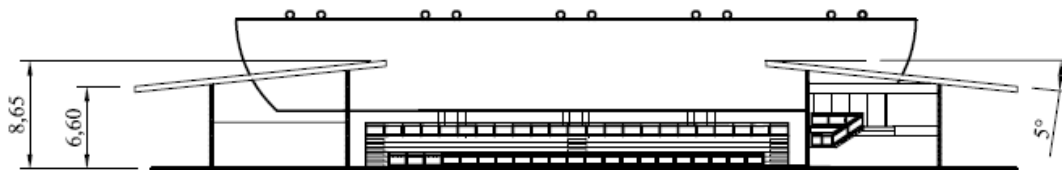


Figura 4.21 – Vista lateral ginásio modelo configuração III [m]

Foi realizada uma calibração para cada velocidade testada, pois as menores partículas são carregadas pelo vento por uma longa distância, enquanto as maiores partículas atingem o piso do túnel de vento próximo à saída dos aspersores. As velocidades do vento finais de ensaio foram da ordem de 10 m/s, em escala natural, na altura do modelo. Este valor é considerado representativo de episódios de vento com alta probabilidade de ocorrência, de acordo com a NBR-6123 (1988). Pode ser adotado um valor para a velocidade básica do vento para a cidade do Rio de Janeiro, RJ, correspondente a 35 m/s, de acordo com a figura das isopleias da velocidade básica do vento indicada na NBR-6123(1988). Cálculos de distintas probabilidades de ocorrência destes valores podem ser realizados a partir desta referência, ou de outros dados de velocidade para a cidade do Rio de Janeiro, RJ, porventura disponíveis para processamento (Blessmann, 1995).

Abaixo, são apresentadas as fotos das resultantes dos ensaios realizados nas 3 (três) configurações determinadas. A partir destes, podemos constatar a diferença de comportamento do ginásio ao ser exposto a uma chuva simples e a uma combinação entre chuva e vento. Como fica possível constatar nas fotos a área que é molhada no interior do ginásio quando a chuva acontece com ou sem a interação com o vento.

Pode-se ver também a configuração atual e a solução proposta para evitar a entrada de água no ginásio quando este submetido a uma chuva combinada com vento.

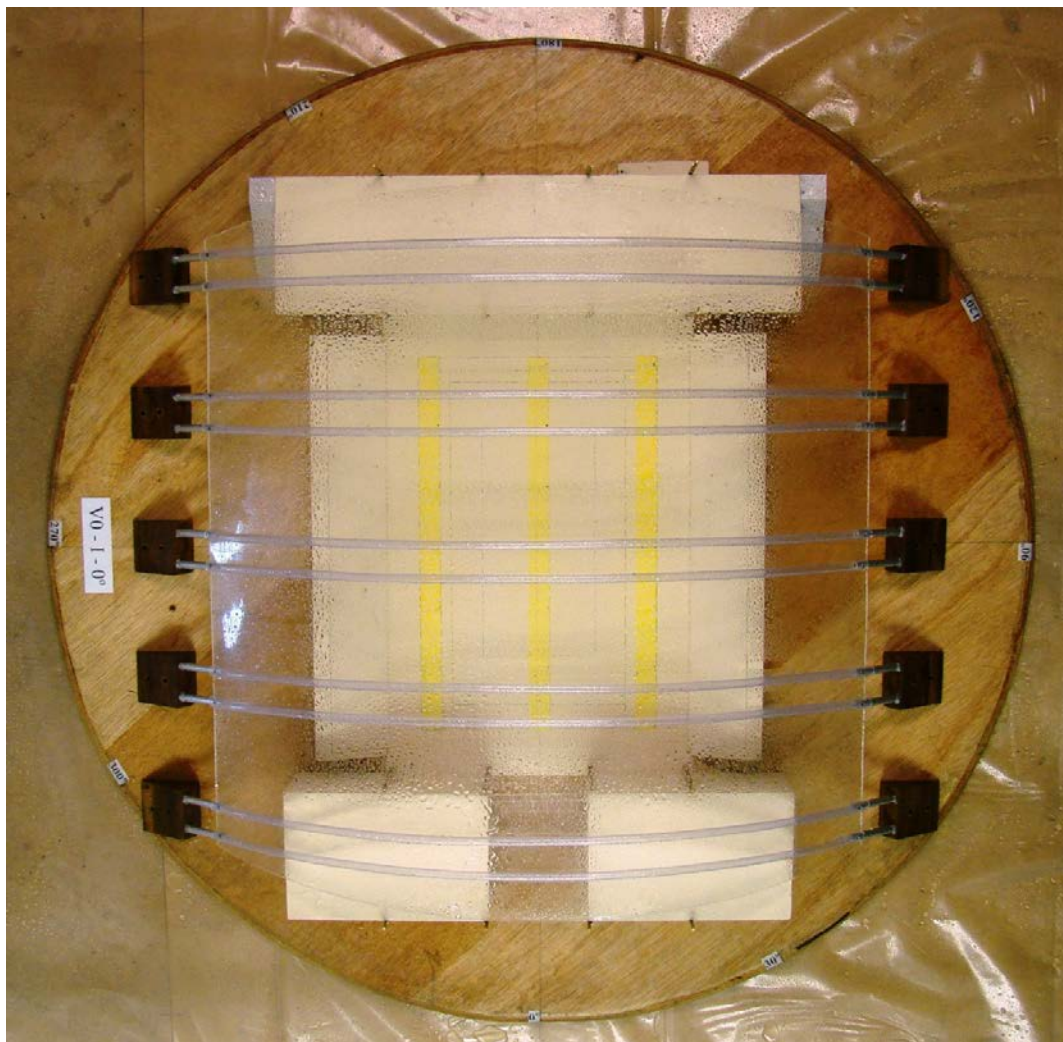


Figura 4.22 – Modelo estudado
Fase II – Configuração I: Sem Placas
Sem Vento.



Figura 4.25 – Modelo estudado
Fase II – Configuração II: Placas Horizontais
Sem Vento.

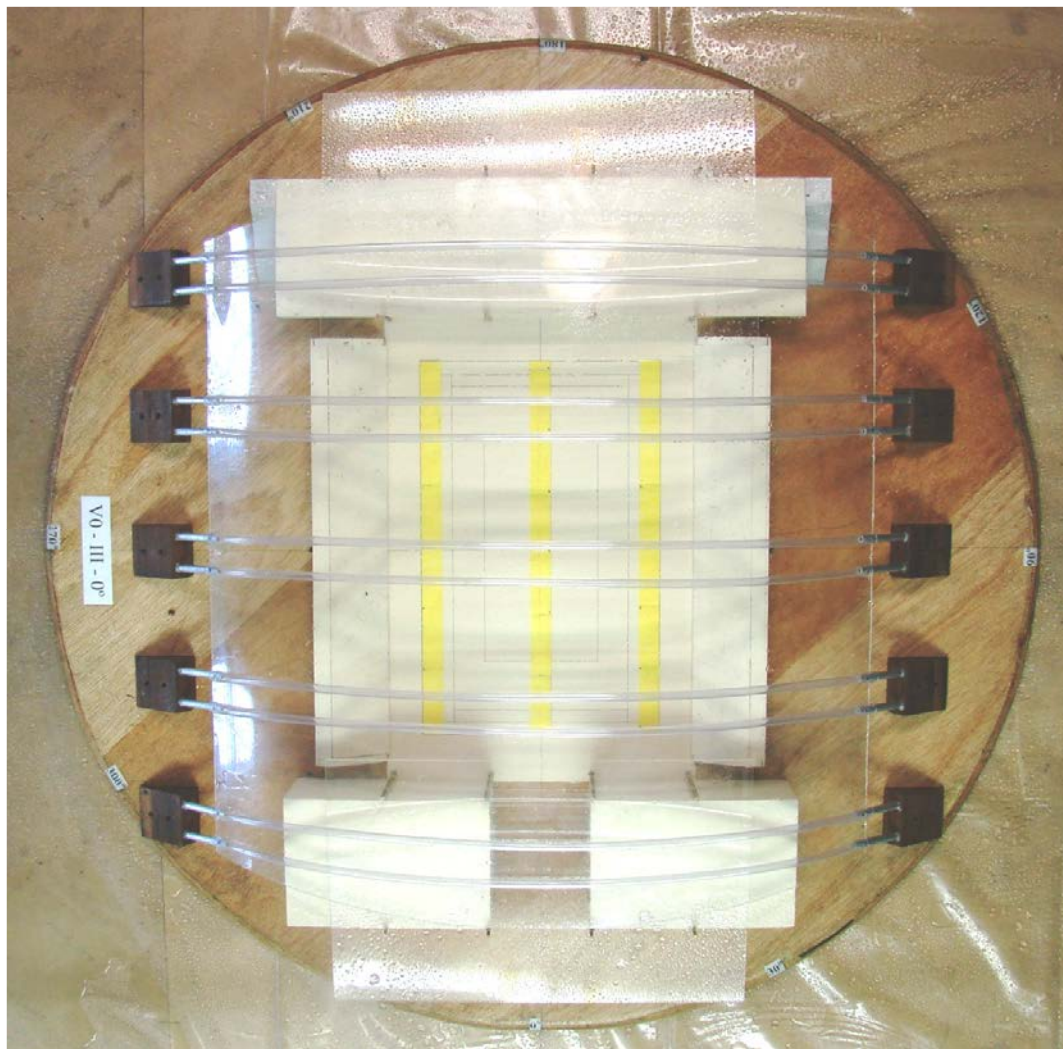


Figura 4.26 – Modelo estudado
Fase II – Configuração III: Placas Inclinadas
Sem Vento.

Para traçar uma referência o modelo foi inicialmente ensaiado apenas sofrendo a ação da chuva, para as três configurações previstas. Neste caso, modelo não apresentou nenhum ponto de penetração d'água.

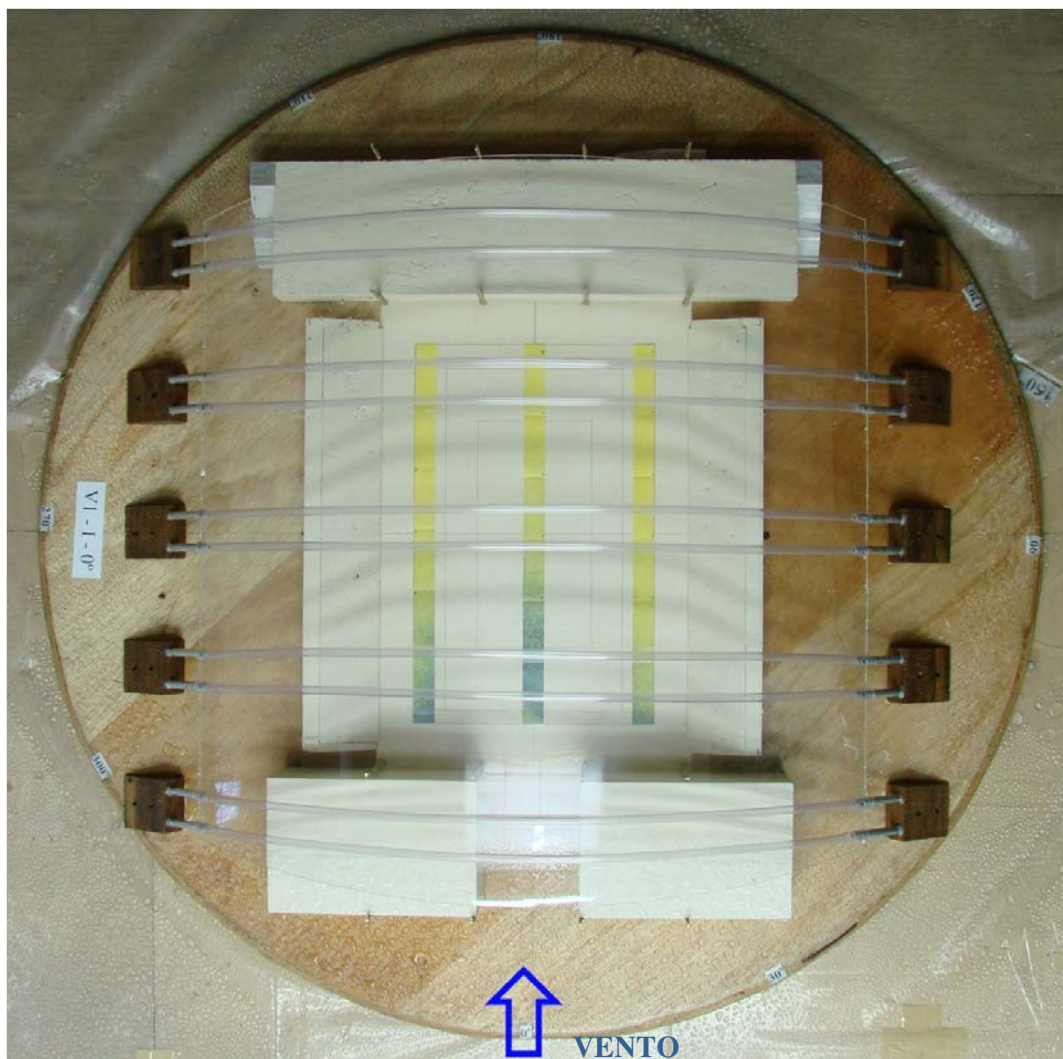


Figura 4.27 – Modelo estudado
Fase II – Configuração I: Sem Placas
Vento 0°.

A figura acima mostra o resultado do ensaio, do modelo na configuração I, ou seja, a configuração existente no local submetida à ação combinada de chuva e vento incidindo no ângulo definido como 0°. Podemos constatar pela mudança cor do papel sensível a água existe percolação de água no ginásio em questão. A fachada no caso a barlavento permite a entrada de água. Note que o papel apresenta mudança de cor até aproximadamente 1/3 de sua área interna.



Figura 4.28 – Modelo estudado
Fase II – Configuração I: Sem Placas
Vento 0°.

A figura acima mostra o resultado na fachada a sotavento. Na figura é possível observar que parte da cobertura do palco ao fundo do ginásio (região de cor branca) não é molhada, pois devido a combinação de vento e chuva a própria cobertura do ginásio impede que esta seja molhada.

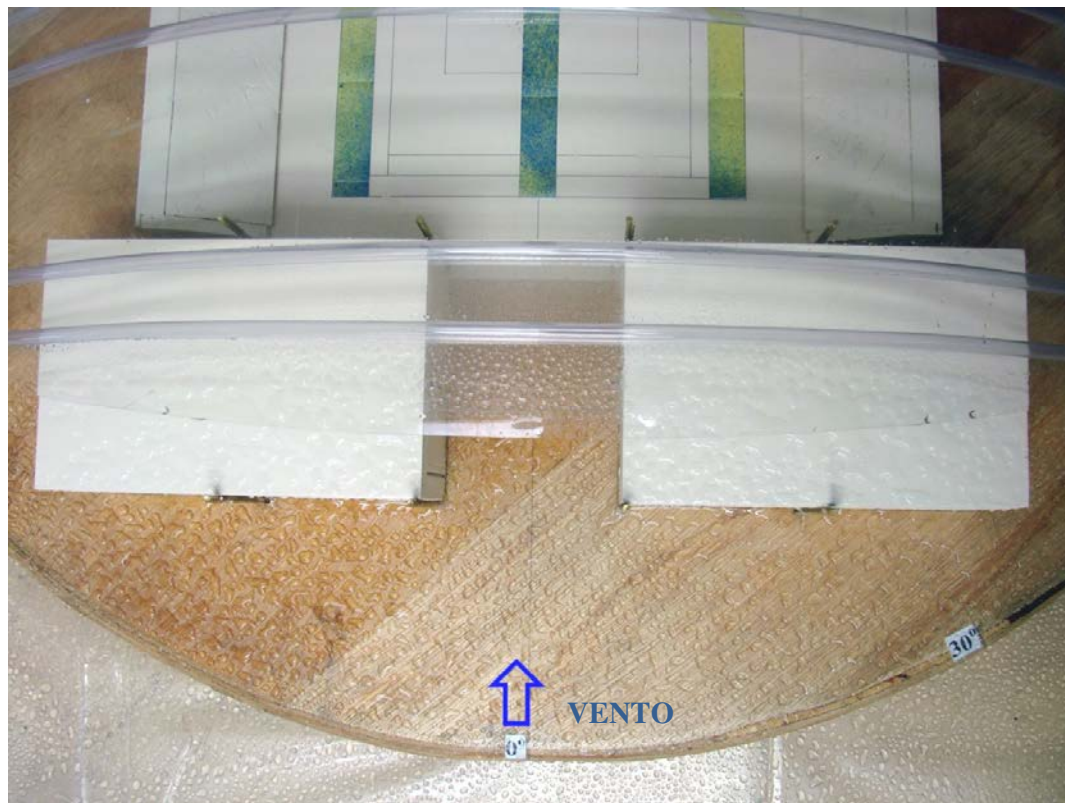


Figura 4.29 – Modelo estudado
Fase II – Configuração I: Sem Placas
Vento 0°.

Novamente analisando a fachada a barlavento, com uma foto um pouco mais próxima, é possível verificar o grande acúmulo de água nesta região onde existe a entrada do ginásio. Com é possível verificar em caso de uma chuva combinada com vento nesta direção o ginásio tem sua função de uso praticamente impedida.

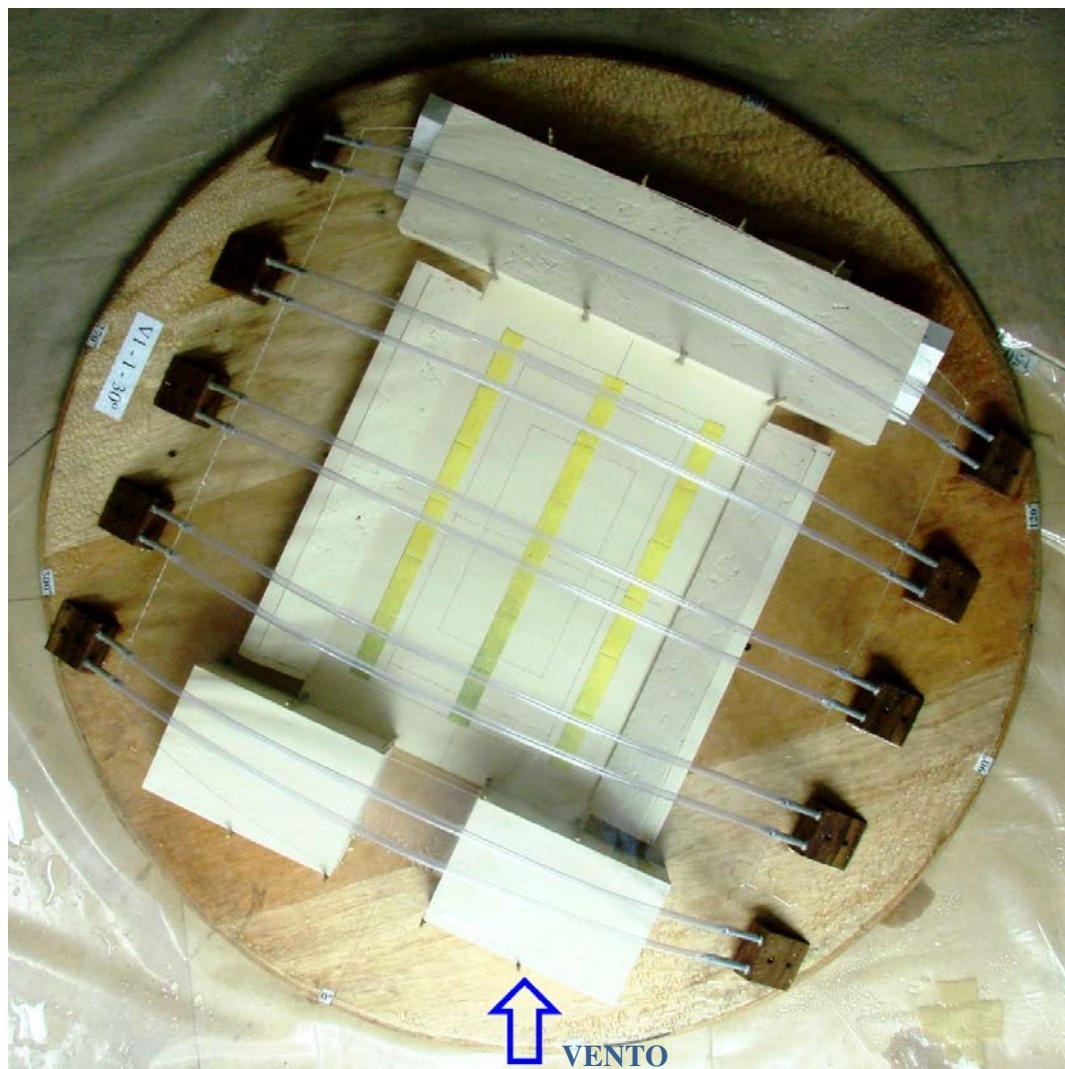


Figura 4.30 – Modelo estudado
Fase II – Configuração I: Sem Placas
Vento 30°.

Ao alterar o ângulo de incidência do vento em 30°, ou seja, o vento e a chuva não incidem diretamente sobre a entrada do ginásio podemos contatar que, diminui na quantidade de água que penetra no ginásio é consideravelmente menor.

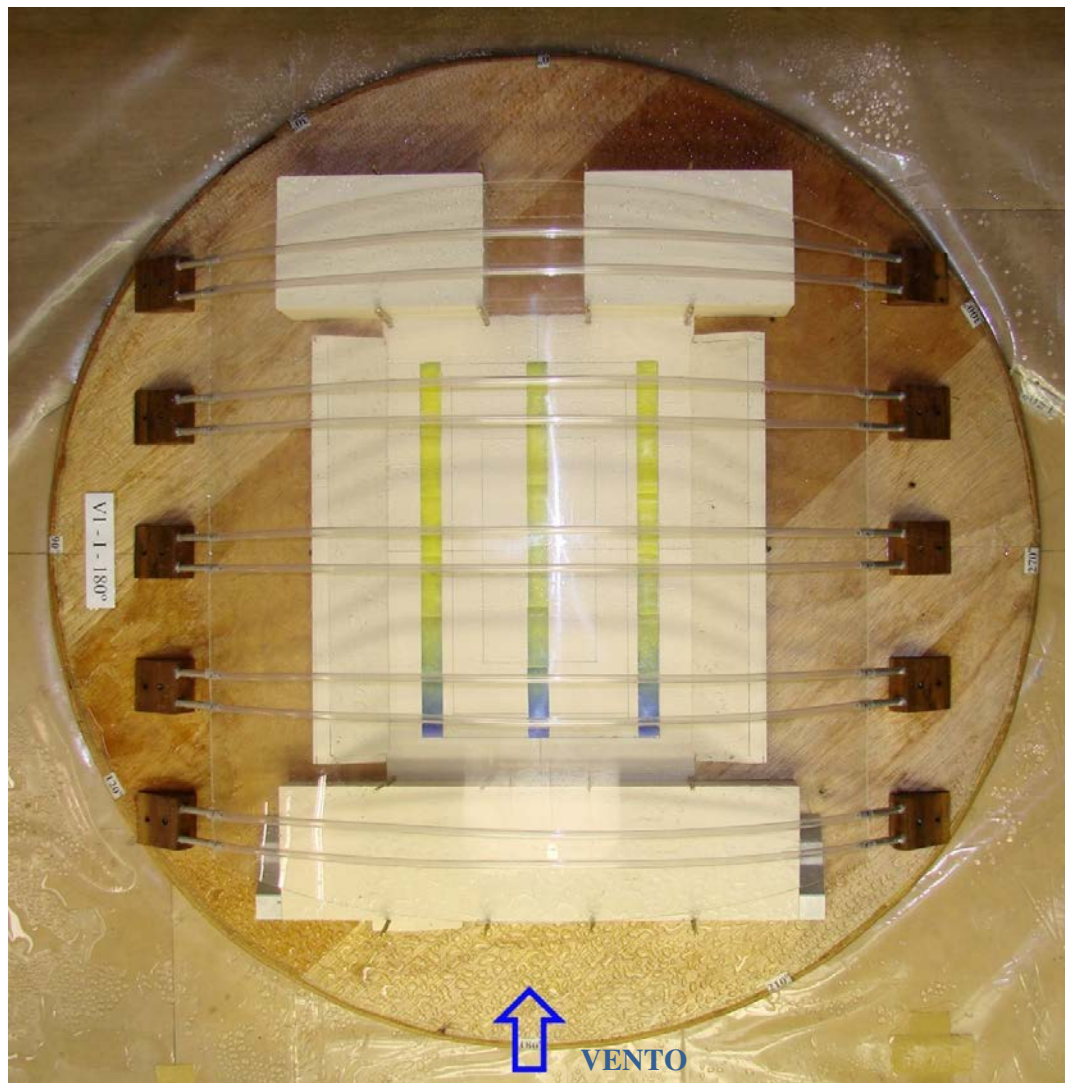


Figura 4.31 – Modelo estudado
Fase II – Configuração I: Sem Placas
Vento 180°.

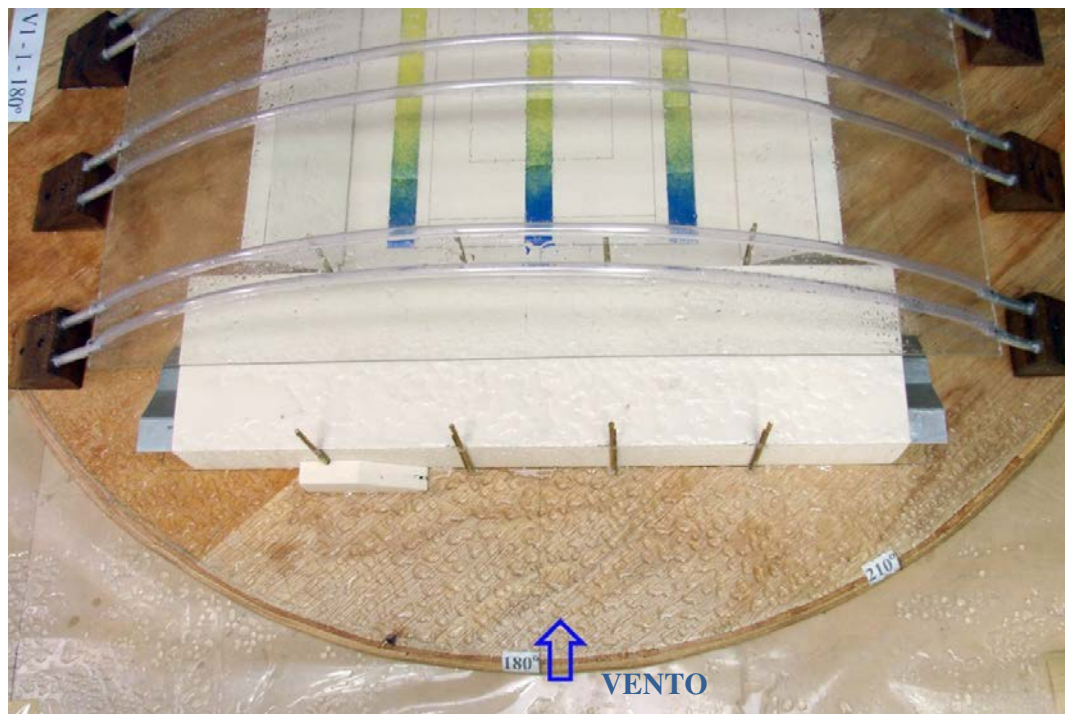


Figura 4.32 – Modelo estudado
Fase II – Configuração I: Sem Placas
Vento 180°.

Nas duas figuras acima é possível ver o resultado da ação de vento e chuva incidindo com um ângulo de 180°, ou seja, na região onde está situado o palco para show. É possível observar no papel a alteração de cor nas áreas molhadas. Note que apesar da existência de um obstáculo, a região do palco, ainda existe a penetração de uma grande quantidade de água, atingindo aproximadamente 1/4 da área interna do ginásio. Chama-se a atenção, nesta segunda figura, para a quantidade d'água acumulada na fachada a barlavento diretamente exposta ao vento e a chuva.

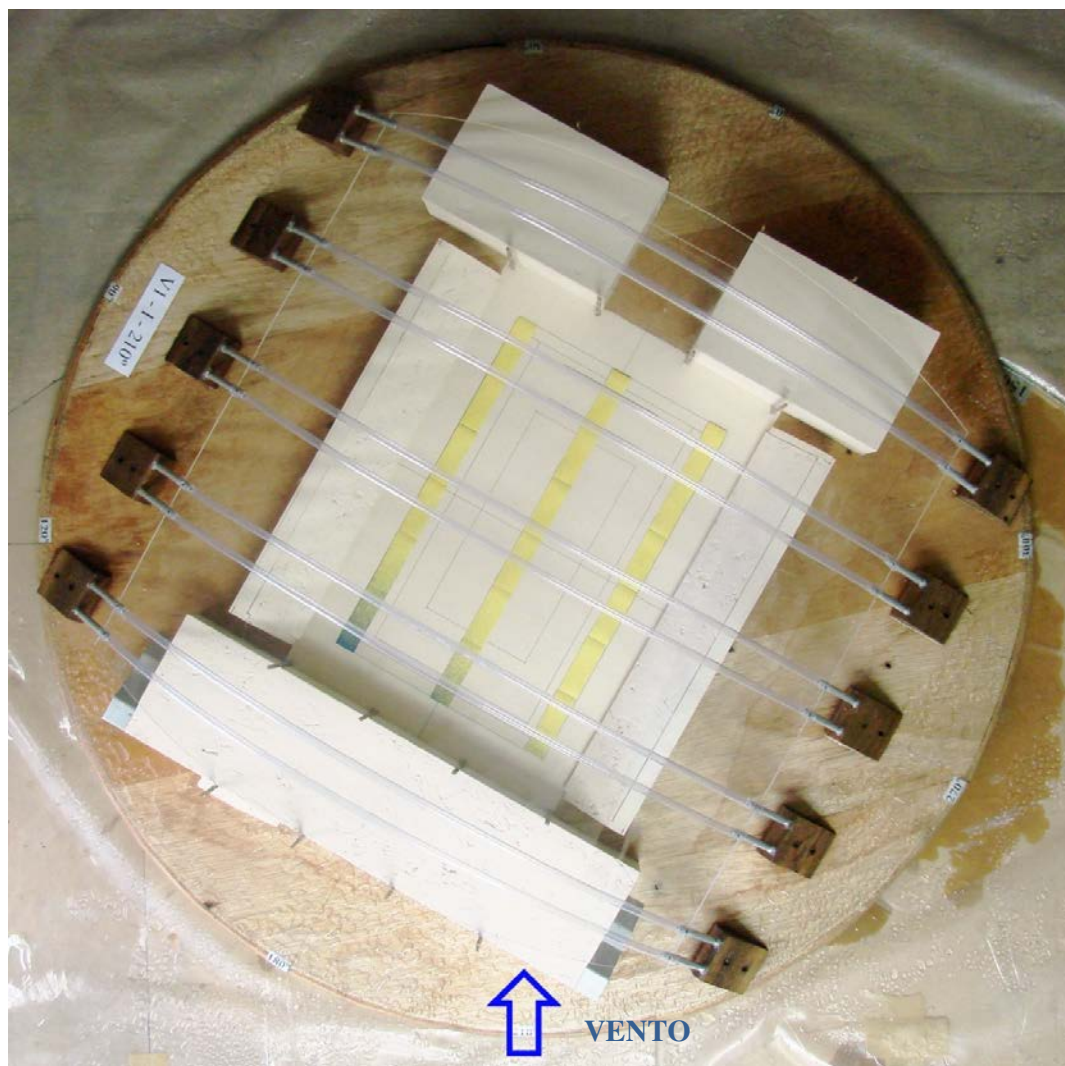


Figura 4.33 – Modelo estudado
Fase II – Configuração I: Sem Placas
Vento 210°.

Altera-se o ângulo de incidência do vento em 30°, ou seja, o vento e a chuva incidem ao ângulo de 210°, não incidindo diretamente no palco do ginásio. Pode-se constatar uma redução na área molhada. Com isso fica claro que os principais problemas do ginásio estão localizados quando o vento e a chuva incidem perpendicularmente a sua entrada e a região onde se localiza o palco.

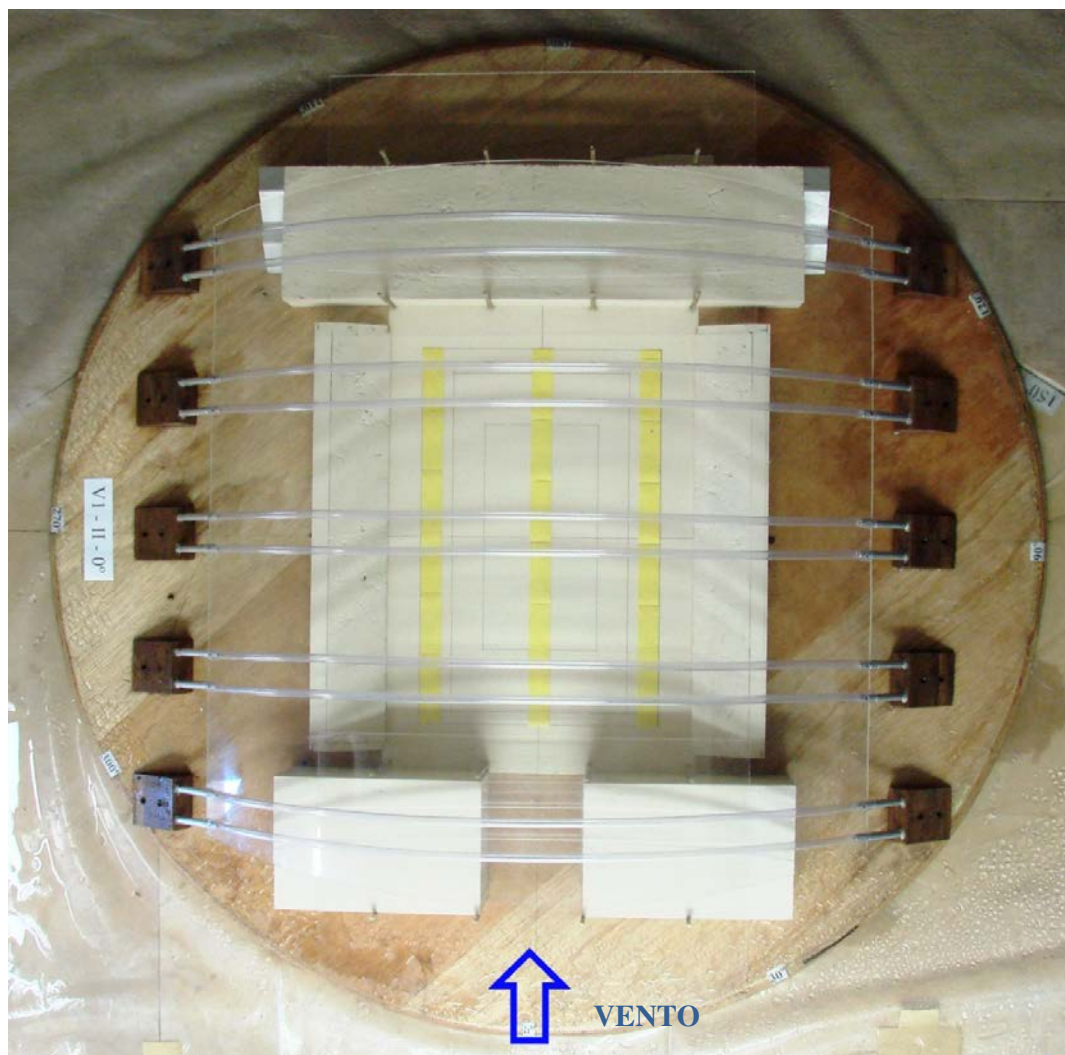


Figura 4.34 – Modelo estudado
Fase II – Configuração II: Placas Horizontais
Vento 0°.

Buscando uma solução para o problema de penetração de água no ginásio a foto acima e as fotos seguintes apresentam os resultados realizados com os mesmos ângulos de incidência (0°, 30°, 180° e 210°) para a configuração II. A configuração II, como já citado anteriormente, consistia na colocação de placas horizontais na entrada do ginásio e na região do palco.

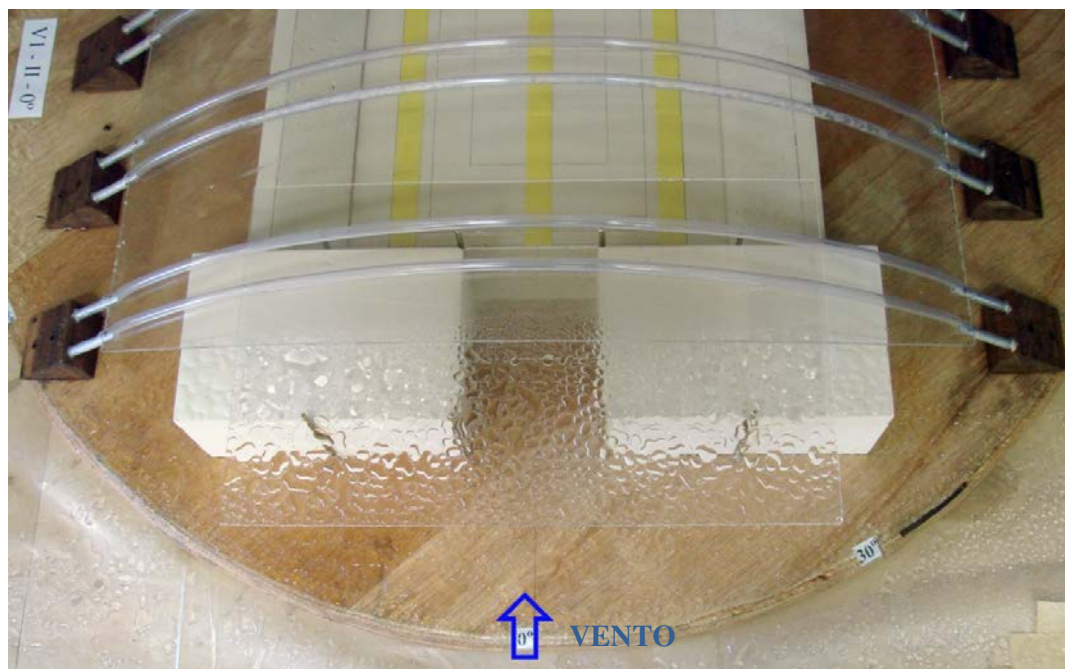


Figura 4.35 – Modelo estudado
Fase II – Configuração II: Placas Horizontais
Vento 0°.

Pode-se constatar a quantidade de água acumulada nas placas horizontais utilizadas para diminuir a percolação de água. Como constatado nos ensaios, a água da chuva ao chocar-se com a placa transforma-se em vapor e este é carregado pelo vento molhando a quadra em quantidade muito menor do que quando não a placas protegendo o ginásio.

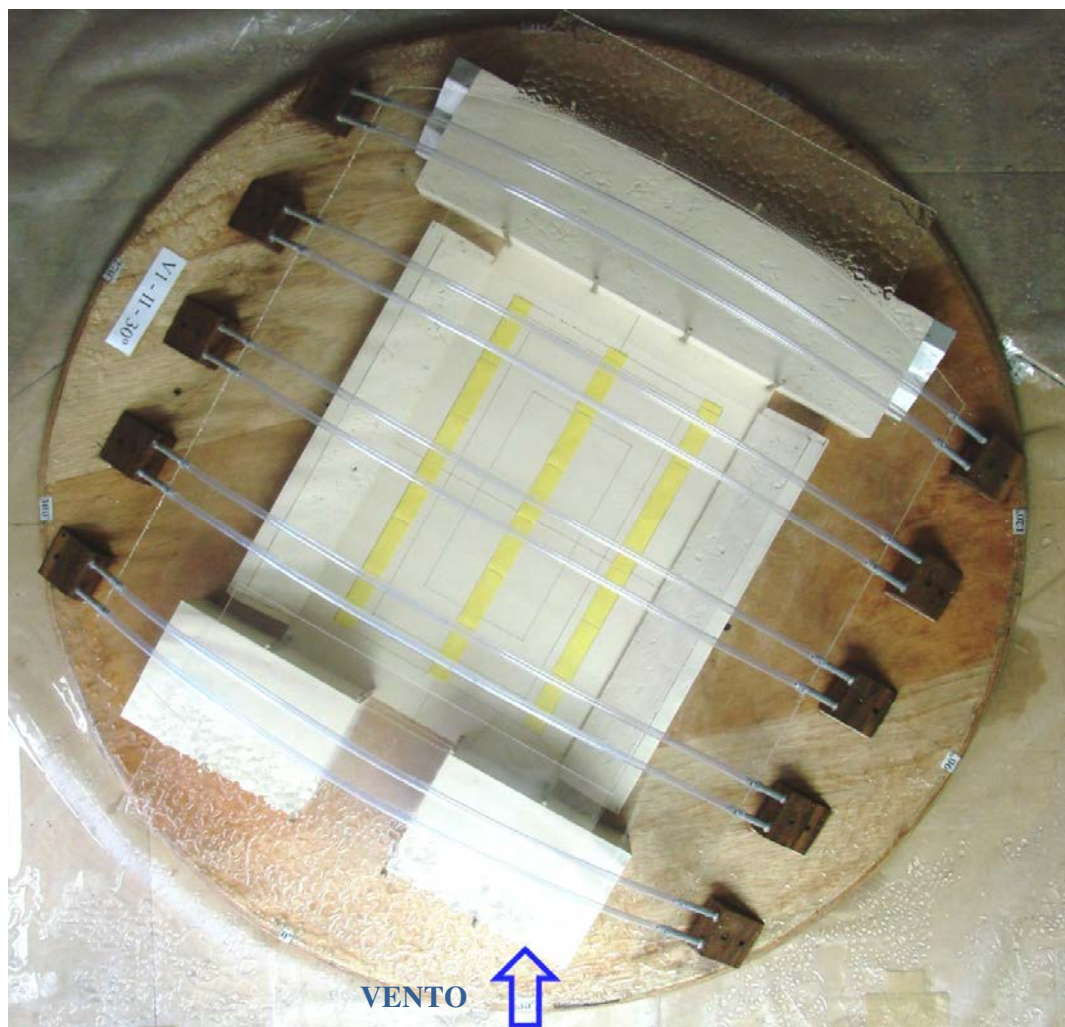


Figura 4.36 – Modelo estudado
Fase II – Configuração II: Placas Horizontais
Vento 30°.

Novamente chama a atenção à grande quantidade de água da chuva sobre as placas horizontais utilizadas para a proteção do ginásio, mesmo a chuva e o vento com ângulo de incidência de 30°. Mas como nota-se a quantidade de água que penetra no ginásio não faz com que o papel usado na medição chegue a mudar de cor.

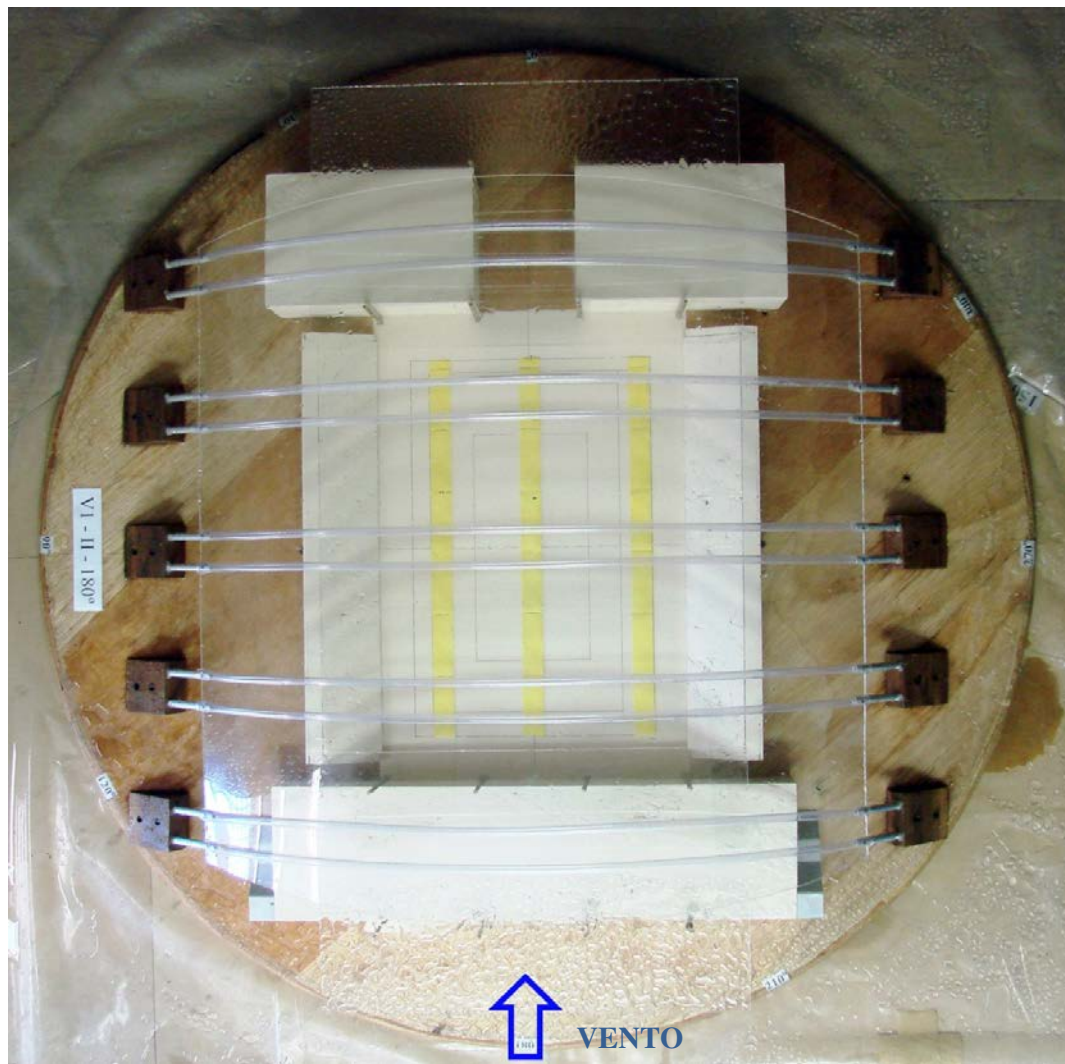


Figura 4.37 – Modelo estudado
Fase II – Configuração II: Placas Horizontais
Vento 180°.

A quantidade de água que penetra no ginásio com vento incidindo a 180° não faz com que o papel não mude de cor.

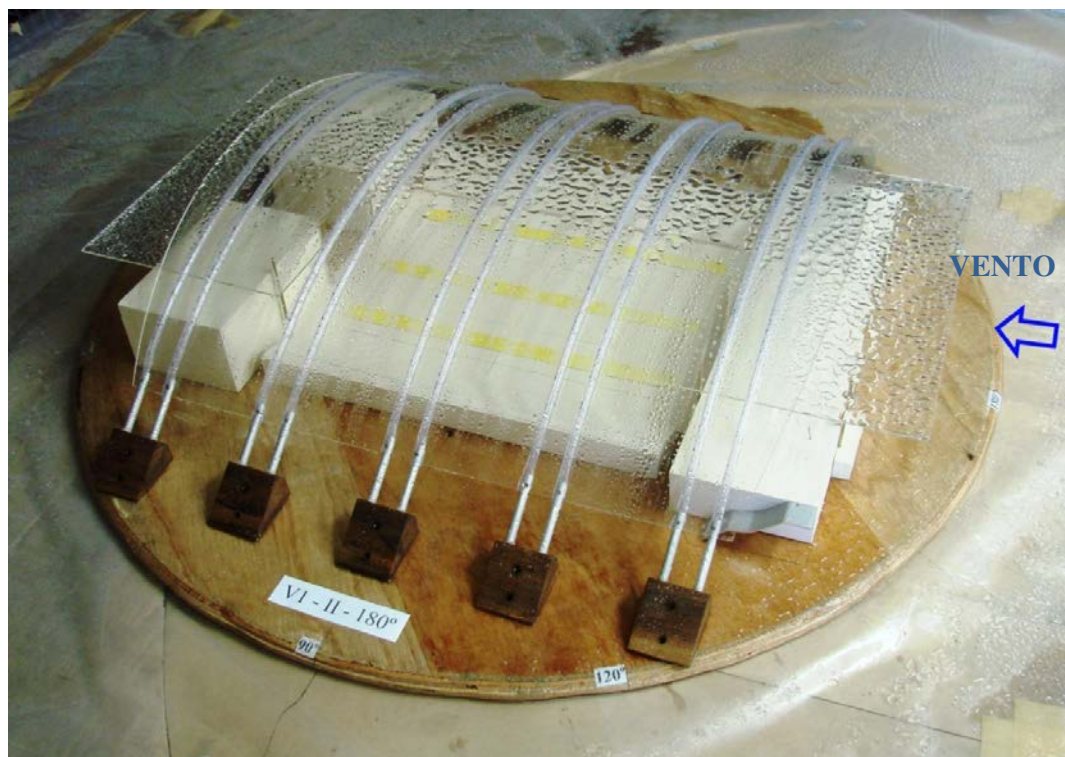


Figura 4.38 – Modelo estudado
Fase II – Configuração II: Placas Horizontais
Vento 180°.

Novamente é possível observar a grande quantidade de água da chuva sobre as placas horizontais utilizadas para a proteção do ginásio, mesmo a chuva e o vento com ângulo de incidência de 180°.

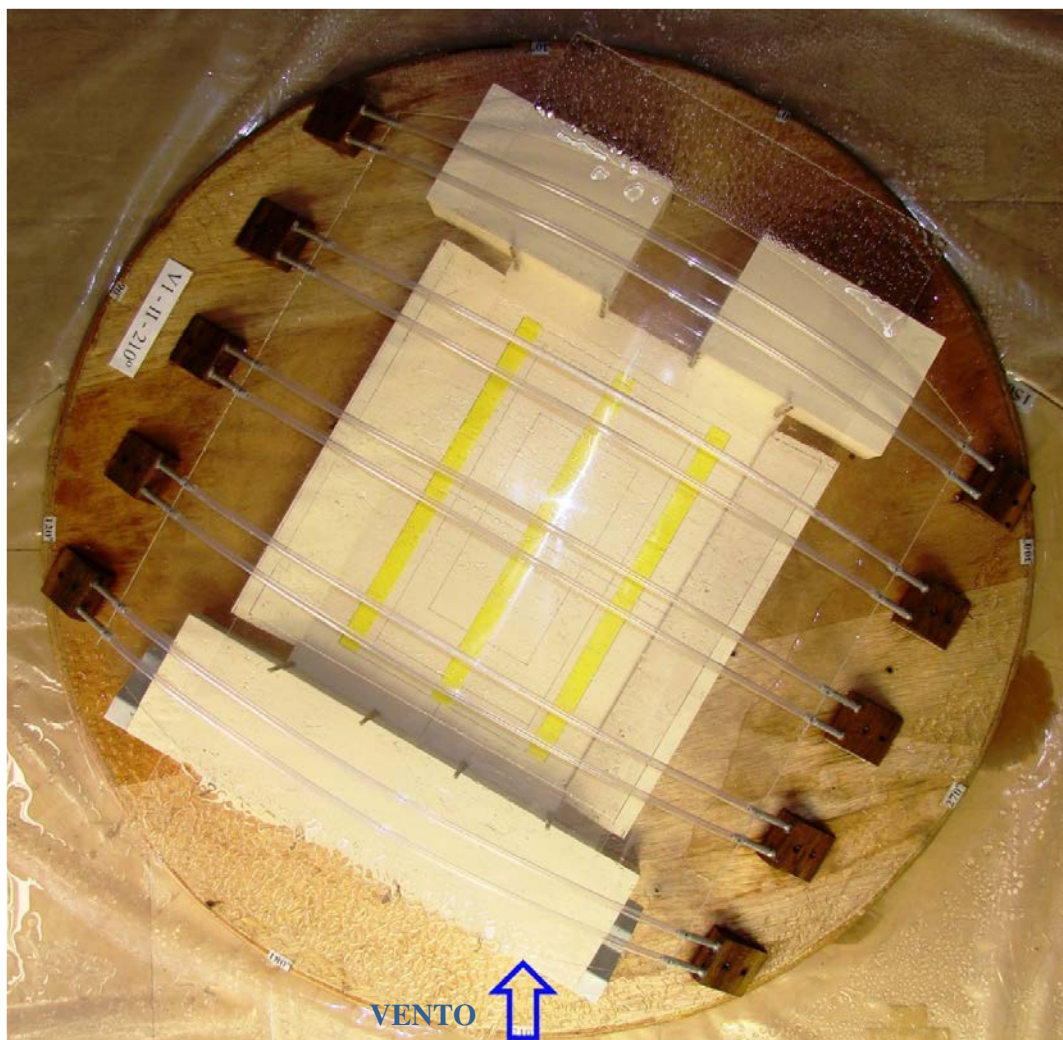


Figura 4.39 – Modelo estudado
Fase II – Configuração II: Placas Horizontais
Vento 210°.

Como é possível constatar pelas figuras, a colocação das placas reduz consideravelmente a quantidade de água que penetrava no ginásio. Note nos papéis sensíveis a água praticamente não alteração na sua cor. Porém a penetração de água não é totalmente resolvida devido ao surgimento de uma espécie de pulverização d'água. A água da chuva ao chocar-se com as placas protetoras transforma-se em vapor e este vapor carregado pelo vento para dentro do ginásio. Em todas as figuras, especialmente na figura(4.38), acima mostradas que representam a configuração II é possível constatar o grande acúmulo de água sobre as placas adicionadas ao modelo.

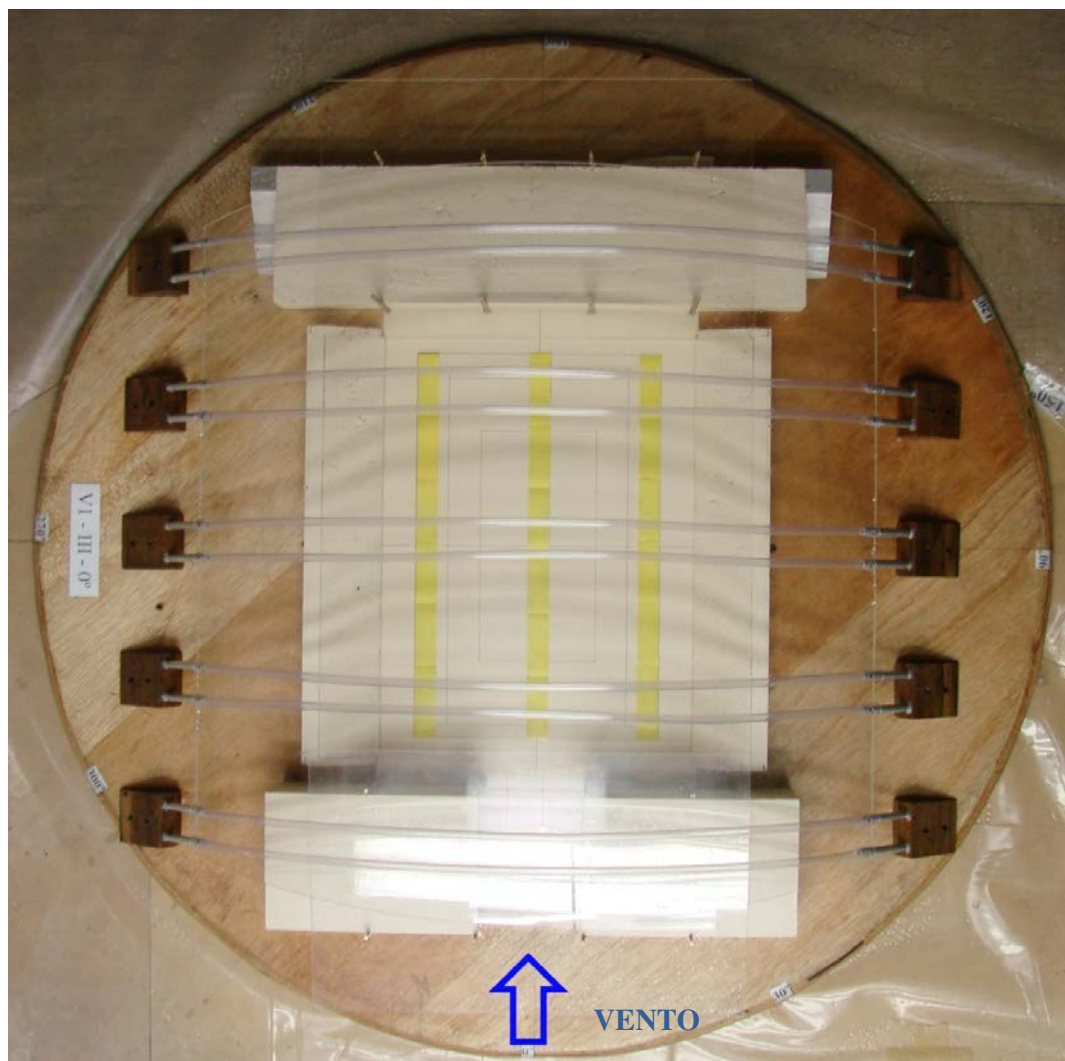


Figura 4.40 – Modelo estudado
Fase II – Configuração III: Placas Inclinadas
Vento 0°.

Outra solução testada para o problema de penetração de água no ginásio foi à colocação de placas nas mesmas posições da configuração anterior, porem ao invés de colocarem placas horizontais, foram colocadas placas com uma inclinação de 5°. Esta configuração recebeu a denominação de configuração III. Esta configuração foi testada nos mesmos ângulos das anteriores, e os resultados podem ser vistos na figura acima e fotos seguintes.

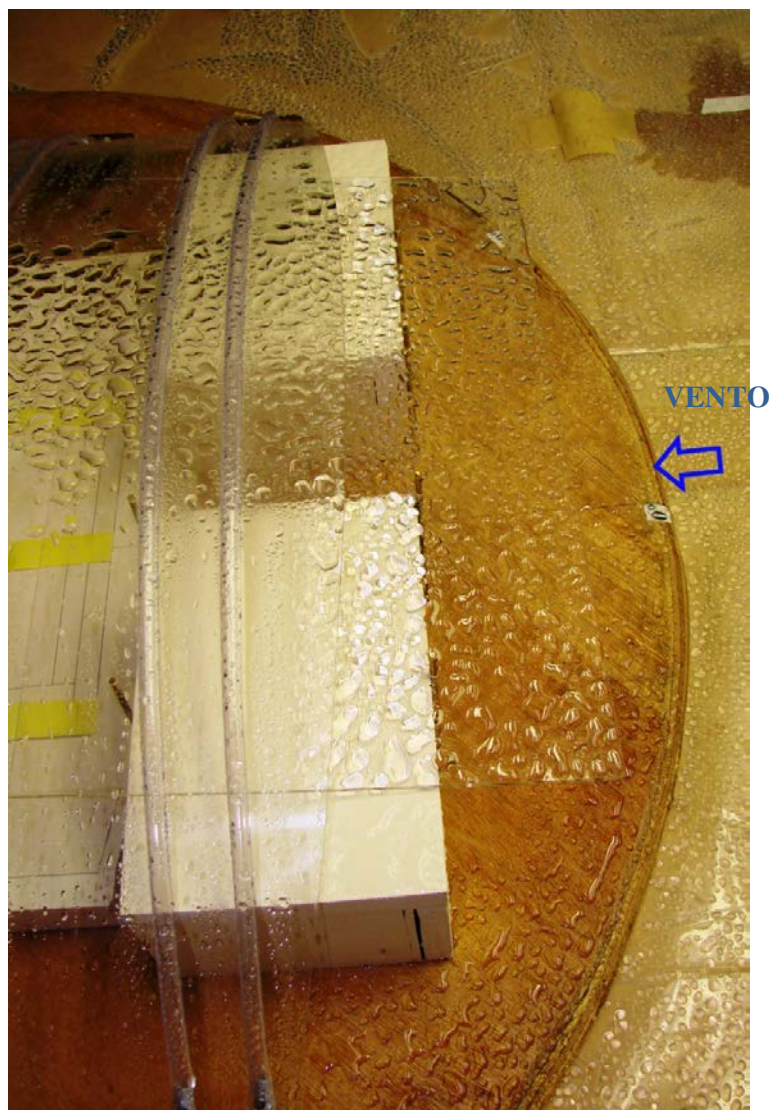


Figura 4.41 – Modelo estudado
Fase II – Configuração III: Placas Inclinadas
Vento 0°.

Observando mais de perto a configuração III, com placas inclinadas a 5°, nota-se que esta configuração apresenta um comportamento parecido com a configuração anterior. Ressalta-se a grande quantidade de água acumulada na abas, o que gera um aumento no problema de carreamento da água da chuva.

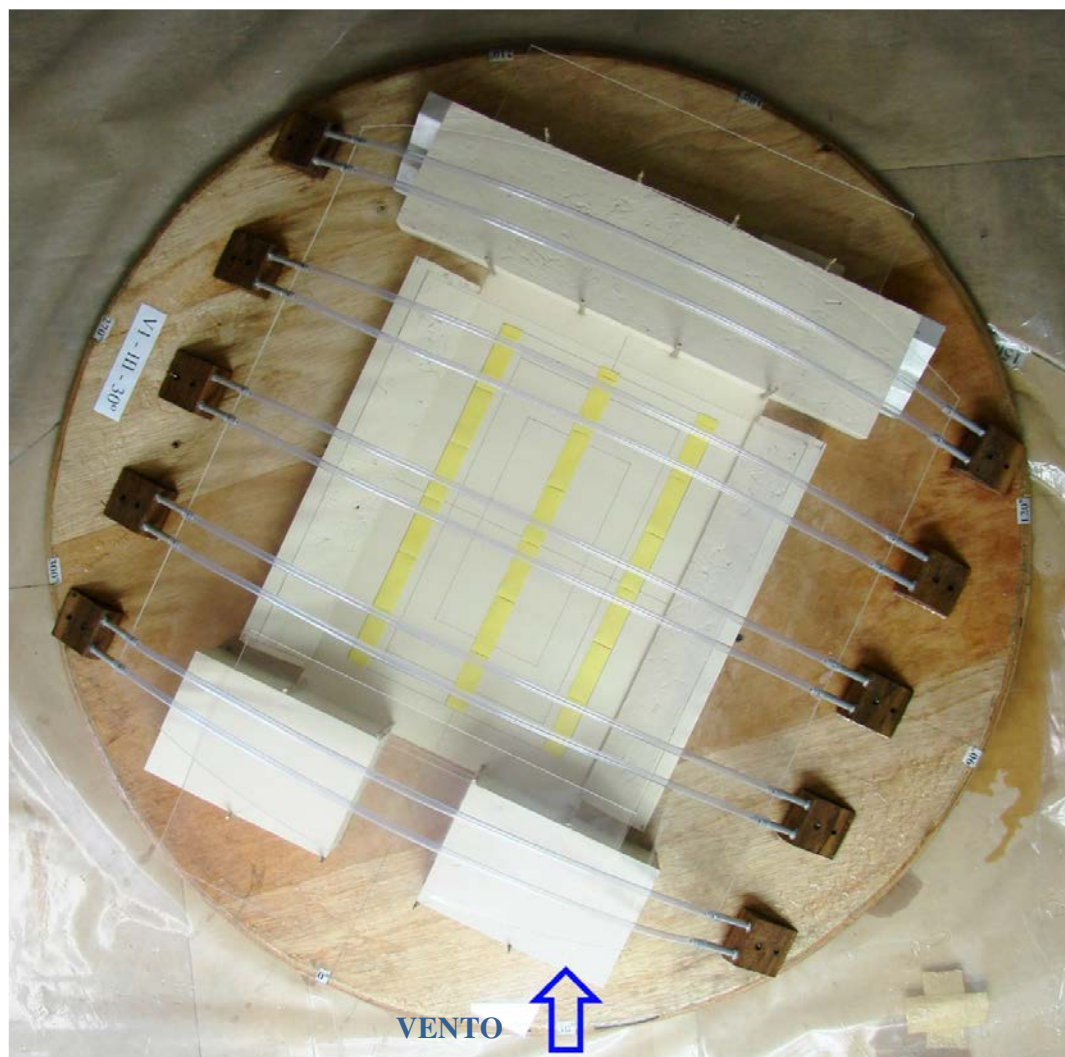


Figura 4.42 – Modelo estudado
Fase II – Configuração III: Placas Inclinadas
Vento 30°.

Novamente nota-se que a quantidade de água que infiltra no ginásio devido ao carreamento não altera a cor do papel utilizado para medição.

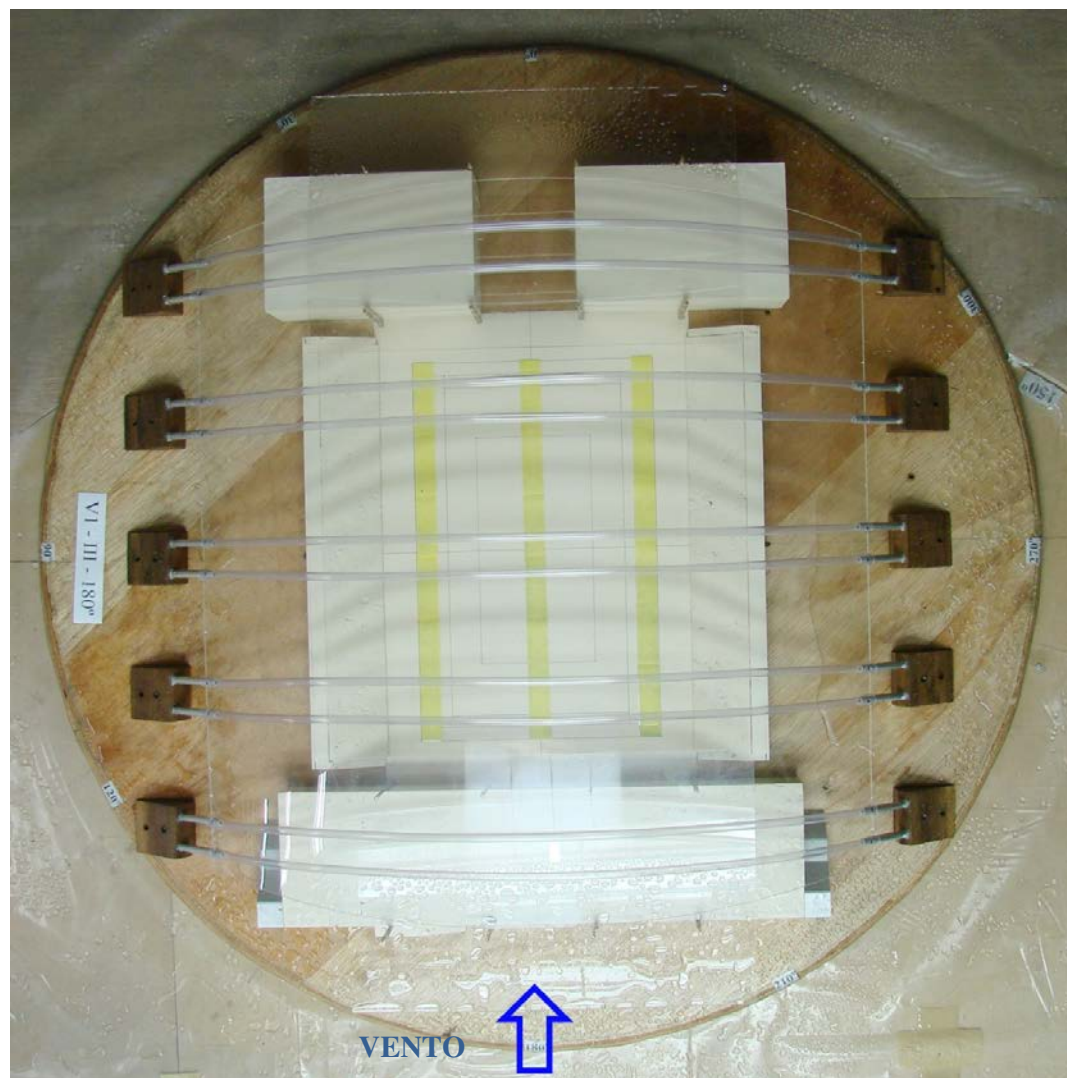


Figura 4.43 – Modelo estudado
Fase II – Configuração III: Placas Inclinadas
Vento 180°.



Figura 4.44 – Modelo estudado
Fase II – Configuração III: Placas Inclinadas
Vento 180°.

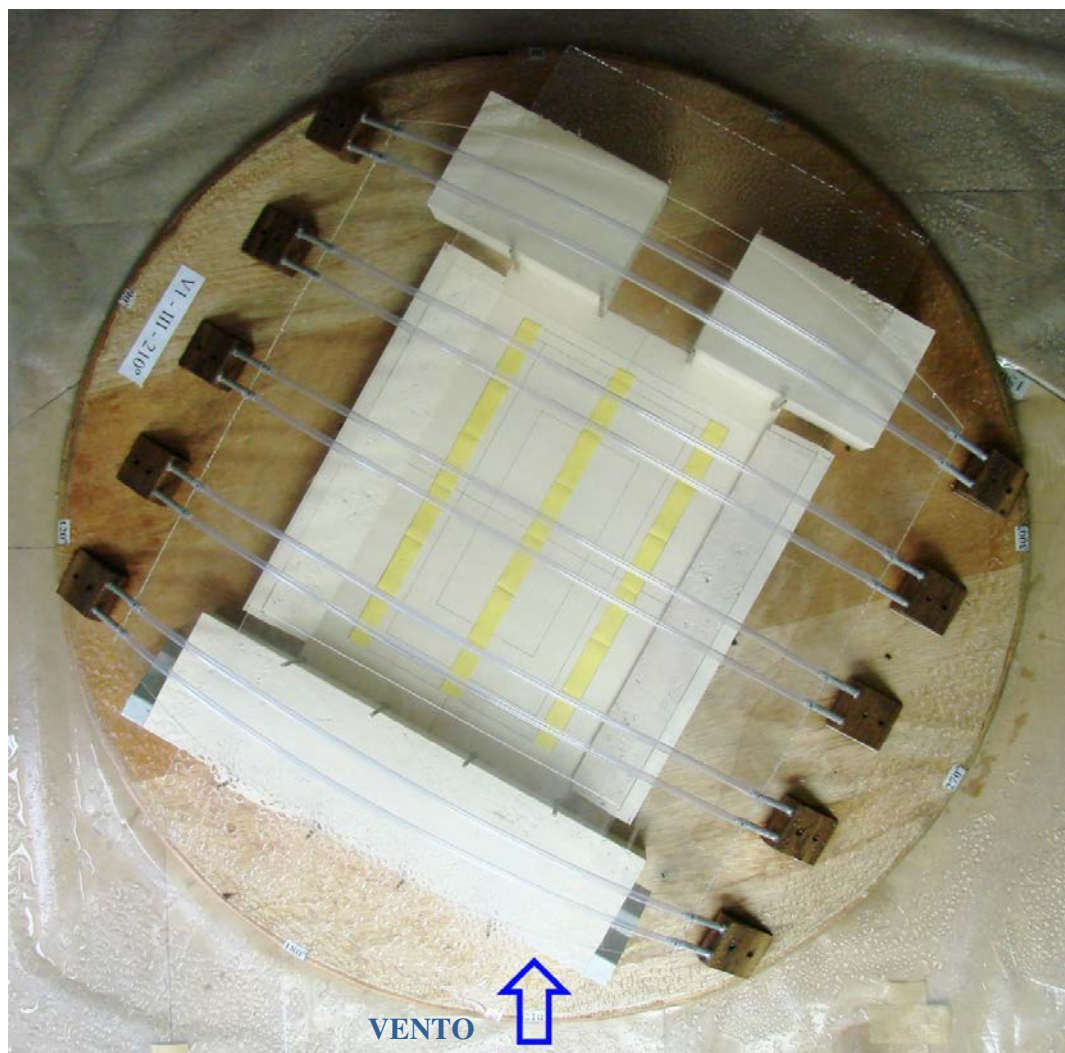


Figura 4.45 – Modelo estudado
Fase II – Configuração III: Placas Inclinadas
Vento 210°.

Novamente é evidente pelas fotos dos ensaios que a colocação das placas reduz consideravelmente a quantidade de água que penetrava no ginásio. Estes resultados são muito semelhantes aos resultados obtidos com as placas na posição horizontal. Porém a constatou uma pequena melhora nos efeitos locais de penetração d'água, mas também uma piora no problema de carreamento do vapor d'água.

5 CONCLUSÕES

A partir dos resultados analisados foi possível determinar que os ensaios em túnel de vento simulando a interação chuva-vento apresentam resultados satisfatórios, ou seja, os ensaios apresentam resultados coerentes com as situações encontradas na edificação já existente. Com isso abre-se uma área de atuação no LAC no que se refere a ensaios em túnel de vento, principalmente para ginásios com aberturas permanentes, a fim de evitar que estes apresentem problemas de penetração de água nos dias de chuva.

A partir do primeiro grupo de ensaios, *Somente Chuva (sem Vento)*, observou-se que a área molhada corresponde ao limite de projeção da cobertura. Sem a ação do vento, a cobertura (sem e com placas) foi em geral eficaz para proteger a quadra e as arquibancadas, que também permaneceram secas. Entretanto, foram identificados respingos de água na quadra, na região próxima à entrada com abertura permanente.

Para o segundo grupo de ensaios, *Chuva e Vento sem Placas (Configuração I)*, o comportamento é distinto conforme o ângulo de incidência do vento. Para incidências de 0° e 180° a área molhada atingiu quase metade da quadra e parte da arquibancada, o que pode ser claramente identificado nas correspondentes figuras no cap. 4, na região de cor azul mais intenso. Já para as incidências de 30° e 210° , a área molhada é menor do que para o caso com vento incidindo diretamente.

Para o terceiro grupo de ensaios, *Chuva e Vento com Placas Horizontais (Configuração II)*, a influência positiva da placa de proteção já é nitidamente percebida. Há uma significativa redução na penetração da água da chuva no interior do ginásio, para todas as incidências do vento. Entretanto, apesar de fortemente reduzida, a penetração de água de chuva não é totalmente impedida. A chuva parece ser “pulverizada” e carregada pelo vento sob a forma de vapor d’água a partir do contato com a placa.

Para o quarto grupo de ensaios, *Chuva e Vento com Placas Inclínadas (Configuração III)*, o comportamento é semelhante ao do terceiro grupo, com uma leve melhora no efeito de proteção em relação à chuva localizada. Há uma piora, porém, no efeito de carreamento do vapor d’água.

A partir da análise dos resultados obtidos nos ensaios em túnel de vento da simulação vento-chuva sobre o ginásio localizado no Rio de Janeiro, conclui-se que a presença das placas é eficaz na redução da penetração da água da chuva através da edificação, porém sem evitá-la totalmente.

Conclui-se que a simulação física da interação vento-chuva em túneis de vento de camada limite é possível, desde que os requisitos de semelhança sejam respeitados.

5.1 TRABALHOS FUTUROS

Evidentemente, mais estudos são necessários para o desenvolvimento das técnicas de simulação e entendimento dos complexos processos da interação vento-chuva-edificação. Sugere-se a realização de ensaios com velocidades distintas daquela realizada neste trabalho, bem como ensaios com formas distintas de modelos de edificações.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Associação Brasileira de Normas Técnicas (1988). NBR-6123 – Forças devidas ao vento em edificações. Rio de Janeiro.
- [2] Baskaran, B. A., Brown, W. C. (1995) Dynamic Evaluation of the Building Envelope for Wind and Wind Driven Rain Performance; *Journal of Thermal Insulation and Building Envelope, Volume 18, January*. pp. 261-275.
- [3] Bauer, E. (1987) Resistência a penetração da chuva em fachadas de alvenarias de materiais cerâmicos: uma análise de desempenho. Dissertação de mestrado. Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, UFRGS. Porto Alegre.
- [4] Blessmann, J. (1982) The Boundary Layer Wind Tunnel of UFRGS; *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 10. pp. 231-248.
- [5] Blessmann, J. (1990) Aerodinâmica das Construções. 2 ed. Porto Alegre. Ed. Universidade. UFRGS.
- [6] Blessmann, J. (1995) O vento na engenharia estrutural. Porto Alegre. Ed. Universidade. UFRGS.
- [7] Choi, E. C. C. (1993) Simulation of wind-driven-rain around a building. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Volumes 46-47, August. Pages 721-729*.
- [8] Choi, E. C. C. (1994) Parameters Affecting The Intensity of Wind-Driven Rain on the Front Face of a Building. Wind, Rain, Building Envelope Seminar. Ottawa, Canada. May 16 and 17.
- [9] Choi, E. C. C. (1994) Characteristics of The Co-occurrence of Wind and Rain and The Driving-Rain Index. Wind, Rain, Building Envelope Seminar. Ottawa, Canada. May 16 and 17.
- [10] Cook, N. J. (1990) The designer's guide to wind loading of building structures. Part 2: Static Structures. (Building Research Establishment). London, UK.

-
- [11] Couper, R. R. (1972) Drainage from Vertical Faces. Paper #4, Symposium “Wind-Driven Rain and the Multi-Storey Building”, Division of Building Research, CSRIO.
- [12] Davenport, A. G., Isyumov, N. (1967) The Application of The Boundary Layer Wind Tunnel to the Prediction of Wind Loading. In: Proceedings of the International Research Seminar: Wind Effects on Buildings and Structures. Ottawa, Canada. September 11-15. Vol. 1. Pp. 201-230.
- [13] Engineering Sciences Data Unit (1982) “Strong winds in the atmospheric boundary layer, Part 1: mean hourly wind speeds. Data item 82026”. London, ESDU.
- [14] Inculet, I. I., Davenport, A. G., Isyumov, N. and Schoren, F. (1987) The Drift and Deposition of Charged Droplets on Tree Canopies: the Development of an Experimental Procedure Using the Boundary Layer Wind Tunnel. Proc. Symposium on the Aerial Application of Pesticides in Forestry. Ottawa, Canada. Oct. 20-22, 1987.
- [15] Ishizaki, H., Mitsuta, Y. and Sano, Y. (1970) Rainfall Deposit on Wall of a Building in a Storm. Bull. of the Disaster Prevention Institute, Kyoto University, Vol. 20.
- [16] Lacy, R. E. (1965) Driving-Rain Maps and the Onslaught of Rain on Buildings. Building Research Station Current Paper 54, presented to the RILEM/CIB Symposium in Helsinki, August 1965.
- [17] Lima, L. G.; Morelli, F. (2005) Mapa Brasileiro de “Chuva Dirigida” – Algumas Considerações. VI Simpósio de Tecnologia de Argamassas e I Internacional Symposium on Mortars Technology. Anais. Florianópolis.
- [18] Marsh, P. (1977) Air and Rain Penetration of buildings. London: The Construction Press.
- [19] Petrucci, H. M. C. (2000) Alteração da Aparência das Fachadas: Interação entre as condições Ambientais e a Forma Construída. Dissertação de mestrado. Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, UFRGS. Porto Alegre.
- [20] Poyastro, P. C. (2010) Avaliação da Influência da Volumetria e das Condições de Entorno da Edificação no Manchamento e Infiltração de Água em Fachadas por

Ação de Chuva Dirigida. Exame de qualificação de Doutorado. Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, UFRGS. Porto Alegre.

- [21] Raimondo, S. and Haasz, A. A. (1978) Single and Dual Air Curtain Jets Used as Protection Against Precipitation. University of Toronto UTIAS Report 227.
- [22] Robinson, G. and Baker, M. C. (1975) Wind-Driven Rain and Buildings. Tech. Paper No. 445, Div. of Bldg. Research, National Research Council of Canada.
- [23] Surry, D., Incullet, D. R., Skerlj, P. F., Lin, J.-X. and Davenport, A. G. (1994) Wind, rain and the building envelope: a status report of ongoing research at the University of Western Ontario. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Volume 53, Issues 1-2, November. Pages 19-36.*
- [24] Sánchez, J. (2000) Fundamentos de Hidrologia. Porto Alegre. Instituto de Pesquisas Hidráulicas-IPH. UFRGS.
- [25] Villela, S. M., Mattos, A. (1975) Hidrologia Aplicada. São Paulo. Ed. McGRAW-HILL do Brasil.