

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL**

**Maria Cristina Dolz Bênia**

**AVALIAÇÃO DE CRITÉRIOS PARA DETERMINAÇÃO DAS  
CONDIÇÕES DE CONFORTO E SEGURANÇA DE PESSOAS  
FRENTE À AÇÃO DO VENTO**

Porto Alegre  
dezembro 2010

**MARIA CRISTINA DOLZ BÊNIA**

**AVALIAÇÃO DE CRITÉRIOS PARA DETERMINAÇÃO DAS  
CONDIÇÕES DE CONFORTO E SEGURANÇA DE PESSOAS  
FRENTE À AÇÃO DO VENTO**

Trabalho de Diplomação apresentado ao Departamento de  
Engenharia Civil da Escola de Engenharia da Universidade Federal  
do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do  
título de Engenheiro Civil

**Orientador: Acir Mércio Loredou-Souza**

Porto Alegre  
dezembro 2010

**MARIA CRISTINA DOLZ BÊNIA**

**AVALIAÇÃO DE CRITÉRIOS PARA DETERMINAÇÃO DAS  
CONDIÇÕES DE CONFORTO E SEGURANÇA DE PESSOAS  
FRENTE À AÇÃO DO VENTO**

Este Trabalho de Diplomação foi julgado adequado como pré-requisito para a obtenção do título de ENGENHEIRO CIVIL e aprovado em sua forma final pelo Professor Orientador e pela Coordenadora da disciplina Trabalho de Diplomação Engenharia Civil II (ENG01040) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Porto Alegre, 20 de dezembro de 2010

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

Profa. Carin Maria Schmitt  
Coordenadora

**BANCA EXAMINADORA**

**Prof. Acir Mércio Loredou-Souza (UFRGS)**  
Ph.D. pela University of Western Ontario, Canadá

**Mario Gustavo Klaus Oliveira**  
Dr. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

**Elvis Antônio Carpeggiani**  
M. Sc. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Dedico este trabalho a meus pais, Enio e Maria Cecilia, e  
as minhas irmãs, Simone e Luciana.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço ao Prof. Acir Mércio Loredo-Souza, orientador deste trabalho, e a Profa. Carin Maria Schmitt, coordenadora das disciplinas de Trabalho de Diplomação, por terem me apoiado e orientado durante a realização deste trabalho.

Agradeço à equipe do Laboratório de Aerodinâmica das Construções pela amizade e colaboração. Agradeço, em especial, ao “Prof.” Paulo Francisco Bueno pelo apoio incondicional e ao Eng. Dr. Mario Gustavo Klaus Oliveira pelo incentivo e pela paciência em esclarecer todas as dúvidas.

Agradeço à minha família e aos meus amigos pelo apoio que me deram e por compreenderem as minhas ausências ao longo do Trabalho de Diplomação e durante todo o curso de Graduação.

O conhecimento é em si mesmo um poder.

*Sir Francis Bacon*

## RESUMO

BÊNIA, M. C. D. **Avaliação de Critérios para Determinação das Condições de Conforto e Segurança de Pessoas Frente à Ação do Vento**. 2010. 90 f. Trabalho de Diplomação (Graduação em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

A mudança na arquitetura das cidades, em especial com a construção de edifícios altos, produz condições adversas de vento. Estas condições podem causar desconforto e até mesmo situações perigosas a pessoas que utilizam áreas no entorno de edificações. Com o objetivo de auxiliar arquitetos e engenheiros a projetarem edificações menos nocivas às condições do vento, foram desenvolvidos vários critérios para determinar as condições de conforto e segurança de pessoas. Estes critérios são baseados na velocidade do vento e na frequência de ocorrência das mesmas. Neste trabalho, alguns critérios são avaliados através da comparação destes utilizando valores de velocidades do vento, do entorno de edifícios reais, obtidos em modelos reduzidos que foram estudados em túnel de vento. Conclui-se que os critérios avaliados conduzem a resultados distintos entre si, o que dificulta a determinação de um critério único para avaliar as condições de conforto e segurança de pessoas frente à ação do vento.

Palavras-chave: ação do vento; pedestres; critérios de conforto.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: representação esquemática do delineamento da pesquisa .....	17
Figura 2: perfil de velocidades médias do vento .....	20
Figura 3: variação da velocidade média horária do vento com a altura para diferentes tipos de terreno .....	20
Figura 4: fotografia do túnel de vento Prof. Joaquim Blessmann .....	26
Figura 5: circuito aerodinâmico do túnel de vento Prof. Joaquim Blessmann .....	26
Figura 6: configuração de ensaio e perfil de velocidades médias do vento para expoente $p=0,11$ .....	28
Figura 7: configuração de ensaio e perfil de velocidades médias do vento para expoente $p=0,14$ .....	28
Figura 8: configuração de ensaio e perfil de velocidades médias do vento para expoente $p=0,19$ .....	29
Figura 9: configuração de ensaio e perfil de velocidades médias do vento para expoente $p=0,23$ .....	29
Figura 10: configuração de ensaio e perfil de velocidades médias do vento para expoente $p=0,34$ .....	30
Figura 11: padrões de escoamento em torno de edificações alteadas .....	32
Figura 12: vórtices de pé de fachada .....	33
Figura 13: escoamento através de passagem .....	34
Figura 14: escoamento entre edifícios vizinhos .....	34
Figura 15: escoamento na esteira do edifício .....	35
Figura 16: velocidade média e rms .....	45
Figura 17: velocidades médias representadas como porcentagens da velocidade de referência .....	48
Figura 18: frequências percentuais de vento .....	49
Figura 19: horas de velocidade do vento por categoria da Escala Beaufort .....	49
Figura 20: variação da velocidade do vento com o intervalo de tempo para cálculo .....	50
Figura 21: tabela para avaliação das condições de conforto e segurança segundo o critério de Lawson e Penwarden .....	52
Figura 22: perspectivas artísticas do Empreendimento Brookfield Towers .....	54
Figura 23: perspectiva artística do Empreendimento E-Business Park .....	55
Figura 24: perspectiva artística do Empreendimento Leopoldo Green .....	55
Figura 25: fotos dos modelos dos empreendimentos Brookfield Towers, E-Business Park e Leopoldo Green no interior do túnel de vento .....	56
Figura 26: geometria do sensor omnidirecional tipo Irwin .....	56
Figura 27: mesa de calibração das sondas Irwin .....	57



Figura 28: distribuição dos coeficientes de velocidade em função do ângulo de incidência do vento .....	58
Figura 29: resultados obtidos para o período de retorno de um ano .....	61
Figura 30: resultados obtidos para o período de retorno de um mês .....	61
Figura 31: resultados obtidos para o período de retorno de uma semana .....	62

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1: categorias de rugosidade do terreno segundo a NBR 6.123.....	24
Quadro 2: valores do expoente p (sobre 1 hora) para as categorias de rugosidade da NBR 6.123 .....	25
Quadro 3: valores do expoente p (sobre 1 hora) utilizados no túnel de vento.....	27
Quadro 4: Escala Beaufort .....	41
Quadro 5: critério de Penwarden e Wise .....	42
Quadro 6: critério de Davenport .....	43
Quadro 7: critério de Lawson e Penwarden .....	51
Quadro 8: convenção de símbolos adotada pelo critério de Lawson e Penwarden .....	51
Quadro 9: critério adaptado de Lawson e Penwarden .....	53
Quadro 10: descrições de conforto adotadas para comparação dos critérios .....	60

## LISTA DE SÍMBOLOS

$z_o$  = rugosidade aerodinâmica (m);

$z_d$  = altura da subcamada sobre a superfície (m);

$\bar{V}(z)$  = velocidade média do vento na altura de interesse (m/s);

$\bar{V}(z_{ref})$  = velocidade média do vento em uma altura de referência (m/s);

$z$  = altura de interesse (m);

$z_{ref}$  = altura de referência (m);

$P$  = expoente que representa o tipo de terreno (adimensional);

$u_*$  = velocidade de corte (m/s);

$\kappa$  = constante de Von Kàrmàn,  $\kappa \cong 0,4$  (adimensional);

$V_e$  = velocidade efetiva de rajada (m/s);

$\bar{V}$  = velocidade média do vento (m/s);

$\sigma_v$  = desvio-padrão da velocidade;

$\bar{\eta}(a)$  = coeficiente de velocidade média para direção do vento  $a$  (adimensional);

$\hat{\eta}(a)$  = coeficiente de velocidade efetiva de rajada para direção do vento  $a$  (adimensional);

$\bar{V}_g(a)$  = velocidade média na altura gradiente para direção do vento  $a$  (m/s);

$P(\bar{V} > \bar{V}_1)$  = probabilidade de exceder a velocidade  $\bar{V}_1$  (baseada na distribuição de Weibull).

$A(a)$  = frequência relativa de ocorrência de velocidade por setor de azimute  $a + \frac{\Delta a}{2}$ ;

$C(a)$  = parâmetro da distribuição de probabilidades de Weibull;

$K(a)$  = parâmetro da distribuição de probabilidades de Weibull,  $K \cong 1,5$ .

$N_v$  = número de tempestades em um período de tempo;

$v$  = frequência estatística da velocidade do vento;

$vT$  = número independente de eventos por ano,  $vT \approx 960$ ;

$\Gamma$  = função Gamma;

$P(> V)$  = probabilidade de exceder a velocidade  $V$  (baseada na distribuição de Weibull);

$V_{pico}$  = velocidade de pico;

$\Delta p$  = diferença de pressão (mm H<sub>2</sub>O);

$p_h$  = pressão medida na altura do pedestre (mm H<sub>2</sub>O);

$p_s$  = pressão medida ao nível do solo (mm H<sub>2</sub>O);

$a, b$  = coeficientes oriundos da calibração das sondas;

$V_0^+$  = velocidade do vento que tem probabilidade  $P_m$  de ser excedida pelo menos uma vez em um período de  $m$  anos (m/s);

$S_3$  = fator estatístico;

$V_0$  = velocidade básica do vento (m/s).

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	13
<b>2 MÉTODO DE PESQUISA</b> .....	15
2.1 QUESTÃO DE PESQUISA .....	15
2.2 OBJETIVOS DO TRABALHO .....	15
<b>2.2.1 Objetivo principal</b> .....	15
<b>2.2.2 Objetivo secundário</b> .....	15
2.3 PRESSUPOSTO .....	16
2.4 DELIMITAÇÕES .....	16
2.5 LIMITAÇÕES .....	16
2.6 DELINEAMENTO .....	16
<b>3 ESCOAMENTO DO VENTO NATURAL</b> .....	19
3.1 PERFIL DE VELOCIDADES MÉDIAS DO VENTO .....	19
<b>3.1.1 Perfil de velocidades médias em lei de potência</b> .....	21
<b>3.1.2 Perfil de velocidades médias em lei logarítmica</b> .....	22
3.2 SIMULAÇÃO DO VENTO NATURAL .....	22
<b>3.2.1 Simulação das características do vento natural</b> .....	23
<b>3.2.2 Túnel de vento Prof. Joaquim Blessmann</b> .....	25
<b>4 EFEITOS DO VENTO EM PEDESTRES</b> .....	31
<b>5 CRITÉRIOS PARA DETERMINAÇÃO DAS CONDIÇÕES DE CONFORTO E SEGURANÇA DE PESSOAS FRENTE À AÇÃO DO VENTO</b> .....	36
5.1 CRITÉRIO DE PENWARDEN E WISE .....	42
5.2 CRITÉRIO DE DAVENPORT .....	43
5.2 CRITÉRIO DE ISYUMOV E DAVENPORT .....	44
5.3 CRITÉRIO DE LAWSON E PENWARDEN .....	47
<b>6 ESTUDOS DE CONFORTO E SEGURANÇA DE PESSOAS FRENTE À AÇÃO DO VENTO NO TÚNEL DE VENTO PROF. JOAQUIM BLESSMANN</b> .....	54
<b>7 COMPARAÇÃO DOS CRITÉRIOS DE CONFORTO E SEGURANÇA DE PESSOAS FRENTE À AÇÃO DO VENTO</b> .....	60
<b>8 CONSIDERAÇÕES FINAIS</b> .....	63
REFERÊNCIAS .....	65
ANEXO A .....	67
ANEXO B .....	80



## 1 INTRODUÇÃO

Condições indesejáveis do vento apresentam-se com frequência em torno de edificações, em locais como praças e passagens através de edifícios, comprometendo sua adequada utilização. Estas condições acontecem devido a alterações causadas por obstáculos, tais como edifícios e relevo, que obrigam o vento a adaptar-se e a contorná-los, alterando a velocidade e a turbulência do escoamento.

O vento que incide sobre edifícios é desviado em direção ao topo, à base e às laterais dos mesmos podendo causar desconforto a pedestres. O escoamento descendente ao longo da fachada aumenta a velocidade do vento na base do prédio e forma um grande vórtice denominado de **vórtice de pé de fachada**. A presença de obstáculos baixos próximos à fachada do edifício aumenta a magnitude deste fenômeno. Há ainda o **efeito Venturi** que ocorre em locais como passagens estreitas entre edifícios vizinhos e através de aberturas na base do edifício. Este efeito ocorre devido à redução da área disponível para o escoamento do vento causando aceleração.

De acordo com a velocidade do vento e a frequência de ocorrência da mesma, são avaliadas condições de conforto e segurança de pessoas que utilizam a área em torno de edifícios para diversas atividades. O objetivo deste trabalho é comparar critérios utilizados para determinar condições de conforto e segurança de pessoas frente à ação do vento confrontando seus resultados para casos de edificações reais para as quais foram realizadas medições de velocidade em modelo reduzido em túnel de vento.

Assim, este relatório, além desta introdução apresenta o capítulo 2 no qual está o método de pesquisa que contém os objetivos deste trabalho e outros fatores que orientam a pesquisa. O capítulo 3 contempla conceitos fundamentais sobre escoamento do vento que buscam criar uma base para o desenvolvimento do trabalho. Este capítulo apresenta também o túnel de vento Prof. Joaquim Blessmann no qual foram realizadas as medições de velocidade em modelo reduzido que servem de instrumento para comparação dos critérios. O capítulo 4 trata dos principais efeitos que pessoas estão sujeitas devido à ação do vento. O capítulo 5 apresenta uma revisão sobre critérios para determinação das condições de conforto e

segurança de pessoas frente à ação do vento e explica mais detalhadamente os quatro critérios que serão avaliados neste trabalho. No capítulo 6 é explicado como se realizam ensaios para determinação de conforto e segurança de pedestres no túnel de vento Prof. Joaquim Blessmann e são apresentados os três casos de edificações reais ensaiadas em túnel de vento utilizados para comparação dos critérios. O capítulo 7 apresenta a comparação entre os critérios. E o capítulo 8 contem considerações finais deste trabalho.



## **2 MÉTODO DE PESQUISA**

Para o desenvolvimento desta pesquisa foram estabelecidas as seguintes diretrizes que orientam a elaboração do trabalho.

### **2.1 QUESTÃO DE PESQUISA**

A questão de pesquisa deste trabalho é: quais as diferenças entre os resultados dos diversos critérios para avaliação das condições de conforto e segurança de pessoas frente à ação do vento?

### **2.2 OBJETIVOS DO TRABALHO**

Os objetivos do trabalho estão classificados em principal e secundário e são apresentados nos próximos itens.

#### **2.2.1 Objetivo principal**

O objetivo principal deste trabalho é a comparação de critérios usados para determinar condições de conforto e segurança de pessoas frente à ação do vento quanto aos níveis de aceitação de velocidades do vento e frequência de ocorrência destas.

#### **2.2.2 Objetivo secundário**

O objetivo secundário deste trabalho é a descrição de métodos utilizados para determinação de critérios de conforto e segurança de pessoas frente à ação do vento.

## 2.3 PRESSUPOSTO

O trabalho tem por pressuposto que as velocidades do vento obtidas em ensaios em túnel de vento representam fielmente o que ocorre na realidade.

## 2.4 DELIMITAÇÕES

O trabalho delimita-se ao estudo das condições de conforto e segurança de pessoas frente à ação do vento em casos específicos de edificações ensaiadas em túnel de vento.

## 2.5 LIMITAÇÕES

São limitações do trabalho:

- a) o número limitado de casos estudados usados para comparação dos critérios;
- b) a utilização de resultados de ensaios realizados em um único túnel de vento;
- c) não foram realizados ensaios especificamente para este trabalho. Utilizaram-se resultados de ensaios previamente realizados com outras finalidades;
- d) não foram considerados efeitos térmicos para avaliação do conforto de pedestres.

## 2.6 DELINEAMENTO

O delineamento do trabalho abrange as seguintes etapas:

- a) pesquisa bibliográfica;
- b) escolha dos critérios que serão comparados;
- c) escolha dos casos de estudo para comparação;
- d) pesquisa documental;
- e) definição de parâmetros para os casos estudados;
- f) aplicação dos critérios para os casos estudados;
- g) comparação dos resultados;
- h) considerações finais.

Uma representação esquemática do delineamento é apresentada na figura 1 e essas etapas são descritas a seguir.

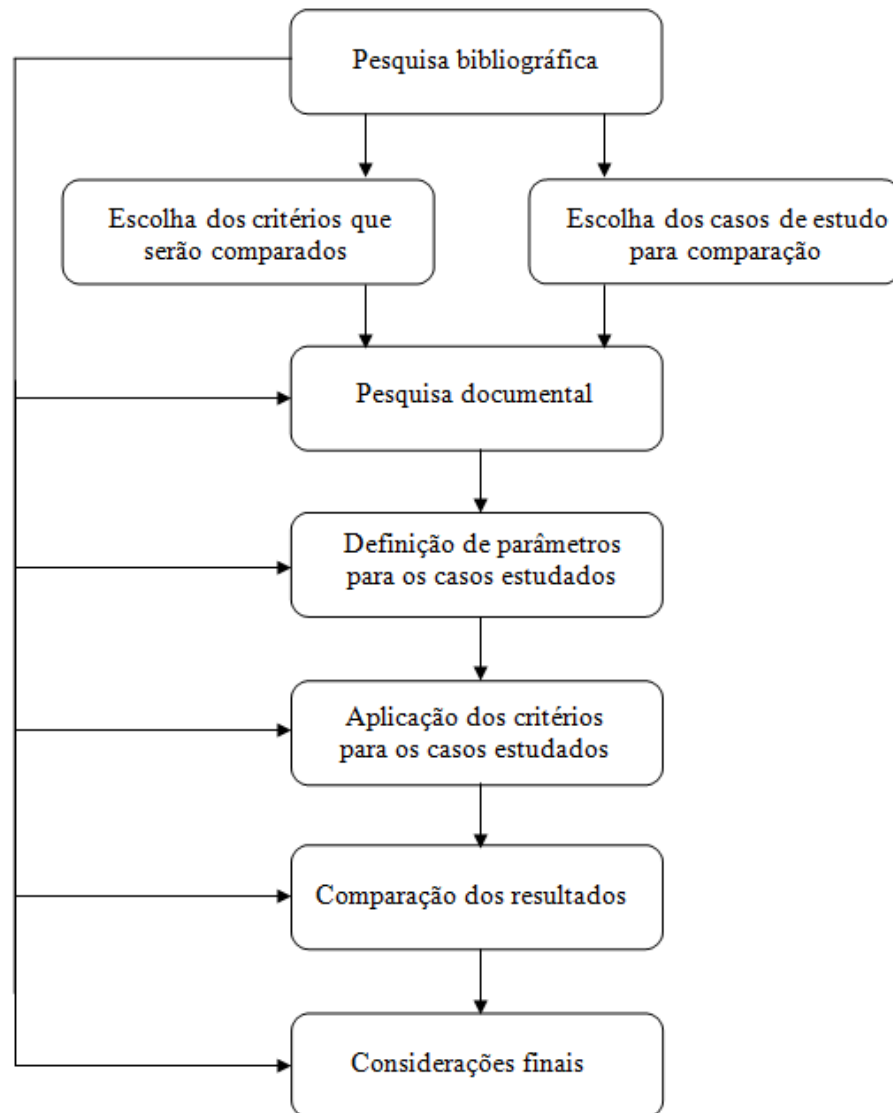


Figura 1: representação esquemática do delineamento da pesquisa

A **pesquisa bibliográfica** foi realizada no decorrer do trabalho direcionada à:

- a) compreensão do escoamento do vento e os efeitos provocados pelo mesmo que podem causar desconforto a pedestres;
- b) revisão dos métodos empregados por pesquisadores para elaboração de critérios para determinação das condições de conforto e segurança de pessoas frente à ação do vento.

Embora existam muitos critérios baseados em diferentes parâmetros, neste trabalho foram comparados apenas alguns deles. A seleção dos critérios abordados foi feita na etapa **escolha dos critérios que serão comparados**. Para comparação dos critérios foram utilizados alguns casos de empreendimentos ensaiados em túnel de vento. Os casos foram escolhidos dentre aqueles previamente ensaiados no túnel de vento Professor Joaquim Blessmann na etapa intitulada **escolha dos casos de estudo para comparação**.

Os ensaios realizados em túnel de vento para determinação das condições de conforto e segurança de pessoas fornecem valores de pressão para diversos pontos de medição no entorno de um edifício. Na etapa **pesquisa documental** foi realizada a revisão de relatórios de pesquisa de empreendimentos ensaiados no túnel de vento Prof. Joaquim Blessmann. Na etapa seguinte, denominada **definição de parâmetros para os casos estudados**, calcularam-se velocidades do vento, a partir dos valores de pressão fornecidos pelos ensaios, de acordo com método usado para processamento de dados de ensaios em túnel de vento.

Em seguida, na etapa **aplicação dos critérios para os casos estudados**, as velocidades do vento calculadas foram classificadas segundo os parâmetros definidos por cada critério escolhido. Depois, na etapa **comparação dos resultados** as classificações obtidas para cada critério foram comparadas e, em seguida, foram feitas **considerações finais**.

### 3 ESCOAMENTO DO VENTO NATURAL

Segundo Blessmann (1995, p. 9) e Sockel (1994, p. 86), o vento origina-se do deslocamento de parcelas de ar de zonas de maior pressão para zonas de menor pressão atmosférica. Essas diferenças de pressões são causadas pelo aquecimento solar variável da atmosfera.

Na parte mais baixa da atmosfera, o movimento do ar é diretamente afetado pelo efeito do atrito causado pela interação do escoamento com a superfície terrestre. A camada da atmosfera na qual o efeito do atrito deve ser considerado é chamada **camada limite atmosférica** (SOCKEL, 1994, p. 87).

#### 3.1 PERFIL DE VELOCIDADES MÉDIAS DO VENTO

A altura da camada limite varia de algumas centenas de metros a vários quilômetros, dependendo da intensidade do vento, da rugosidade do terreno e do ângulo de latitude. Dentro da camada limite, a velocidade do vento aumenta com a altura. A magnitude da velocidade no topo da camada limite é chamada de velocidade gradiente (SIMIU; SCANLAN, 1978, p. 36).

Blessmann (1995, p. 14, grifos do autor) explica que:

Abaixo da altura gradiente situa-se a **camada limite atmosférica**, na qual a velocidade do vento é alterada por diversas causas. [...] Nesta região as características do vento dependem principalmente da topografia do terreno, da forma, dimensões e distribuição dos obstáculos naturais e artificiais (a chamada **rugosidade superficial**) e da variação da temperatura na direção vertical. Todos esses fatores originam turbulência, que rapidamente se dissemina por toda a camada limite atmosférica. Nesta, a velocidade do vento varia de zero, junto à superfície, até a velocidade gradiente, na altura gradiente.

De acordo com Loredou-Souza et al. (2004, p. 137), o perfil de velocidades médias do vento é definido pela variação da velocidade do ar em função da altura dentro da camada limite atmosférica. A figura 2 representa o perfil de velocidades médias do vento.

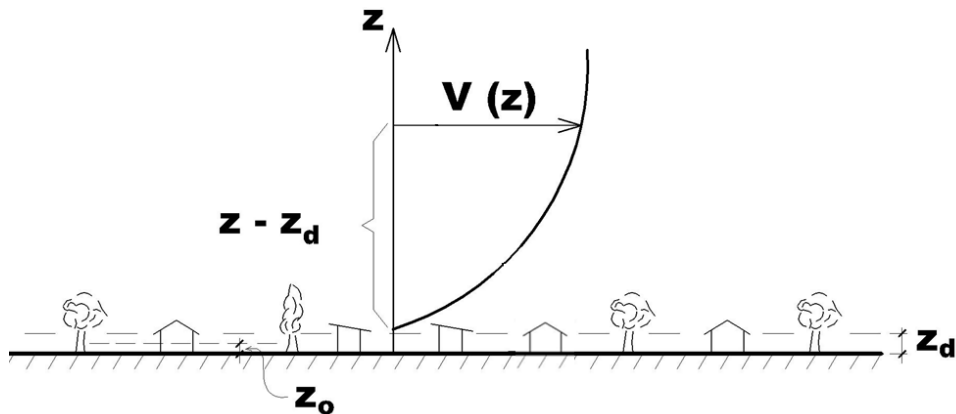


Figura 2: perfil de velocidades médias do vento  
(adaptada de LOREDO-SOUZA et al., 2004, p. 137)

Na figura 2,  $z_0$  corresponde à rugosidade aerodinâmica e representa a rugosidade local do terreno. O termo  $z_d$  representa uma fina subcamada da camada limite atmosférica que está localizada junto à superfície terrestre. Esta subcamada pode ser desprezada quando a rugosidade da superfície for pequena, isto é, em campo aberto ou sobre o mar.

Penwarden e Wise (1975, p. 1) explicam que o escoamento médio do vento é acompanhado por quantidades variáveis de turbulência à medida que o vento é quebrado pela rugosidade da superfície em uma sucessão interminável de rajadas de vento e calmarias. A figura 3 mostra como a velocidade média horária do vento varia com a altura para três típicos tipos de terrenos.

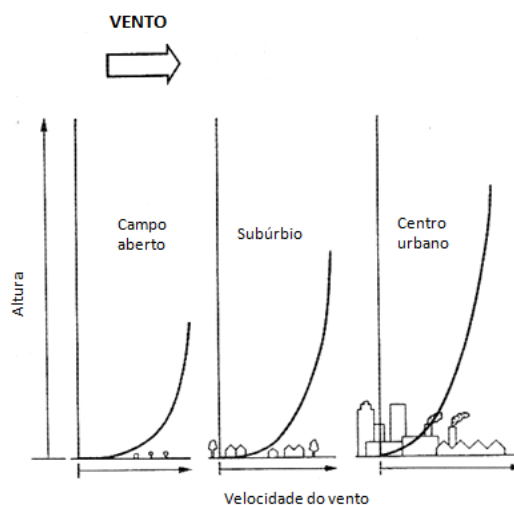


Figura 3: variação da velocidade média horária do vento com a altura para diferentes tipos de terreno (adaptada de PENWARDEN; WISE, 1975, p. 1)

Os perfis de velocidades médias mais utilizados na área de Engenharia de Vento são em lei de potência e logarítmico (LOREDO-SOUZA et al., 2004, p. 139). Estes perfis serão detalhados nos próximos itens.

### 3.1.1 Perfil de velocidades médias em lei de potência

A equação 1 representa o perfil de velocidades médias do vento em lei de potência (LOREDO-SOUZA et al., 2004, p. 138):

$$\frac{\bar{V}(z)}{\bar{V}(z_{ref})} = \left( \frac{z - z_d}{z_{ref}} \right)^p \quad (\text{equação 1})$$

Onde:

$\bar{V}(z)$  = velocidade média do vento na altura de interesse;

$\bar{V}(z_{ref})$  = velocidade média do vento em uma altura de referência;

$z$  = altura de interesse;

$z_d$  = altura da subcamada sobre a superfície;

$z_{ref}$  = altura de referência;

$p$  = expoente que representa o tipo de terreno.

Esta lei é empírica e pode ser aplicada até a altura gradiente (SOCKEL, 1994, p. 96). Apesar de não representar muito bem a região muito próxima da superfície, é muito utilizada pois representa bem o perfil médio de velocidades. O expoente  $p$  representa o tipo de terreno, ou seja, a rugosidade da superfície. Varia de 0,10 (para terrenos predominantemente planos como mar e lagos) a 0,35 (para centros urbanos com muitos edifícios altos) para intervalo de tempo de 1 hora.

### 3.1.2 Perfil de velocidades médias em lei logarítmica

A equação 2 representa o perfil de velocidades médias do vento em lei logarítmica (LOREDO-SOUZA et al., 2004, p. 138):

$$\frac{\bar{V}(z)}{u_*} = \frac{1}{\kappa} \ln \left( \frac{z - z_d}{z_o} \right) \quad (\text{equação 2})$$

Onde:

$\bar{V}(z)$  = velocidade média do vento na altura de interesse;

$u_*$  = velocidade de corte;

$\kappa$  = constante de Von Kàrmàn,  $\kappa \cong 0,4$ ;

$z$  = altura de interesse;

$z_d$  = altura da subcamada sobre a superfície;

$z_o$  = rugosidade aerodinâmica.

A lei logarítmica apresenta um bom ajuste na camada próxima à superfície, porém não representa bem a região superior da camada limite atmosférica. Segundo Blessmann (1995, p. 50), a forma mais correta para a descrição do perfil de velocidades médias para grandes intervalos de tempo (10 minutos, 1 hora) seria utilizar uma lei logarítmica. No entanto, uma lei potencial é aplicável também a curtos intervalos de tempo (3 segundos). Para este trabalho será utilizada a lei potencial para representar o perfil de velocidades médias do vento.

## 3.2 SIMULAÇÃO DO VENTO NATURAL

Inicialmente, túneis de vento aerodinâmicos eram usados para estudar modelos de construções. No entanto, com a invenção do avião, o desenvolvimento de túneis de vento passou a ser focado na Engenharia Aeronáutica. Estes túneis de vento foram denominados **túneis aerodinâmicos** e possuem relação comprimento/altura da câmara de ensaios geralmente em torno de dois. Túneis aerodinâmicos clássicos não simulam corretamente o



vento natural, pois o escoamento nestes túneis é suave e uniforme, diferindo do escoamento do vento natural que é turbulento e tem grandes variações da velocidade com a altura (BLESSMANN, 1990, p. 110-111). Nos próximos itens será explicado como se realiza a simulação das características do vento natural em túneis de vento.

### 3.2.1 Simulação das características do vento natural

Segundo Blessmann (1990, p. 112-114), as características do vento natural podem ser simuladas em túnel de vento de três formas:

- a) cobrindo o piso do túnel de vento com material de rugosidade adequada;
- b) colocando obstáculos a barlavento do modelo, por exemplo,
  - telas curvas ou planas de malha variável;
  - grelhas de barras horizontais de seção retangular ou circular;
  - grelhas de malha quadrada ou retangular (compostas por barras de seção retangular);
  - grelha única de malha variável;
  - diversas grelhas superpostas;
  - tela uniforme;
  - barras finas metálicas de seção circular (variando diâmetro e/ou espaçamento entre barras);
  - triângulos de dimensões e proporções variadas, de corpo cheio ou vazado, de lados retos ou curvos;
- c) através de jatos de ar lançados perpendicularmente ao escoamento do vento, a partir do piso do túnel de vento.

Para Sockel (1994, p. 139), o material rugoso no piso do túnel de vento é o elemento mais importante da simulação, pois representa a rugosidade da superfície terrestre próxima ao protótipo. O autor explica que as grelhas colocadas a barlavento são dispositivos de mistura que produzem escoamento turbulento. Blessmann (1990, p. 113) expõe que além de geradoras de turbulência, as grelhas reproduzem perfis de velocidades médias.

A NBR 6.123 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1988) classifica a rugosidade da superfície terrestre em cinco categorias (quadro 1).

CATEGORIA	DESCRIÇÃO	EXEMPLOS
I	Superfícies lisas de grandes dimensões, com mais de 5km de extensão, medida na direção do vento incidente.	- mar calmo; - lagos e rios; - pântanos e vegetação.
II	Terrenos abertos em nível ou aproximadamente em nível, com poucos obstáculos isolados, tais como árvores e edificações baixas.  A cota média do topo dos obstáculos é considerada inferior ou igual a 1,0m.	- zonas costeiras planas; - pântanos com vegetação rala; - campos de aviação; - pradarias e charnecas; - fazendas com sebes ou muros.
III	Terrenos planos ou ondulados com obstáculos, tais como sebes e muros, poucos quebra-ventos de árvores, edificações baixas e esparsas.  A cota média do topo dos obstáculos é considerada igual a 3,0m	- granjas e casas de campo, com exceção das partes com matos; - fazendas com sebes e/ou muros; - subúrbios a considerável distância do centro, com casas baixas e esparsas.
IV	Terrenos cobertos por obstáculos numerosos e pouco espaçados, em zona florestal, industrial ou urbanizada.  A cota média do topo dos obstáculos é considerada igual a 10,0m.  Esta categoria também inclui zonas com obstáculos maiores e que ainda não podem ser consideradas na Categoria V.	- 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.
V	Terrenos cobertos por obstáculos numerosos, grandes, altos e pouco espaçados.  A cota média do topo dos obstáculos é considerada igual ou superior a 25m.	- florestas com árvores altas e copas isoladas; - centros de grandes cidades; - complexos industriais bem desenvolvidos.

Quadro 1: categorias de rugosidade do terreno segundo a NBR 6.123 (baseado em ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1988, p. 8)

No quadro 2 estão apresentados valores do expoente  $p$  para determinação do perfil de velocidades médias do vento (sobre 1 hora) em lei de potência (equação 1) para as categorias de rugosidade do terreno da NBR 6.123 apresentadas no quadro 1.

CATEGORIA	EXPOENTE $p$
I	0,10
II	0,16
III	0,20
IV	0,25
V	0,35

Quadro 2: valores do expoente  $p$  (sobre 1 hora) para as categorias de rugosidade da NBR 6.123 (baseado em ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1988, p. 42)

Para a categoria I cabe ressaltar que para mar agitado, em caso de ventos violentos, o expoente  $p$  pode atingir o valor de 0,15. Em geral, para mar agitado  $p$  é aproximadamente 0,12 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1988, p. 8).

### 3.2.2 Túnel de vento Prof. Joaquim Blessmann

De acordo com Sockel (1994, p. 131), edifícios estão imersos em escoamento atmosférico turbulento, portanto a simulação do comportamento aerodinâmico destas estruturas deve ser conduzida em túneis de vento que tenham escoamento com características similares as do vento natural. Blessmann (1990, p. 114) explica que túneis construídos com a finalidade específica de aplicação na construção civil devem ter relação comprimento/altura superior a oito a fim de simular o mais fielmente possível as características do vento natural. Estes túneis são denominados **túneis de vento**.

O Túnel de Vento Professor Joaquim Blessmann da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (figura 4) tem relação comprimento/altura igual a 10,3 e permite a correta simulação da camada limite atmosférica. A figura 5 apresenta o circuito aerodinâmico do túnel de vento. Atualmente o túnel de vento possui quatro mesas de ensaios, cada uma com suas aplicações

específicas. Todas as mesas são giratórias permitindo a análise dos efeitos do vento sobre estruturas para vários ângulos de incidência.



Figura 4: fotografia do túnel de vento Prof. Joaquim Blessmann (trabalho não publicado)<sup>1</sup>

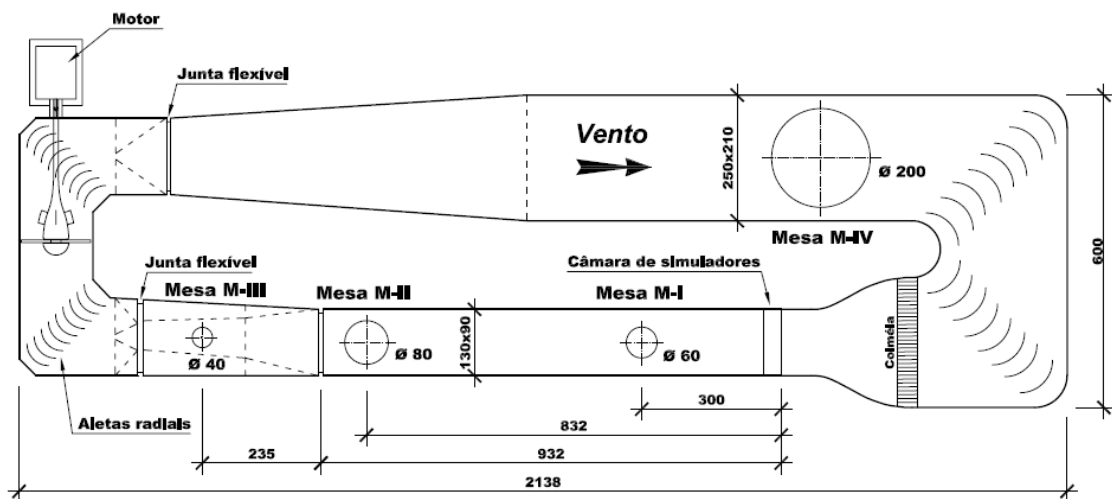


Figura 5: circuito aerodinâmico do túnel de vento Prof. Joaquim Blessmann (trabalho não publicado)<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Esta figura foi obtida do relatório de pesquisa Estudo em Túnel de Vento das Condições de Conforto de Pedestres para o Empreendimento Brookfield Towers, São Paulo-SP. Este relatório foi elaborado pelo Laboratório de Aerodinâmica das Construções da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, em dezembro de 2009. A autoria do relatório é do prof. Acir Mércio Loredo-Souza e equipe.

<sup>2</sup> Idem.

A mesa M-I está localizada no início da câmara de ensaios. Possui escoamento de ar de baixa turbulência e camada limite de pequena espessura. Nesta mesa são realizados ensaios para pesquisa aeronáutica com modelos no piso do túnel. São também realizados ensaios em formas geométricas simples em modelos bi ou tridimensionais. Com a colocação de dispositivos de mistura geradores de turbulência é possível a realização de ensaios para aplicação na construção civil.

A mesa M-II é utilizada para ensaios aplicados à construção civil com o uso de diversas configurações de geradores de turbulência associados com blocos fixados no piso do túnel. Estas configurações permitem a simulação da camada limite atmosférica. Nesta mesa também são realizados ensaios do tipo aeronáutico com modelo no eixo do túnel além de aferição de tubos Pitot-Prandtl e anemômetros.

Na mesa M-III são simulados efeitos dinâmicos em estruturas alteadas como, por exemplo, mastros, chaminés, torres de televisão, etc. No retorno do túnel de vento está localizada a mesa M-IV. Esta mesa é utilizada em ensaios de dissipação de poluentes, modelos de grandes obras (por exemplo, pontes, estádios e ginásios), simulação de chuvas, etc.

No quadro 3 estão apresentados valores do expoente  $p$  utilizados no túnel de vento Prof. Joaquim Blessmann para determinação do perfil de velocidades médias do vento (sobre 1 hora) em lei de potência (equação 1) para as categorias de rugosidade do terreno da NBR 6.123 (quadro 1). As figuras 6 a 10 mostram configurações de ensaio utilizadas para simular os perfis de velocidades médias referentes a estes expoentes. Estes perfis estão calculados em porcentagem da velocidade média no eixo longitudinal do túnel de vento. Isto significa que na equação 1, a incógnita  $z_{ref}$  é igual a 450mm.

<b>CATEGORIA</b>	<b>EXPOENTE <math>p</math></b>
I	0,11
II	0,14
III	0,19
III/IV	0,23
V	0,34

Quadro 3: valores do expoente  $p$  (sobre 1 hora) utilizados no túnel de vento Prof. Joaquim Blessmann

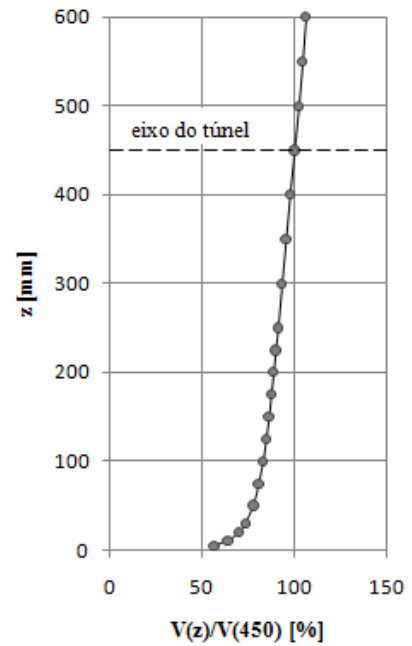


Figura 6: configuração de ensaio e perfil de velocidades médias do vento para expoente  $p = 0,11$  (trabalho não publicado)<sup>3</sup>

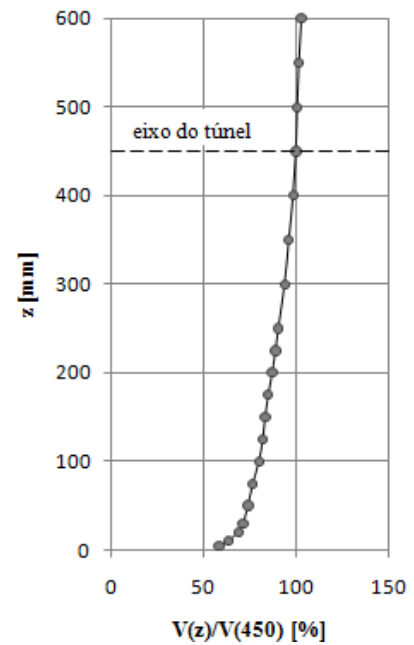


Figura 7: configuração de ensaio e perfil de velocidades médias do vento para expoente  $p = 0,14$  (trabalho não publicado)<sup>4</sup>

<sup>3</sup> Este gráfico foi elaborado pelo Laboratório de Aerodinâmica das Construções da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

<sup>4</sup> Idem.

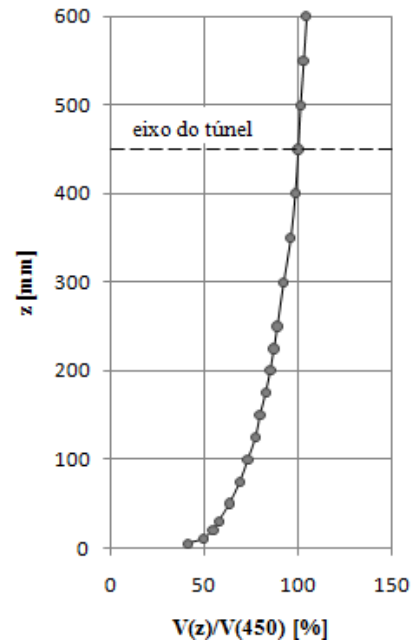


Figura 8: configuração de ensaio e perfil de velocidades médias do vento para expoente  $p = 0,19$  (trabalho não publicado)<sup>5</sup>

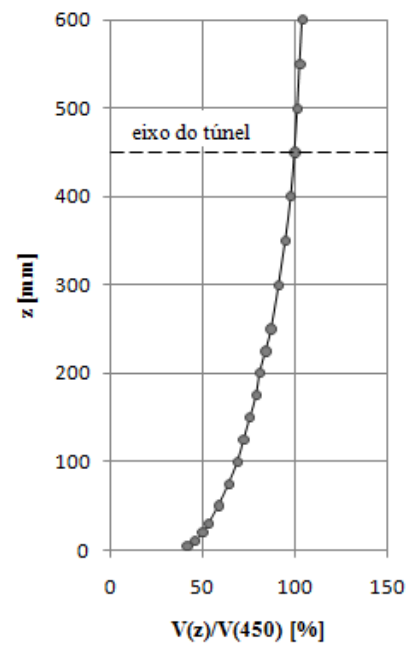
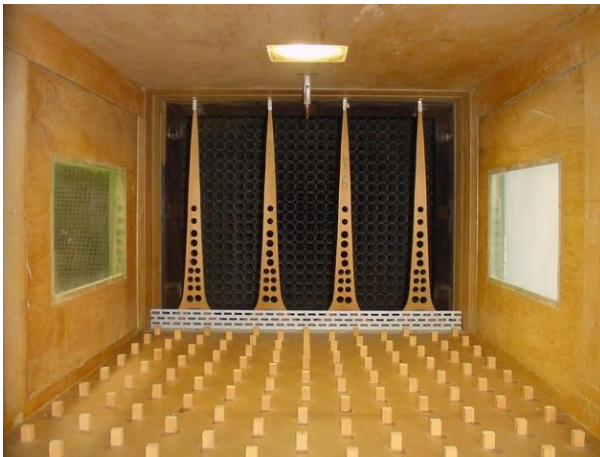


Figura 9: configuração de ensaio e perfil de velocidades médias do vento para expoente  $p = 0,23$  (trabalho não publicado)<sup>6</sup>

<sup>5</sup> Este gráfico foi elaborado pelo Laboratório de Aerodinâmica das Construções da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

<sup>6</sup> Idem.

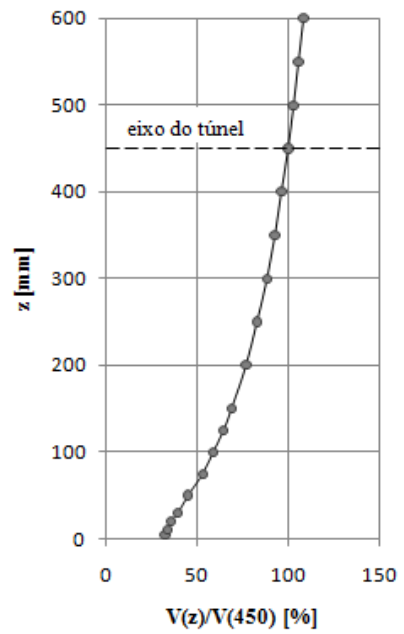


Figura 10: configuração de ensaio e perfil de velocidades médias do vento para expoente  $p = 0,34$  (trabalho não publicado)<sup>7</sup>

<sup>7</sup> Este gráfico foi elaborado pelo Laboratório de Aerodinâmica das Construções da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.



## 4 EFEITOS DO VENTO EM PEDESTRES

Mudanças no perfil das cidades modernas, com o advento da construção de edifícios altos, agravam severamente as condições de vento das cidades. Em muitos casos, a presença de edifícios altos cria condições de vento, ao nível do solo, desagradáveis e até mesmo perigosas. Como resultado disto, condições aceitáveis de vento em áreas externas públicas tornaram-se um importante fator a ser considerado no projeto de novos complexos de edifícios, e uma preocupação sobre áreas existentes consideradas indesejáveis pelo público (ISYUMOV; DAVENPORT, 1977, p. 403)

A ideia de projetar edifícios pensando nos efeitos do vento é uma inovação recente e foi concebida devido à reação adversa do público a edifícios que têm condições de vento desagradáveis em seu entorno (LAWSON, 1980, p. 210). Para Ratcliff e Peterka (1990, p. 791), arquitetos e urbanistas desejam saber os efeitos da construção de edifícios nas condições do vento local experimentadas por pedestres para garantir a segurança e para melhorar a atratividade do novo projeto para o público. Simiu e Scanlan (1978, p. 343) afirmam ainda que é tarefa dos projetistas, na fase de planejamento do empreendimento, verificar a possível existência de zonas de desconforto inaceitável para usuários de áreas ao ar livre no entorno das edificações.

O padrão de escoamento em torno de um edifício depende das características do vento que ali incide, do entorno imediato e do tamanho e forma do próprio edifício. O vento não pode interferir diretamente em edifícios que não são mais altos do que seus vizinhos ou são protegidos por árvores próximas ou por outros recursos naturais de altura similar. Nestes casos o escoamento principal do vento passa por cima dos telhados e as ruas na vizinhança são normalmente protegidas, a menos que o vento sopra diretamente ao longo delas. Um edifício que é substancialmente mais alto que o seu entorno apresenta maior obstrução ao vento, defletindo-o horizontal e verticalmente de seu curso original (PENWARDEN; WISE, 1975, p. 1). Na figura 11 estão representados padrões de escoamento em torno de edificações alteadas.

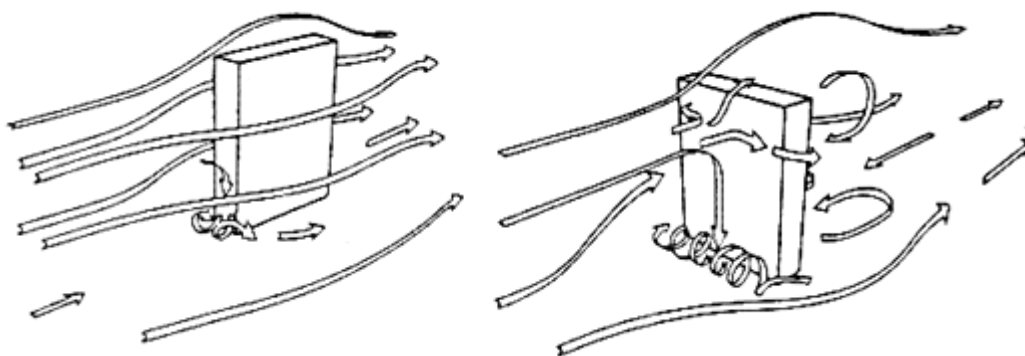


Figura 11: padrões de escoamento em torno de edificações alteadas  
(adaptada de BOTTEMA, 1993, p. 26)

Segundo Lawson (1980, p. 214) há oito partes de um complexo de edifícios que podem produzir velocidades de vento altas. São elas:

- a) vórtices nas fachadas do edifício;
- b) aberturas através de edifícios;
- c) espaços entre edifícios;
- d) esteira do edifício;
- e) ruas retas longas;
- f) estreitamento de ruas;
- g) cantos dos edifícios;
- h) pátios.

Quando o vento incide perpendicularmente à face de um edifício, ocorre um ponto de estagnação na linha central da fachada a uma altura entre dois terços e três quartos da altura total do edifício acima do solo. O ar acima do ponto de estagnação escoar em direção às laterais e ao topo. Abaixo deste ponto o ar escoar em direção às laterais e à base do edifício. Se um edifício sobressair acima de seus vizinhos, induzirá ar de alta velocidade em direção à base de sua face de barlavento aumentando o escoamento ao nível do solo ao redor do edifício. Quanto mais alto o edifício, maior será a velocidade do vento ao nível do solo (LAWSON, 1980, p. 216-218).

Uma parcela do vento defletido para baixo forma um vórtice, denominado **vórtice de pé de fachada** (figura 12), que depois se estende lateralmente e envolve o edifício em formato de ferradura (PENWARDEN; WISE, 1975, p. 1). A magnitude deste efeito aumenta com a altura da edificação e com a largura da fachada exposta. O vórtice gradualmente se dissipa na

turbulência do escoamento podendo ser sentido pelos edifícios vizinhos (LAWSON, 1980, p. 218). A presença de edificação mais baixa a barlavento, para certas configurações, pode reforçar o vórtice e acentuar ainda mais a velocidade do vento ao nível do solo (ISYUMOV; DAVENPORT, 1977, p. 404).



Figura 12: vórtice de pé de fachada (trabalho não publicado)<sup>8</sup>

Segundo Penwarden e Wise (1975, p. 3), se há passagens que comuniquem diretamente as fachadas de barlavento e sotavento, parte do vento defletido para baixo flui facilmente por tais aberturas (galerias, corredores, pilotis, etc.) formando um jato que penetra na região de esteira do escoamento atrás do edifício. Velocidades do vento nestas aberturas são geralmente as mais altas obtidas em qualquer ponto em torno de um edifício alto. Este fenômeno é conhecido como **efeito Venturi** e está mostrado na figura 13. Os autores enfatizam a importância da compreensão deste efeito explicando que uma pessoa que caminha em uma região protegida entre edifícios baixos e entra em uma passagem na base de um edifício alto deve experimentar velocidades do vento quatro vezes maiores. Considerando que a força exercida pelo vento aumenta com o quadrado da velocidade do escoamento, isto implica em aumento de 16 vezes na força aplicada pelo vento sobre a pessoa. Este fato ilustra o desconforto e os possíveis perigos de tal situação.

---

<sup>8</sup> Esta figura foi obtida dos diapositivos utilizados na disciplina de Aerodinâmica das Construções, ministrada pelo prof. Acir Mércio Loredou-Souza, no curso de Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, semestre 2010/01.



Figura 13: escoamento através de passagem (trabalho não publicado)<sup>9</sup>

O efeito Venturi é explicado por Lawson (1980, p. 220): a velocidade do vento tende a aumentar à medida que a massa de ar que se move tem que passar por uma área reduzida. Este efeito ocorre também quando há passagens estreitas entre edifícios vizinhos (figura 14) ou quando há estreitamento de ruas. Gandemer (1977, p. 427) salienta que a região crítica para conforto de pedestres está situada na parte mais estreita da passagem, conhecida como pescoço do efeito Venturi.



Figura 14: escoamento entre edifícios vizinhos (trabalho não publicado)<sup>10</sup>

Penwarden e Wise (1975, p. 3) explicam que as correntes de ar acelerado na base do edifício passam em torno dos cantos da edificação formando dois jatos de ar que se estendem a sota-vento a uma distância considerável, como mostrado na figura 15. Segundo Lawson (1980, p. 221), quando um edifício alto tem um espaço relativamente aberto a sota-vento esses vórtices

<sup>9</sup> Esta figura foi obtida dos diapositivos utilizados na disciplina de Aerodinâmica das Construções, ministrada pelo prof. Acir Mércio Loredo-Souza, no curso de Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, semestre 2010/01.

<sup>10</sup> Idem.

tendem a desaparecer na turbulência do escoamento, perdendo a sua estrutura. Podem ocorrer velocidades instantâneas do vento na esteira maiores do que as que ocorrem nos cantos do edifício. Rajadas de vento e momentos de calmaria produzidos na esteira são suficientes para virar um guarda-chuva, levantar a poeira do chão ou causar outros inconvenientes. Isyumov e Davenport (1977, p. 404) ponderam que as condições do vento na esteira do edifício, embora muito turbulentas, têm velocidades médias do vento mais baixas. No entanto, escoamentos reversos são observados com a corrente ascendente ao longo da face de sota-vento. Gandemer (1977, p. 429) acrescenta que a maneira pela qual uma esteira pode se espalhar é uma função direta do ambiente próximo. De sua definição, o **efeito esteira** inclui o efeito do escoamento no canto da edificação. Este efeito gera maior nível de desconforto na esteira.

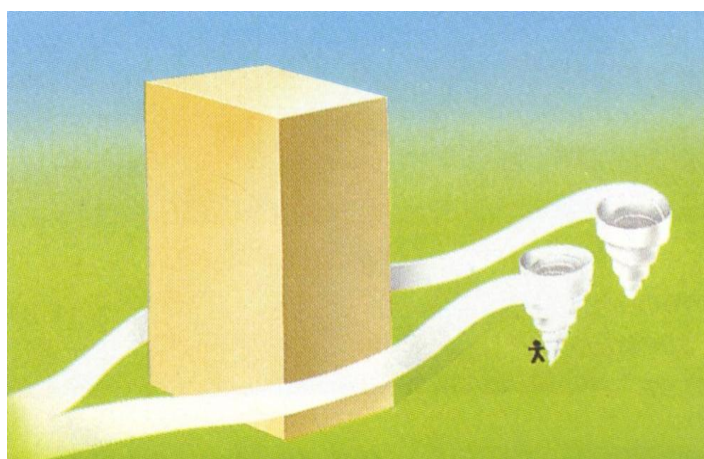


Figura 15: escoamento na esteira do edifício (trabalho não publicado)<sup>11</sup>

---

<sup>11</sup> Esta figura foi obtida dos diapositivos utilizados na disciplina de Aerodinâmica das Construções, ministrada pelo prof. Acir Mércio Loredou-Souza, no curso de Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, semestre 2010/01.

## 5 CRITÉRIOS PARA DETERMINAÇÃO DAS CONDIÇÕES DE CONFORTO E SEGURANÇA DE PESSOAS FRENTE À AÇÃO DO VENTO

O desconforto induzido pelo vento é motivo de preocupação no contexto da manutenção de áreas ao ar livre em um ambiente construído. Certas configurações de edifícios e espaços abertos podem dar origem a intensos escoamentos de vento local. Em qualquer situação de projeto é esperado que ocorram, com certa frequência, situações inaceitáveis de desconforto induzido pelo vento. Isto depende do grau de desconforto, das características do projeto e das condições do vento local. O desconforto é inaceitável se a frequência de ocorrência é considerada muito elevada. Declarações especificando valores máximos aceitáveis de frequências médias de ocorrência para vários graus de desconforto são chamadas de **critérios de conforto** (SIMIU; SCANLAN, 1978, p. 343).

Para auxiliar na comunicação entre arquitetos, planejadores e clientes, uma série de descrições subjetivas das condições de conforto de pessoas frente à ação do vento foi feita. Termos descritivos das atuais condições, como confortável, tolerável, desagradável, perigoso e inaceitável, são usados por alguns profissionais e outros termos relativos a possíveis ações como **medida corretiva tomada, nenhuma ação tomada** são usadas por outros, e comparações podem ser feitas (LAWSON, 1978, p. 99). Para Isyumov e Davenport (1977, p. 403), a escolha de critérios adequados para avaliar a aceitabilidade de condições do vento é uma questão difícil, pois envolve não apenas considerações de segurança e de restrição à prática de determinadas atividades, mas também considerações muito subjetivas sobre o conforto humano.

De acordo com Lawson (1978, p. 99), há duas abordagens para elaboração de critérios para determinação das condições de conforto: em termos relativos e em termos absolutos. Isyumov (1978, p. 196) explica que critérios relativos são baseados em comparações das velocidades do vento em um determinado local com as de um local considerado confortável para o público, em termos de velocidades do vento. Outra abordagem dos critérios relativos é avaliar o impacto da construção de um edifício comparando as velocidades do vento com e sem a construção.

Os critérios absolutos são orientações baseadas em aceitar certos valores de velocidade do vento desde que a frequência de ocorrência das mesmas seja inferior a um determinado valor conservador de aceitação. Estes critérios são a forma mais prática de avaliar as condições de conforto e segurança frente à ação do vento (ISYUMOV, 1978, p. 196).

Segundo Simiu e Scanlan (1978, p. 349), para definir quantitativamente a noção de desconforto inaceitável, é necessário que:

- a) uma correspondência seja estabelecida entre vários graus de desconforto de pedestres e a velocidade do vento que os causa;
- b) sejam especificadas máximas frequências de ocorrência das velocidades do vento que causam desconforto.

Penwarden e Wise (1975, p. 40) explicam que os efeitos observáveis de vento foram classificados pelo almirante Sir Francis Beaufort, em 1806, para fornecer uma maneira de estimar as condições de vento no mar. Uma versão modificada da Escala Beaufort é usada para estimar as velocidades do vento sobre a terra e esta contém algumas descrições que formam um ponto de partida para a formulação de critérios de conforto e segurança de pessoas frente à ação do vento. De acordo com Isyumov e Davenport (1975, p. 408), a classificação de Beaufort foi a primeira tentativa de separar, em categorias de velocidades do vento, efeitos físicos ou mecânicos.

A Escala Beaufort é apresentada na sua forma adaptada para velocidades do vento sobre a terra no quadro 4. Segundo Lawson (1978, p. 101), esta escala é adequada porque 0,1m/s é uma unidade muito pequena para distinguir qual a velocidade do vento. O Almirante Beaufort foi cuidadoso ao escolher as divisões entre os intervalos de sua escala de modo que em cada intervalo alguns efeitos distintos e notáveis ocorressem.

Número de Beaufort	Designação	$\bar{V}_{(10min)}$ (10m) (1)		EFEITOS EM	
		km/h	m/s	NATUREZA E CONSTRUÇÕES	PESSOAS
0	Calmaria	< 1 (< 1,5)	< 0,3 (< 0,5)	Fumaça eleva-se verticalmente.	O vento não é notado.
1	Aragem	1 - 6 (1,5 - 8,7)	0,3 - 1,6 (0,5 - 2,3)	Fumaça inclina-se, indicando direção e sentido do vento.	O vento não é notado.
2	Brisa	6 - 12 (8,7 - 17,4)	1,6 - 3,3 (2,3 - 4,8)	Folhas agitam-se suavemente (farfalham). Cata ventos indicam a direção do vento.	O vento não é notado.
3	Vento suave	12 - 20 (17,4 - 29)	3,3 - 5,4 (4,8 - 7,8)	Folhas, ramos finos e arbustos pequenos em movimento constante. Bandeiras leves e pequenas são inteiramente desfraldadas.	O cabelo é parcialmente despenteado. Roupas folgadas agitam-se. Dificuldades para ler jornais.
4	Vento moderado	20 - 29 (29 - 42)	5,4 - 8,0 (7,8 - 11,6)	Folhas, ramos finos e arbustos pequenos em movimento agitado. Bandeiras maiores são desfraldadas. Poeira e papéis soltos são levantados e carregados pelo vento.	O cabelo é completamente despenteado.

continua



Número de Beaufort	Designação	$\bar{V}_{(10min)} (10m) (1)$		EFEITOS EM	
		km/h	m/s	NATUREZA E CONSTRUÇÕES	PESSOAS
5	Vento regular	29 - 39 (42 - 56)	8,0 - 10,7 (11,6-15,5)	Ramos maiores e árvores pequenas oscilam.	A força do vento é sentida no corpo. Perturbação leve ao caminhar. Perigo de tropeçar ao entrar em zona com rajadas fortes (ex.: próximo a
6	Vento forte	39 - 50 (56 - 72)	10,7 - 13,8 (15,5-20,0)	Galhos e arbustos grandes em movimento.	Dificuldade para caminhar firmemente e usar guarda-chuva. Ruído do vento nos ouvidos é desagradável. Ouve-se o assobio de fios telegráficos e telefônicos.
7	Ventania fraca	50 - 62 (72 - 89)	13,8 - 17,1 (20,0-24,8)	Árvores inteiras em movimento. Galhos fortes são flexionados.  Danos a coberturas mal construídas.	Difícil caminhar contra o vento. O vento é ouvido em edifícios.  Ouve-se suave gemido do vento.
8	Ventania moderada	62 - 75 (89 - 108)	17,1 - 20,7 (24,8-30,0)	Galhos finos e árvores fracas quebram-se. Troncos de árvores esbeltas oscilam.  Coberturas leves são danificadas, principalmente na cumeeira e beirais.  Desabamento de muros muito altos (2,5 - 3m) e de tapumes comuns.	Geralmente é impossível caminhar. Difícil equilibrar-se com rajadas fortes.  Aumenta o gemido do vento.

continua

continuação

Número de Beaufort	Designação	$\bar{V}_{(10min)}$ (10m) (1)		EFEITOS EM	
		km/h	m/s	NATUREZA E CONSTRUÇÕES	PESSOAS
9	Ventania forte	75 - 88 (108 - 128)	20,7 - 24,5 (30,0-35,5)	Galhos grossos e arbustos quebram-se. Árvores esbeltas podem ser derrubadas. Telhas e telhados leves arrancados; topos de chaminés de alvenaria danificados; coberturas isoladas (postos de serviço, abrigos de ônibus, etc.) ou com poucas paredes na periferia sofrem danos que podem chegar ao tombamento, inclusive com seus suportes; ruptura de vidraças; arrancamento de esquadrias; casa simples (de madeira ou alvenaria pobre) destruídas. Desabamento de muros altos (2-2,5m). Painéis de propaganda e de sinalização danificados. Objetos leves são deslocados. Telhas leves, depois de arrancadas, são lançadas à distância. Caminhões-baús vazios podem tombar. Queda de torres de rádio e torres repetidoras de televisão. Torres de linhas de transmissão podem ser danificadas. Postes de iluminação e de telefonia celular são inclinados ou tombados. Antenas parabólicas são danificadas.	Pessoas podem ser lançadas ao solo pelas rajadas
10	Vendaval	88 - 102 (128 - 148)	24,5 - 28,4 (35,5-41,2)	Árvores são quebradas ou arrancadas em grande número. Danos a plantações e bosques. Danos estruturais consideráveis: forros, telhas e telhados pesados são arrancados; danos a paredes de alvenaria; casas de alvenaria podem ser parcial ou totalmente destruídas; hangares são destelhados e mesmo arrancados de suas bases; tombamento de silos metálicos. Destruição ou arrancamento de revestimentos de fachadas, esquadrias e vidraças. Tombamento de jantanas com carga leve. Tombamento de vagões e locomotivas em linhas de 1m. Desabamento de muros comuns (1,8m). Torres de linhas de transmissão danificadas ou arrancadas de suas bases. Postes tombados.	Pessoas podem ser arrastadas.

continua

continuação

Número de Beaufort	Designação	$\bar{V}_{(10min)}$ (10m) (1)		EFEITOS EM	
		km/h	m/s	NATUREZA E CONSTRUÇÕES	PESSOAS
11	Tempestade	102 - 120 (148 - 174)	28,4 - 33,3 (41,2-48,3)	Danos generalizados e severos, tanto em estruturas como em plantações e bosques, que sofrem grandes devastações.  Construções de alvenaria podem ser totalmente destruídas, bem como pavilhões industriais e afins. Mesmo construções com boa estrutura em concreto armado ou aço sofrem danos consideráveis em paredes e telhados.	
12	Furacão Tufão	> 120 ( > 174 )	> 33,3 ( > 48,3 )	Extremamente violento e devastador, com danos ainda mais importantes que os ocasionados por uma tempestade.	
(1) Entre parênteses: velocidade de rajada máxima sobre 3 segundos.					

Quadro 4: Escala Beaufort (BLESSMANN, 2001, p. 127-129)

A forma como a Escala Beaufort é utilizada depende do método utilizado para elaborar o critério. De acordo com Lawson (1978, p. 100-101), o critério de Penwarden escolhe uma única velocidade média do vento e expressa seus parâmetros subjetivos em relação à frequência de ocorrência desta velocidade. O autor expõe também que o critério de Davenport

e o critério de Lawson, por outro lado, consideram uma série de atividades e atribuem diferentes valores numéricos de velocidade do vento para seus termos subjetivos para cada atividade. Dependendo da finalidade da área de interesse e do tempo de exposição a que os pedestres serão submetidos, um mesmo valor de velocidade média do vento pode ser considerado aceitável ou inaceitável, mesmo que os efeitos descritos na Escala Beaufort sejam observados. Nos próximos itens serão apresentados os critérios de conforto e segurança de pessoas frente à ação do vento que são avaliados neste trabalho.

### 5.1 CRITÉRIO DE PENWARDEN E WISE

O critério de Penwarden e Wise foi desenvolvido no *Building Research Establishment* em Londres, Inglaterra. Os autores ensaiaram diversos modelos de edificações no túnel de vento do *National Physical Laboratory* e fizeram algumas medições de velocidade e direção do vento em escala real, buscando compreender os efeitos do vento em pedestres. Com base nos dados obtidos formularam o critério em termos da **velocidade média horária** do vento, desprezando os efeitos causados pela turbulência do escoamento causada pelas rajadas de vento.

De acordo com Penwarden e Wise (1975, p. 41), o desconforto causado pelo vento inicia quando a velocidade atinge 5m/s. Nesta velocidade cabelos e roupas agitam-se e areia e papéis soltos voam. Velocidades acima de 10m/s são desagradáveis, pois o vento exerce considerável força sobre o corpo humano. São consideradas perigosas velocidades acima de 20m/s. No quadro 5 estão relacionadas as velocidades determinadas pelos autores com a Escala Beaufort para velocidade média horária medida a 2 metros do solo.

DESCRIÇÃO	VELOCIDADE MÉDIA HORÁRIA	NÚMERO DE BEAUFORT
Desconfortável	5m/s	4
Desagradável	10m/s	6
Perigoso	20m/s	10

Quadro 5: critério de Penwarden e Wise

O critério estabelece ainda que, se a velocidade média horária do vento de 5m/s ocorrer em mais de 20% do tempo, uma medida corretiva deve ser tomada. Os autores salientam que em locais onde as pessoas permanecem ao ar livre deve-se manter a velocidade média do vento abaixo de 5m/s pelo máximo tempo possível (PENWARDEN; WISE, 1975, p. 42).

## 5.2 CRITÉRIO DE DAVENPORT

O critério de Davenport foi estabelecido no *Boundary Layer Wind Tunnel Laboratory* (BLWTL) da Universidade de Western Ontario em London, Canadá. Este critério se baseia na **velocidade média horária** do vento e utiliza a Escala Beaufort (quadro 4) adaptada para a altura do pedestre (KOSS, 2006, p. 783). Nos diversos ensaios de conforto e segurança de pedestres conduzidos no BLWTL, Davenport definiu locais no entorno das edificações onde foram medidas velocidades do vento para 36 direções de incidência, em intervalos de 10° (ISYUMOV, 1978, p. 191). A cada local é atribuída uma categoria de acordo com o quadro 6. Neste quadro também estão apresentados os limites, em termos de número da Escala Beaufort (quadro 4), de velocidades admitidas para as situações de conforto relativo: **confortável**, **tolerável**, **desagradável** e **perigoso** (ISYUMOV; DAVENPORT, 1977, p. 409-410).

ATIVIDADE	LOCAL	NÍVEL DE CONFORTO RELATIVO			
		Confortável	Tolerável	Desconfortável	Perigoso
Caminhando rapidamente	Passeios, calçadas	B5	B6	B7	B8
Praticando esportes, andando de patins	Arenas, parques	B4	B5	B6	B8
Parado, sentado (curta exposição)	Parques, praças	B3	B4	B5	B8
Parado, sentado (longa exposição)	Restaurantes e teatros ao ar livre	B2	B3	B4	B8
<b>Critério para aceitação</b>			< 1 ocorrência / semana	< 1 ocorrência / mês	< 1 ocorrência / ano

Quadro 6: critério de Davenport  
(adaptado de ISYUMOV; DAVENPORT, 1977, p. 408)

### 5.3 CRITÉRIO DE ISYUMOV E DAVENPORT

O critério de Isyumov e Davenport foi estabelecido no *Boundary Layer Wind Tunnel Laboratory* (BLWTL) da Universidade de Western Ontario em London, Canadá. Assim como o critério de Davenport, o critério de Isyumov e Davenport se baseia na Escala Beaufort (quadro 4) e utiliza as mesmas categorias de uso e limites de velocidades expostos no quadro 6. No entanto, este critério considera a influência da turbulência atmosférica. Segundo Isyumov e Davenport (1977, p. 409-410) a dificuldade em usar diretamente as velocidades médias determinadas pela Escala Beaufort em um ambiente urbano, é o fato de que as velocidades determinadas por esta escala referem-se a medições realizadas em terrenos abertos nos quais a intensidade de turbulência é menor do que a encontrada em ambientes urbanos. Para superar esta dificuldade definiu-se uma **velocidade efetiva de rajada**, determinada pela equação 3:

$$V_e = \bar{V} + 1,5\sigma_v \quad (\text{equação 3})$$

Onde:

$V_e$  = velocidade efetiva de rajada;

$\bar{V}$  = velocidade média do vento;

$\sigma_v$  = desvio-padrão da velocidade.

Nesta equação o valor 1,5 representa o fator de pico estatístico para cálculo do **fator de rajada**. Este valor foi escolhido a partir dos dados de velocidade do vento compilados por Durst<sup>12</sup>. O desvio-padrão representa as flutuações em torno do valor médio da velocidade do vento (figura 16). Estas flutuações caracterizam a turbulência do escoamento causada pelas rajadas de vento.

---

<sup>12</sup> DURST, C. S. Wind speeds over Short Periods of Time. *Meteorological Magazine*, London/UK, v. 89, n. 1056, p. 181-?, July 1960.

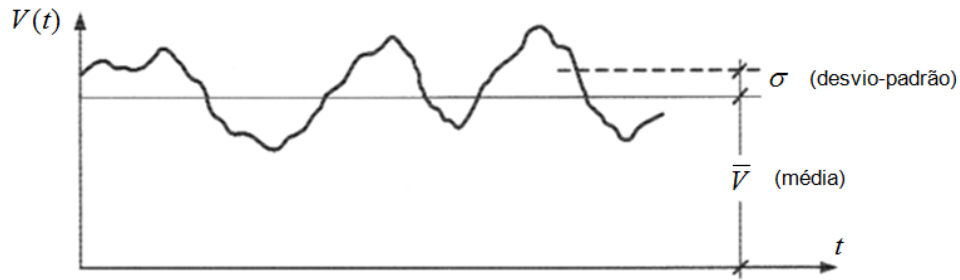


Figura 16: velocidade média e desvio-padrão  
(adaptada de BLESSMANN, 1998, p. 45)

Isyumov e Davenport (1977, p. 410) denominam o desvio-padrão como valor rms. No entanto, de acordo com Blessmann (1998, p. 44-45), o valor rms (*root mean square value*) é a raiz quadrada positiva do valor quadrado médio das velocidades registradas no intervalo de tempo (equação 4). Portanto, o valor rms só é igual ao desvio-padrão se o valor médio for igual a zero.

$$x_{rms} = \sqrt{\overline{x^2}} = \sqrt{\overline{(x)}^2 + \sigma^2} \quad (\text{equação 4})$$

A razão entre a velocidade medida, durante ensaio em túnel de vento, em cada local e velocidade gradiente é denominada **velocidade normalizada**. Isyumov e Davenport utilizam a velocidade média normalizada (equação 5) e a velocidade efetiva de rajada normalizada (equação 6) para cada ângulo de incidência do vento (ISYUMOV, 1978, p. 191):

$$\bar{\eta}(a) = \frac{\bar{V}(a)}{\bar{V}_g(a)} \quad (\text{equação 5})$$

$$\hat{\eta}(a) = \frac{\bar{V}(a) + 1,5\sigma_v(a)}{\bar{V}_g(a)} \quad (\text{equação 6})$$

Onde:

$\bar{\eta}(a)$  = coeficiente de velocidade média para direção do vento  $a$ ;

$\hat{\eta}(a)$  = coeficiente de velocidade efetiva de rajada para direção do vento  $a$ ;

$\bar{V}_g(a)$  = velocidade média na altura gradiente para direção do vento  $a$ .

Os valores obtidos destes velocidades normalizadas fornecem estimativas diretas das velocidades do vento, em escala real, para os locais medidos. Consequentemente pode-se obter a probabilidade de exceder um valor de velocidade média, independente do ângulo de incidência do vento. A equação 7 mostra a função da distribuição de probabilidades de Weibull para a o cálculo da probabilidade da velocidade  $\bar{V}_1$  ser excedida para qualquer incidência do vento (ISYUMOV, 1978, p. 194):

$$P(\bar{V} > \bar{V}_1) = \sum_{a=1}^{36} A(a) \exp - \left[ \frac{\bar{V}_1}{\bar{\eta}(a)C(a)} \right]^{K(a)} \quad (\text{equação 7})$$

Onde:

$P(\bar{V} > \bar{V}_1)$  = probabilidade de exceder a velocidade  $\bar{V}_1$  (baseada na distribuição de Weibull).

$A(a)$  = frequência relativa de ocorrência de velocidade por setor de azimute  $a + \frac{\Delta a}{2}$ ;

$C(a)$  = parâmetro da distribuição de probabilidades de Weibull;

$K(a)$  = parâmetro da distribuição de probabilidades de Weibull,  $K \approx 1,5$ .

Segundo Isyumov e Davenport (1977, p. 414), velocidades médias horárias apresentam interdependência devido ao caráter sinóptico das flutuações. Como resultado disto, é interessante saber a porcentagem de tempo que determinada velocidade do vento é excedida e também o número de ocasiões em que isto ocorre. Ou seja, a quantidade de tempestades por período de tempo. É possível determinar esta relação a partir da equação 8.



$$N_v = \sqrt{2\pi}vT\left(\Gamma\left(1 + \frac{2}{K}\right) - \Gamma^2\left(1 + \frac{1}{K}\right)\right)^{1/2} K(-\ln(P > V))^{\frac{K-1}{K}} P(> V) \quad (\text{equação 8})$$

Onde:

$N_v$  = número de tempestades em um período de tempo;

$v$  = frequência estatística da velocidade do vento;

$vT$  = número independente de eventos por ano,  $vT \approx 960$ ;

$\Gamma$  = função Gamma;

$K$  = parâmetro da distribuição de probabilidades de Weibull,  $K \approx 1,5$ ;

$P(> V)$  = probabilidade de exceder a velocidade  $V$  (baseada na distribuição de Weibull).

De acordo com a equação 8, as magnitudes das tempestades com frequência 1/ano, 1/mês, 1/semana correspondem a velocidades do vento para as quais  $P(>V)$  é igual a 0,01; 0,3 e 1,5 por cento, respectivamente. Isyumov (1978, p. 194) expõe que avaliar as condições de conforto para uma determinada área com base em previsão estatística das velocidades do vento oferece vantagens. A avaliação feita baseada somente nas máximas velocidades medidas em túnel de vento é considerada conservadora pelo autor.

#### 5.4 CRITÉRIO DE LAWSON E PENWARDEN

O critério de Lawson e Penwarden foi elaborado na Universidade de Bristol, Inglaterra. Bem como Penwarden e Wise e Davenport, os autores basearam-se nos efeitos descritos pela Escala Beaufort (quadro 4) para velocidades médias do vento. O critério de Lawson e Penwarden considera também a turbulência do escoamento, pois seu critério avalia tanto a velocidade média sobre 15 minutos quanto à velocidade média sobre três segundos (rajada de vento) (LAWSON; PENWARDEN, 1977, p. 612-613).

Os ensaios em túnel de vento realizados para elaboração do critério mediram a velocidade média do vento sobre três segundos e sobre 15 minutos para 12 ângulos de incidência do vento, em intervalos de 30°, em diversos locais no entorno de edifícios. Estas velocidades são apresentadas como porcentagens da velocidade média horária medida no topo do edifício em

estudo (velocidade de referência), como mostrado na figura 17 (LAWSON; PENWARDEN, 1977, p. 614-615).

Intervalo de tempo		Local	Ângulos de incidência do vento											
min	seg		0°	30°	60°	90°	120°	150°	180°	210°	240°	270°	300°	330°
	3	1	66	55	48	81	68	78	93	73	33	48	60	29
15			21	20	14	23	18	18	37	32	10	13	24	8
	3	2	89	95	80	113	86	79	85	64	49	82	96	73
15			32	39	28	38	36	32	32	19	12	28	36	27
	3	3	80	68	71	53	75	71	73	65	38	61	60	70
15			28	27	24	20	31	23	39	27	12	24	17	23
	3	4	132	132	98	70	98	101	117	97	44	62	71	125
15			81	71	41	30	54	54	60	37	9	21	32	64
	3	5	108	86	60	71	77	80	101	66	53	82	83	79
15			35	30	19	28	41	41	44	31	13	28	30	24
	3	6	99	97	66	86	109	103	80	53	54	66	96	88
15			39	32	20	40	59	47	39	12	12	27	38	35
	3	7	100	75	81	70	74	78	61	52	47	81	78	66
15			28	23	18	33	31	31	21	18	11	27	25	18
	3	8	108	103	73	94	85	50	86	93	62	67	56	64
15			40	42	26	40	36	17	22	41	16	21	22	20
	3	9	72	67	41	85	82	76	97	77	41	58	57	48
15			26	21	15	28	30	29	44	44	14	27	24	13
	3	10	35	66	97	89	58	58	76	94	43	49	46	25
15			14	26	33	27	17	18	35	49	16	19	14	7

Figura 17: velocidades médias representadas como porcentagens da velocidade de referência (adaptada de LAWSON; PENWARDEN, 1977, p. 615)

Lawson e Penwarden (1977, p. 615-616) calcularam a frequência de ocorrência de velocidades médias horárias para cada ângulo de incidência do vento baseados em dados obtidos em estações meteorológicas para cada mês e para o ano como um todo. Estas estações fornecem tabelas (figura 18) com a porcentagem de horas que intervalos de velocidades do vento ocorrem.

Velocidade média do vento		Porcentagem de horas com ventos de												Todas as direções
Nós	m/h	350°	20°	50°	80°	110°	140°	170°	200°	230°	260°	290°	320°	
		10°	40°	70°	100°	130°	160°	190°	220°	250°	280°	310°	340°	Total
		ANUAL												
Calmo														2,7
1-3	1-3													24,6
4-6	4-7	0,7	1,0	1,3	1,8	1,8	0,9	0,6	1,2	4,3	4,6	1,7	0,9	20,8
7-10	8-12	0,8	1,1	1,5	2,4	1,9	1,0	0,8	1,8	5,1	4,5	1,9	0,9	23,7
11-16	13-18	0,5	0,9	1,3	1,5	1,1	0,9	0,6	1,6	4,7	3,8	1,5	0,8	19,2
17-21	19-24	0,1	0,1	0,4	0,3	0,3	0,3	0,2	0,6	1,8	1,5	0,5	0,2	6,3
22-27	25-31	0+	0+	0,1	0,1	0,2	0,1	0+	0,2	0,7	0,5	0,2	0+	2,1
28-33	32-28	0+	0+	0+	0+	0,1	0+	0+	0+	0,2	0,1	0+	0+	0,4
34-40	39-46			0+	0+	0+	0+		0+	0+	0+	0+	0+	0+
41-47	47-54													
48-55	55-63													
56-63	64-72													
>63	>72													
<b>TOTAL</b>		2,1	3,1	4,6	6,1	5,4	3,2	2,2	5,4	16,8	15,0	5,8	2,8	99,8
		Porcentagem de horas perdidas												0,2

Figura 18: frequências percentuais de vento  
(adaptada de LAWSON; PENWARDEN, 1977, p. 615)

Uma vez que a frequência de ocorrência da velocidade de referência é conhecida em magnitude e direção, é possível calcular por quantas horas um local no entorno de um edifício (onde foram medidas velocidades do vento) é considerado em cada uma das divisões da Escala Beaufort para cada intervalo de tempo (três segundos e 15 minutos) de cálculo da velocidade média. O cálculo é feito para cada mês e para o ano como um todo (EVERETT; LAWSON, 1978, p. 221). Estes dados são apresentados na figura 19 para um mês.

Mês	10									
Local	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8	B9	B10	
40	282,6	153	66,3	17,2	3,9	0,3	0	0	0	
40	334,4	94,6	65,8	21,4	6,5	0,8	0	0	0	
41	297,5	140,8	69,3	13,1	2,4	0,3	0	0	0	
41	330,5	103,2	72,1	12,9	3,5	1	0,3	0	0	
42	247,7	164,3	83,6	21,9	5,2	0,7	0	0	0	
42	269,9	119	80,2	38,8	12,7	2,6	0,1	0	0	
43	204,8	154,9	110,1	38,6	11,9	2,9	0,3	0	0	
43	186,7	126,4	106,5	65,8	25,3	7,1	2,5	0,4	0,1	
44	288	131,4	64,1	32,4	6,4	0,7	0,4	0,1	0	
44	327	101,4	49,4	32,9	9,8	2,3	0,5	0,2	0	
45	300,9	142,9	69,9	8,7	1,1	0	0	0	0	
45	354	125,9	39,2	3,7	0,6	0	0	0	0	

Figura 19: horas de velocidade do vento por categoria da Escala Beaufort  
(adaptada de LAWSON; PENWARDEN, 1977, p. 616)

Os valores de velocidade do vento que definem cada divisão da Escala Beaufort mudam de acordo com o intervalo de tempo para cálculo da média do registro da velocidade. Os pesquisadores da Universidade de Bristol definiram os limites da Escala Beaufort adotando velocidade constante para qualquer intervalo de tempo entre dez minutos e uma hora. Para intervalos de tempo mais curtos os limites são definidos por variação logarítmica sugerida pela ESDU<sup>13</sup> para intensidade de turbulência de 28% (LAWSON; PENWARDEN, 1977, p. 613). A figura 20 mostra o gráfico utilizado na pelos pesquisadores.

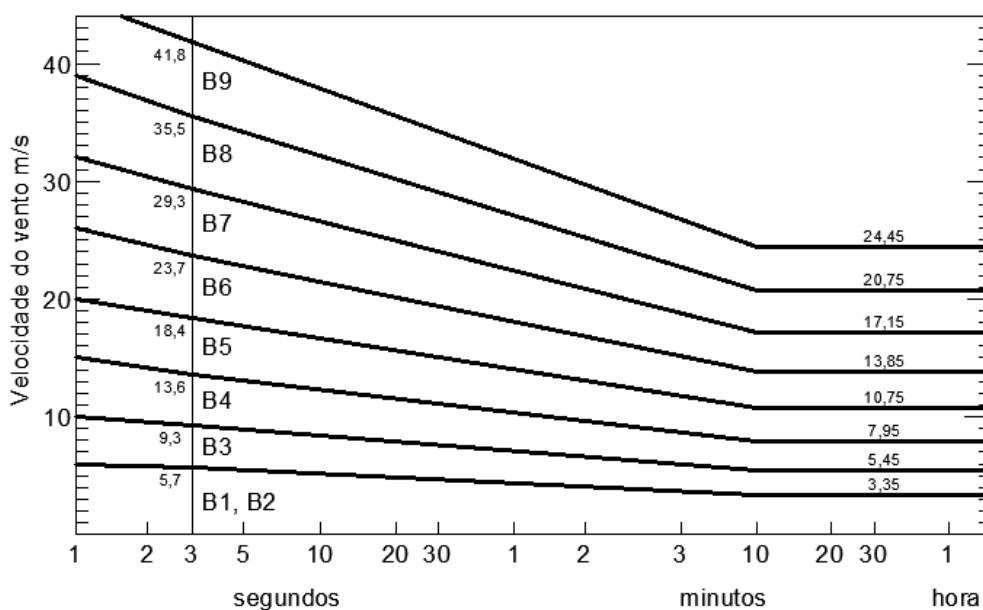


Figura 20: variação da velocidade do vento com o intervalo de tempo para cálculo (adaptada de LAWSON; PENWARDEN, 1977, p. 613)

Lawson e Penwarden (1977, p. 612) atribuem quatro termos subjetivos para definir a adequação de uma área ao conforto humano quanto à velocidade do vento:

- a) **inaceitável**: condições do vento que não serão toleradas normalmente;
- b) **tolerável**: condições do vento causam desconforto. Neste caso, pode-se tentar amenizar as velocidades do vento ou aceitar a ocorrência eventual de desconforto;
- c) **aceitável**;
- d) **ao ar livre**: condição do vento que ocorreria se não houvesse o empreendimento e em seu lugar houvesse uma área aberta.

<sup>13</sup> ENGINEERING SCIENCES DATA UNIT. Characteristics of Wind Speed in the Lower Layers of the Atmosphere near the Ground: Strong Winds (Neutral Atmosphere). ESDU Data Item 72026. Londres/UK. Dec. 1972.

De acordo com o local e os tipos de atividades que podem ser desenvolvidas no mesmo, Lawson e Penwarden determinam se a velocidade do vento e a frequência de ocorrência desta são inaceitáveis ou toleráveis (EVERETT; LAWSON, 1978, p. 221-222). O quadro 7 apresenta o critério de Lawson e Penwarden.

LOCAL	INACEITÁVEL	TOLERÁVEL	SÍMBOLO
Ruas, estacionamentos	4% > B6	2% > B5	Fe
Pessoas trabalhando no entorno de edifícios	4% > B6	4% > B4	FD
Áreas onde pedestres caminham rapidamente	2% > B5	4% > B4	eD
Áreas onde pedestres permanecem sentados	4% > B4	4% > B3	DC
Áreas de acesso de edifícios	4% > B4	3% > B3	Dc
Áreas cobertas	4% > B4	3% > B3	Dc

Quadro 7: critério de Lawson e Penwarden  
(adaptado de EVERETT; LAWSON, 1978, p. 221-222)

Conforme Everett e Lawson (1978, p. 222) na segunda e terceira colunas são sugeridos valores de velocidade do vento (expressos como valores máximos da Escala Beaufort – figura 20), que constituem os limites de cada termo subjetivo para cada local. Os valores de frequência de ocorrência das velocidades sugeridos foram escolhidos com base em diversos ensaios em túnel de vento. Na quarta coluna são apresentados símbolos que seguem a convenção adotada por Lawson e Penwarden. A convenção é apresentada no quadro 8.

ESCALA BEAUFORT	FREQUÊNCIA DE OCORRÊNCIA	SÍMBOLO	ESCALA BEAUFORT	FREQUÊNCIA DE OCORRÊNCIA	SÍMBOLO
1	6%	A	4	4%	D
	4%	a		3%	d
2	8%	B	5	6%	E
	4%	b		2%	e
3	4%	C	6	4%	F
	3%	c		2%	f

Quadro 8: convenção de símbolos adotada pelo critério de Lawson e Penwarden  
(baseado em EVERETT; LAWSON, 1978, p. 223)

Aplicando a convenção às tabelas contendo horas de velocidade do vento por categoria da Escala Beaufort para cada mês (figura 19) e para o ano, obtêm-se uma tabela (figura 21) sobre a qual devem ser avaliadas as condições de conforto e segurança de pessoas frente à ação do vento.

CRITÉRIO	LOCAL	ANO		MESES																								
				JAN.		FEV.		MAR.		ABR.		MAIO		JUN.		JUL.		AGO.		SET.		OUT.		NOV.		DEZ.		
		3s	15m	3s	15m	3s	15m	3s	15m	3s	15m	3s	15m	3s	15m	3s	15m	3s	15m	3s	15m	3s	15m	3s	15m	3s	15m	
eD	40	D	D	D	e	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	
DC	41	C	B	C	B	C	B	C	B	C	B	C	B	C	B	C	B	C	B	C	B	C	B	C	B	C	B	
DC	42	C	C	C	C	C	C	C	C	C	B	b	c	B	B	B	C	B	C	c	C	B	C	C	C	C	C	
FD	43	d	C	D	C	D	C	D	C	D	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	d	C	d	C
FD	44	D	C	D	C	D	C	D	C	D	C	D	C	C	C	C	C	C	D	C	C	C	C	D	C	C	D	C
Fe	45	f	f	F	F	F	f	f	f	F	e	e	e	f	e	e	E	f	E	f	E	f	f	f	f	f	F	
Fe	46	E	E	f	f	f	f	E	f	f	e	e	e	e	e	e	e	E	E	e	e	E	E	f	f	f	f	
FD	47	D	C	e	d	D	C	D	C	C	B	d	C	C	C	d	C	D	C	d	C	D	C	D	C	D	C	
FD	48	D	C	e	d	e	D	D	C	D	C	C	C	D	C	d	C	D	C	D	C	D	C	D	C	D	C	
FD	49	B	A	B	A	B	b	B	A	B	A	B	A	b	A	b	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B	A	
FD	50	C	E	C	B	C	B	C	B	C	B	C	B	C	b	C	b	C	B	C	B	C	b	C	B	C	B	

Figura 21: tabela para avaliação das condições de conforto e segurança segundo o critério de Lawson e Penwarden (adaptada de EVERETT; LAWSON, 1978, p. 224)

Nas colunas da esquerda está indicado o local de medição da velocidade e a sua classificação (quadro 6). As letras indicadas na coluna denominada **Critério** indicam os valores máximos de frequência de ocorrência das velocidades médias do vento sobre três segundos e sobre 15 minutos de acordo com a convenção apresentada no quadro 7. Para o local 49, por exemplo, o critério determina limite FD e estas letras não aparecem nas colunas de cada mês. Logo, este local não apresenta condições de conforto e segurança consideradas inaceitáveis. No entanto, o local 45 tem limite definido Fe e a letra F aparece em diversos meses para os dois intervalos de tempo. Isto significa que, para estas situações, o local é considerado intolerável.

Lawson e Penwarden (1977, p. 617) explicam que para aqueles locais em que as condições não cumprem o critério, a primeira questão é ver o quanto excedem os limites impostos. Isso pode ser visto imediatamente na tabela com as horas de velocidade do vento por categoria da Escala Beaufort (como a apresentada na figura 18). Se o critério admite 4% (28,8 horas no mês) e a tabela com horas de vento mostra que a velocidade do vento limite foi excedida durante 29 horas, então, a condição do local pode ser considerada marginal.

Ratcliff e Peterka (1990, p. 795) afirmam que o critério de Lawson e Penwarden pode ser expresso em função da velocidade média e da média quadrática da velocidade para que os critérios de conforto possam ser comparados (equação 9):

$$V_{pico} = \bar{V} + 2,68\sigma_v \quad (\text{equação 9})$$

Onde:

$V_{pico}$  = velocidade de pico;

$\bar{V}$  = velocidade média do vento;

$\sigma_v$  = desvio-padrão da velocidade.

Lawson e Penwarden determinam uma **velocidade de pico** e escolhem o fator de rajada igual a 2,68 a partir dos dados compilados por Durst<sup>14</sup>. Os limites do critério estão apresentados no quadro 9. Neste quadro os valores entre parênteses correspondem a categoria da Escala Beaufort que a velocidade determinada equivale de acordo com a figura 20.

LOCAL	$\bar{V}$ (m/s)	$V_{pico}$ (m/s)	FREQUÊNCIA
Áreas cobertas	3,35 (B2)	5,7 (B2)	< 4%
Áreas onde pedestres permanecem sentados	5,45 (B3)	9,3 (B3)	< 4%
Áreas onde pedestres caminham rapidamente	7,95 (B4)	13,6 (B4)	< 4%
Inaceitável	13,85 (B6)	23,7 (B6)	> 2%
Desconfortável	Todos os outros casos		

Quadro 9: critério adaptado de Lawson e Penwarden  
(adaptado de EVERETT; LAWSON, 1978, p. 221-222)

Neste trabalho será utilizada a equação apresentada por Ratcliff e Peterka para expressar o critério de Lawson e Penwarden.

<sup>14</sup> DURST, C. S. Wind speeds over Short Periods of Time. *Meteorological Magazine*, London/UK, v. 89, n. 1056, p. 181-?, July 1960.

## 6 ESTUDOS DE CONFORTO E SEGURANÇA DE PESSOAS FRENTE À AÇÃO DO VENTO NO TÚNEL DE VENTO PROF. JOAQUIM BLESSMANN

O Laboratório de Aerodinâmica das Construções realizou diversos ensaios, em túnel de vento, de edificações reais para avaliar as condições de conforto e segurança de pessoas frente à ação do vento. Neste trabalho são utilizados resultados de medições de velocidades do vento para três casos: Brookfield Towers, E-Business Park e Leopoldo Green. Perspectivas artísticas dos empreendimentos são mostradas nas figuras 22 a 24. Detalhes dos casos estudados são apresentados no anexo A.



Figura 22: perspectivas artísticas do Empreendimento Brookfield Towers  
(trabalho não publicado)<sup>15</sup>

---

<sup>15</sup> Esta figura foi obtida no relatório de pesquisa Estudo em Túnel de Vento das Condições de Conforto de Pedestres para o Empreendimento Brookfield Towers, São Paulo - SP. Este relatório foi elaborado pelo Laboratório de Aerodinâmica das Construções da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, em dezembro de 2009. A autoria do relatório é do prof. Acir Mércio Loredo-Souza e equipe.





Figura 23: perspectiva artística do Empreendimento E-Business Park (trabalho não publicado)<sup>16</sup>



Figura 24: perspectiva artística do Empreendimento Leopoldo Green (trabalho não publicado)<sup>17</sup>

Para cada empreendimento avaliado foi construído um modelo em escala reduzida da edificação no qual foram representados todos os detalhes arquitetônicos relevantes. A vizinhança do empreendimento também foi representada no modelo (figura 25). O modelo foi construído sobre uma mesa de madeira que é fixada a mesa giratória M-II (figura 5) do túnel de vento. As velocidades do vento foram medidas para 24 ângulos de incidência do vento, em intervalos de 15°. Para os três casos estudados foi simulado um vento com perfil de

---

<sup>16</sup> Esta figura foi obtida no relatório de pesquisa Estudo em Túnel de Vento das Condições de Conforto de Pedestres para o Empreendimento E-Business Park, São Paulo-SP. Este relatório foi elaborado pelo Laboratório de Aerodinâmica das Construções da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, em agosto de 2008. A autoria do relatório é do prof. Acir Mércio Loredo-Souza e equipe.

<sup>17</sup> Esta figura foi obtida no relatório de pesquisa Estudo em Túnel de Vento das Condições de Conforto de Pedestres para o Empreendimento YUNY Leopoldo Green, São Paulo-SP. Este relatório foi elaborado pelo Laboratório de Aerodinâmica das Construções da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, em março de 2009. A autoria do relatório é do prof. Acir Mércio Loredo-Souza e equipe.

velocidades médias de expoente  $p=0,23$ , que corresponde a terrenos com rugosidades entre as categorias III e IV da NBR 6.123 (quadro 3).



Figura 25: fotos dos modelos dos empreendimentos Brookfield Towers, E-Business Park e Leopoldo Green no interior do túnel de vento

O entorno de cada edificação foi instrumentado com sensores omnidirecionais (sondas tipo Irwin) para medições de velocidades do vento. Segundo Irwin (1981, p. 221) o sensor consiste em um orifício de diâmetro  $D$  na superfície da mesa do modelo do centro do qual se projeta um tubo de diâmetro externo  $d$  (um pouco menor que  $D$ ). O tubo se projeta a uma altura  $h$  acima da superfície da mesa do modelo. A figura 26 mostra a geometria do sensor.

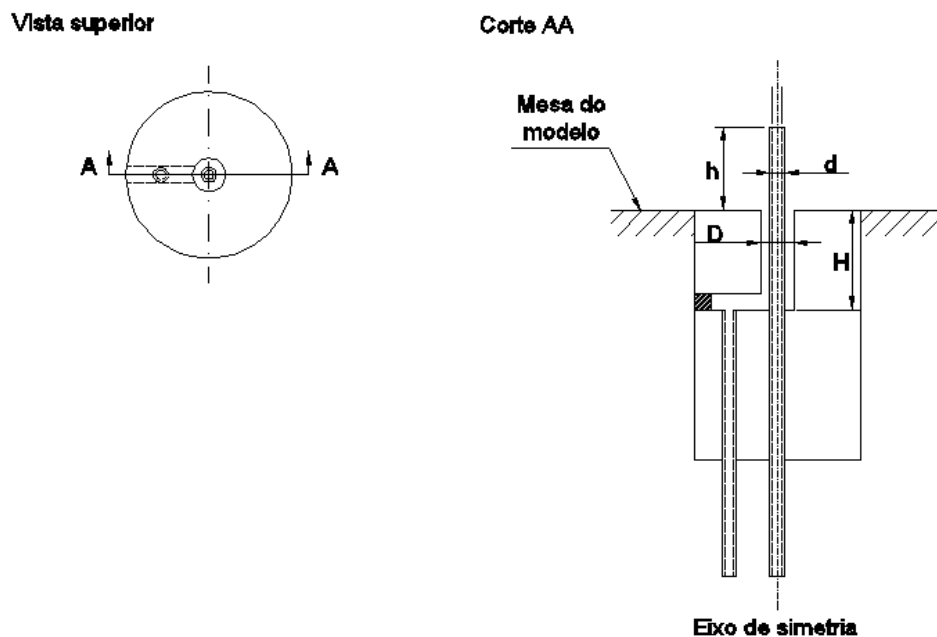


Figura 26: geometria do sensor omnidirecional tipo Irwin (adaptada de IRWIN, 1981, p. 220)

As sondas Irwin medem pressões na altura do pedestre (h) e ao nível do solo. A diferença de pressão ( $\Delta p$ ) é calculada pela equação 10:

$$\Delta p = p_h - p_s \quad (\text{equação 10})$$

Onde:

$\Delta p$  = diferença de pressão (mm H<sub>2</sub>O);

$p_h$  = pressão medida na altura do pedestre (mm H<sub>2</sub>O);

$p_s$  = pressão medida ao nível do solo (mm H<sub>2</sub>O).

Para transformar os valores de diferença de pressão em valores de velocidade é necessário usar as curvas de calibração das sondas. A calibração é feita em túnel de vento colocando-se as sondas em uma superfície plana que é fixada a mesa M-II do túnel de vento. É instalada uma sonda de fio-quente para medir a componente horizontal da velocidade do vento na altura do pedestre, ou seja, alinhada com o topo do tubo da sonda Irwin na altura h (figura 27). Logo, é possível estabelecer uma relação entre a diferença de pressão medida pela sonda Irwin e a velocidade do vento medida pela sonda de fio-quente. Assim cada sonda Irwin tem uma equação de calibração como a apresentada na equação 11. A sonda de fio-quente mede a velocidade média e a velocidade flutuante do vento, no entanto, os resultados utilizados neste trabalho foram obtidos com sondas Irwin calibradas apenas para a velocidade média do vento.



Figura 27: mesa de calibração das sondas Irwin

$$V = a(\Delta p)^b \quad (\text{equação 11})$$

Onde:

$V$  = velocidade, em m/s;

$\Delta p$  = diferença de pressão, em mmH<sub>2</sub>O;

a, b= coeficientes oriundos da calibração das sondas.

Então, para cada uma das sondas Irwin instaladas no entorno do modelo do edifício há um valor de velocidade do vento por ângulo de incidência do vento. Estas velocidades são divididas pela velocidade de referência, em cada direção do vento, fornecendo coeficientes de velocidade. A velocidade de referência é, em geral, a velocidade medida no topo do modelo da edificação em estudo. Os coeficientes de velocidade podem ser apresentados na forma de gráficos polares como os mostrados na figura 28.

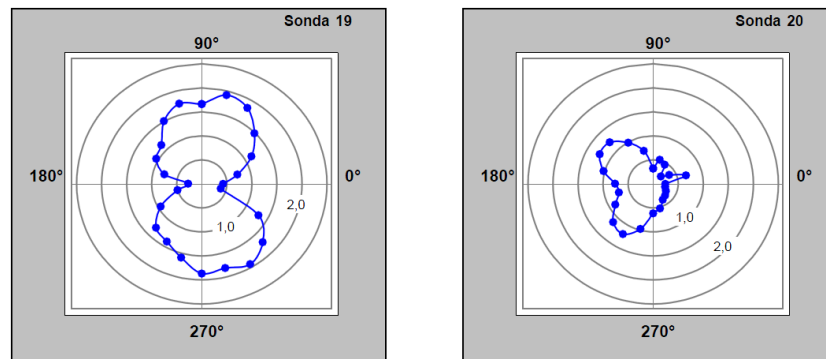


Figura 28: distribuição dos coeficientes de velocidade em função do ângulo de incidência do vento

Os valores apresentados nestes gráficos indicam a relação entre a velocidade ao nível do pedestre e a velocidade de referência para a edificação em escala real. Isto é, para o ângulo de incidência de 270°, a sonda 19 (figura 28-esquerda) mostra que a velocidade ao nível do pedestre é aproximadamente o dobro da velocidade no topo da edificação (velocidade de referência). A sonda 20 (figura 28-direita) indica que, para o mesmo ângulo de incidência, a velocidade ao nível do pedestre é a metade da velocidade no topo da edificação.

Os critérios de conforto e segurança de pessoas frente à ação do vento são aplicados às velocidades do vento em escala real. A velocidade do vento usada como referência para recomposição dos valores da velocidade ao nível dos pedestres (2m), em escala real, é a velocidade média do vento correspondente, geralmente, ao topo do edifício. É possível utilizar os valores determinados pela NBR 6.123 se não houver medições específicas de velocidades do vento para o local em estudo. A velocidade básica do vento ( $V_0$ ) indicada pela norma corresponde à velocidade de uma rajada de três segundos medida a 10m acima do terreno, em campo aberto e plano, com período de recorrência de 50 anos (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1988, p. 6). A probabilidade de que a velocidade básica do vento seja igualada ou excedida neste período é de 63%. Para outros períodos de recorrência e probabilidades, a norma recomenda o uso do fator estatístico  $S_3$  como indicado na equação 12:

$$V_0^+ = S_3 V_0 \quad (\text{equação 12})$$

Onde:

$V_0^+$  = velocidade do vento que tem probabilidade  $P_m$  de ser excedida pelo menos uma vez em um período de  $m$  anos, em m/s;

$S_3$  = fator estatístico;

$V_0$  = velocidade básica do vento, em m/s.

A equação 13 calcula o fator  $S_3$ :

$$S_3 = 0,54 \left[ -\frac{\ln(1 - P_m)}{m} \right]^{-0,157} \quad (\text{equação 13})$$

## 7 COMPARAÇÃO DOS CRITÉRIOS DE CONFORTO E SEGURANÇA DE PESSOAS FRENTE À AÇÃO DO VENTO

A avaliação dos critérios utilizados para determinar as condições de conforto e segurança de pessoas frente à ação do vento (capítulo 5) foi realizada através da comparação dos resultados obtidos para os casos estudados apresentados no capítulo 6. Para possibilitar a comparação consideraram-se três condições de conforto: **perigoso**, **desconfortável** e **aceitável**. O quadro 10 apresenta a relação entre os termos adotados pelos quatro critérios avaliados.

DESCRIÇÃO	CRITÉRIO			
	Penwarden e Wise	Davenport	Isyumov e Davenport	Lawson e Penwarden
<b>Perigoso</b>	Inaceitável	Perigoso	Perigoso	Inaceitável
<b>Desconfortável</b>	Desconfortável	Desconfortável	Desconfortável	Desconfortável
<b>Aceitável</b>	Desagradável	Tolerável	Tolerável	Aceitável
	Aceitável	Confortável	Confortável	

Quadro 10: descrições de conforto adotadas para comparação dos critérios

No anexo B encontram-se os resultados obtidos para os critérios de Penwarden e Wise, Davenport, Isyumov e Davenport e Lawson e Penwarden para cada caso estudado. Foram realizadas medições de velocidade do vento ao nível do pedestre em 151 pontos no entorno das edificações ensaiadas em túnel de vento. As figuras 29 a 31 mostram os resultados compilados para os períodos de retorno de um ano, um mês e uma semana.

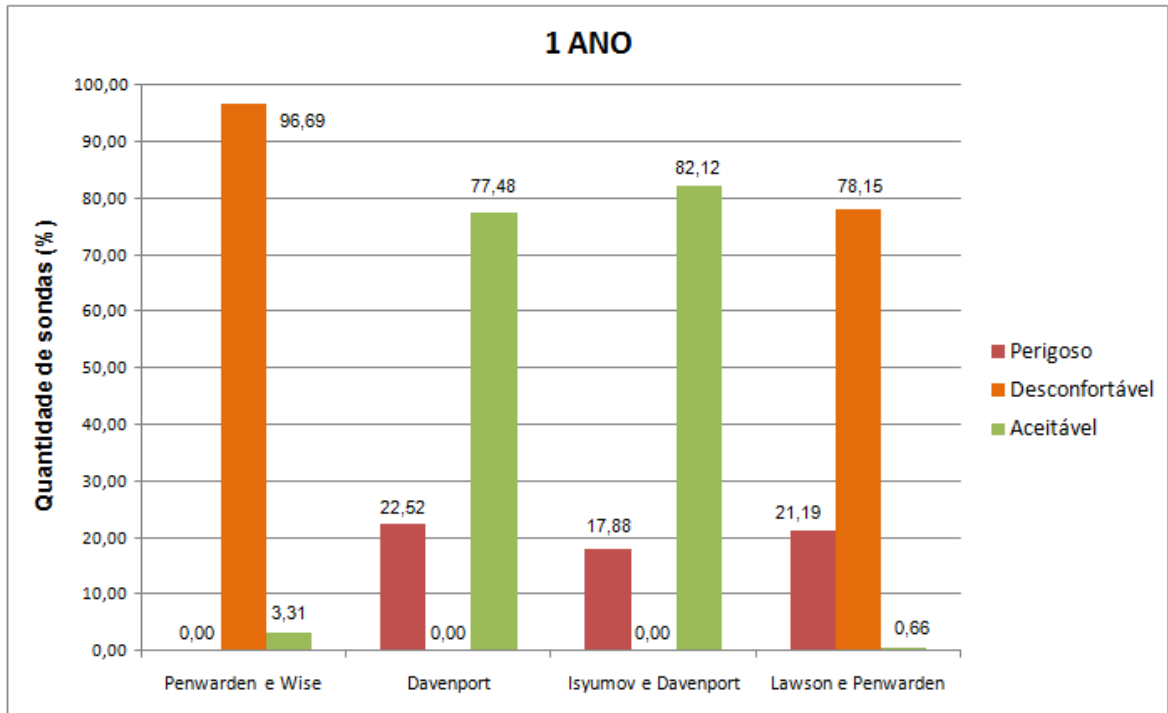


Figura 29: resultados obtidos para o período de retorno de um ano

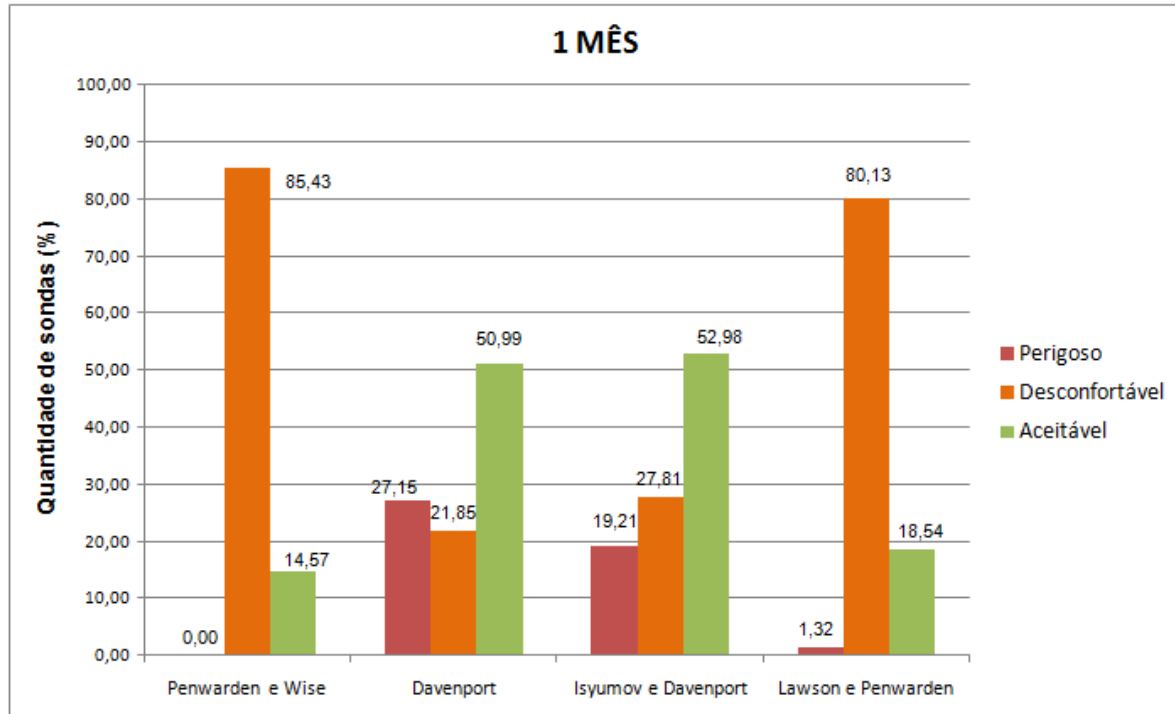


Figura 30: resultados obtidos para o período de retorno de um mês

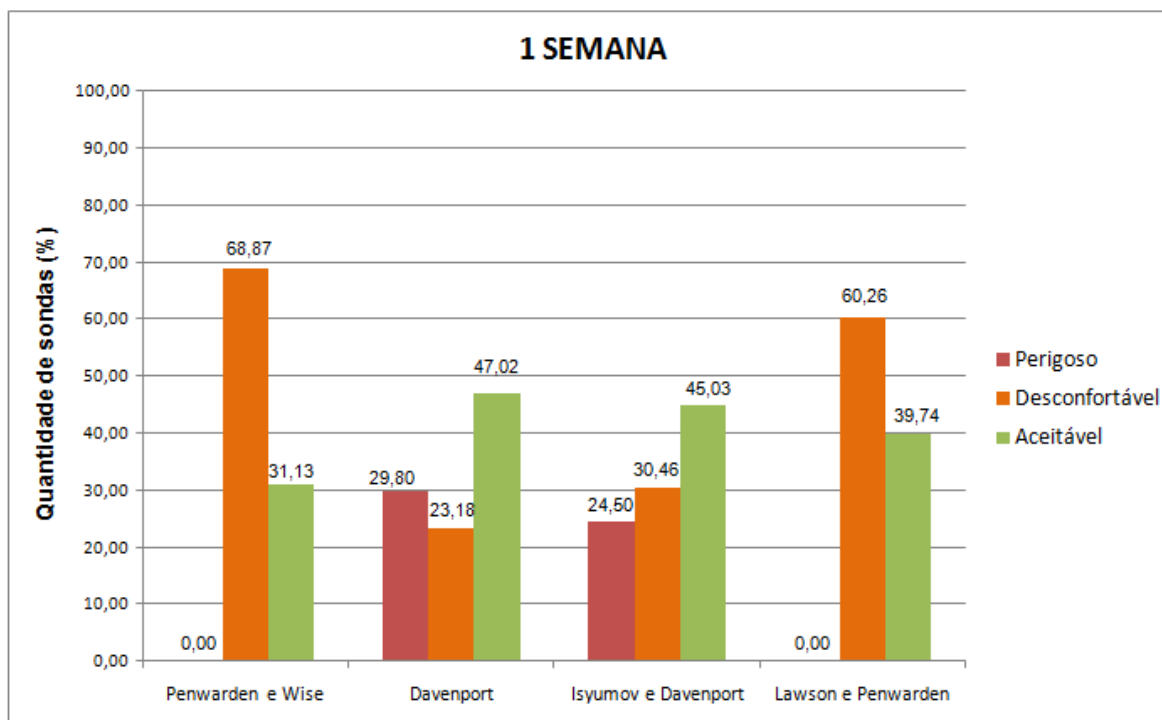


Figura 31: resultados obtidos para o período de retorno de uma semana

Analisando as figuras 29 a 31 observar-se que:

- a) o critério de Penwarden e Wise e o critério de Davenport, embora considerem apenas a velocidade média horária do vento, apresentam resultados divergentes para os três períodos de retorno considerados;
- b) os resultados obtidos para o critério de Isyumov e Davenport e para o critério de Lawson e Penwarden, critérios que consideram a influência das flutuações de velocidade, estão em desacordo para os três períodos de retorno;
- c) o critério de Penwarden e Wise e o critério de Lawson e Penwarden apresentam resultados semelhantes para os períodos de retorno de um mês e uma semana. Para o período de retorno de um ano os resultados obtidos para os dois critérios são distintos;
- d) o critério de Davenport e o critério de Isyumov e Davenport apresentam resultados semelhantes para os três períodos de retorno.



## 8 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Em setembro de 2000 foi montado um grupo de estudos (*COST Action 14/ WG 1 – Impact of Wind Storm on City Life and Built Environment / Assesment and Evaluation of pedestrian Wind Comfort*) que busca discutir a introdução de um método mais geral e de um critério único para determinar as condições de conforto e segurança de pessoas frente à ação do vento. O objetivo do grupo é no futuro formular uma norma unificada de boas práticas a nível europeu.

Em trabalho apresentado por Koss (2006, p. 796) as conclusões do grupo *COST Action 14/ WG 1* são apresentadas baseadas na comparação teórica de diversos critérios de conforto e segurança de pessoas frente à ação do vento e na comparação da aplicação dos critérios aos resultados obtidos em testes em túnel de vento do modelo reduzido da Corte de Justiça da Comunidade Européia localizada em Luxemburgo. O grupo concluiu que a norma de boas práticas deve apresentar indicações baseadas em um critério único que considera velocidade média horária do vento. Um critério baseado neste parâmetro fornecerá resultados mais uniformes se aplicado por diferentes usuários. Além disso, é mais fácil encontrar concordância entre critérios baseados na velocidade média horária do que entre critérios que consideram a turbulência atmosférica local. Todavia, o grupo acrescenta que é desejável que no futuro se apresente um critério que considere a velocidade média horária e também a influência da turbulência atmosférica local. No entanto, a formulação deste critério exige mais pesquisas para superar as diferenças entre os critérios existentes que consideram os dois parâmetros.

A importância de considerar os efeitos da turbulência atmosférica local na formulação de critérios para determinação de condições de conforto e segurança de pessoas frente à ação do vento é apresentada por Lawson e Penwarden que observaram, através de ensaios em túnel de vento, que os efeitos mais nocivos a pedestres são causados por rajadas de vento e não por vento a velocidade constante soprando por longo período (LAWSON; PENWARDEN, 1977, p. 612-613). Melbourne e Joubert (1971, p. 106-109) comentam ainda que pessoas podem permanecer em pé sob a ação de vento soprando constantemente a altas velocidades. No entanto, é o aspecto inesperado das rajadas de vento que surpreende as pessoas e causa

acidentes. Os autores relatam que, em ocasiões diferentes, duas meninas foram derrubadas pelo vento sob ação de rajadas que passaram de 12m/s para 23m/s em dois ou três segundos. Penwarden e Wise (1975, p.40) expõem o caso de duas senhoras que faleceram devido às lesões que sofreram após serem lançadas contra a parede por vento com velocidade média de 24m/s e rajadas de 30m/s.

## REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6.123**: forças devidas ao vento em edificações. Rio de Janeiro, 1988.

BLESSMANN, J. **Aerodinâmica das Construções**. 2. ed. Porto Alegre: Sagra, 1990.

\_\_\_\_\_. **O Vento na Engenharia Estrutural**. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 1995.

\_\_\_\_\_. **Introdução ao estudo das ações dinâmicas do vento**. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 1998.

\_\_\_\_\_. **Acidentes Causados pelo Vento**. 4. ed. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 2001.

BOTTEMA, M. **Wind climate and urban geometry**. Eindhoven: Technische Universiteit Eindhoven Press, 1993.

EVERETT, T. W.; LAWSON, T. V. Presentation and discussion of results as performed at University of Bristol. **Journal of Industrial Aerodynamics**, Amsterdam, v. 3, n. 2, 3, p. 215-225, July 1978.

GANDEMER, J. Wind environment around buildings: aerodynamic concepts. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON WIND EFFECTS ON BUILDINGS AND STRUCTURES, 4., 1975, Heathrow/UK. **Proceedings...** Cambridge/UK: Cambridge University Press, 1977, p. 423-432.

IRWIN, H. P. A. H. A simple omnidirectional sensor for wind-tunnel studies of pedestrian level winds. **Journal of Industrial Aerodynamics**, Amsterdam, v. 7, p. 219-239, July 1981.

ISYUMOV, N.; DAVENPORT, A. G. The ground level wind environment in built-up areas. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON WIND EFFECTS ON BUILDINGS AND STRUCTURES, 4., 1975, Heathrow/UK. **Proceedings...** Cambridge/UK: Cambridge University Press, 1977, p. 403-422.

ISYUMOV, N. Studies of the pedestrian level wind environment at the Boundary Layer Wind Tunnel Laboratory of the University of Western Ontario. **Journal of Industrial Aerodynamics**, Amsterdam, v. 3, n. 2, 3, p. 187-200, July 1978.

KOSS, H. H. On differences and similarities of applied wind comfort criteria. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, Amsterdam, v. 94, p. 781-791, July 2006.

LAWSON, T. V.; PENWARDEN, A. D. The effects of wind on people in the vicinity of buildings. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON WIND EFFECTS ON BUILDINGS AND STRUCTURES, 4., 1975, Heathrow/UK. **Proceedings...** Cambridge/UK: Cambridge University Press, 1977, p. 605-622.

LAWSON, T. V. The wind content of the built environment. **Journal of Industrial Aerodynamics**, Amsterdam, v. 3, n. 2-3, p. 93-105, July 1978.

\_\_\_\_\_. **Wind effects on buildings**. Essex/UK: Applied Science, 1980.

LOREDO-SOUZA, A. M.; SCHETTINI, E. B. C.; PALUCH, M. J. Simulação da Camada Limite Atmosférica em Túnel de Vento. In: MÖLER, S. V.; SILVESTRINI, J. H. (Org.). **Turbulência**. Porto Alegre: ABCM, 2004, v. 4, p. 137-163.

MELBOURNE, W. H.; JOUBERT, P. N. Problems of the wind flow at the base of tall buildings. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON WIND EFFECTS ON BUILDINGS AND STRUCTURES, 3., 1971, Tokyo. **Proceedings...** Tokyo, 1971, p. 105-114.

PENWARDEN, A. D.; WISE, A. F. E. **Wind environment around buildings**. London: HSMO, 1975.

RATCLIFF, M. A.; PETERKA, J. A. Comparison of Pedestrian Wind Acceptability Criteria. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**. Amsterdam, v. 36, n. 3, p. 791-800, 1990.

SIMIU, E.; SCANLAN, R. H. **Wind effects on structures**: an introduction to wind engineering. New York/USA: John Wiley & Sons, 1978.

SOCKEL, H. Fundamentals of wind engineering. **CISM Courses and Lectures**: wind-excited vibrations. Vienna, v. 335, p. 85-160, 1994.

## **ANEXO A – Casos estudados**

## A.1 EMPREENDIMENTO BROOKFIELD TOWERS

O empreendimento Brookfield Towers será construído na cidade de São Paulo, SP. A figura A1-1 mostra a localização do empreendimento. O círculo vermelho na figura A1-1 indica a projeção da área ensaia em túnel de vento.



Figura A1-1: localização do Empreendimento Brookfield Towers e projeção da área ensaiada em túnel de vento (trabalho não publicado)<sup>18</sup>

Para este estudo foi construído um modelo em escala 1/400. O modelo foi instrumentado com 66 sensores (sondas Irwin) no entorno do edifício que mediram a velocidade do vento a uma altura equivalente a 2m em escala real. Dos 66 sensores utilizados, 30 foram posicionados no térreo do empreendimento (figura A1-2), 12 no primeiro pavimento (figura A1-3), oito no segundo pavimento (figura A1-4) e 16 no terceiro pavimento (A1-5). As velocidades foram medidas para 24 ângulos de incidência do vento, em intervalos de 15°. A referência para o ângulo de incidência do vento está apresentada na figura A1-6.

---

<sup>18</sup> Esta figura foi obtida no relatório de pesquisa Estudo em Túnel de Vento das Condições de Conforto de Pedestres para o Empreendimento Brookfield Towers, São Paulo - SP. Este relatório foi elaborado pelo Laboratório de Aerodinâmica das Construções da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, em dezembro de 2009. A autoria do relatório é do prof. Acir Mércio Loredo-Souza e equipe.

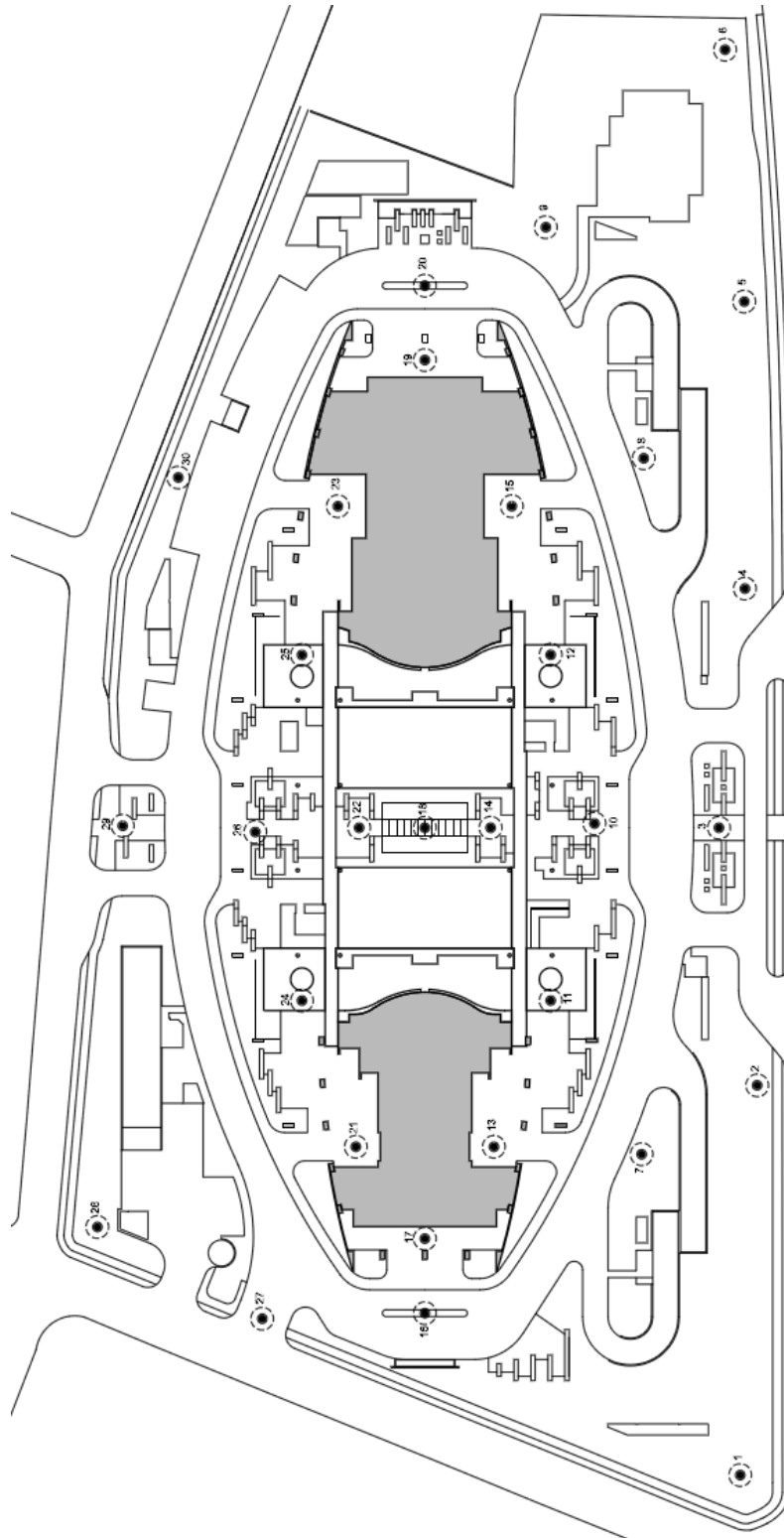


Figura A1-2: localização dos sensores de velocidade no térreo do modelo do Empreendimento Brookfield Towers (trabalho não publicado)<sup>19</sup>

<sup>19</sup> Esta figura foi obtida no relatório de pesquisa Estudo em Túnel de Vento das Condições de Conforto de Pedestres para o Empreendimento Brookfield Towers, São Paulo - SP. Este relatório foi elaborado pelo Laboratório de Aerodinâmica das Construções da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, em dezembro de 2009. A autoria do relatório é do prof. Acir Mércio Loredou-Souza e equipe.

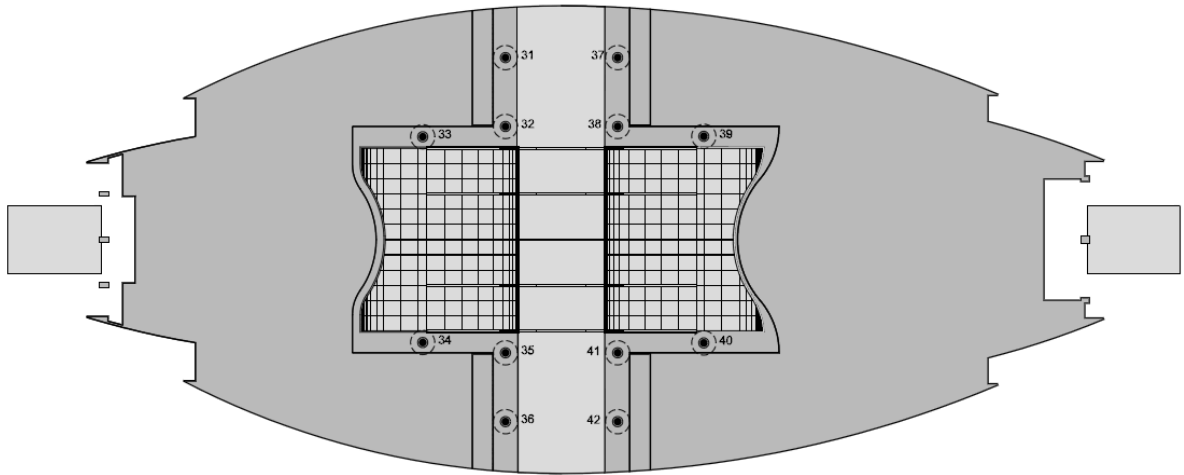


Figura A1-3: localização dos sensores de velocidade no 1º pavimento do modelo do Empreendimento Brookfield Towers (trabalho não publicado)<sup>20</sup>

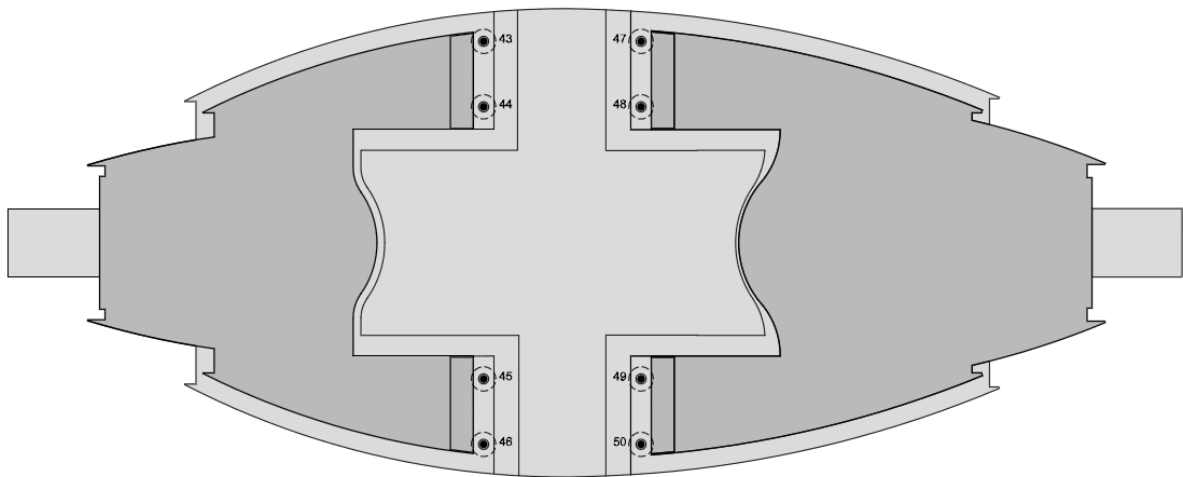


Figura A1-4: localização dos sensores de velocidade no 2º pavimento do modelo do Empreendimento Brookfield Towers (trabalho não publicado)<sup>21</sup>

<sup>20</sup> Esta figura foi obtida no relatório de pesquisa Estudo em Túnel de Vento das Condições de Conforto de Pedestres para o Empreendimento Brookfield Towers, São Paulo - SP. Este relatório foi elaborado pelo Laboratório de Aerodinâmica das Construções da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, em dezembro de 2009. A autoria do relatório é do prof. Acir Mércio Loredo-Souza e equipe.

<sup>21</sup> Idem.



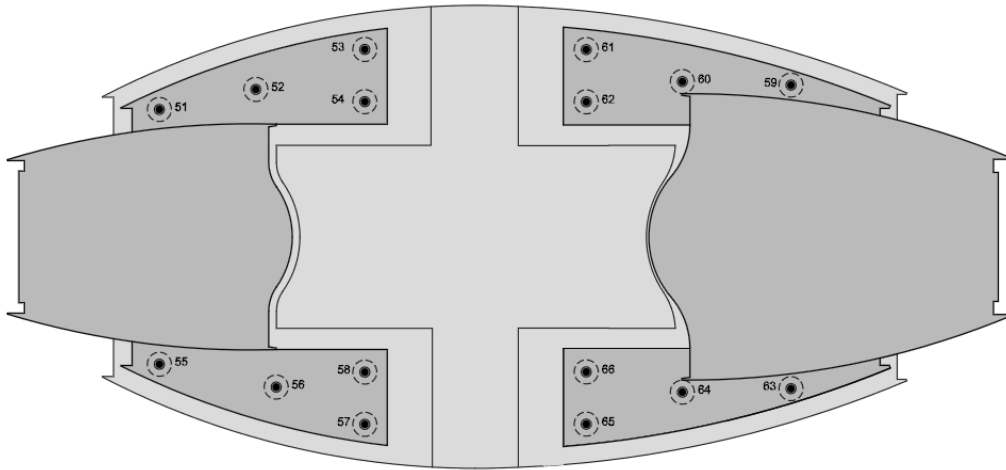


Figura A1-5: localização dos sensores de velocidade no 3º pavimento do modelo do Empreendimento Brookfield Towers (trabalho não publicado)<sup>22</sup>

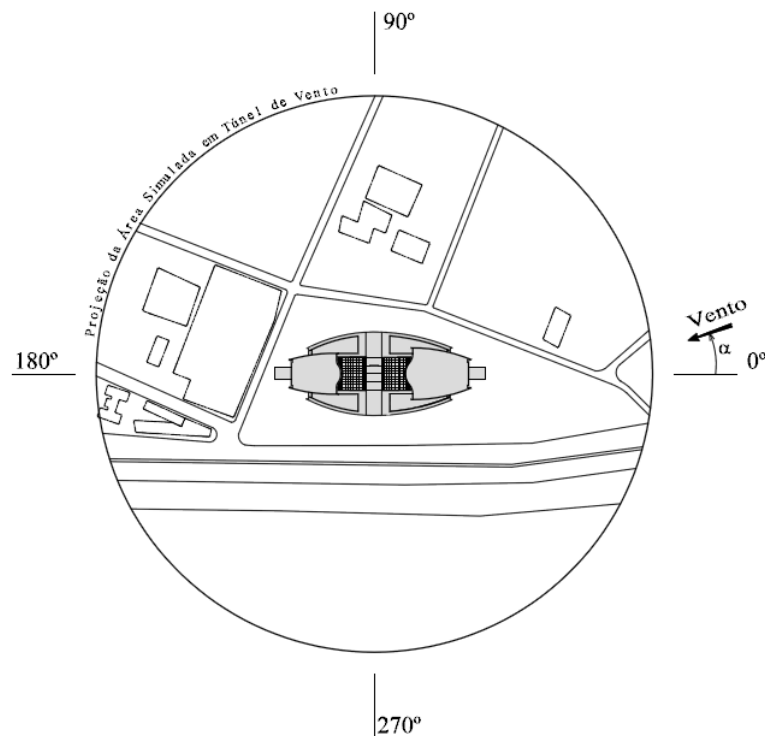


Figura A1-6: referência para o ângulo de incidência do vento para o Empreendimento Brookfield Towers (trabalho não publicado)<sup>23</sup>

<sup>22</sup> Esta figura foi obtida no relatório de pesquisa Estudo em Túnel de Vento das Condições de Conforto de Pedestres para o Empreendimento Brookfield Towers, São Paulo - SP. Este relatório foi elaborado pelo Laboratório de Aerodinâmica das Construções da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, em dezembro de 2009. A autoria do relatório é do prof. Acir Mércio Loredo-Souza e equipe.

<sup>23</sup> Idem.

## A.2 EMPREENDIMENTO E-BUSINESS PARK

O edifício E-Business Park está localizado em São Paulo, SP. A figura A2-1 mostra a localização do empreendimento. O círculo vermelho na figura indica a projeção da área ensaiada em túnel de vento.

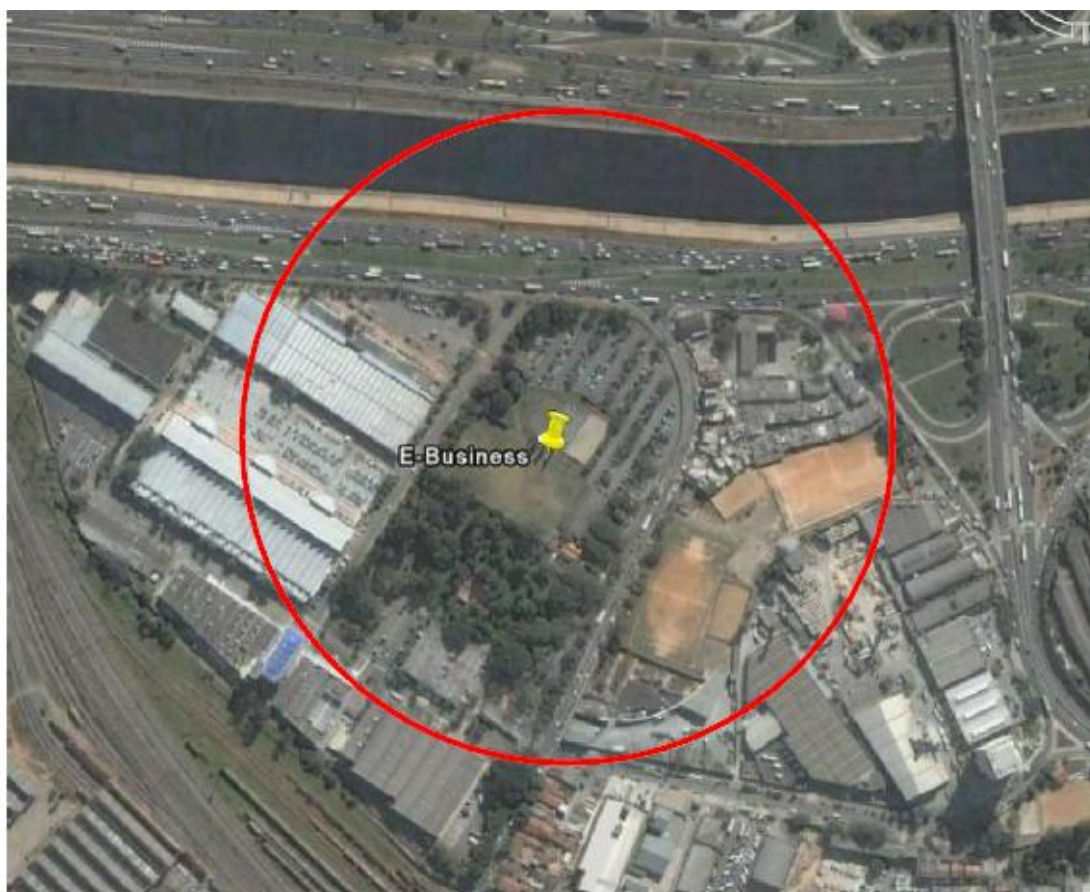


Figura A2-1: localização do Empreendimento E-Business Park e projeção da área ensaiada em túnel de vento (trabalho não publicado)<sup>24</sup>

Para este estudo foi construído um modelo em escala 1/400. O modelo foi instrumentado com 50 sensores (sondas Irwin) no entorno do edifício que mediram a velocidade do vento a uma altura equivalente a 2m em escala real. Dos 50 sensores utilizados, 26 foram posicionados no térreo do empreendimento (figura A2-2), oito no primeiro pavimento (figura A2-3) e 16 no segundo pavimento (figura A2-4). As velocidades foram medidas para 24 ângulos de

<sup>24</sup> Esta figura foi obtida no relatório de pesquisa Estudo em Túnel de Vento das Condições de Conforto de Pedestres para o Empreendimento E-Business Park, São Paulo-SP. Este relatório foi elaborado pelo Laboratório de Aerodinâmica das Construções da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, em agosto de 2008. A autoria do relatório é do prof. Acir Mércio Loredo-Souza e equipe.

incidência do vento, em intervalos de  $15^\circ$ . A referência para o ângulo de incidência do vento está apresentada na figura A2-5.

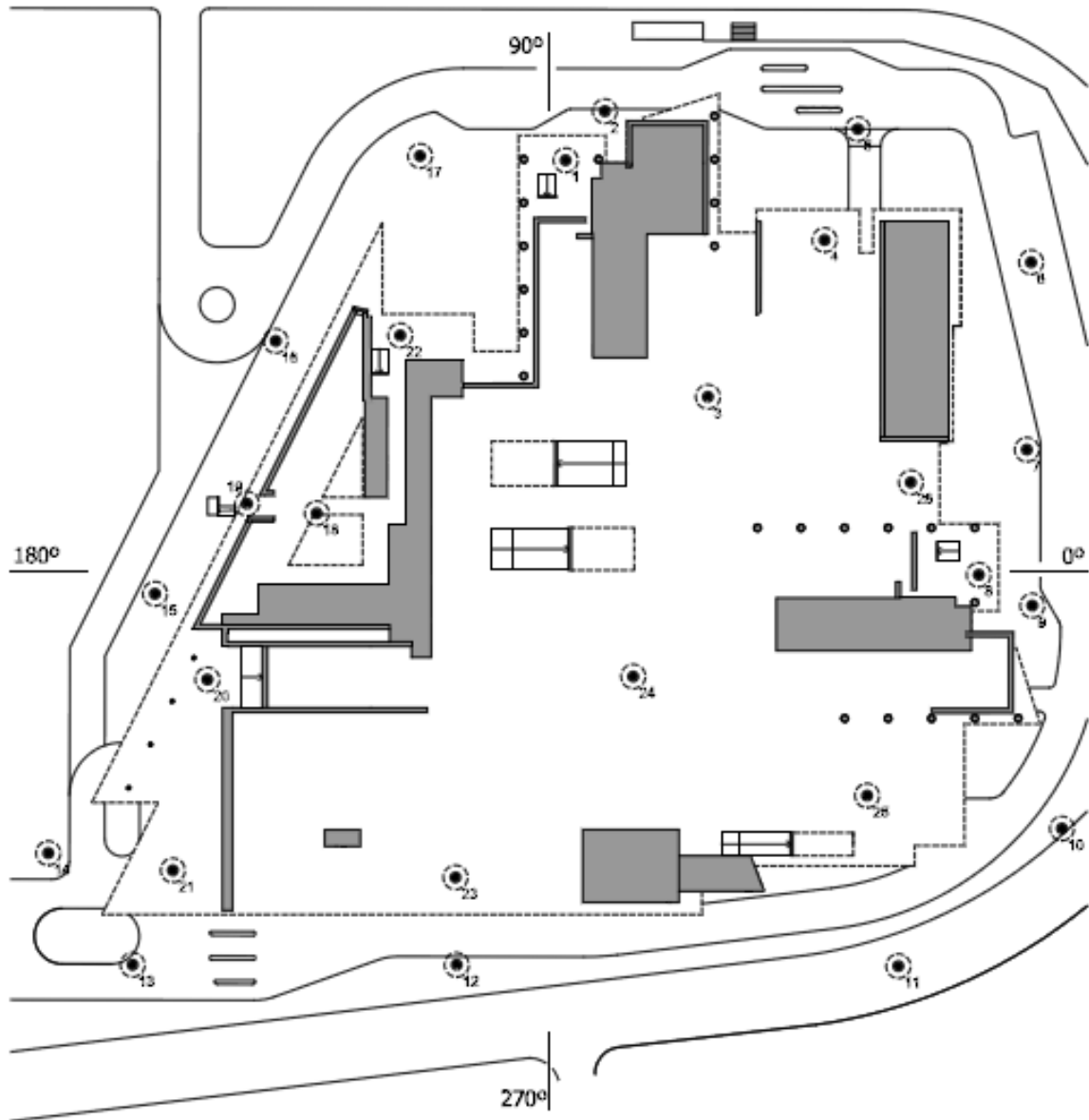


Figura A2-2: localização dos sensores de velocidade no térreo do modelo do Empreendimento E-Business Park (trabalho não publicado)<sup>25</sup>

<sup>25</sup> Esta figura foi obtida no relatório de pesquisa Estudo em Túnel de Vento das Condições de Conforto de Pedestres para o Empreendimento E-Business Park, São Paulo-SP. Este relatório foi elaborado pelo Laboratório de Aerodinâmica das Construções da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, em agosto de 2008. A autoria do relatório é do prof. Acir Mércio Loredo-Souza e equipe.

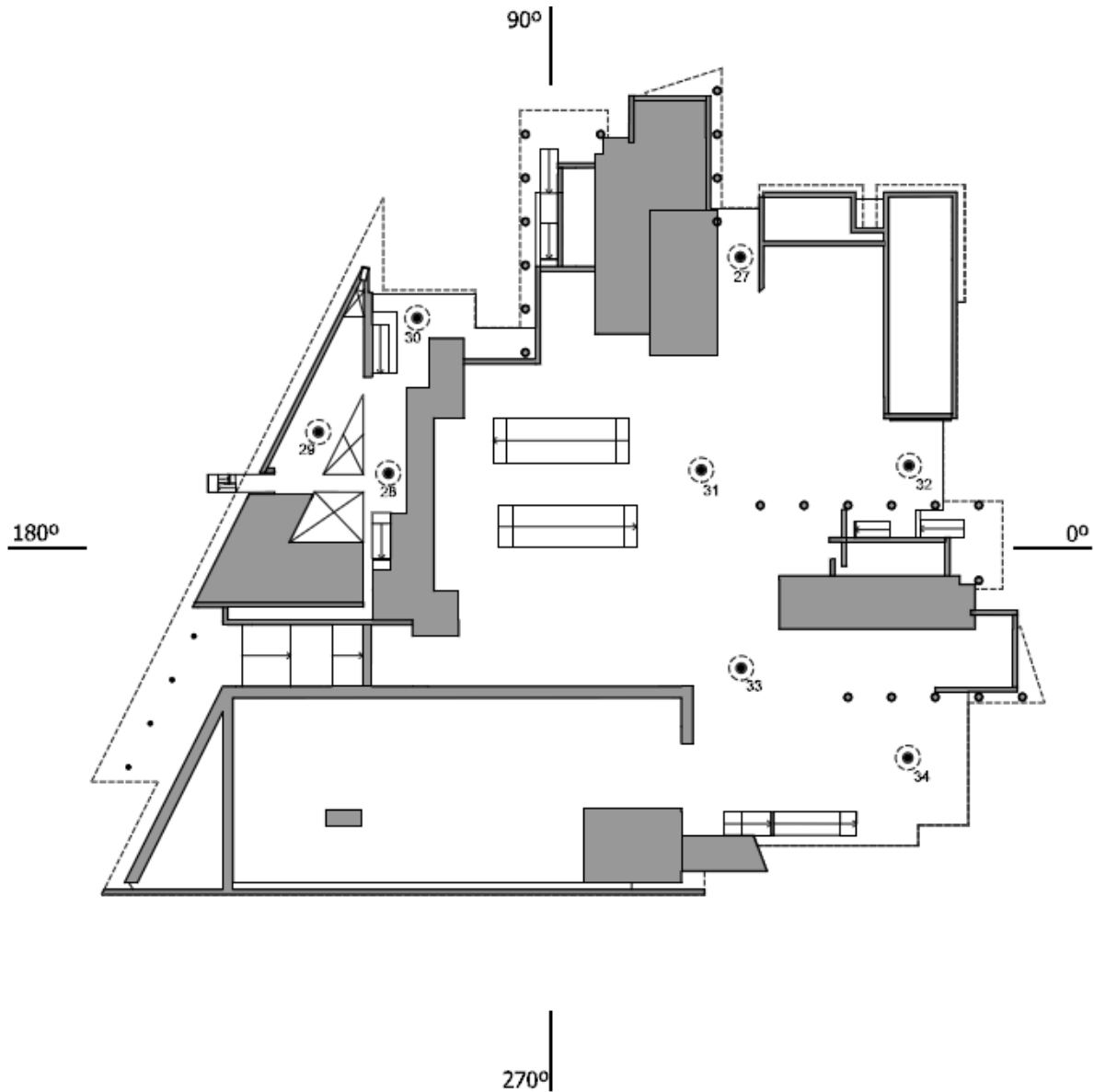


Figura A2-3: localização dos sensores de velocidade no 1º pavimento do modelo do Empreendimento E-Business Park (trabalho não publicado)<sup>26</sup>

<sup>26</sup> Esta figura foi obtida no relatório de pesquisa Estudo em Túnel de Vento das Condições de Conforto de Pedestres para o Empreendimento E-Business Park, São Paulo-SP. Este relatório foi elaborado pelo Laboratório de Aerodinâmica das Construções da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, em agosto de 2008. A autoria do relatório é do prof. Acir Mércio Loredo-Souza e equipe.

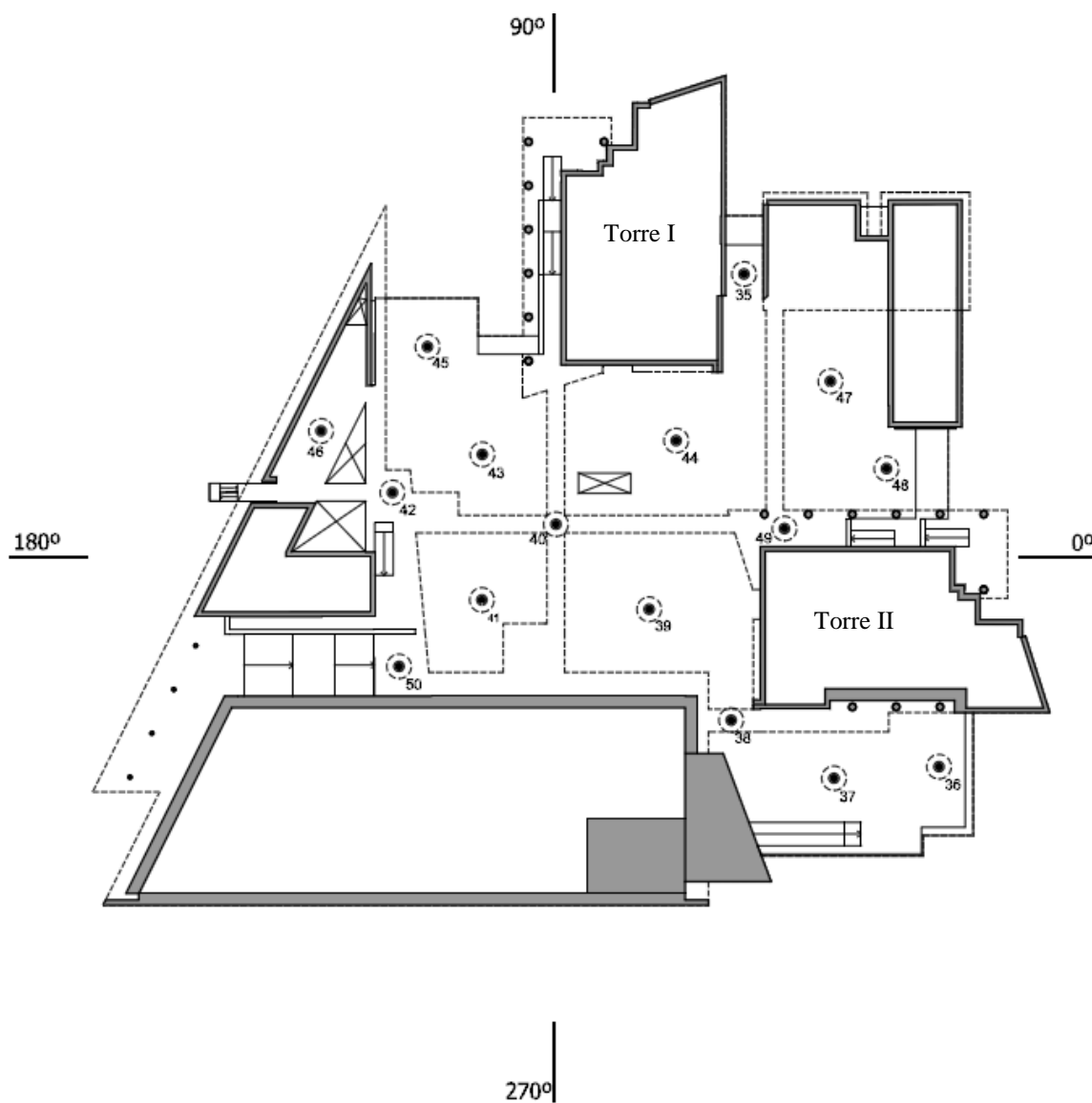


Figura A2-4: localização dos sensores de velocidade no 2º pavimento do modelo do Empreendimento E-Business Park (trabalho não publicado)<sup>27</sup>

<sup>27</sup> Esta figura foi obtida no relatório de pesquisa Estudo em Túnel de Vento das Condições de Conforto de Pedestres para o Empreendimento E-Business Park, São Paulo-SP. Este relatório foi elaborado pelo Laboratório de Aerodinâmica das Construções da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, em agosto de 2008. A autoria do relatório é do prof. Acir Mércio Loredo-Souza e equipe.

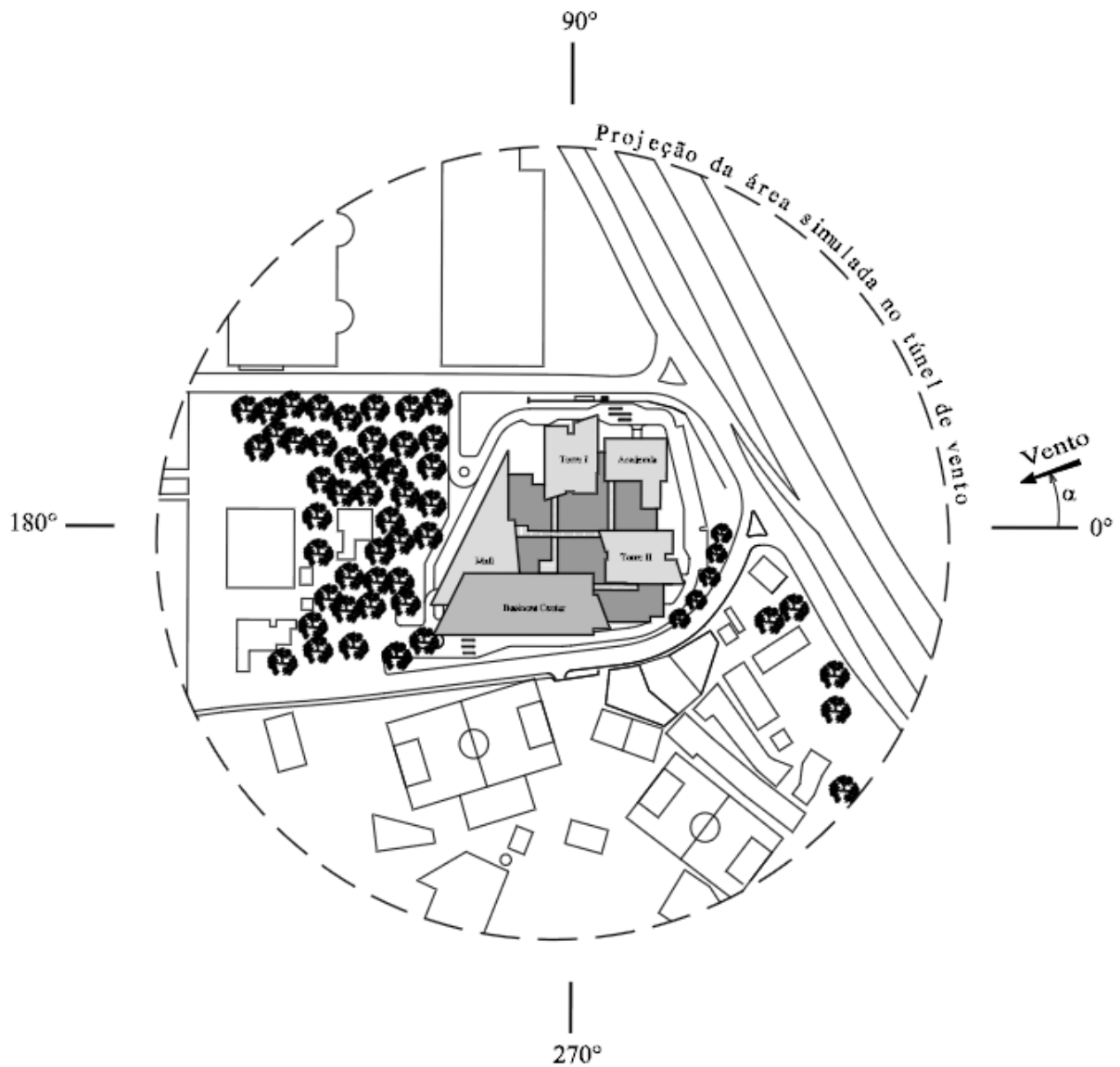


Figura A2-5: referência para o ângulo de incidência do vento para o Empreendimento E-Business Park (trabalho não publicado)<sup>28</sup>

<sup>28</sup> Esta figura foi obtida no relatório de pesquisa Estudo em Túnel de Vento das Condições de Conforto de Pedestres para o Empreendimento E-Business Park, São Paulo-SP. Este relatório foi elaborado pelo Laboratório de Aerodinâmica das Construções da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, em agosto de 2008. A autoria do relatório é do prof. Acir Mércio Loredo-Souza e equipe.

### A.3 EMPREENDIMENTO LEOPOLDO GREEN

O empreendimento Leopoldo Green será construído na cidade de São Paulo, SP. A figura A3-1 mostra a localização do empreendimento. O círculo vermelho na figura A3-1 indica a projeção da área ensaia em túnel de vento.

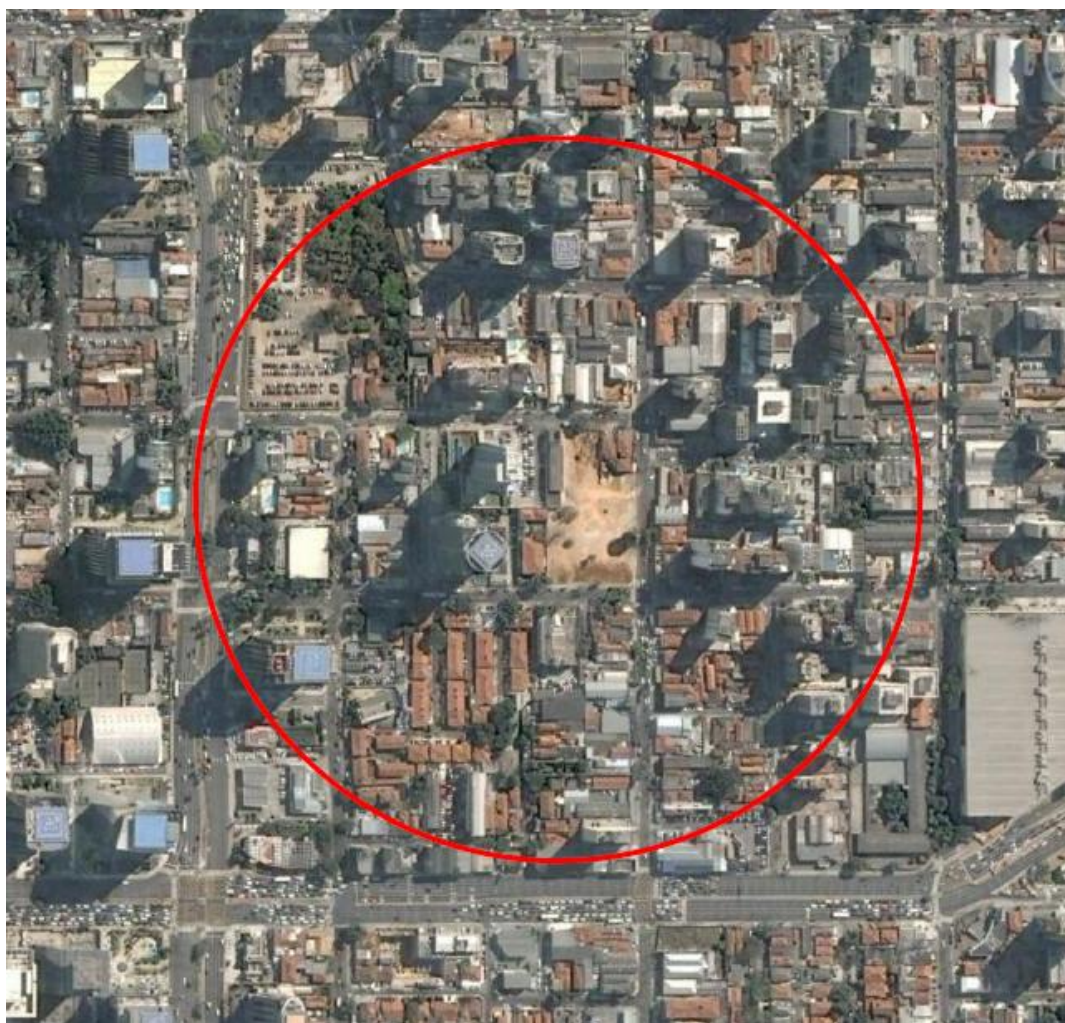


Figura A3-1: localização do Empreendimento Leopoldo Green e projeção da área ensaiada em túnel de vento (trabalho não publicado)<sup>29</sup>

Para este estudo foi construído um modelo em escala 1/400. O modelo foi instrumentado com 35 sensores (sondas Irwin) no entorno do edifício que mediram a velocidade do vento a uma altura equivalente a 2m em escala real (figura A3-2). As velocidades foram medidas para 24

<sup>29</sup> Esta figura foi obtida no relatório de pesquisa Estudo em Túnel de Vento das Condições de Conforto de Pedestres para o Empreendimento Brookfield Towers, São Paulo - SP. Este relatório foi elaborado pelo Laboratório de Aerodinâmica das Construções da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, em dezembro de 2009. A autoria do relatório é do prof. Acir Mércio Loredou-Souza e equipe.

ângulos de incidência do vento, em intervalos de 15°. A referência para o ângulo de incidência do vento está apresentada na figura A3-3.

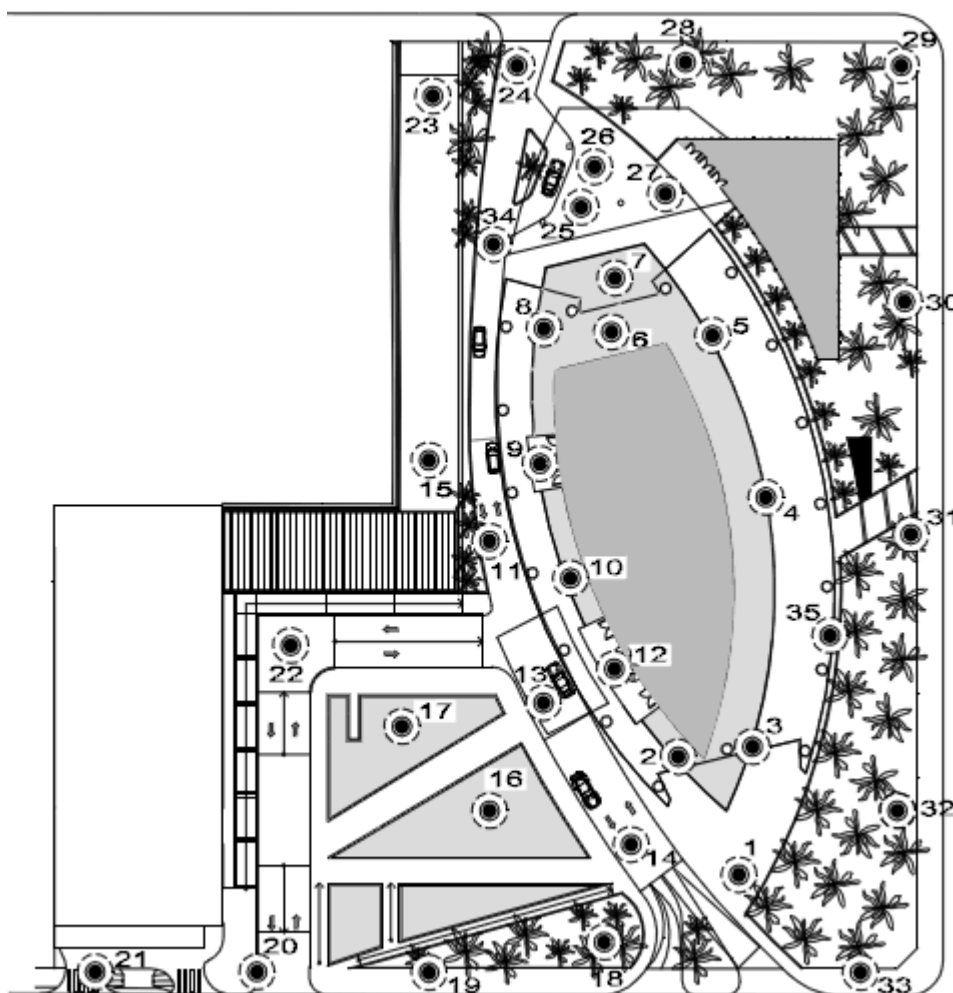


Figura A3-2: localização dos sensores de velocidade no entorno do modelo do Empreendimento Leopoldo Green (trabalho não publicado)<sup>30</sup>

<sup>30</sup> Esta figura foi obtida no relatório de pesquisa Estudo em Túnel de Vento das Condições de Conforto de Pedestres para o Empreendimento YUNY Leopoldo Green, São Paulo-SP. Este relatório foi elaborado pelo Laboratório de Aerodinâmica das Construções da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, em março de 2009. A autoria do relatório é do prof. Acir Mércio Loredo-Souza e equipe.



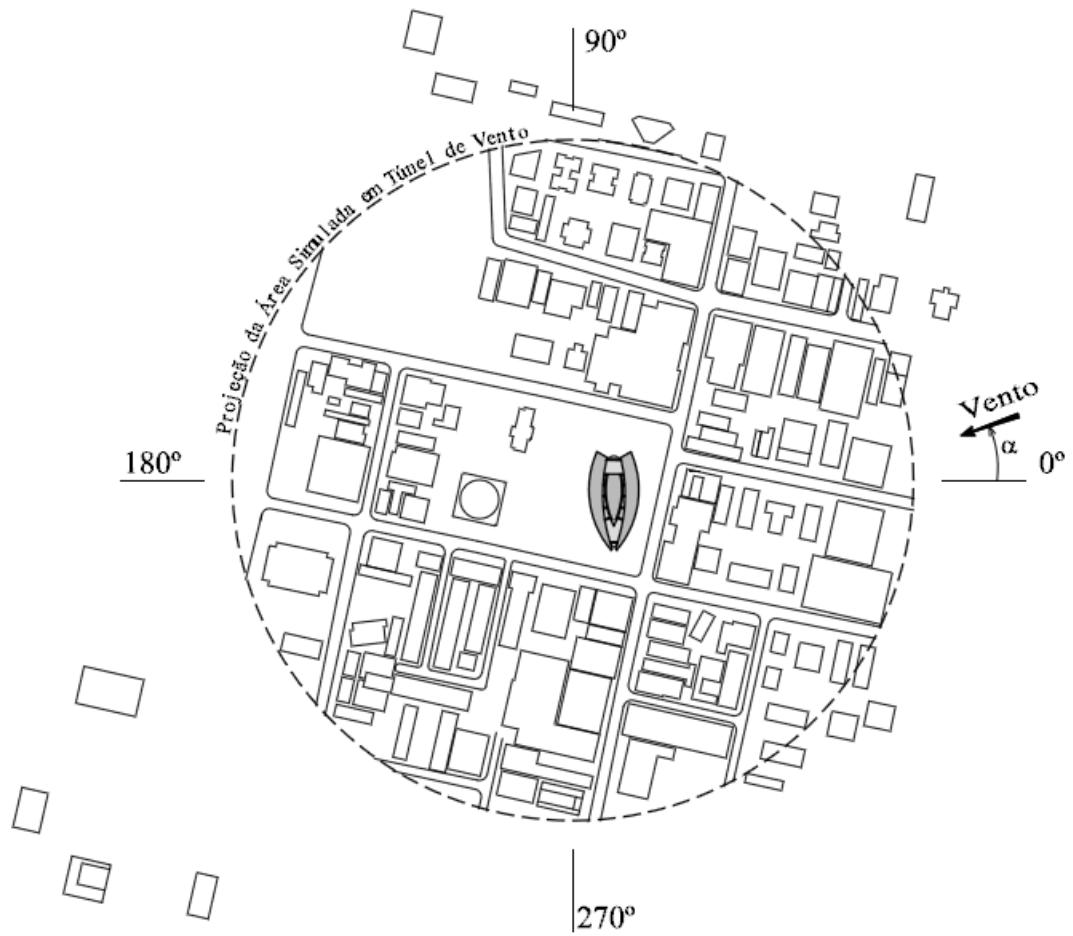


Figura A3-3: referência para o ângulo de incidência do vento para o Empreendimento Leopoldo Green (trabalho não publicado)<sup>31</sup>

<sup>31</sup> Esta figura foi obtida no relatório de pesquisa Estudo em Túnel de Vento das Condições de Conforto de Pedestres para o Empreendimento YUNY Leopoldo Green, São Paulo-SP. Este relatório foi elaborado pelo Laboratório de Aerodinâmica das Construções da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, em março de 2009. A autoria do relatório é do prof. Acir Mércio Loredo-Souza e equipe.

## **ANEXO B – Resultados obtidos para cada caso estudado**

As figuras B1 a B5 apresentam os resultados da aplicação dos critérios de Penwarden e Wise, Davenport, Isyumov e Davenport e Lawson e Penwarden (para a velocidade média e a velocidade de pico), respectivamente, para o empreendimento Brookfield Towers.

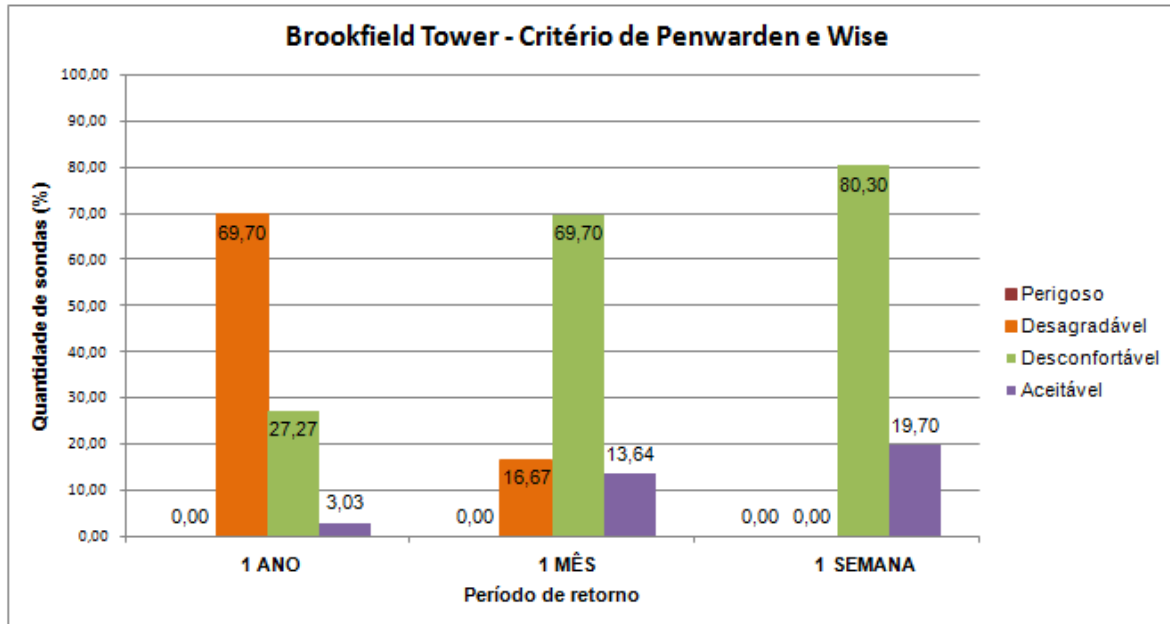


Figura B1: resultados obtidos pelo critério de Penwarden e Wise para o empreendimento Brookfield Towers

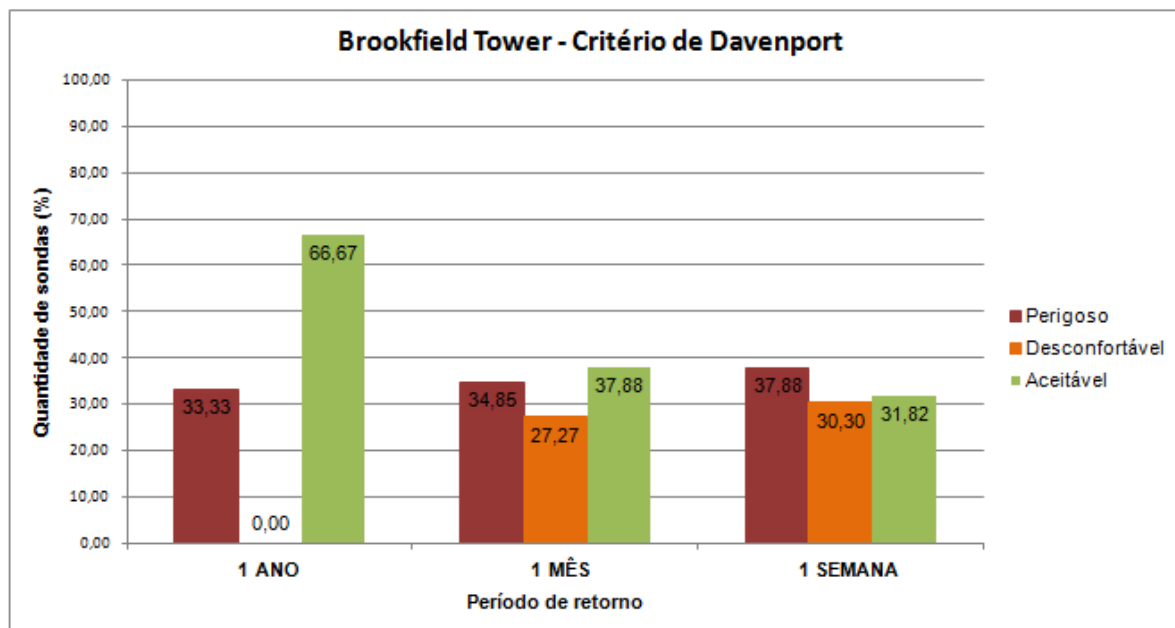


Figura B2: resultados obtidos pelo critério de Davenport para o empreendimento Brookfield Towers

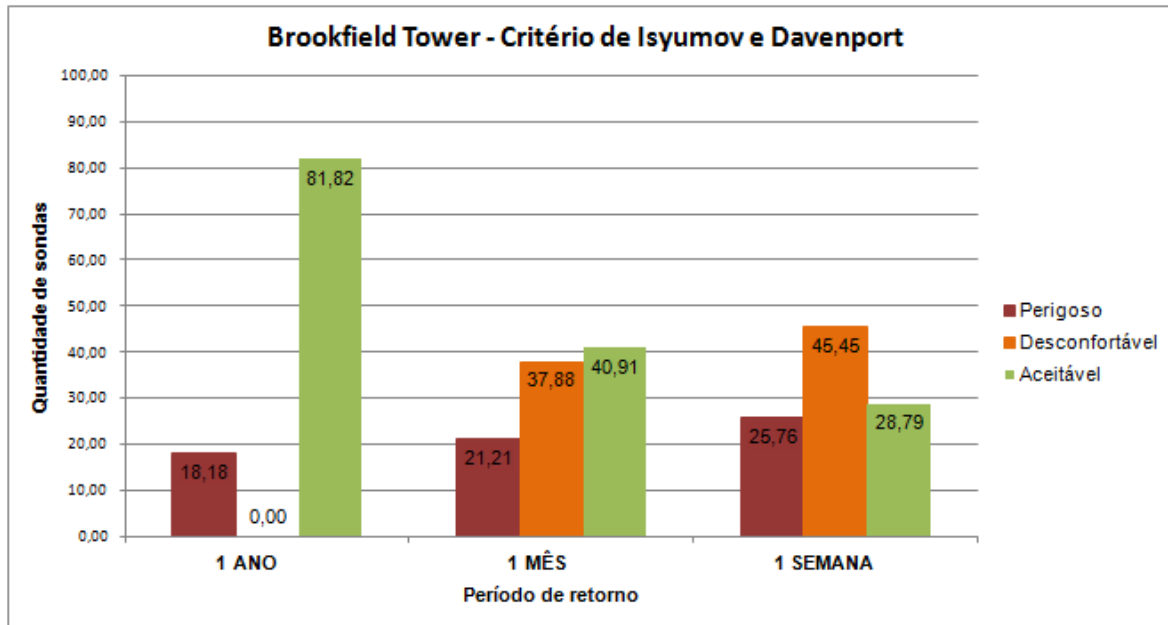


Figura B3: resultados obtidos pelo critério de Isyumov e Davenport para o empreendimento Brookfield Towers

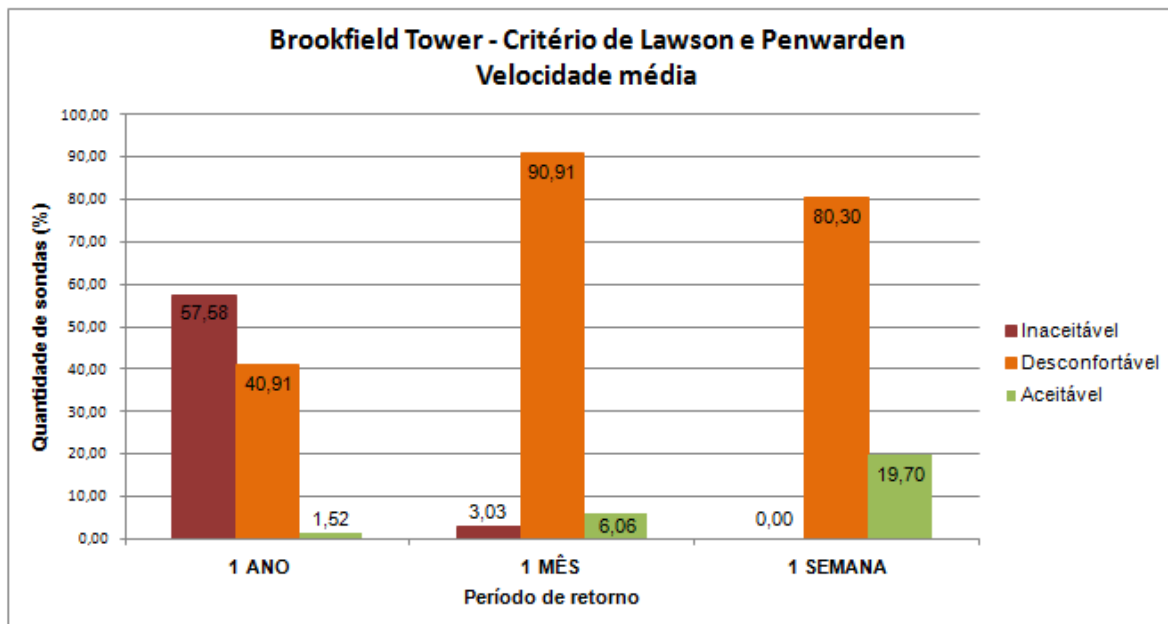


Figura B4: resultados obtidos para velocidades médias pelo critério de Lawson e Penwarden para o empreendimento Brookfield Towers

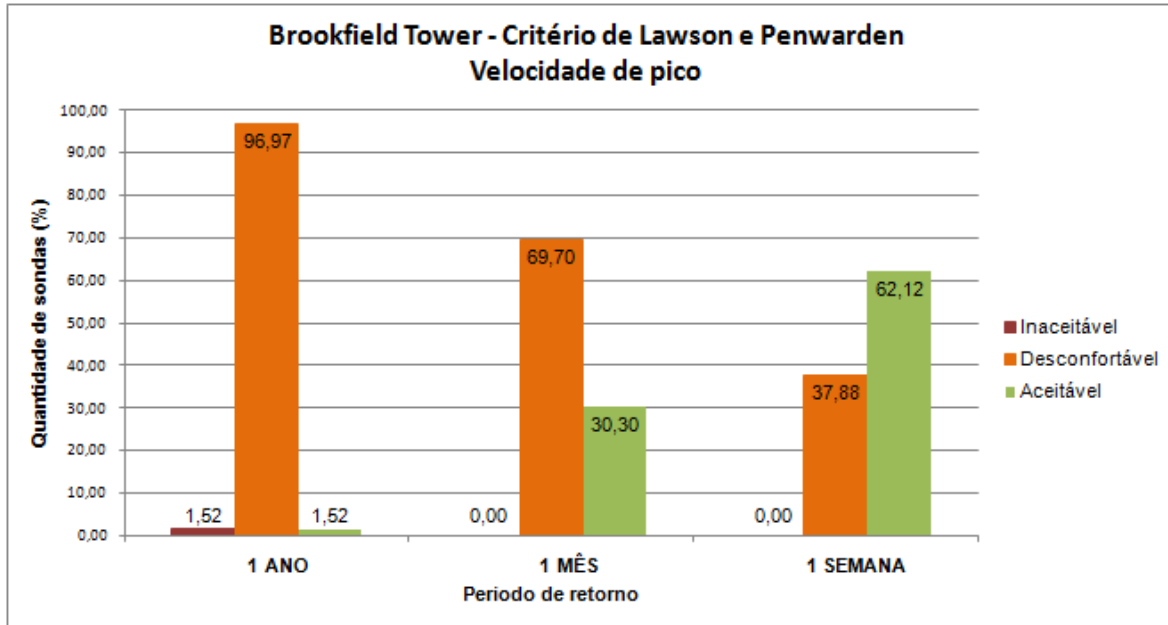


Figura B5: resultados obtidos para velocidades de pico pelo critério de Lawson e Penwarden para o empreendimento Brookfield Towers

As figuras B6 a B10 apresentam os resultados da aplicação dos critérios de Penwarden e Wise, Davenport, Isyumov e Davenport e Lawson e Penwarden (velocidades médias e velocidades de pico), respectivamente, para o empreendimento E-Business Park.

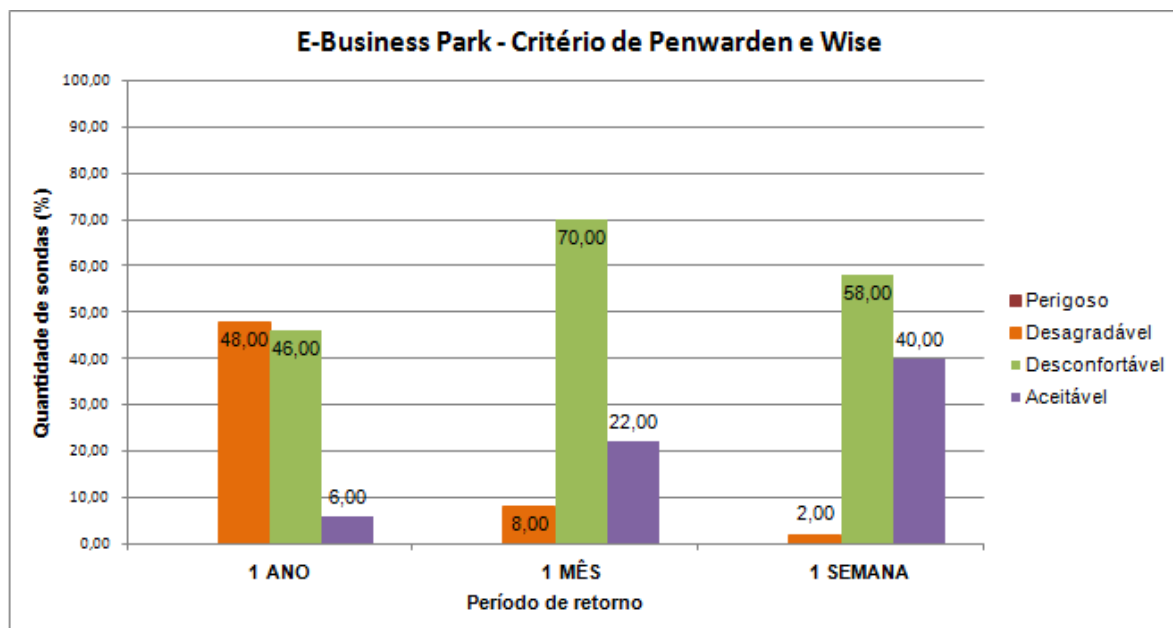


Figura B6: resultados obtidos pelo critério de Penwarden e Wise para o empreendimento E-Business Park

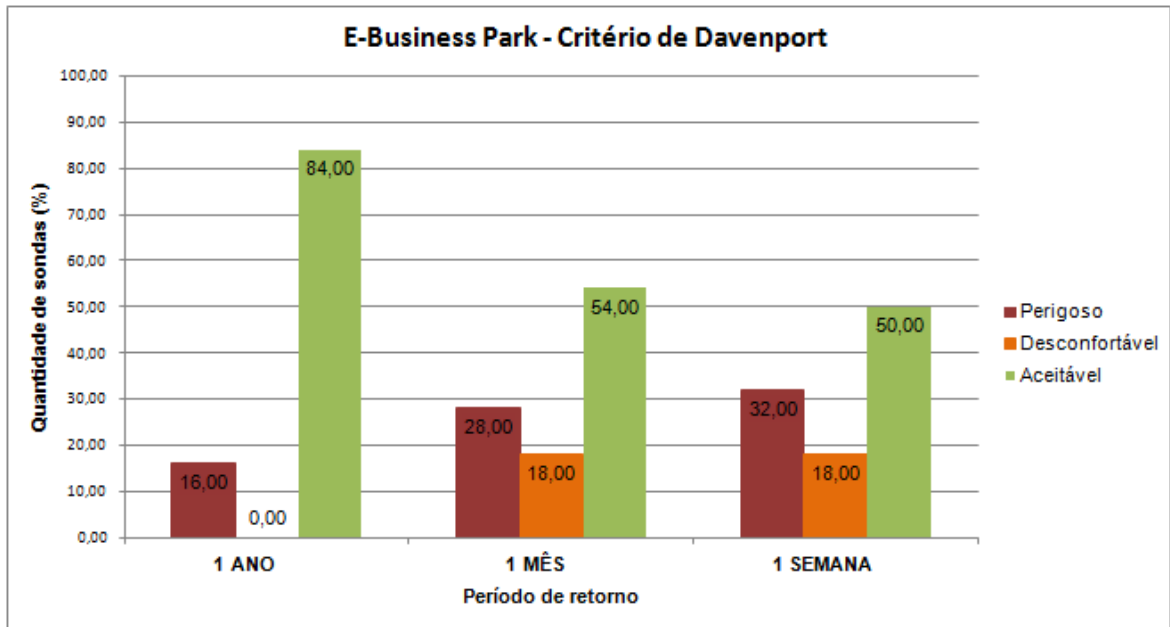


Figura B7: resultados obtidos pelo critério de Davenport para o empreendimento E-Business Park

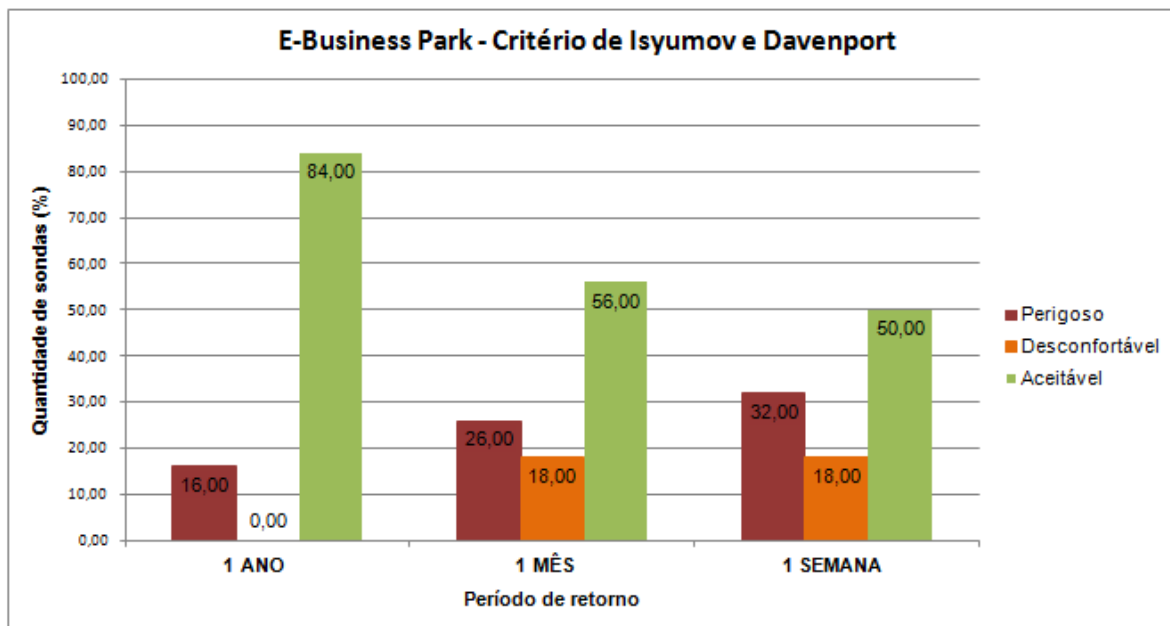


Figura B8: resultados obtidos pelo critério de Isyumov e Davenport para o empreendimento E-Business Park

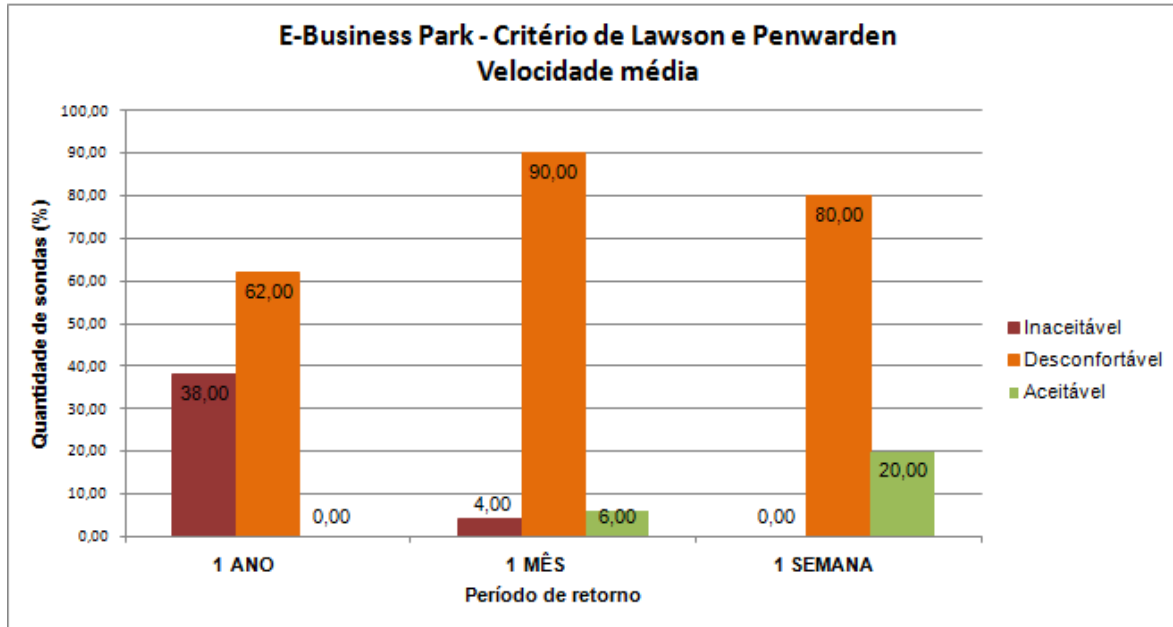


Figura B9: resultados obtidos para as velocidades médias pelo critério de Lawson e Penwarden para o empreendimento E-Business Park

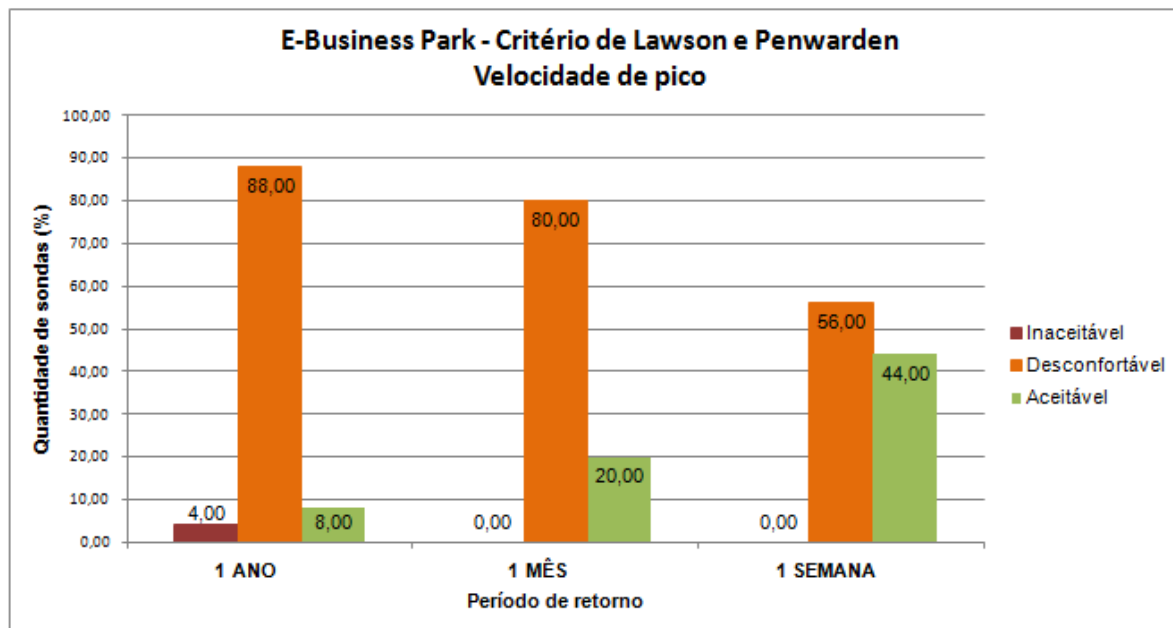


Figura B10: resultados obtidos para as velocidades de pico pelo critério de Lawson e Penwarden para o empreendimento E-Business Park

As figuras B11 a B15 apresentam os resultados da aplicação dos critérios de Penwarden e Wise, Davenport, Isyumov e Davenport e Lawson e Penwarden (velocidades médias e velocidades de pico), respectivamente, para o empreendimento Leopoldo Green.

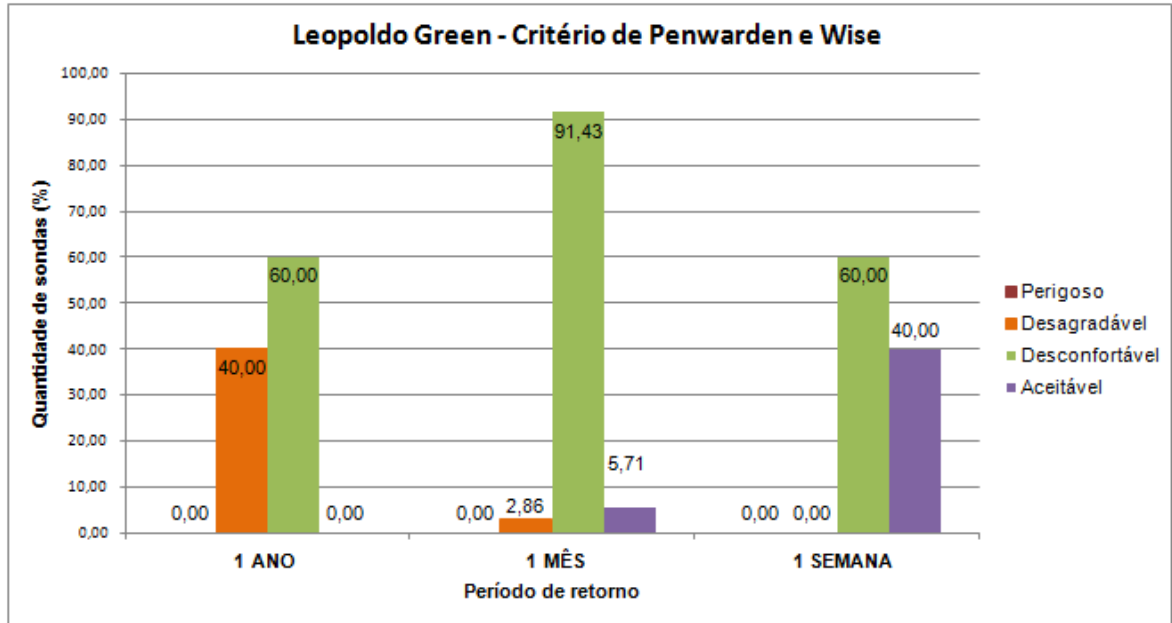


Figura B11: resultados obtidos pelo critério de Penwarden e Wise para o empreendimento Leopoldo Green

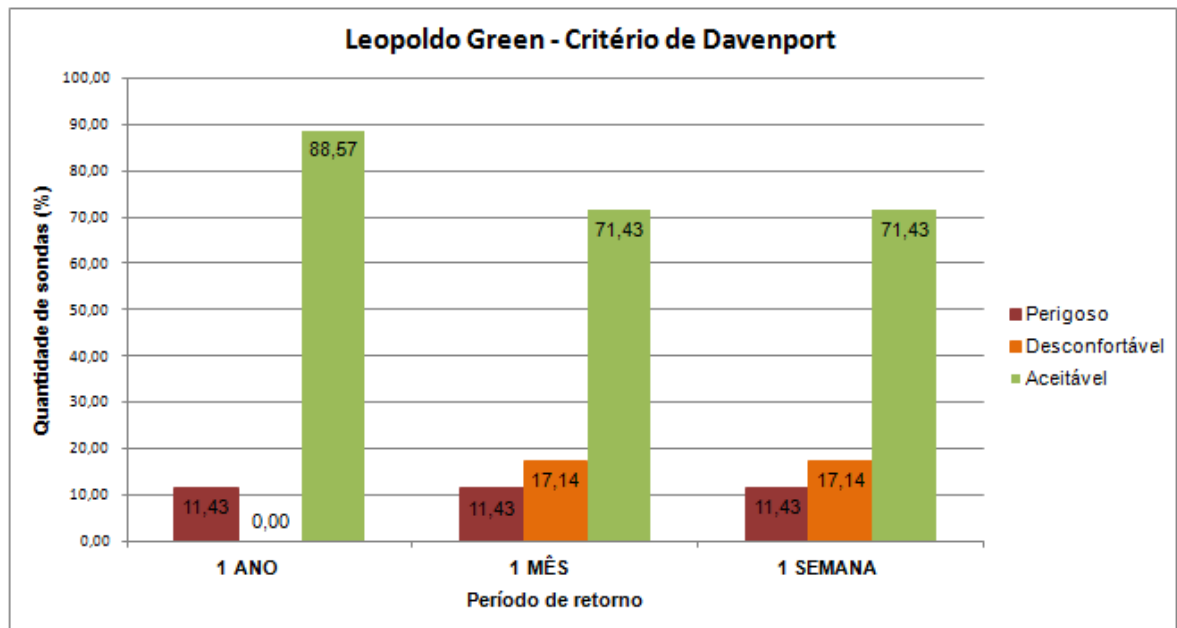


Figura B12: resultados obtidos pelo critério de Davenport para o empreendimento Leopoldo Green



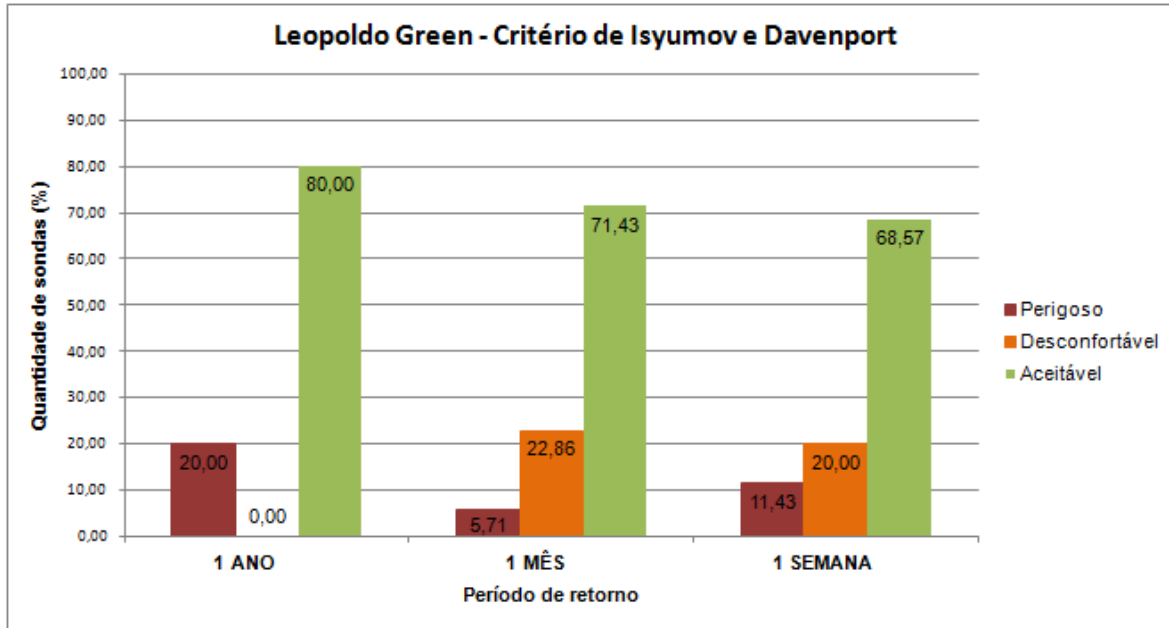


Figura B13: resultados obtidos pelo critério de Isyumov e Davenport para o empreendimento Leopoldo Green

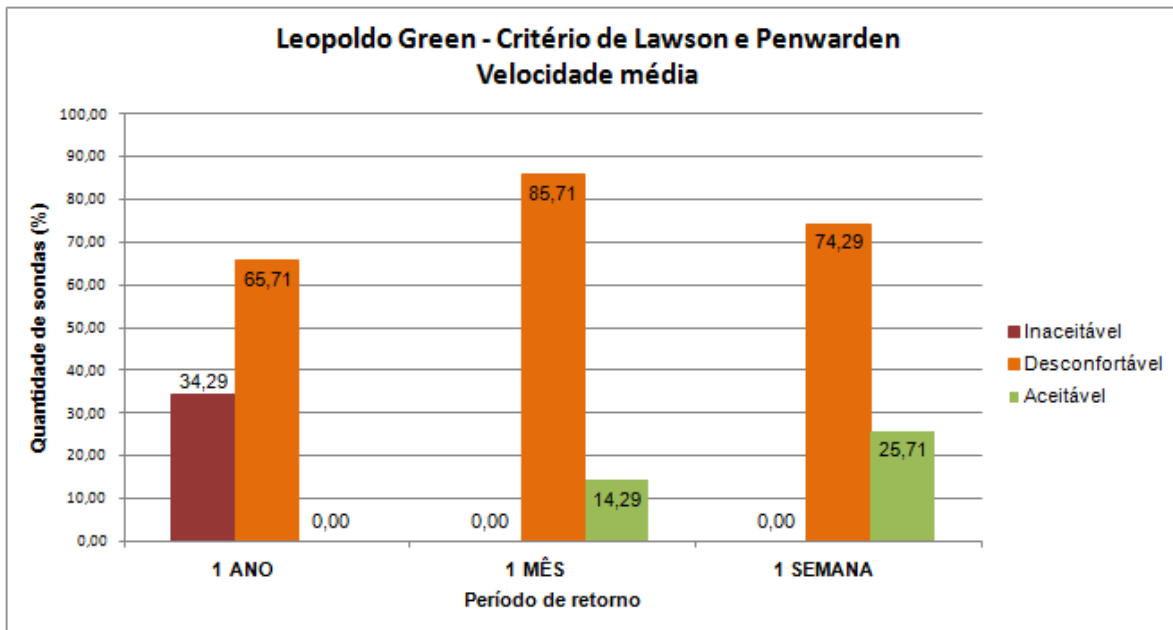


Figura B14: resultados obtidos para velocidades médias pelo critério de Lawson e Penwarden para empreendimento Leopoldo Green

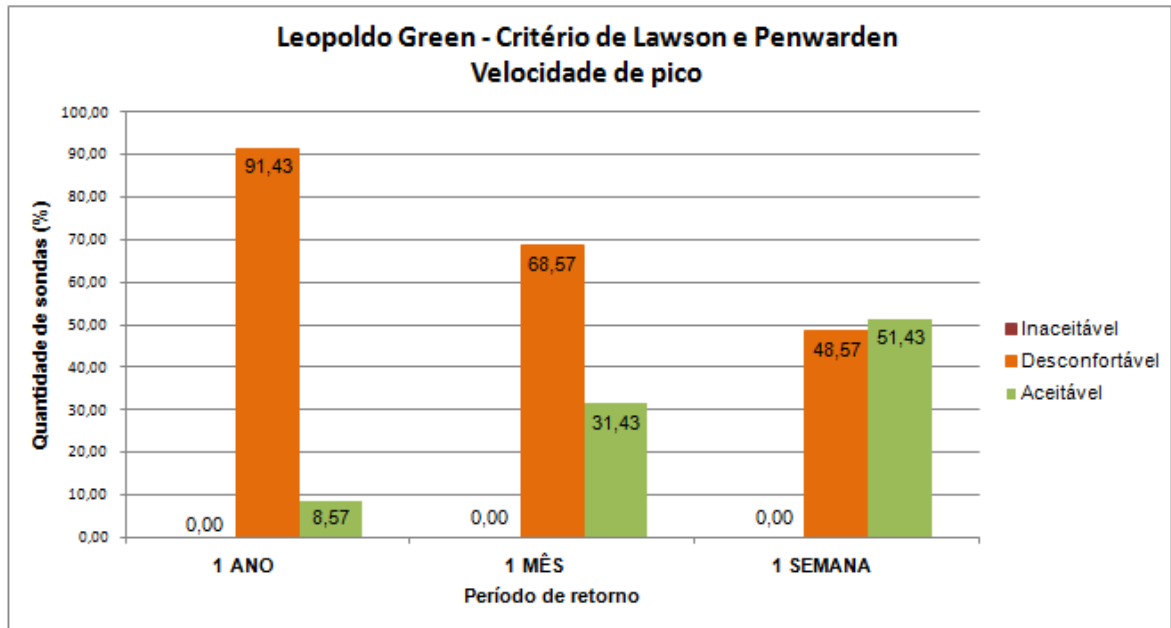


Figura B15: resultados obtidos para velocidades de pico pelo critério de Lawson e Penwarden para empreendimento Leopoldo Green