

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

**Guilherme Pigatto Arrais**

**PRESSÕES EXERCIDAS PELO VENTO EM FACHADAS DE  
EDIFÍCIOS ALTOS: ESTUDO COMPARATIVO DOS  
VALORES OBTIDOS ATRAVÉS DE ENSAIOS EM TÚNEL DE  
VENTO E ESPECIFICAÇÕES NORMATIVAS**

Porto Alegre  
julho 2011

**GUILHERME PIGATTO ARRAIS**

**PRESSÕES EXERCIDAS PELO VENTO EM FACHADAS DE  
EDIFÍCIOS ALTOS: ESTUDO COMPARATIVO DOS  
VALORES OBTIDOS ATRAVÉS DE ENSAIOS EM TÚNEL DE  
VENTO E ESPECIFICAÇÕES NORMATIVAS**

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

julho 2011

**GUILHERME PIGATTO ARRAIS**

**PRESSÕES EXERCIDAS PELO VENTO EM FACHADAS DE  
EDIFÍCIOS ALTOS: ESTUDO COMPARATIVO DOS  
VALORES OBTIDOS ATRAVÉS DE ENSAIOS EM TÚNEL DE  
VENTO E ESPECIFICAÇÕES NORMATIVAS**

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, 18 de julho de 2011

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

Profa. Carin Maria Schmitt  
Coordenadora

**BANCA EXAMINADORA**

**Prof. Acir Mércio Loredo-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 todos aqueles que fizeram e/ou fazem parte da minha vida pessoal e acadêmica.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço ao Prof. Acir Mércio Loredou-Souza, orientador deste trabalho, pela dedicação e empenho para que este trabalho fosse realizado.

Agradeço aos professores do meu curso de Graduação pelos ensinamentos recebidos, tanto no âmbito acadêmico quanto no profissional.

Agradeço aos colegas pelo auxílio e apoio mútuo durante o curso.

Nunca ande pelo caminho traçado, pois ele conduz  
somente até onde os outros foram.

*Alexander Graham Bell*

## RESUMO

ARRAIS, G. P. **Pressões Exercidas pelo Vento em Fachadas de Edifícios Altos**: estudo comparativo dos valores obtidos através de ensaios em túnel de vento e especificações normativas. 2010. 79 f. Trabalho de Diplomação (Graduação em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

Este trabalho trata sobre as pressões que são exercidas pelo vento em fachadas de edifícios, tendo, como preocupação maior, o correto dimensionamento dos revestimentos utilizados. Nele é demonstrado todo o procedimento recomendado pela norma brasileira, referente aos esforços do vento em edificações, para executar o cálculo das pressões, desde a determinação da velocidade básica atuante na região, até transformá-la em carregamento. É descrito também o mecanismo de funcionamento de um túnel de vento, as mesas de ensaio, como podem ser simuladas as características do vento natural tornando o ensaio o mais próximo possível do que aconteceria com a estrutura real. Essa determinação de pressões torna-se muito importante tendo em vista os novos e mais leves materiais que estão sendo usados atualmente no revestimento de fachadas, podendo assim dimensionar corretamente e evitar que ocorram acidentes com os revestimentos das fachadas, evitando-se assim o arrancamento de placas ou quebra de vidros. Foram estudadas quatro edificações com formatos e dimensões diferentes entre si. Concluiu-se que, na maioria dos casos, a Norma apresenta valores mais baixos do que os esperados em relação aos obtidos pelos ensaios em túnel de vento.

Palavras-chave: fachada; NBR 6123; pressões; túnel de vento.

## LISTA DE FIGURAS

|   |    |
|---|----|
| Figura 1: diagrama de representação das etapas da pesquisa .....  | 18 |
| Figura 2: isopletas da velocidade básica $V_o$ (m/s) .....  | 22 |
| Figura 3: fator topográfico $S_1$ .....   | 24 |
| Figura 4: convenção de sinais para sobrepressão e sucção .....  | 29 |
| Figura 5: ângulo de incidência do vento e regiões da edificação .....   | 29 |
| Figura 6: dispositivos de geração das diferentes camadas limites do túnel de vento<br>Prof. Joaquim Blessmann ..... | 36 |
| Figura 7: planta baixa do túnel de vento Prof. Joaquim Blessmann .....  | 37 |
| Figura 8: maquete do empreendimento Cidade Jardim .....   | 44 |
| Figura 9: fachadas frontal e lateral da Torre I do empreendimento Cidade Jardim<br>(medidas em metros) .....        | 45 |
| Figura 10: planta baixa do pavimento da Torre I do empreendimento Cidade Jardim<br>(medidas em metros) .....        | 45 |
| Figura 11: área simulada no túnel de vento para o empreendimento Cidade Jardim .....                                | 46 |
| Figura 12: sucções obtidas no túnel para a fachada da Torre I do empreendimento<br>Cidade Jardim .....              | 47 |
| Figura 13: sobrepressões obtidas no túnel para a fachada da Torre I do<br>empreendimento Cidade Jardim .....        | 48 |
| Figura 14: sucções obtidas pela Norma para a fachada da Torre I do empreendimento<br>Cidade Jardim .....            | 49 |
| Figura 15: sobrepressões obtidas pela Norma para a fachada da Torre I do<br>empreendimento Cidade Jardim .....      | 50 |
| Figura 16: perspectiva artística do empreendimento Nuova Vita .....   | 52 |
| Figura 17: fachadas frontal e lateral da Torre Alegria do empreendimento Nuova Vita<br>(medidas em metros) .....    | 53 |
| Figura 18: planta baixa do pavimento da Torre Alegria do empreendimento Nuova<br>Vita (medidas em metros) .....     | 53 |
| Figura 19: área simulada no túnel de vento para o empreendimento Nuova Vita .....                                   | 54 |
| Figura 20: sucções obtidas no túnel para a fachada da Torre Alegria do<br>empreendimento Nuova Vita .....           | 55 |
| Figura 21: sobrepressões obtidas no túnel para a fachada da Torre Alegria do<br>empreendimento Nuova Vita .....     | 56 |
| Figura 22: sucções obtidas pela Norma para a fachada da Torre Alegria do<br>empreendimento Nuova Vita .....         | 57 |
| Figura 23: sobrepressões obtidas pela Norma para a fachada da Torre Alegria do<br>empreendimento Nuova Vita .....   | 58 |
| Figura 24: perspectiva artística do empreendimento Odebrecht Atlanta .....  | 60 |

|  |    |
|--|----|
| Figura 25: fachadas frontal e lateral do empreendimento Odebrecht Atlanta (medidas em metros) .....  | 61 |
| Figura 26: planta baixa do pavimento do empreendimento Odebrecht Atlanta (medidas em metros) .....   | 61 |
| Figura 27: área simulada no túnel de vento para o empreendimento Odebrecht Atlanta                   | 62 |
| Figura 28: sucções obtidas no túnel para a fachada do empreendimento Odebrecht Atlanta .....         | 63 |
| Figura 29: sobrepressões obtidas no túnel para a fachada do empreendimento Odebrecht Atlanta .....   | 64 |
| Figura 30: sucções obtidas pela Norma para a fachada do empreendimento Odebrecht Atlanta .....       | 65 |
| Figura 31: sobrepressões obtidas pela Norma para a fachada do empreendimento Odebrecht Atlanta ..... | 66 |
| Figura 32: perspectiva artística do empreendimento Prosperitas .....                                 | 68 |
| Figura 33: fachadas frontal e lateral do empreendimento Prosperitas (medidas em metros) .....        | 69 |
| Figura 34: planta baixa do pavimento do empreendimento Prosperitas (medidas em metros) .....         | 69 |
| Figura 35: área simulada no túnel de vento para o empreendimento Prosperitas .....                   | 70 |
| Figura 36: sucções obtidas no túnel para a fachada do empreendimento Prosperitas .....               | 71 |
| Figura 37: sobrepressões obtidas no túnel para a fachada do empreendimento Prosperitas .....         | 72 |
| Figura 38: sucções obtidas pela Norma para a fachada do empreendimento Prosperitas                   | 73 |
| Figura 39: sobrepressões obtidas pela Norma para a fachada do empreendimento Prosperitas .....       | 74 |

## LISTA DE QUADROS

|  |    |
|--|----|
| Quadro 1: parâmetros meteorológicos .....  | 27 |
| Quadro 2: valores mínimos do fator estatístico $S_3$ .....   | 27 |
| Quadro 3: coeficientes de pressão e de forma, externos, para edificações retangulares ..                                   | 30 |
| Quadro 4: parâmetros do cálculo no túnel de vento para a Torre I do empreendimento<br>Cidade Jardim .....                  | 46 |
| Quadro 5: parâmetros do cálculo pela Norma para a Torre I do empreendimento<br>Cidade Jardim .....                         | 48 |
| Quadro 6: comparativo dos resultados para sucções na fachada da Torre I do<br>empreendimento Cidade Jardim .....           | 51 |
| Quadro 7: comparativo dos resultados para sobrepressões na fachada da Torre I do<br>empreendimento Cidade Jardim .....     | 51 |
| Quadro 8: parâmetros do cálculo no túnel de vento para a Torre Alegria do<br>empreendimento Nuova Vita .....               | 54 |
| Quadro 9: parâmetros do cálculo pela Norma para a Torre Alegria do<br>empreendimento Nuova Vita .....                      | 56 |
| Quadro 10: comparativo dos resultados para sucções na fachada da Torre Alegria do<br>empreendimento Nuova Vita .....       | 59 |
| Quadro 11: comparativo dos resultados para sobrepressões na fachada da Torre<br>Alegria do empreendimento Nuova Vita ..... | 59 |
| Quadro 12: parâmetros do cálculo no túnel de vento para o empreendimento<br>Odebrecht Atlanta .....                        | 62 |
| Quadro 13: parâmetros do cálculo pela Norma para o empreendimento Odebrecht<br>Atlanta .....                               | 64 |
| Quadro 14: comparativo dos resultados para sucções na fachada do empreendimento<br>Odebrecht Atlanta .....                 | 67 |
| Quadro 15: comparativo dos resultados para sobrepressão na fachada do<br>empreendimento Odebrecht Atlanta .....            | 67 |
| Quadro 16: parâmetros do cálculo no túnel de vento para o empreendimento<br>Prosperitas .....                              | 70 |
| Quadro 17: parâmetros do cálculo pela Norma para o empreendimento Prosperitas .....  | 72 |
| Quadro 18: comparativo dos resultados para sucções na fachada do empreendimento<br>Prosperitas .....                       | 75 |
| Quadro 19: comparativo dos resultados para sobrepressões na fachada do<br>empreendimento Prosperitas .....                 | 75 |

## LISTA DE SÍMBOLOS

a: maior dimensão da edificação, em planta (m)

A: área plana considerada (m<sup>2</sup>)

b: menor dimensão da edificação, em planta (m)

C<sub>e</sub>: coeficiente de forma externo

C<sub>i</sub>: coeficiente de forma interno

c<sub>pe</sub>: coeficiente de pressão externa

c<sub>pi</sub>: coeficiente de pressão interna

$\hat{c}_p$  : coeficiente de pressão máxima

$\bar{c}_p$  : coeficiente de pressão média

$\tilde{c}_p$  : coeficiente de pressão mínima

c<sub>pp</sub>: coeficiente de pressão de pico (mínimo ou máximo, medido no túnel de vento)

$\tilde{c}_p$  : coeficiente de pressão rms

d: diferença de nível entre a base e o topo do talude ou morro (m)

F: força do vento atuando em uma área A (N)

g: fator de pico equivalente

h: altura da edificação (m)

p: expoente referente à rugosidade do terreno

p(t): pressão instantânea, na superfície da edificação, medida em relação à pressão estática de referência

p<sub>max</sub>: valor máximo de p(t) para o período de amostragem T

$\bar{p}$  : valor médio de  $p(t)$  para o período de amostragem  $T$

$p_{\min}$ : valor mínimo de  $p(t)$  para o período de amostragem  $T$

$\tilde{p}$  : média quadrática das flutuações em torno da pressão média

$p_o$  : pressão de projeto

$\Delta p$ : pressão efetiva (Pa)

$q$ : pressão dinâmica (Pa)

$\bar{q}$  : pressão dinâmica de referência

$\check{q}$  : pressão dinâmica de referência, medida sobre um intervalo de três segundos

$S_1$ : fator topográfico

$S_2$ : fator de dimensões da edificação e rugosidade do terreno

$S_3$ : fator estatístico

$T$ : período de amostragem

$\theta$ : inclinação média do talude ou encosta do morro

$\bar{V}(x_3)$ : velocidade média na altura  $x_3$  (m/s)

$V_k$ : velocidade característica do vento (m/s)

$V_o$ : velocidade básica do vento (m/s)

$\bar{V}_{ref}$ : velocidade média em uma altura de referência (no túnel,  $x_{ref} = 450$  mm) (m/s)

$z$ : altura medida a partir da superfície do terreno no ponto considerado (m)

## SUMÁRIO

|  |    |
|--|----|
| <b>1 INTRODUÇÃO</b> .....  | 14 |
| <b>2 MÉTODO DE PESQUISA</b> .....  | 16 |
| 2.1 QUESTÃO DE PESQUISA .....  | 16 |
| 2.2 OBJETIVOS DO TRABALHO .....  | 16 |
| <b>2.2.1 Objetivo principal</b> .....  | 16 |
| <b>2.2.2 Objetivo secundário</b> .....   | 17 |
| 2.3 HIPÓTESE .....   | 17 |
| 2.4 PRESSUPOSTO .....  | 17 |
| 2.5 DELIMITAÇÃO .....  | 17 |
| 2.6 LIMITAÇÕES .....   | 17 |
| 2.7 DELINEAMENTO .....   | 18 |
| <b>3. A NBR 6123/1988</b> .....  | 20 |
| 3.1 DETERMINANDO AS FORÇAS ESTÁTICAS .....   | 21 |
| <b>3.1.1 Velocidade Básica</b> .....   | 21 |
| <b>3.1.2 Velocidade Característica</b> .....   | 23 |
| 3.1.2.1 Fator topográfico $S_1$ .....  | 23 |
| 3.1.2.2 Fator de rugosidade do terreno, dimensões da edificação e altura sobre o terreno $S_2$ ..... | 25 |
| 3.1.2.3 Fator estatístico $S_3$ .....  | 27 |
| <b>3.1.3 Pressão Dinâmica</b> .....  | 28 |
| <b>3.1.4 Coeficientes de Pressão</b> .....   | 28 |
| <b>3.1.5 Forças Estáticas</b> .....  | 31 |
| <b>3.1.6 Pressão Interna</b> .....   | 31 |
| 3.2 EFEITOS DE VIZINHANÇA .....  | 32 |
| 3.3 EFEITOS DINÂMICOS .....  | 33 |
| <b>4 O TÚNEL DE VENTO</b> .....  | 34 |
| 4.1 HISTÓRICO .....  | 34 |
| 4.2 SIMULAÇÃO DO VENTO NATURAL .....   | 35 |
| 4.3 O TÚNEL PROF. JOAQUIM BLESSMANN .....  | 36 |
| 4.4 METODOLOGIA EMPREGADA .....  | 38 |
| <b>5 EMPREENDIMENTOS ESTUDADOS</b> .....   | 43 |
| 5.1 CIDADE JARDIM CORPORATE CENTER .....   | 44 |
| <b>5.1.1 Ensaios Túnel de Vento</b> .....  | 46 |

|  |    |
|--|----|
| <b>5.1.2 Resultados pela NBR 6123/1988</b> ..... | 48 |
| <b>5.1.3 Comparativo dos resultados</b> .....    | 50 |
| 5.2 NUOVA VITA .....                             | 52 |
| <b>5.2.1 Ensaio Túnel de Vento</b> .....         | 54 |
| <b>5.2.2 Resultados pela NBR 6123/1988</b> ..... | 56 |
| <b>5.2.3 Comparativo dos resultados</b> .....    | 58 |
| 5.3 ODEBRECHT ATLANTA .....                      | 59 |
| <b>5.3.1 Ensaio Túnel de Vento</b> .....         | 62 |
| <b>5.3.2 Resultados pela NBR 6123/1988</b> ..... | 64 |
| <b>5.3.3 Comparativo dos resultados</b> .....    | 66 |
| 5.4 PROSPERITAS .....                            | 68 |
| <b>5.4.1 Ensaio Túnel de Vento</b> .....         | 70 |
| <b>5.4.2 Resultados pela NBR 6123/1988</b> ..... | 72 |
| <b>5.4.3 Comparativo dos resultados</b> .....    | 74 |
| <b>6 CONSIDERAÇÕES FINAIS</b> .....              | 76 |
| REFERÊNCIAS .....                                | 77 |
| APÊNDICE A .....                                 | 78 |



## 1 INTRODUÇÃO

Atualmente, a limitação de espaço horizontal para construção nas grandes cidades está sendo um obstáculo para o crescimento. Na busca por mais espaço, tanto para moradias quanto para ambientes de trabalho, a solução encontrada foi o aumento do número de pavimentos. Assim, as edificações estão cada vez mais altas e, aliado à pequena área existente, estão ficando mais esbeltas. Além disso, há também um apelo estético no qual se projeta com formatos cada vez mais diferentes dos convencionais.

Devido a esses fatores, as forças exercidas pelo vento têm uma significância cada vez maior no dimensionamento da estrutura, não apenas do prédio em si, mas também dos revestimentos utilizados. Isso se deve principalmente ao fato de que, com o avanço da tecnologia, certos tipos de revestimentos mais leves estão tornado-se predominantes nas fachadas dos edifícios. O que antes era ocupado principalmente por concreto e alvenaria, materiais pesados e resistentes, está sendo executado em peles de vidro, placas de alumínio, entre outros.

Assim, torna-se muito importante o conhecimento das pressões exercidas pelo vento nesses elementos a fim de evitar que ocorram acidentes como a quebra de vidro ou desprendimento de um elemento, colocando em perigo a vida de usuários e de pedestres. Para que essas pressões sejam obtidas, podem-se fazer ensaios em túnel de vento com a utilização de modelos em escala reduzida ou pode-se proceder conforme a recomendação de cálculo da NBR 6123/1988: Forças devidas ao Vento em Edificações.

Sabe-se, a partir de outros trabalhos na área, para determinados tipos de prédios e determinadas alturas, que com os procedimentos preconizados pela Norma alguns resultados são até 30% inferiores em comparação aos obtidos em ensaios em túnel de vento. Mesmo que fossem aplicados fatores de majoração, como o efeito de vizinhança, grande parte desses valores continuaria abaixo dos valores obtidos no túnel (ALMEIDA, 2009, p. 67).

Sendo assim, neste trabalho buscou-se verificar essas diferenças nos resultados obtidos no túnel de vento e através do procedimento da NBR 6123/1988, levando-se em consideração outros prédios altos e com geometria diferenciada. Para descrever esse trabalho, no capítulo 2

é apresentada a questão e os objetivos do trabalho, bem como limitações, delimitações e hipóteses adotadas.

O capítulo 3 trata da descrição da NBR 6123/1988: Forças devidas ao Vento em Edificações. Relata o processo da escolha e determinação de parâmetros a serem utilizados no cálculo das pressões em edificações. O capítulo 4 apresenta o túnel de vento do Laboratório de Aerodinâmica das Construções da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, definindo seu funcionamento e utilidades. O capítulo 5 apresenta as edificações estudadas e os resultados de pressões obtidos através dos dois métodos. No capítulo 6, têm-se algumas considerações finais referentes aos resultados obtidos.

## **2 MÉTODO DE PESQUISA**

Para a elaboração do presente trabalho é definido a seguir o método utilizado contendo questão da pesquisa, os objetivos do trabalho, a hipótese adotada, pressuposto, as delimitações, as limitações do trabalho e o delineamento da pesquisa.

### **2.1 QUESTÃO DE PESQUISA**

A questão de pesquisa deste trabalho é: sabendo-se que existem diferenças entre os valores de pressões exercidas pelo vento em fachadas de edifícios obtidas em ensaios no túnel de vento e pelo método da NBR 6123/1988, quais as diferenças para os edifícios estudados neste trabalho?

### **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 das pressões exercidas pelo vento calculadas pela NBR 6123/88 frente às pressões reais a que estão submetidas as edificações estudadas.

### 2.2.2 Objetivo secundário

O objetivo secundário deste trabalho é a apresentação do processo de cálculo para pressões em fachadas através da NBR 6123/88 para as edificações estudadas.

## 2.3 HIPÓTESE

A hipótese do trabalho é que os menores valores para pressões obtidos pela NBR 6123/1988 serão em torno de 50 a 60% dos valores reais.

## 2.4 PRESSUPOSTO

O trabalho tem por pressuposto que os valores obtidos para pressões através de ensaios em túnel de vento são os mais próximos dos reais.

## 2.5 DELIMITAÇÃO

O trabalho delimita-se ao estudo de quatro edifícios reais ensaiados em túnel de vento.

## 2.6 LIMITAÇÕES

São limitações do trabalho:

- a) edifícios, em escala reduzida, ensaiados em um único túnel de vento;
- b) os ensaios já haviam sido realizados, sendo apenas coletados os resultados;
- c) não serão considerados os efeitos dinâmicos.

## 2.7 DELINEAMENTO

O trabalho foi realizado através das etapas apresentadas a seguir, que estão representadas na figura 1 e são descritas nos próximos parágrafos:

- a) pesquisa bibliográfica;
- b) definição dos edifícios a serem estudados;
- c) coleta de dados dos ensaios no túnel de vento;
- d) cálculo das pressões conforme procedimento da NBR 6123/88;
- e) comparação dos resultados;
- f) considerações finais.

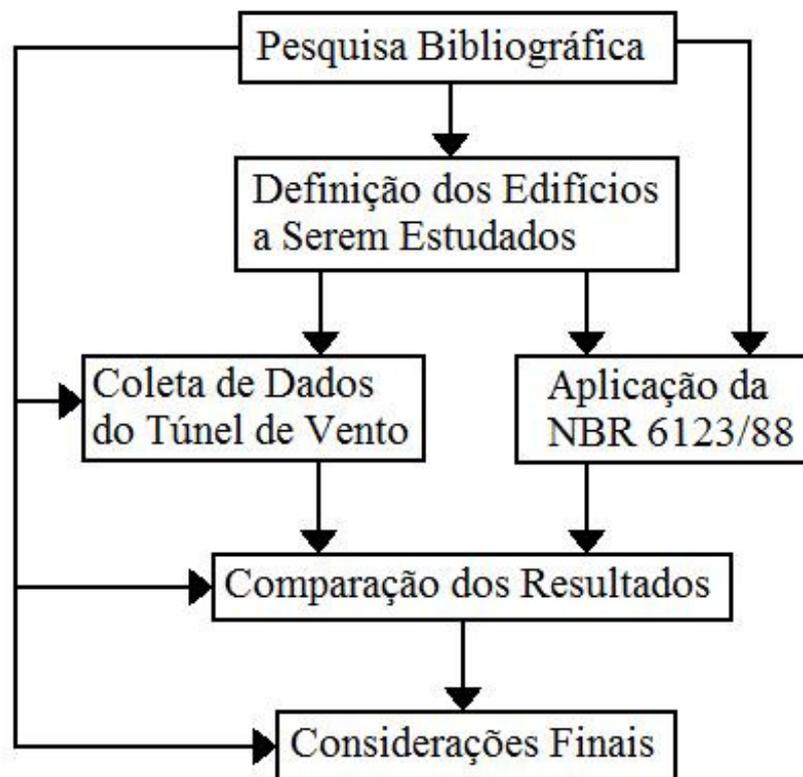


Figura 1: diagrama de representação das etapas da pesquisa

A pesquisa bibliográfica foi baseada principalmente na NBR 6123/88, sendo essa a norma brasileira sobre os efeitos do vento em edificações e, foram consultados, também, livros e trabalhos relacionados ao tema. A definição dos edifícios que foram estudados neste trabalho

foi feita com base em modelos já ensaiados no laboratório do túnel de vento da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), o Laboratório de Aerodinâmica das Construções (LAC). Junto a esta etapa, foram coletados relatórios desses ensaios de modelos dos edifícios selecionados.

Paralelamente, foi desenvolvido o cálculo das pressões seguindo os procedimentos recomendados pela NBR 6123/88, para cada edificação escolhida, o processo encontra-se descrito neste trabalho. A comparação dos resultados foi feita com base nos relatórios coletados no túnel de vento frente aos valores calculados pela norma para cada edificação, visando a diferença entre eles, gerando as conclusões do trabalho. Posteriormente foram feitas as considerações finais em relação aos resultados obtidos, chegando-se a uma conclusão sobre a eficácia da Norma, para os casos estudados.

### 3 A NBR 6123/1988

A NBR6123/1988: Forças devidas ao Vento em Edificações, foi desenvolvida com o objetivo de facilitar a determinação dos esforços exercidos pelo vento em edifícios sem ser necessário recorrer a métodos mais trabalhosos como ensaios em túnel de vento. O estudo para a sua elaboração foi desenvolvido no Laboratório de Aerodinâmica das Construções (LAC) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS).

Tendo em vista o atual cenário da construção no País, que está em grande desenvolvimento, o vento está se tornando um elemento de grande importância no dimensionamento de estruturas como um todo. Como afirma Almeida (2009, p. 16), “O vento não é um problema em construções baixas e pesadas com paredes de grande espessura, porém em estruturas esbeltas passa a ser uma das ações mais importantes a determinar no projeto de estruturas.”.

Mas a importância das forças do vento não é exclusiva da estrutura, como afirma Blessmann (2001, p. 11):

Atualmente as paredes de edifícios altos não têm, em geral, função resistente, mas apenas de vedação. São, em muitos casos, constituídas de leves painéis de vedação, fazendo com que já ocorram problemas de arrancamento de painéis, pelas altas sucções que aparecem próximos às quinas.

Sobre os acidentes causados pelo vento Blessmann (2001, p. 95) ainda afirma que são evitáveis:

Para isso é necessário levar em conta os coeficientes aerodinâmicos reais. Eles podem ser obtidos de normas atualizadas ou de ensaios realizados para obras semelhantes em estudo. Em caso de formas novas ou de obras excepcionais, recomenda-se o estudo direto em túnel de vento, com simulação das principais características do vento natural.

Tendo esses problemas em vista, deve-se ter especial cuidado na determinação dos esforços causados pelo vento em edifícios, utilizando a Norma de forma correta. Porém, atualmente há muitos casos que não são mais contemplados pela Norma como, por exemplo, edifícios com formatos diferenciados dos convencionais (ou seja, curvos, irregulares, inclinados), sendo que

esses formatos estão tornando-se cada vez mais usuais, o que leva a dimensionamentos errôneos caso ela seja aplicada, pois ela refere-se aos edifícios com base quadrilátera e com formato uniforme ao longo de sua altura.

Outro ponto que a Norma não leva em consideração são as várias possibilidades de ângulo de incidência do vento, que pode gerar grandes sucções locais em quinas (BLESSMANN, 2001, p. 19). Nesses casos torna-se necessário recorrer a ensaios em túneis de vento.

Nos próximos itens desse trabalho, será visto como são determinadas as pressões e forças devidas ao vento que atuam nas fachadas dos edifícios conforme a NBR 6123/1988. Alguns outros tópicos como efeitos de vizinhança e efeitos dinâmicos também serão abordados.

### 3.1 DETERMINANDO AS FORÇAS ESTÁTICAS

Conforme a NBR 6123 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1988, p. 4):

As forças devidas ao vento sobre uma edificação devem ser calculadas separadamente para:

- a) elementos de vedação e suas fixações (telhas, vidros, esquadrias, painéis de vedação, etc.);
- b) partes da estrutura (telhados, paredes, etc.);
- c) a estrutura como um todo.

A seguir será descrito o processo de cálculo para os esforços devidos ao vento em edificações conforme essa Norma.

#### 3.1.1 Velocidade Básica

Para calcularem-se as pressões estáticas devidas ao vento, deve-se primeiro determinar a velocidade básica do vento em uma determinada região. A NBR 6123 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1988, p. 5) define a velocidade básica como sendo

“[...] uma rajada de 3 s, excedida em média uma vez em 50 anos, a 10 m acima do terreno, em campo aberto e plano.”. Essa velocidade pode ser obtida através do mapa das isopletas disponível na Norma e apresentado na figura 2. A NBR 6123 ainda afirma que “Em caso de dúvida quanto à seleção da velocidade básica e em obras de excepcional importância, é recomendado um estudo específico para a determinação de  $V_0$ .”.

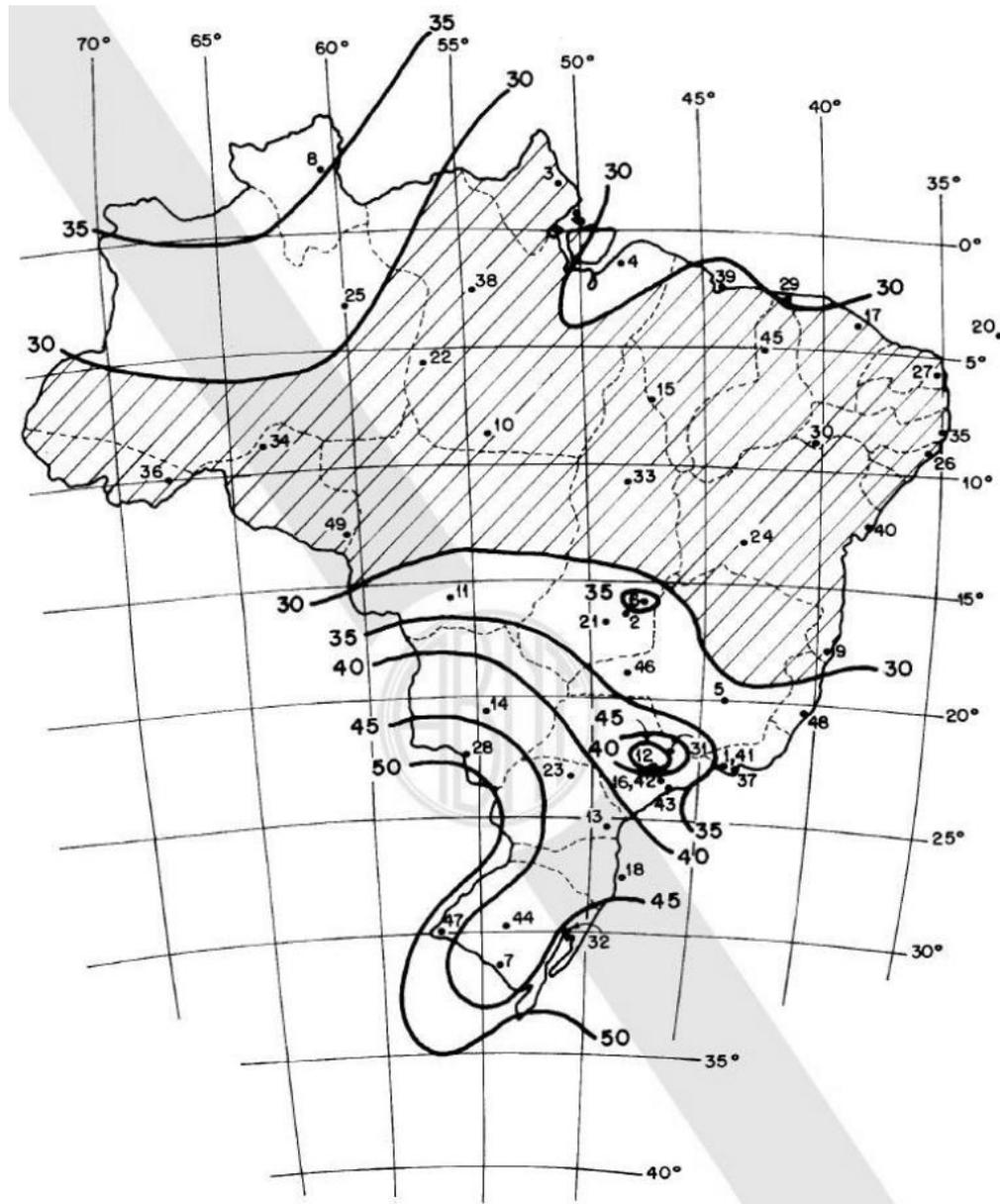


Figura 2: isopletas da velocidade básica  $V_0$  (m/s)  
(ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1988, p. 6)

### 3.1.2 Velocidade Característica

A velocidade característica,  $V_k$ , é a velocidade a ser considerada na determinação da pressão dinâmica exercida pelo vento. Ela representa a velocidade básica,  $V_o$ , afetada por uma série de fatores, que consideram a variação topográfica, dimensões da edificação e estatística, sendo obtida pela equação (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1988, p. 4):

$$V_k = V_o S_1 S_2 S_3 \quad (\text{equação 1})$$

Onde:

$V_k$  = velocidade característica do vento (m/s);

$V_o$  = velocidade básica do vento (m/s);

$S_1$  = fator topográfico;

$S_2$  = fator de dimensões da edificação e rugosidade do terreno (varia com a altura da edificação);

$S_3$  = fator estatístico.

Os fatores  $S_1$ ,  $S_2$  e  $S_3$  são descritos nos próximos itens.

#### 3.1.2.1 Fator topográfico $S_1$

Segundo a Norma (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1988, p. 5), o fator topográfico considera o relevo do terreno e suas variações. Para terreno plano ou fracamente acidentado, o valor de  $S_1 = 1,0$ . Para taludes e morros alongados, nos quais se pode admitir um fluxo bidimensional utiliza-se a figura 3. No ponto A, em morros, e nos pontos A e C, em taludes:  $S_1 = 1,0$ . No ponto B de morros e taludes o  $S_1$  é variável com a altura: para  $\theta \leq 3^\circ$ :  $S_1 = 1,0$ ; para  $6^\circ \leq \theta \leq 17^\circ$  o  $S_1$  é dado pela equação 2, devendo ser maior ou igual a 1:

$$S_1(z) = 1,0 + \left(2,5 - \frac{z}{d}\right) \operatorname{tg}(\theta - 3^\circ) \quad (\text{equação 2})$$

Onde:

$z$  = altura medida a partir da superfície do terreno no ponto considerado;

$d$  = diferença de nível entre a base e o topo do talude ou morro;

$\theta$  = inclinação média do talude ou encosta do morro.

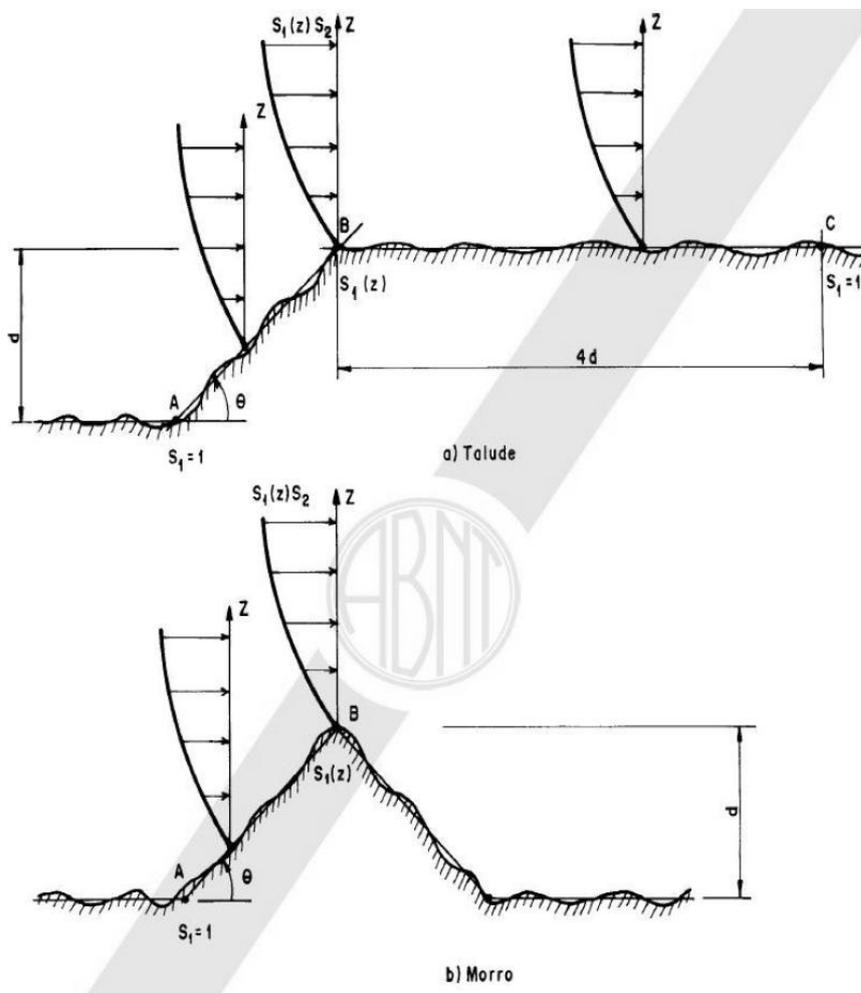


Figura 3: fator topográfico  $S_1$   
(ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1988, p. 7)

Ainda segundo a Norma, para  $\theta \geq 45^\circ$  o  $S_1$  é dado pela equação 3, também devendo ser maior ou igual a 1:

$$S_1(z) = 1,0 + \left( 2,5 - \frac{z}{d} \right) 0,31 \quad (\text{equação 3})$$

Onde:

$z$  = altura medida a partir da superfície do terreno no ponto considerado;

$d$  = diferença de nível entre a base e o topo do talude ou morro;

$\theta$  = inclinação média do talude ou encosta do morro.

Para  $3^\circ \leq \theta \leq 6^\circ$  e  $17^\circ \leq \theta \leq 45^\circ$ , deve-se interpolar linearmente. Por último, para vales profundos protegidos do vento, utiliza-se o valor  $S_1 = 0,9$ . Excetuando-se terreno plano ou fracamente acidentado, os valores dados são apenas uma estimativa aproximada, devendo serem usados com precaução.

### 3.1.2.2 Fator de rugosidade do terreno, dimensões da edificação e altura sobre o terreno $S_2$

A Norma (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1988, p. 8) descreve que este fator:

[...] considera o efeito combinado da rugosidade do terreno, da variação da velocidade do vento com a altura do terreno e das dimensões da edificação ou parte da edificação em consideração.

Em ventos fortes em estabilidade neutra, a velocidade do vento aumenta com a altura acima do terreno. Este aumento depende da rugosidade do terreno e do intervalo de tempo considerado na determinação da velocidade. Este intervalo de tempo está relacionado com as dimensões da edificação, pois edificações pequenas e elementos de edificações são mais afetados por rajadas de curta duração do que grandes edificações.

Para sua determinação, a NBR 6123 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1988, p. 8) divide a rugosidade do terreno em cinco categorias:

- a) categoria I: superfícies lisas de grandes dimensões, com mais de 5 km de extensão, medida na direção e sentido do vento incidente;

- b) categoria II: terrenos abertos em nível ou aproximadamente em nível, com poucos obstáculos isolados, tais como árvores e edificações baixas;
- c) categoria III: terrenos planos ou ondulados com obstáculos, tais como sebes e muros, poucos quebra-ventos de árvores, edificações baixas e esparsas;
- d) categoria IV: terrenos cobertos por obstáculos numerosos e pouco espaçados, em zona florestal, industrial ou urbanizada;
- e) categoria V: terrenos cobertos por obstáculos numerosos, grandes, altos e pouco espaçados.

A NBR 6123 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1988, p. 9) divide as dimensões das edificações em três classes:

- a) classe A: todas as unidades de vedação, seus elementos de fixação e peças individuais de estrutura sem vedação. Toda edificação na qual a maior dimensão horizontal ou vertical não exceda 20 m;
- b) classe B: toda edificação ou parte de edificação para a qual a maior dimensão horizontal ou vertical da superfície frontal esteja entre 20 m e 50 m;
- c) classe C: toda edificação ou parte de edificação para a qual a maior dimensão horizontal ou vertical da superfície frontal exceda 50 m.

Tendo definido a categoria e a classe, procura-se no quadro 1 os parâmetros a serem inseridos na equação 4, para obter o valor de  $S_2$ .

$$S_2 = bF_r \left( \frac{z}{10} \right)^p \quad (\text{equação 4})$$

Onde:

b = parâmetro meteorológico;

$F_r$  = fator de rajada (sempre correspondente à categoria II);

z = altura acima do terreno;

p = parâmetro meteorológico.

| Categoria | $z_s$<br>(m) | Parâmetro | Classes |       |       |
|-----------|--------------|-----------|---------|-------|-------|
|           |              |           | A       | B     | C     |
| I         | 250          | b         | 1,10    | 1,11  | 1,12  |
|           |              | p         | 0,06    | 0,065 | 0,07  |
| II        | 300          | b         | 1,00    | 1,00  | 1,00  |
|           |              | $F_r$     | 1,00    | 0,98  | 0,95  |
| III       | 350          | b         | 0,94    | 0,94  | 0,93  |
|           |              | p         | 0,10    | 0,105 | 0,115 |
| IV        | 420          | b         | 0,86    | 0,85  | 0,84  |
|           |              | p         | 0,12    | 0,125 | 0,135 |
| V         | 500          | b         | 0,74    | 0,73  | 0,71  |
|           |              | p         | 0,15    | 0,16  | 0,175 |

Quadro 1: parâmetros meteorológicos  
(ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1988, p. 9)

### 3.1.2.3 Fator estatístico $S_3$

O fator  $S_3$  considera o grau de segurança e a vida útil da edificação. O quadro 2 apresenta os valores mínimos desse fator (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1988, p. 10).

| Grupo | Descrição   | $S_3$ |
|-------|---|-------|
| 1     | Edificações cuja ruína total ou parcial pode afetar a segurança ou possibilidade de socorro a pessoas após uma tempestade destrutiva (hospitais, quartéis de bombeiros e de forças de segurança, centrais de comunicação, etc.) | 1,10  |
| 2     | Edificações para hotéis e residências. Edificações para comércio e indústria com alto fator de ocupação   | 1,00  |
| 3     | Edificações e instalações industriais com baixo fator de ocupação (depósitos, silos, construções rurais, etc.)  | 0,95  |
| 4     | Vedações (telhas, vidros, painéis de vedação, etc.)   | 0,88  |
| 5     | Edificações temporárias. Estruturas dos grupos 1 a 3 durante a construção   | 0,83  |

Quadro 2: valores mínimos do fator estatístico  $S_3$   
(ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1988, p. 10)

### 3.1.3 Pressão Dinâmica

Tendo definida a velocidade característica, consegue-se determinar a pressão dinâmica exercida pelo vento através da equação 5 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1988, p. 4):

$$q = 0,613V_k^2 \quad (\text{equação 5})$$

Onde:

$q$  = pressão dinâmica (Pa);

$V_k$  = velocidade característica do vento (m/s).

### 3.1.4 Coeficientes de Pressão

Conforme a NBR 6123 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1988, p. 4), “[...] a força do vento depende da diferença de pressão nas faces opostas da parte da edificação em estudo [...]”, por isso existe um coeficiente de pressão na superfície externa e um coeficiente para a superfície interna. Logo, a pressão efetiva é definida por:

$$\Delta p = (c_{pe} - c_{pi})q \quad (\text{equação 6})$$

Onde:

$\Delta p$  = pressão efetiva;

$c_{pe}$  = coeficiente de pressão externa;

$c_{pi}$  = coeficiente de pressão interna.

Se o valor do coeficiente de pressão for positivo, ele corresponde a uma sobrepressão. Se, negativo, a uma sucção (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1988, p. 4), como indica a figura 4.

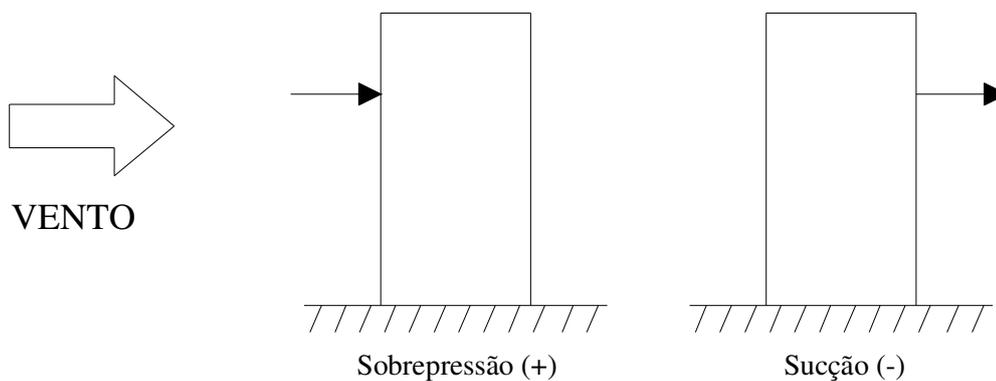


Figura 4: convenção de sinais para sobrepressão e sucção

A figura 5 indica as direções do vento e as faixas às quais correspondem cada letra referentes ao quadro 3 que apresenta valores dos coeficientes de pressão e de forma para edificações retangulares (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1988, p. 14).

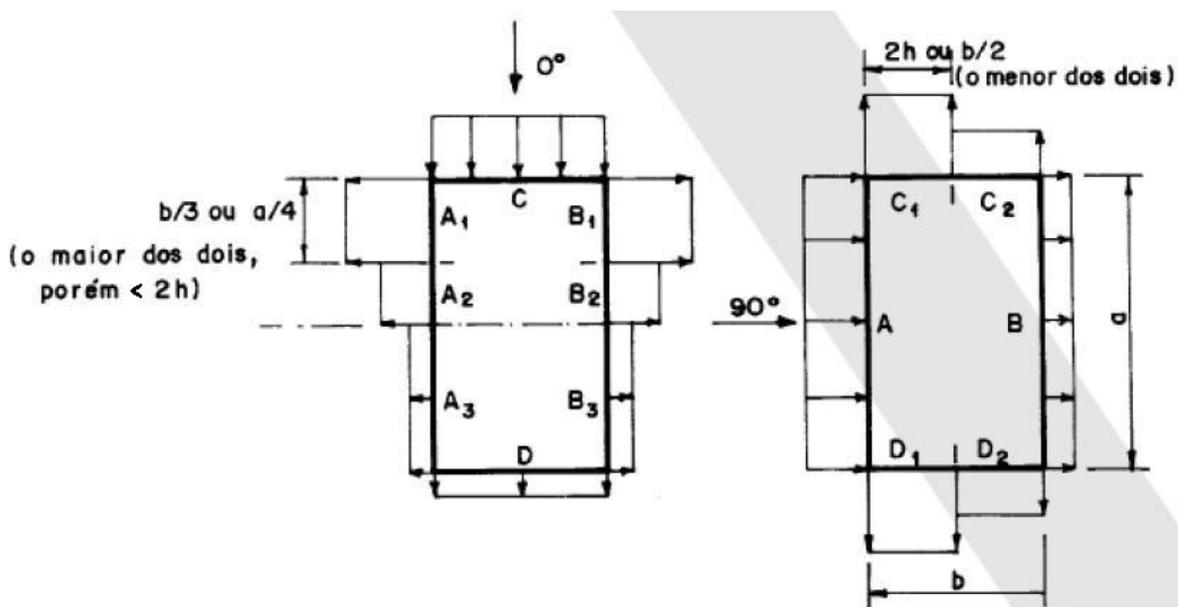
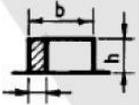
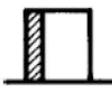
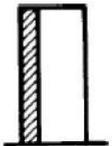


Figura 5: ângulo de incidência do vento e regiões da edificação (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1988, p. 14)

| Altura relativa  |                                       | Valores de $C_e$ para |               |      |      |                     |      |               |               | $C_{pe}$ médio<br> |
|--|---------------------------------------|-----------------------|---------------|------|------|---------------------|------|---------------|---------------|---|
|  |                                       | $\alpha = 0^\circ$    |               |      |      | $\alpha = 90^\circ$ |      |               |               |   |
|  |                                       | $A_1$ e $B_1$         | $A_2$ e $B_2$ | C    | D    | A                   | B    | $C_1$ e $D_1$ | $C_2$ e $D_2$ |   |
| <br>$0,2b$ ou $h$<br>(o menor dos dois)<br>$\frac{h}{b} \leq \frac{1}{2}$ | $1 \leq \frac{a}{b} \leq \frac{3}{2}$ | -0,8                  | -0,5          | +0,7 | -0,4 | +0,7                | -0,4 | -0,8          | -0,4          | -0,9  |
|  | $2 \leq \frac{a}{b} \leq 4$           | -0,8                  | -0,4          | +0,7 | -0,3 | +0,7                | -0,5 | -0,9          | -0,5          | -1,0  |
| <br>$\frac{1}{2} < \frac{h}{b} \leq \frac{3}{2}$                          | $1 \leq \frac{a}{b} \leq \frac{3}{2}$ | -0,9                  | -0,5          | +0,7 | -0,5 | +0,7                | -0,5 | -0,9          | -0,5          | -1,1  |
|  | $2 \leq \frac{a}{b} \leq 4$           | -0,9                  | -0,4          | +0,7 | -0,3 | +0,7                | -0,6 | -0,9          | -0,5          | -1,1  |
| <br>$\frac{3}{2} < \frac{h}{b} \leq 6$                                   | $1 \leq \frac{a}{b} \leq \frac{3}{2}$ | -1,0                  | -0,6          | +0,8 | -0,6 | +0,8                | -0,6 | -1,0          | -0,6          | -1,2  |
|  | $2 \leq \frac{a}{b} \leq 4$           | -1,0                  | -0,5          | +0,8 | -0,3 | +0,8                | -0,6 | -1,0          | -0,6          | -1,2  |

Quadro 3: coeficientes de pressão e de forma, externos, para edificações retangulares (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1988, p. 14)

Algumas considerações são feitas para a utilização do quadro 3:

- para  $a/b$  entre  $3/2$  e  $2$ , interpolar linearmente;
- para o vento a  $0^\circ$ , nas partes  $A_3$  e  $B_3$ , o coeficiente de forma  $C_e$  tem os seguintes valores,
  - para  $a/b = 1$ : mesmo valor das partes  $A_2$  e  $B_2$ ;
  - para  $a/b \geq 2$ :  $C_e = -0,2$ ;
  - para  $1 < a/b < 2$ : interpolar linearmente;
- para cada uma das duas incidências do vento ( $0^\circ$  ou  $90^\circ$ ), o coeficiente de pressão médio externo  $c_{pe}$  médio, é aplicado à parte de barlavento das paredes paralelas ao vento, em uma distância igual a  $0,2b$  ou  $h$ , considerando-se o menor destes dois valores.

### 3.1.5 Forças Estáticas

Segundo a NBR 6123 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1988, p. 4), “A força do vento sobre um elemento plano de edificação de área A atua em direção perpendicular a ele [...]”, sendo calculada por:

$$F = (C_e - C_i) qA \quad (\text{equação 7})$$

Onde:

F = força do vento atuante em uma área A (N);

$C_e$  = coeficiente de forma externo;

$C_i$  = coeficiente de forma interno;

A = área plana considerada (m<sup>2</sup>).

Para os coeficientes de forma é válida a mesma convenção definida para coeficientes de pressão (ver figura 4).

A NBR 6123 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1988, p. 4) também indica que para os casos previstos por ela, “[...] a pressão interna é considerada uniformemente distribuída no interior da edificação. Conseqüentemente, em superfícies internas planas,  $c_{pi} = C_i$ .”

O quadro 3, anteriormente apresentado, indica uma lista com coeficientes de pressão e de forma conforme a região da edificação e o ângulo de incidência do vento.

### 3.1.6 Pressão Interna

Sobre a consideração da pressão interna a NBR 6123 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1988, p. 12) dispõe que:

Se a edificação for totalmente impermeável ao ar, a pressão no seu interior será invariável no tempo e independente da velocidade da corrente de ar externa. Porém, usualmente as paredes e/ou a cobertura de edificações consideradas como fechadas, em condições normais de serviço ou como consequência de acidentes, permitem a passagem do ar, modificando-se as condições ideais supostas nos ensaios. [...]

[...] são considerados impermeáveis os seguintes elementos construtivos e vedações: lajes e cortinas de concreto armado ou protendido; paredes de alvenaria, de pedra, de tijolos, de blocos de concreto e afins, sem portas, janelas ou quaisquer outras aberturas. [...] A permeabilidade deve-se à presença de aberturas, tais como juntas entre painéis de vedação e entre telhas, frestas em portas e janelas, ventilações em telhas e telhados, vãos abertos de portas e janelas, chaminés, lanternins, etc.

Os valores dos coeficientes de pressão interna podem ser definidos utilizando-se métodos descritos pela NBR 6123/1988.

### 3.2 EFEITOS DE VIZINHANÇA

Segundo a NBR 6123 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1988, p. 58), existem situações em que devem ser considerados efeitos causados no vento por edificações vizinhas àquela em estudo, sendo que elas: “[...] podem causar aumento das forças do vento de três modos diferentes [...]”. Um dos modos é o **efeito Venturi**, sobre o qual a Norma (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1988, p. 58) descreve: “Edificações vizinhas podem, por suas dimensões, forma e orientação, causar um ‘afunilamento’ do vento, acelerando o fluxo de ar, com conseqüente aumento nas pressões.”.

A segunda forma de influência referida pela Norma (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1988, p. 58) é dita **por deflexão do vento na direção vertical**:

Edificações altas defletem para baixo parte do vento que incide em sua fachada de barlavento, aumentando a velocidade em zonas próximas ao solo. Edificações mais baixas, situadas nestas zonas, poderão ter as cargas do vento aumentadas por este efeito, com os coeficientes de forma atingindo valores entre - 1,5 e - 2,0.

A terceira forma é **pela turbulência da esteira**, sobre o qual a Norma (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1988, p. 58) define:

Uma edificação situada a sotavento de outra pode ser afetada sensivelmente pela turbulência gerada na esteira da edificação de barlavento, podendo causar efeitos dinâmicos (‘efeitos de golpe’) consideráveis e alterações nas pressões. Estas são

particularmente importantes em edificações com coberturas e painéis de vedação feitos de materiais leves.

### 3.3 EFEITOS DINÂMICOS

Para o cálculo dos esforços produzidos pelo vento nas edificações, utiliza-se a pressão dinâmica para definir forças estáticas equivalentes. Porém, como indica a Norma em seu anexo H (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1988, p. 59):

Certas edificações esbeltas e flexíveis apresentam comportamento intrinsecamente dinâmico, quando expostas ao vento, sendo que nem sempre a velocidade mais desfavorável é a velocidade máxima prevista para o vento. [...] A resposta dinâmica na edificação à excitação do vento depende não só de sua forma externa, mas também dos materiais empregados, do amortecimento e da rigidez estrutural.

A melhor forma de definir esses efeitos é através de ensaios em túnel de vento, porém esses efeitos não serão tratados neste trabalho.

## 4 O TÚNEL DE VENTO

Neste capítulo será apresentado um breve histórico sobre a utilização de túneis de vento para determinação de esforços em edificações e o mecanismo de ensaio do túnel do Laboratório de Aerodinâmica das Construções (LAC) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS).

### 4.1 HISTÓRICO

Foi na Universidade de Melbourne, Austrália, que tiveram lugar os primeiros ensaios para definição dos esforços do vento em edificações. Eles foram desenvolvidos por Kernot e Mann entre os anos de 1891 e 1894, com o vento sendo gerado por um ventilador dentro de um túnel aerodinâmico de secção 30,5x30,5 cm. Porém, o desenvolvimento dos túneis aerodinâmicos atendeu os interesses da aeronáutica, que necessitava de simulação de um vento sem turbulência, que para alguns casos de edificações, gera valores bastante diferentes dos reais (BLESSMANN, 1990, p. 110-111). Como cita Blessmann (1990, p. 111):

Estudos sobre edificações reais mostraram diferenças muito importantes entre as forças aerodinâmicas reais e as medidas em modelos reduzidos em túneis aerodinâmicos. [...] Para reproduzir corretamente os efeitos do vento sobre as edificações e poder aplicar às edificações reais os resultados obtidos em túneis de vento, é de importância fundamental a boa reprodução no túnel de vento da camada limite atmosférica.

Blessmann (1990, p. 112) ainda afirma:

A procura de resultados mais fiéis originou o desenvolvimento de diversas técnicas de simulação de características dos ventos naturais em laboratório. Por sua vez, uma maior precisão dos resultados tornou-se importante nos últimos anos, à medida que o desenvolvimento arquitetônico e estrutural permitiram a construção de edificações mais arrojadas, leves e esbeltas.

## 4.2 SIMULAÇÃO DO VENTO NATURAL

Existem dois mecanismos principais para a simulação das características do vento natural:

- a) cobrir um comprimento considerável do piso do túnel com materiais para simular a rugosidade do terreno;
- b) utilizar bem a barlavento perfis que fechem parcialmente a secção transversal do túnel.

Sobre o primeiro mecanismo, Blessmann (1990, p. 112-113) afirma “Este dispositivo corresponde à principal fonte de turbulência na atmosfera a baixa altitude, em ventos em condições de estabilidade neutra.”. A respeito do segundo mecanismo Blessmann (1990, p. 113) cita alguns tipos:

- telas curvas ou telas planas de malha variável: perfil de velocidades médias e turbulência fina;
- grelhas de barras horizontais de secção retangular ou circular, variando o espaçamento e/ou a espessura: perfil de velocidades médias e turbulência média;
- grelhas de malha quadrada ou retangular, constituídas de barras de secção retangular: turbulência superposta a uma corrente de ar aproximadamente uniforme;
- grelha única de malha variável ou diversas grelhas superpostas: perfil de velocidades médias e turbulência;
- tela uniforme: turbulência fina superposta a uma corrente de ar uniforme;
- barras finas metálicas de secção circular, variando o diâmetro e/ou o espaçamento: perfil de velocidades médias e turbulência fina;
- triângulos de diversas dimensões e proporções, cheios ou vazados, de lados retos ou curvos: perfil de velocidades médias e turbulência.

Para alguns casos a simulação do vento pode ser feita utilizando-se apenas um desses perfis citados anteriormente. Porém, as características do vento podem ser mais bem reproduzidas combinando-se um desses perfis com os dispositivos de rugosidade (BLESSMANN, 1990, p. 113). A figura 6 apresenta alguns exemplos dessas combinações.

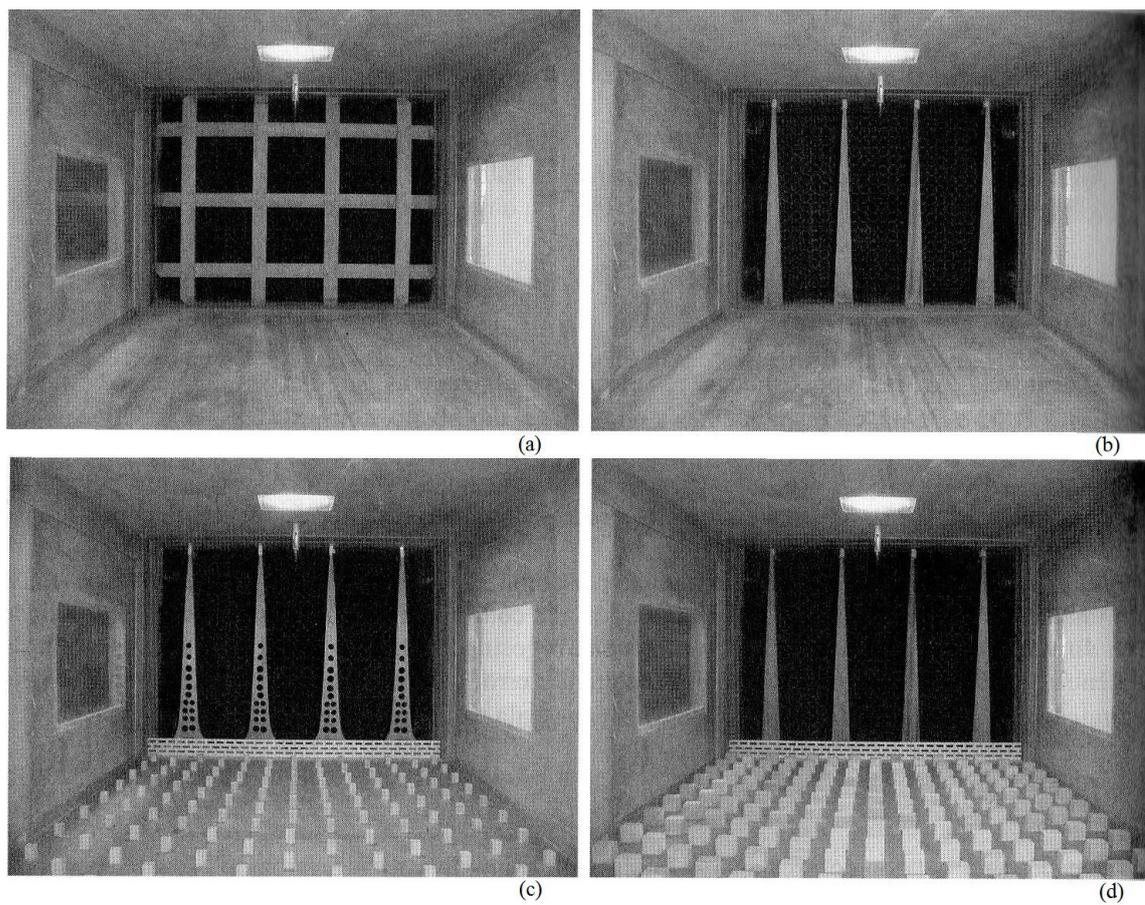


Figura 6: dispositivos de geração das diferentes camadas limites do túnel de vento Prof. Joaquim Blessmann: (a) grelha; (b)  $p = 0,11$ ; (c)  $p = 0,23$ ; (d)  $p = 0,34$  (LOREDO-SOUZA et al, 2004, p. 150)

### 4.3 O TÚNEL PROF. JOAQUIM BLESSMANN

O túnel de vento Prof. Joaquim Blessmann, instalado no Laboratório de Aerodinâmica das Construções (LAC) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), permite o desenvolvimento de estudos sobre os efeitos estáticos e dinâmicos em construções. A figura 7 apresenta a planta baixa do túnel.

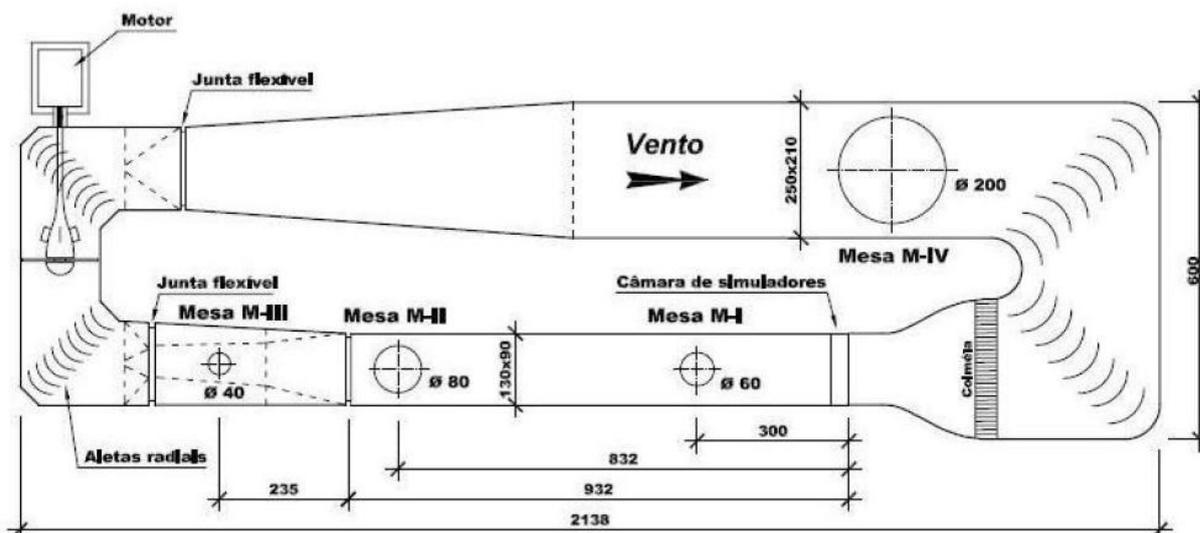


Figura 7: planta baixa do túnel de vento Prof. Joaquim Blessmann (UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL, 2010a)

Sobre ele o LAC (UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL, 2010a) informa:

Trata-se de um túnel de vento de retorno fechado, projetado especificamente para ensaios estáticos e dinâmicos de modelos de construções civis. Este túnel permite a simulação das principais características de ventos naturais. Tem relação comprimento / altura da câmara principal de ensaios superior a 10, e dimensões  $1,30\text{m} \times 0,90\text{m} \times 9,32\text{m}$  (largura  $\times$  altura  $\times$  comprimento). A velocidade máxima do escoamento de ar nesta câmara, com vento uniforme e suave, sem modelos, é de 42 m/s (150 km/h). As hélices do ventilador são acionadas por um motor elétrico de 100 HP e a velocidade do escoamento é controlada através de aletas radiais metálicas que obstruem a passagem do ar.

Para os ensaios dos modelos, o túnel dispõe de quatro mesas giratórias, cada uma projetada para uma finalidade, conforme exemplifica Blessmann (1990, p. 114):

- a) mesa M-I: ensaios do tipo aeronáutico no piso do túnel; com camada limite de pequena espessura e fluxo de ar de baixa turbulência, pesquisa básica em formas geométricas simples, em modelos bi ou tridimensionais; ensaios para a construção civil com geradores de turbulência colocados na câmara de simuladores;
- b) mesa M-II: ensaios do tipo aeronáutico no eixo do túnel; ensaios para construção civil, com blocos colocados no piso e/ou geradores de turbulência na câmara de simuladores e/ou em outras seções; idem para jatos transversais;
- c) mesa M-III: mesa de grande rigidez, situada no primeiro divergente do túnel. As frequências naturais, segundo os três eixos ortogonais usuais, estão acima

de 500 Hz. Esta mesa foi construída especificamente para estudos dinâmicos em estruturas de grande alteamento, tais como chaminés, pilares de viadutos, torres de televisão, de microondas e mastros;

- d) mesa M-IV: no retorno do túnel, onde a secção transversal mede 240 x 210 cm. Para ensaios de dissipação de fumaça e de gases industriais, influência de topografia sobre os ventos, efeitos de interação, modelos de pontes, etc.

Conforme o LAC (UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL, 2010b), para edifícios, através dos ensaios no túnel, pode-se determinar:

- a) prognóstico de pressões, tensões, deformações, deslocamentos e características das vibrações;
- b) avaliação de requisitos estruturais para otimização de projetos para resistir as forças do vento;
- c) influência de detalhes arquitetônicos;
- d) economia e segurança no projeto;
- e) influência do vento em ventilação e climatização de edificações;
- f) monitoramento da resposta do vento em estruturas reais.

#### 4.4 METODOLOGIA EMPREGADA

Nesta seção será vista a metodologia utilizada para a obtenção das pressões através de ensaios no túnel de vento (trabalho não publicado)<sup>1</sup>. No modelo a ser ensaiado, são simulados todos os detalhes significativos da edificação real para que as condições de semelhança sejam preservadas. No entorno do modelo instrumentado, são reproduzidas as edificações mais próximas, para que as condições de escoamento correspondam o mais fielmente possível às condições reais às quais a edificação ensaiada estará sujeita depois de concluída.

É simulado vento com perfil potencial de velocidades médias, que é expresso por:

---

<sup>1</sup> Informações obtidas do relatório técnico Ação Estática do Vento sobre o Edifício do Empreendimento Odebrecht Atlanta, de dezembro de 2007. Este relatório foi elaborado no Laboratório de Aerodinâmica das Construções da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. A autoria do relatório é do prof. Acir Mércio Loredo-Souza e equipe.

$$\frac{\bar{V}(x_3)}{\bar{V}_{ref}} = \left( \frac{x_3}{x_{ref}} \right)^p \quad (\text{equação 8})$$

Onde:

$\bar{V}(x_3)$  = velocidade média na altura  $x_3$  (m/s);

$\bar{V}_{ref}$  = velocidade média em uma altura de referência (no túnel,  $x_{ref} = 450$  mm) (m/s);

$p$  = expoente referente à rugosidade do terreno.

As pressões no modelo são registradas por meio de transdutores elétricos de pressão e, a partir dos registros de séries temporais, são calculados os coeficientes de pressão externa médio, rms, máximo e mínimo nas faces do modelo. Para os empreendimentos estudados neste trabalho, o período de aquisição dos transdutores foi de 16,77 segundos a uma taxa de cerca de 488,49 valores por segundo (são coletados 8192 valores no período de aquisição). O coeficiente de pressão média é calculado pela equação 9:

$$\bar{c}_p = \frac{\frac{1}{T} \int_0^T p(t) dt}{\bar{q}} \quad (\text{equação 9})$$

Onde:

$\bar{c}_p$  = coeficiente de pressão média;

$p(t)$  = pressão instantânea, na superfície da edificação, medida em relação à pressão estática de referência;

$T$  = período de amostragem;

$\bar{q}$  = pressão dinâmica de referência.

Por sua vez o coeficiente de pressão rms é obtido pela equação 10:

$$\tilde{c}_p = \frac{\sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T (p(t) - \bar{p})^2 dt}}{\bar{q}} \quad (\text{equação 10})$$

Onde:

$\tilde{c}_p$  = coeficiente de pressão rms;

$\bar{p}$  = valor médio de p(t) para o período de amostragem T.

O coeficiente de pressão máxima é calculado por:

$$\hat{c}_p = \frac{P_{\max}}{\bar{q}} \quad (\text{equação 11})$$

Onde:

$\hat{c}_p$  = coeficiente de pressão máxima;

$P_{\max}$  = valor máximo de p(t) para o período de amostragem T.

Já o coeficiente de pressão mínima é obtido pela equação 12:

$$\check{c}_p = \frac{P_{\min}}{\bar{q}} \quad (\text{equação 12})$$

Onde:

$\check{c}_p$  = coeficiente de pressão mínima;

$p_{\min}$  = valor mínimo de  $p(t)$  para o período de amostragem  $T$ .

No relatório é afirmado que as pressões locais esperadas, relevantes ao projeto dos elementos de revestimento, podem ser determinadas através da combinação dos coeficientes aerodinâmicos, com a estatística do vento na região de construção da edificação. Não há um total consenso quanto a qual procedimento para determinação das pressões locais é o mais significativo para o projeto dos elementos de revestimento, entretanto, três alternativas são possíveis. A primeira utiliza o conceito de fator de pico, sendo a pressão de projeto dada por:

$$p_o = \bar{p} + g\tilde{p} \quad (\text{equação 13})$$

A segunda alternativa utiliza diretamente os valores de pico medidos no túnel de vento, sendo a pressão de projeto dada por:

$$p_o = \bar{q}c_{pp} \quad (\text{equação 14})$$

A terceira alternativa consiste em utilizar os valores médios dos coeficientes de pressão combinados com pressões dinâmicas de pico. A pressão de projeto é dada por:

$$p_o = \bar{q}\bar{c}_p \quad (\text{equação 15})$$

Onde:

$p_o$  = pressão de projeto;

$\bar{p}$  = carga causada pelo vento médio (média sobre uma hora, usualmente);

$g$  = fator de pico equivalente;

$\tilde{p}$  = média quadrática das flutuações em torno da pressão média;

$\bar{q}$  = pressão dinâmica de referência, medida sobre um intervalo de uma hora;

$c_{pp}$  = coeficiente de pressão de pico (mínimo ou máximo, medido no túnel de vento);

$\tilde{q}$  = pressão dinâmica de referência, medida sobre um intervalo de três segundos;

$\bar{c}_p$  = coeficiente de pressão médio.

No túnel de vento do LAC, as três alternativas de cálculo são utilizados, considerando-se, posteriormente, a combinação dos piores resultados. Com essas pressões, são criados os diagramas de blocos referentes a cada edificação ensaiada. O diagrama de bloco é uma imagem, da edificação estudada, que tem áreas pintadas com diferentes cores para representar as diferentes pressões que ocorrem na fachada.

## 5 EMPREENDIMENTOS ESTUDADOS

Neste capítulo serão apresentados os empreendimentos que foram estudados para a realização do trabalho, bem como algumas considerações gerais. Os ensaios foram realizados entre os anos de 2007 e 2009 por solicitação das empresas construtoras e/ou calculistas, reforçando, portanto, que eles não foram realizados com o intuito desta pesquisa. Os empreendimentos são:

- a) Cidade Jardim Corporate Center (São Paulo-SP);
- b) Nuova Vita (Caxias do Sul-RS);
- c) Odebrecht Atlanta (Alphaville-SP);
- d) Prosperitas (São Paulo-SP).

Nos próximos itens, serão apresentadas características de cada empreendimento, como dimensões, escala do modelo, número de tomadas de pressão, e os parâmetros utilizados para calcular as pressões através da NBR6123/1988. Apresenta-se, também, os diagramas de blocos com as piores sucções e sobrepressões encontradas no ensaio em túnel de vento comparadas com os valores calculados. Para fins práticos do estudo, será apresentada apenas uma fachada para cada situação (sucção ou sobrepressão), sendo ela representativa do todo, devido a fato de não haver grandes diferenças entre as fachadas.

Devido a limitações da Norma, foi necessário considerar os edifícios como tendo base retangular com as maiores dimensões em planta, pois ela só considera edificações neste formato. Outra simplificação da Norma, é que os coeficientes aerodinâmicos fornecidos são referentes apenas a ventos incidindo a  $0^\circ$  e a  $90^\circ$  na edificação, ou seja, sempre perpendiculares a uma das fachadas.

## 5.1 CIDADE JARDIM CORPORATE CENTER (trabalho não publicado)<sup>2</sup>

O empreendimento Cidade Jardim é composto por três edificações basicamente retangulares mas com diferenças de dimensões entre si. Neste trabalho será estudada apenas a Torre I do empreendimento por ela ser a torre mais esbelta. Na figura 8, é apresentada uma foto da maquete do empreendimento (a Torre I é a mais à direita), na figura 9, são apresentadas as fachadas frontal e lateral do edifício em estudo, com suas respectivas dimensões da base e altura e a figura 10 apresenta a planta baixa da edificação.



Figura 8: maquete do empreendimento Cidade Jardim

---

<sup>2</sup> As informações contidas nesse item foram obtidas do relatório técnico Ação Estática do Vento sobre a Torre I, Empreendimento Cidade Jardim Corporate Center, São Paulo-SP. Este relatório foi elaborado pelo Laboratório de Aerodinâmica das Construções da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, em julho de 2009. A autoria do relatório é do prof. Acir Mércio Loredo-Souza e equipe.

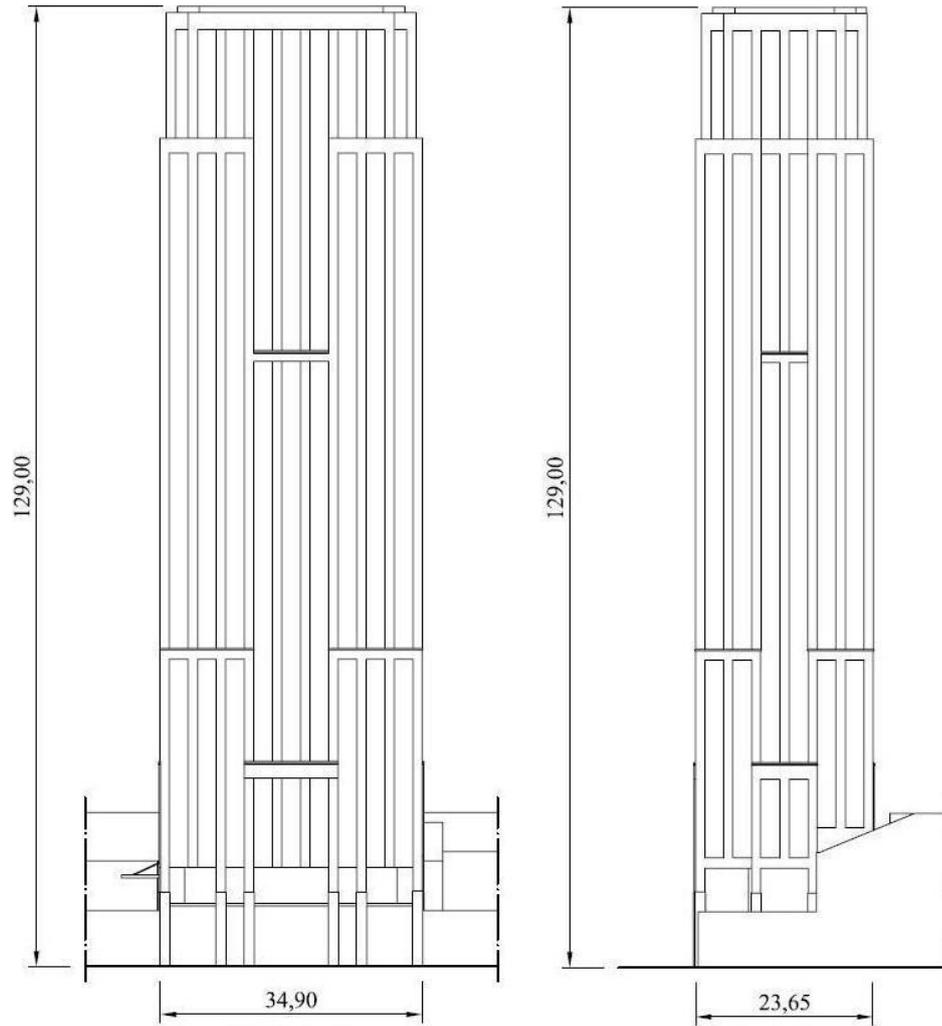


Figura 9: fachadas frontal e lateral da Torre I do empreendimento Cidade Jardim (medidas em metros)

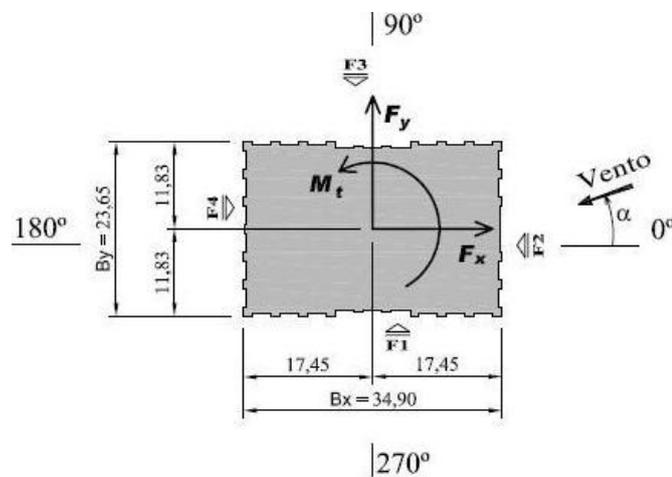


Figura 10: planta baixa do pavimento da Torre I do empreendimento Cidade Jardim (medidas em metros)

### 5.1.1 Ensaio Túnel de Vento

Foi construído um modelo reduzido em escala 1/400, sendo ele instrumentado com um total de 233 tomadas de pressão, distribuídas de modo a permitir um levantamento representativo das pressões em toda a edificação. O modelo foi girado de 360°, medindo as pressões a cada 15° de incidência do vento, totalizando 5592 registros de pressão. De acordo com as características da rugosidade do terreno em torno do empreendimento, foi simulado um vento com perfil potencial de velocidades médias de expoente  $p = 0,23$  (o que representa uma rugosidade entre as categorias III e IV). A figura 11 apresenta a área simulada no túnel.

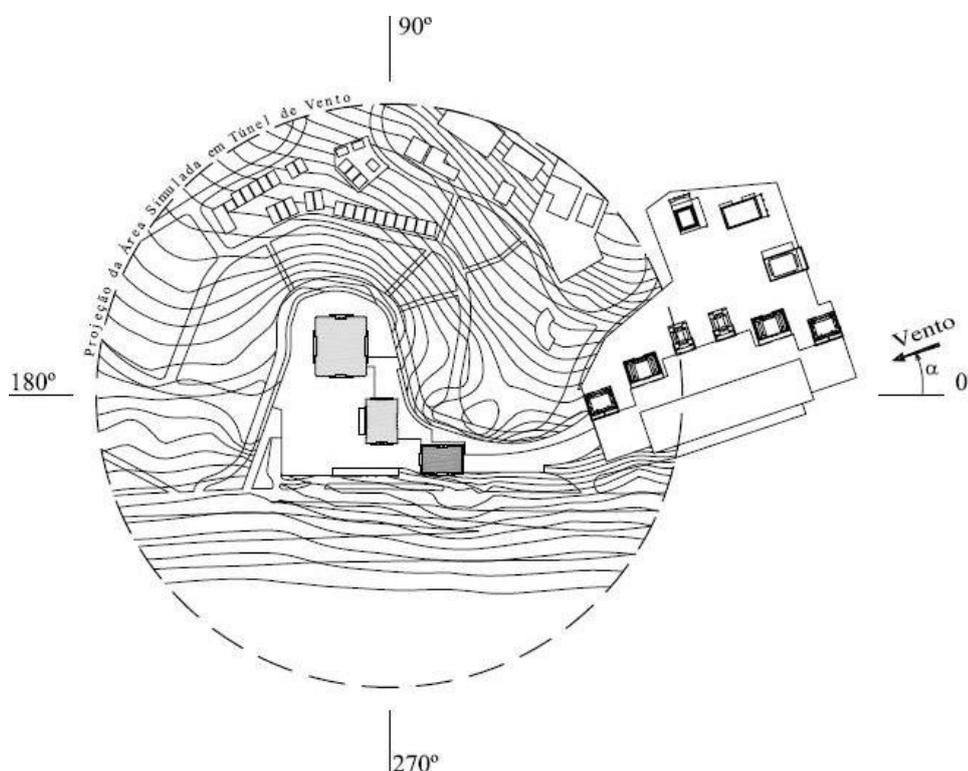


Figura 11: área simulada no túnel de vento para o empreendimento Cidade Jardim

Para os cálculos no túnel de vento foram utilizados os parâmetros apresentados no quadro 4.

| $V_0$ (m/s) | $S_1$ | $S_3$ | $S_2$ |      | $V_k$ (m/s) |      | $q_k$ (Pa) |     |
|-------------|-------|-------|-------|------|-------------|------|------------|-----|
|             |       |       | 3s    | 1h   | 3s          | 1h   | 3s         | 1h  |
| 38          | 1     | 1     | 1,19  | 0,88 | 45,2        | 33,4 | 1252       | 684 |

Quadro 4: parâmetros do cálculo no túnel de vento para a Torre I do empreendimento Cidade Jardim

Os valores foram obtidos admitindo-se que todos os elementos de revestimento externo permaneçam fechados, gerando-se, assim, os diagramas de blocos da figura 12, para sucções, e da figura 13, para sobrepressões. Para este empreendimento é apresentada a fachada 3 (que se encontra voltada para o ângulo 90° na figura 11).

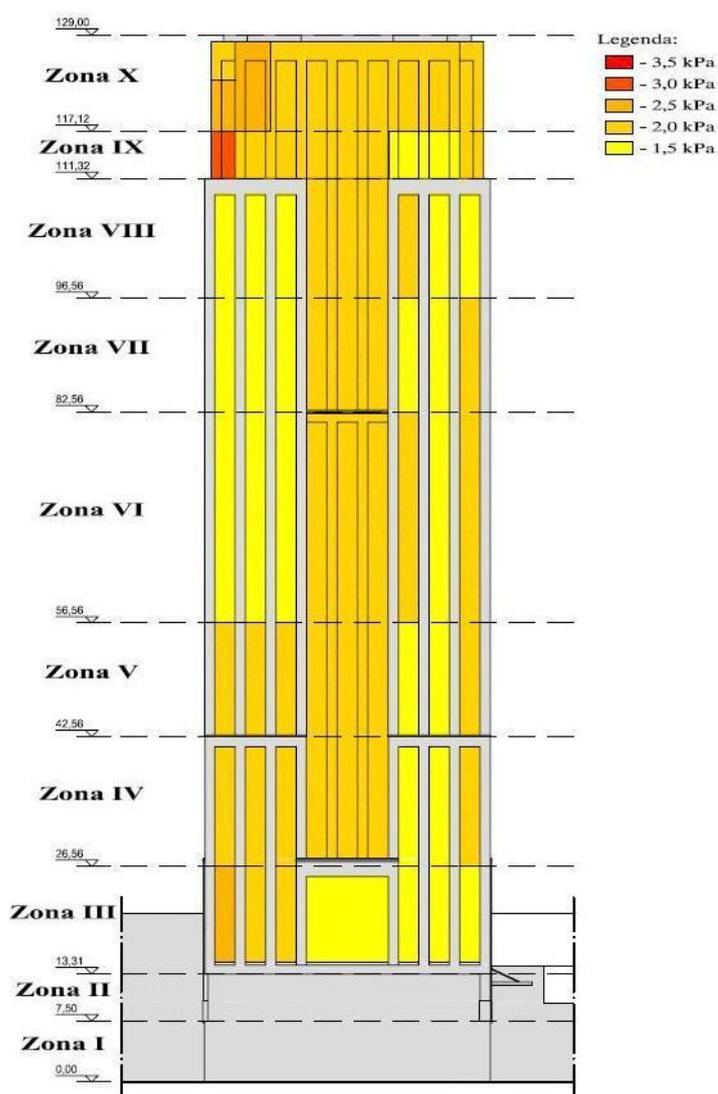


Figura 12: sucções obtidas no túnel para a fachada da Torre I do empreendimento Cidade Jardim

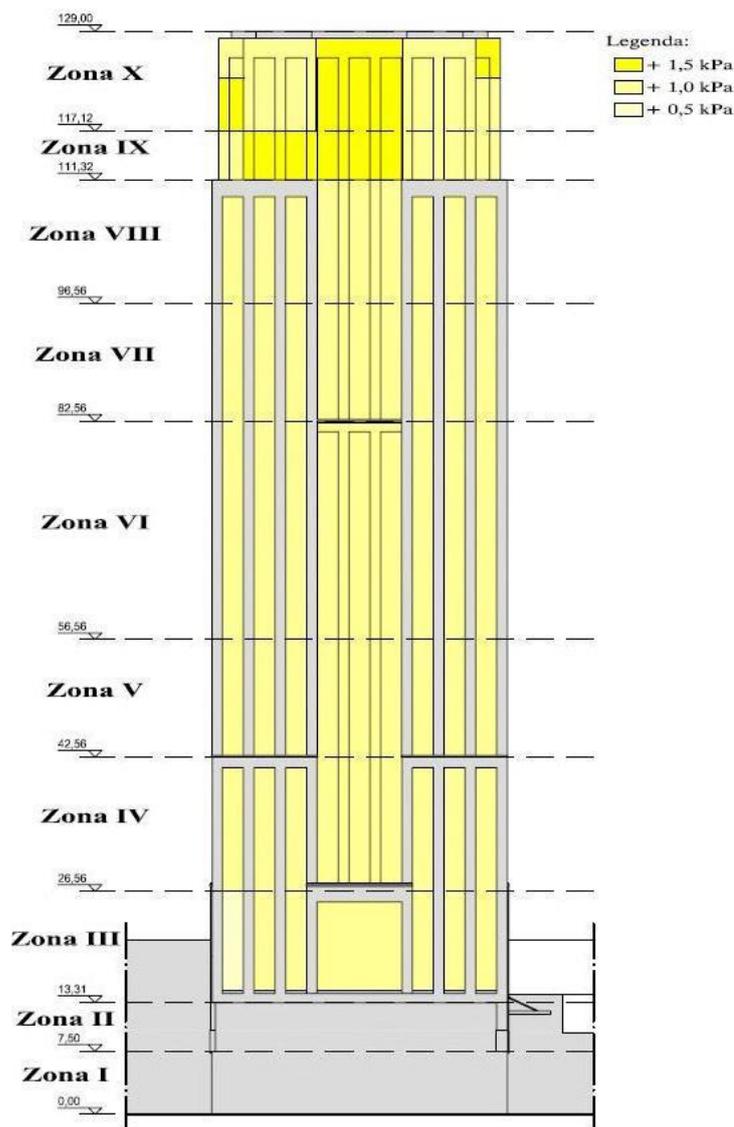


Figura 13: sobrepressões obtidas no túnel para a fachada da Torre I do empreendimento Cidade Jardim

### 5.1.2 Resultados pela NBR 6123/1988

Para os cálculos com a utilização da norma, foram considerados os parâmetros apresentados no quadro 5.

| $V_o$ (m/s) | $S_1$ | $S_2$ | $S_3$ | $V_k$ (m/s) | $q_k$ (Pa) |
|-------------|-------|-------|-------|-------------|------------|
| 38          | 1,0   | 1,21  | 1,0   | 45,98       | 1295,98    |

Quadro 5: parâmetros do cálculo pela Norma para a Torre I do empreendimento Cidade Jardim

Por recomendação da Norma (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1988, p. 9) o fator  $S_2$  foi calculado para o topo da edificação. Os valores dos coeficientes de pressão foram majorados em 30% devido aos efeitos de vizinhança. As sucções estão representadas na figura 14, e as sobrepressões na figura 15.

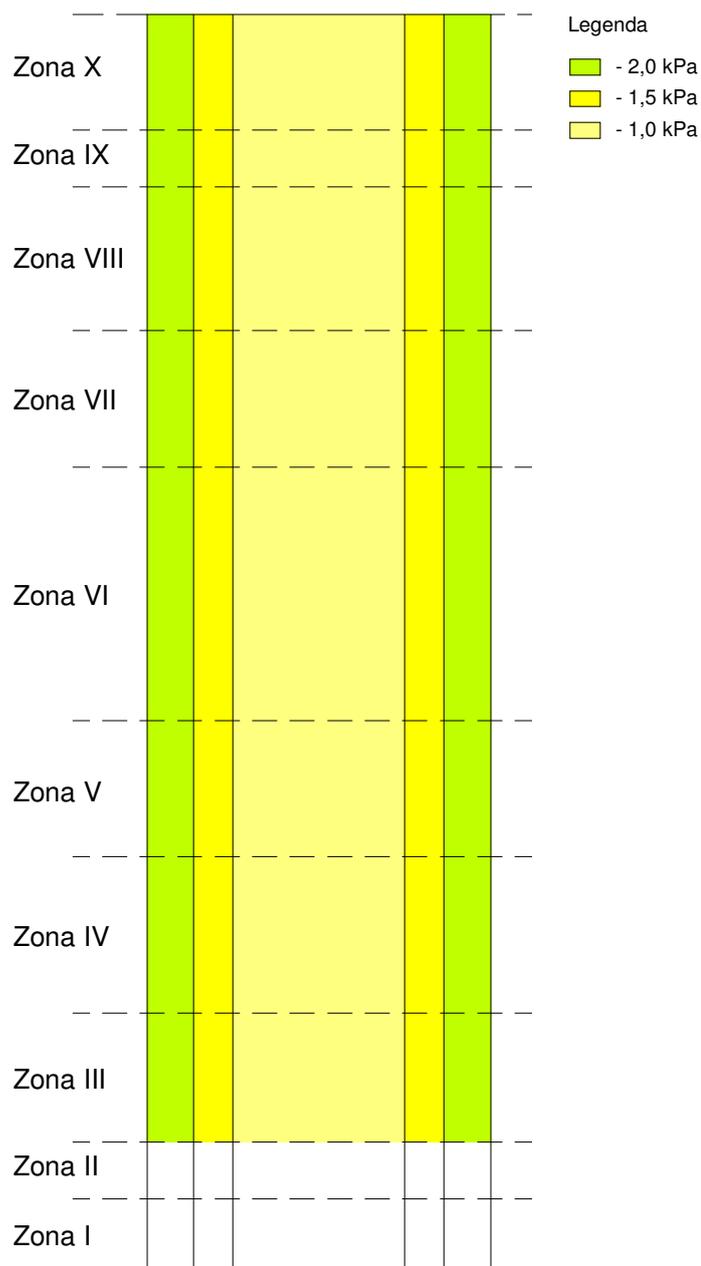


Figura 14: sucções obtidas pela Norma para a fachada da Torre I do empreendimento Cidade Jardim

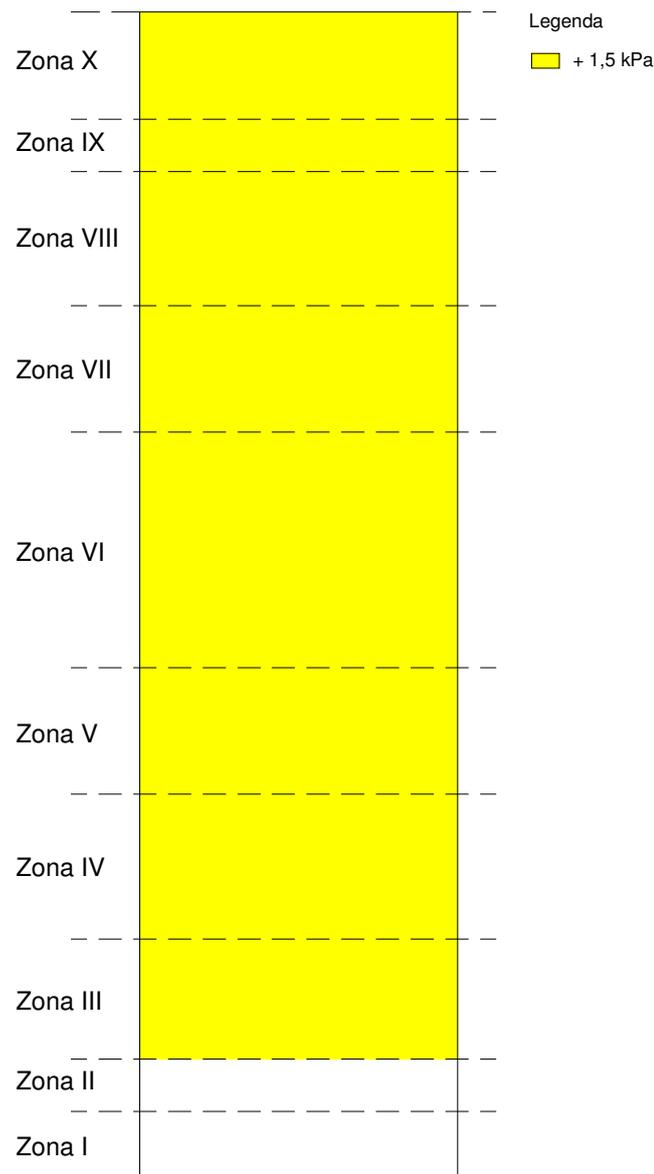


Figura 15: sobrepressões obtidas pela Norma para a fachada da Torre I do empreendimento Cidade Jardim

### 5.1.3 Comparativo dos resultados

A seguir encontram-se os quadros com o comparativo dos valores obtidos pela NBR 6123/1988 e pelo ensaio em túnel de vento para a Torre I do empreendimento Cidade Jardim. Foi considerada a divisão de zonas verticais do túnel de vento e a divisão de regiões horizontais obtidas através da Norma (ver apêndice A), adotando-se o maior valor presente dentro desses limites, exceção é feita para as sobrepressões, pois não há divisão de regiões,

sendo consideradas apenas as zonas verticais. O quadro 6 apresenta o comparativo para as sucções, e o quadro 7, para as sobrepressões.

| Zona | Região 1     |                |               | Região 2     |                |               | Região 3     |                |               | Região 4     |                |               | Região 5     |                |               |
|------|--------------|----------------|---------------|--------------|----------------|---------------|--------------|----------------|---------------|--------------|----------------|---------------|--------------|----------------|---------------|
|      | NBR<br>(kPa) | Túnel<br>(kPa) | NBR/<br>Túnel |
| X    | -2,0         | -2,5           | 0,80          | -1,5         | -2,5           | 0,60          | -1,0         | -2,0           | 0,50          | -1,5         | -2,0           | 0,75          | -2,0         | -2,0           | 1,00          |
| IX   | -2,0         | -3,0           | 0,67          | -1,5         | -2,0           | 0,75          | -1,0         | -2,0           | 0,50          | -1,5         | -1,5           | 1,00          | -2,0         | -2,0           | 1,00          |
| VIII | -2,0         | -1,5           | 1,33          | -1,5         | -1,5           | 1,00          | -1,0         | -2,0           | 0,50          | -1,5         | -1,5           | 1,00          | -2,0         | -1,5           | 1,33          |
| VII  | -2,0         | -1,5           | 1,33          | -1,5         | -1,5           | 1,00          | -1,0         | -2,0           | 0,50          | -1,5         | -1,5           | 1,00          | -2,0         | -2,0           | 1,00          |
| VI   | -2,0         | -1,5           | 1,33          | -1,5         | -1,5           | 1,00          | -1,0         | -2,0           | 0,50          | -1,5         | -1,5           | 1,00          | -2,0         | -2,0           | 1,00          |
| V    | -2,0         | -2,0           | 1,00          | -1,5         | -2,0           | 0,75          | -1,0         | -2,0           | 0,50          | -1,5         | -1,5           | 1,00          | -2,0         | -2,0           | 1,00          |
| IV   | -2,0         | -2,0           | 1,00          | -1,5         | -2,0           | 0,75          | -1,0         | -2,0           | 0,50          | -1,5         | -1,5           | 1,00          | -2,0         | -2,0           | 1,00          |
| III  | -2,0         | -2,5           | 0,80          | -1,5         | -2,0           | 0,75          | -1,0         | -1,5           | 0,67          | -1,5         | -1,5           | 1,00          | -2,0         | -1,5           | 1,33          |
| II   | -            | -              | -             | -            | -              | -             | -            | -              | -             | -            | -              | -             | -            | -              | -             |
| I    | -            | -              | -             | -            | -              | -             | -            | -              | -             | -            | -              | -             | -            | -              | -             |

Quadro 6: comparativo dos resultados para sucções na fachada da Torre I do empreendimento Cidade Jardim

| Zona | NBR<br>(kPa) | Túnel<br>(kPa) | NBR/<br>Túnel |
|------|--------------|----------------|---------------|
| X    | 1,5          | 1,5            | 1,00          |
| IX   | 1,5          | 1,5            | 1,00          |
| VIII | 1,5          | 1,0            | 1,50          |
| VII  | 1,5          | 1,0            | 1,50          |
| VI   | 1,5          | 1,0            | 1,50          |
| V    | 1,5          | 1,0            | 1,50          |
| IV   | 1,5          | 1,0            | 1,50          |
| III  | 1,5          | 1,0            | 1,50          |
| II   | -            | -              | -             |
| I    | -            | -              | -             |

Quadro 7: comparativo dos resultados para sobrepressões na fachada da Torre I do empreendimento Cidade Jardim

Em relação às sucções, mais da metade dos resultados da Norma igualaram ou superaram os resultados em túnel de vento, as maiores diferenças de valores apresentaram-se na região central (região 3) da edificação, atingindo entre 50% e 67% dos valores obtidos no túnel de vento. Obteve-se, também, diferenças em algumas zonas das regiões 1 e 2, mas estas variaram de 60% a 80%. Para as sobrepressões, a Norma apresentou bons resultados, igualando ou superando os valores do túnel de vento em todas as zonas da edificação.

## 5.2 NUOVA VITA (trabalho não publicado)<sup>3</sup>

O empreendimento Nuova Vita é composto por quatro edificações pareadas, duas iguais com dimensões maiores e as outras duas com dimensões menores, com formato bastante irregular. Neste trabalho será estudada apenas a Torre Allegria do empreendimento por ela ser a torre mais esbelta. Na figura 16, é apresentada uma perspectiva artística do empreendimento, na figura 17, são apresentadas as fachadas frontal e lateral do edifício em estudo, com suas respectivas dimensões da base e altura e a figura 18 apresenta a planta baixa da edificação.



Figura 16: perspectiva artística do empreendimento Nuova Vita

---

<sup>3</sup> As informações contidas nesse item foram obtidas do relatório técnico Ação Estática do Vento sobre a Torre Allegria do Empreendimento Nuova Vita, Construção Merit Engenharia, Caxias do Sul-RS. Este relatório foi elaborado pelo Laboratório de Aerodinâmica das Construções da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, em fevereiro de 2009. A autoria do relatório é do prof. Acir Mércio Loredou-Souza e equipe.

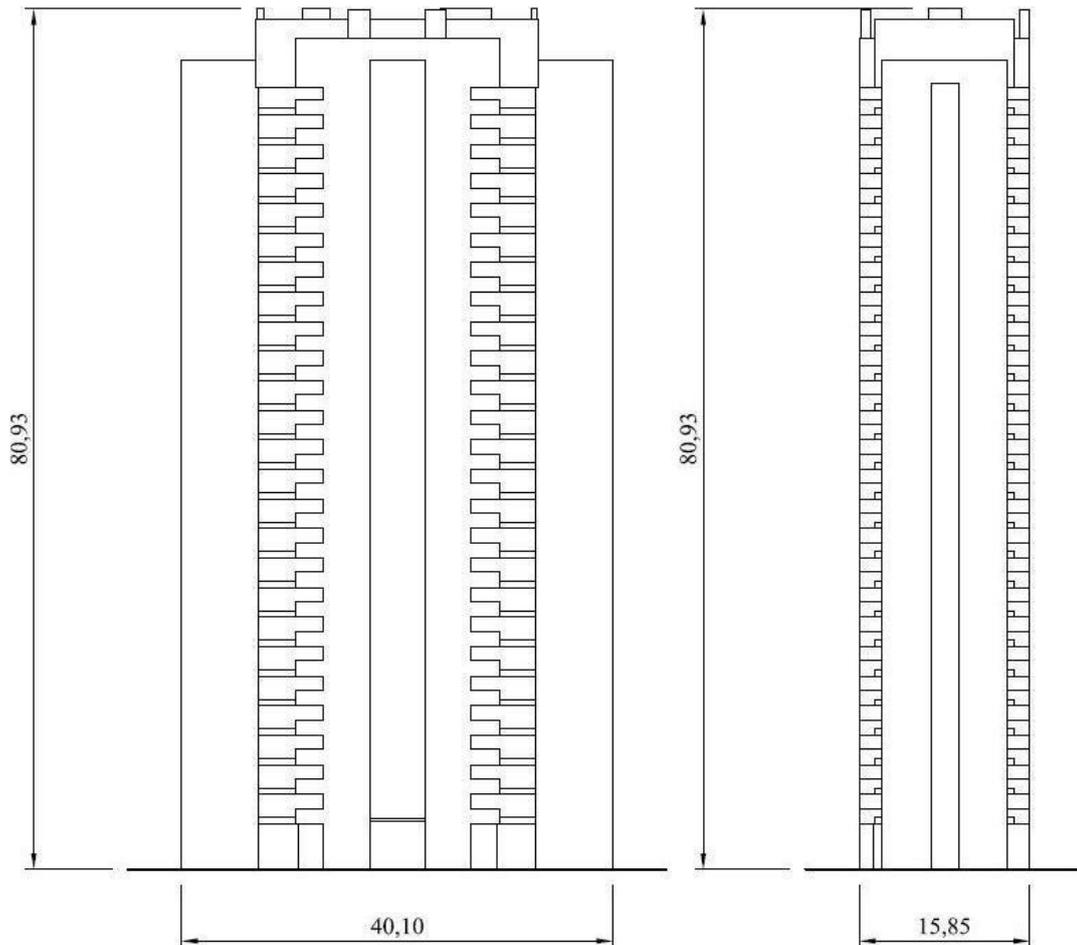


Figura 17: fachadas frontal e lateral da Torre Allegría do empreendimento Nuova Vita (medidas em metros)

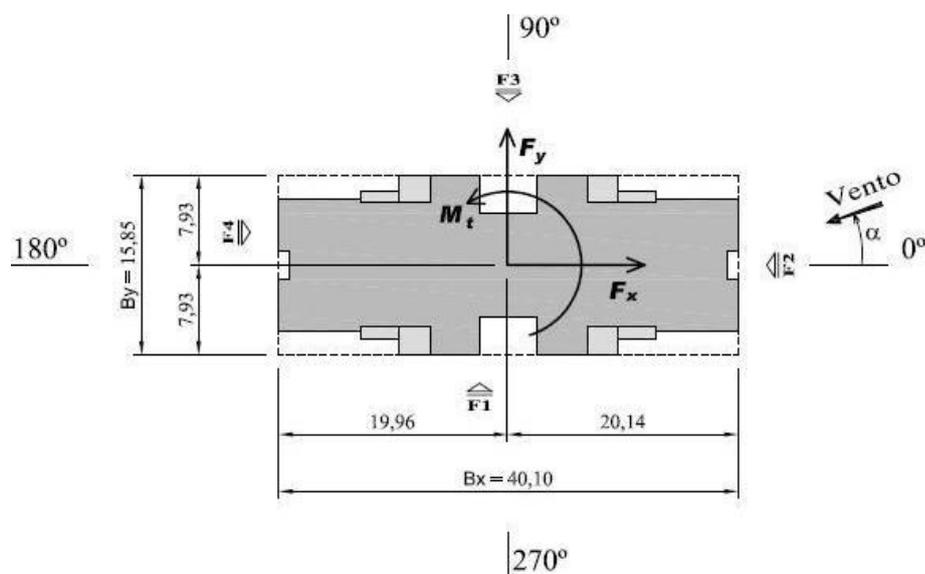


Figura 18: planta baixa do pavimento da Torre Allegría do empreendimento Nuova Vita (medidas em metros)

### 5.2.1 Ensaio Túnel de Vento

Foi construído um modelo reduzido em escala 1/300, sendo ele instrumentado com um total de 256 tomadas de pressão, distribuídas de modo a permitir um levantamento representativo das pressões em toda a edificação. O modelo foi girado de 360°, medindo as pressões a cada 15° de incidência do vento, totalizando 6144 registros de pressão. De acordo com as características da rugosidade do terreno em torno do empreendimento, foi simulado um vento com perfil potencial de velocidades médias de expoente  $p = 0,23$  (o que representa uma rugosidade entre as categorias III e IV). A figura 19 apresenta a área simulada no túnel.

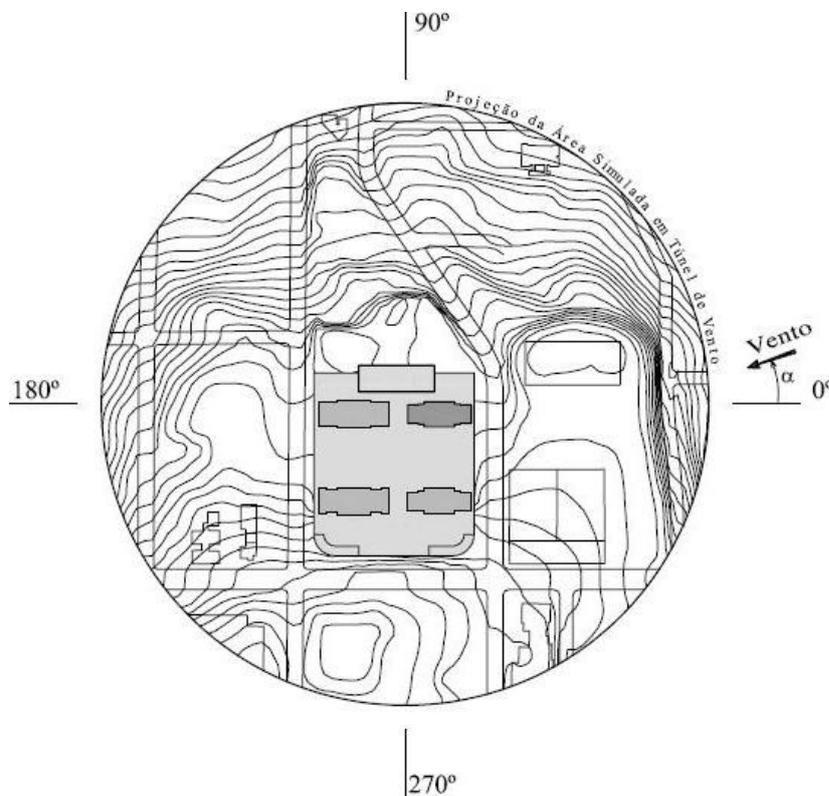


Figura 19: área simulada no túnel de vento para o empreendimento Nuova Vita

Para os cálculos no túnel de vento foram utilizados os parâmetros apresentados no quadro 8.

| $V_o$ (m/s) | $S_1$ | $S_3$ | $S_2$ |      | $V_k$ (m/s) |      | $q_k$ (Pa) |       |
|-------------|-------|-------|-------|------|-------------|------|------------|-------|
|             |       |       | 3s    | 1h   | 3s          | 1h   | 3s         | 1h    |
| 45          | 1     | 1     | 1,16  | 0,82 | 52,2        | 36,9 | 1670,3     | 834,7 |

Quadro 8: parâmetros do cálculo no túnel de vento para a Torre Allegria do empreendimento Nuova Vita

Os valores foram obtidos admitindo-se que todos os elementos de revestimento externo permaneçam fechados, gerando-se, assim, os diagramas de blocos da figura 20, para sucções, e da figura 21, para sobrepressões. Para este empreendimento é apresentada a fachada 1 (que se encontra voltada para o ângulo 270° na figura 19).

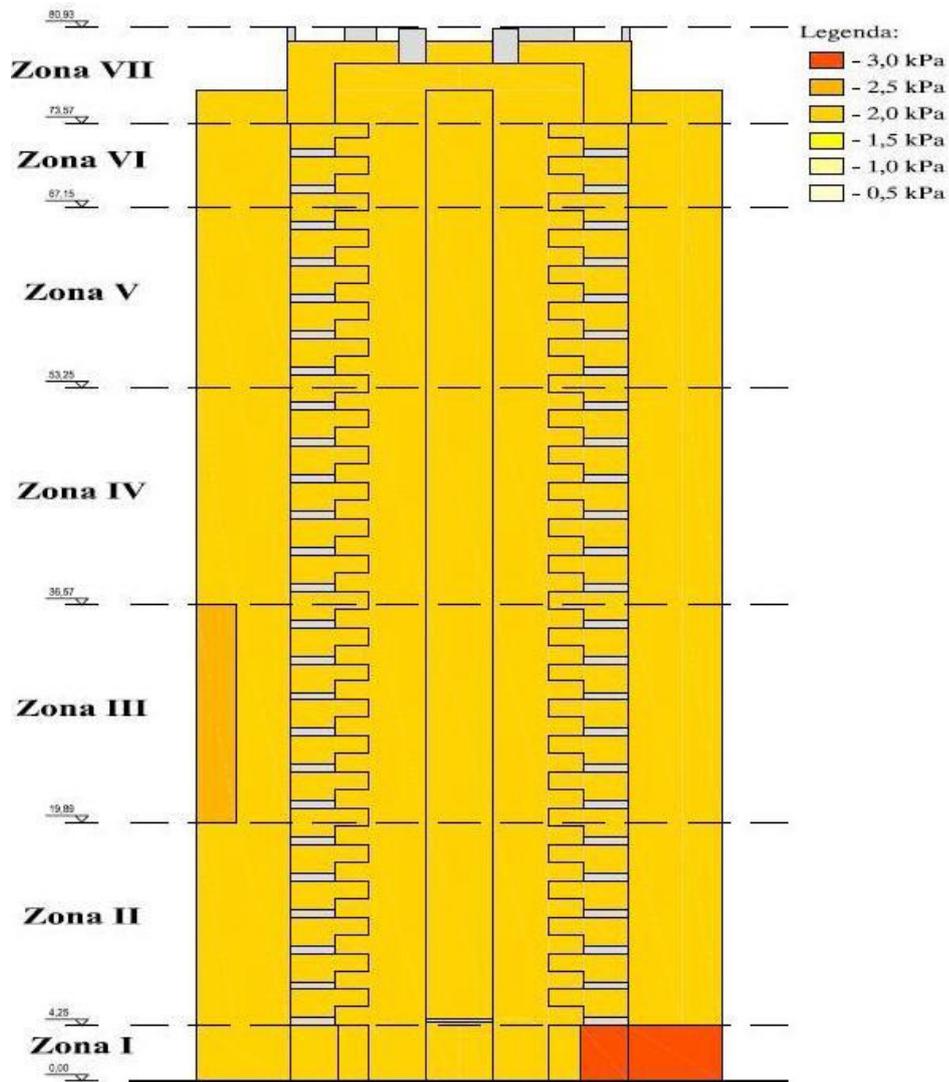


Figura 20: sucções obtidas no túnel para a fachada da Torre Allegria do empreendimento Nuova Vita

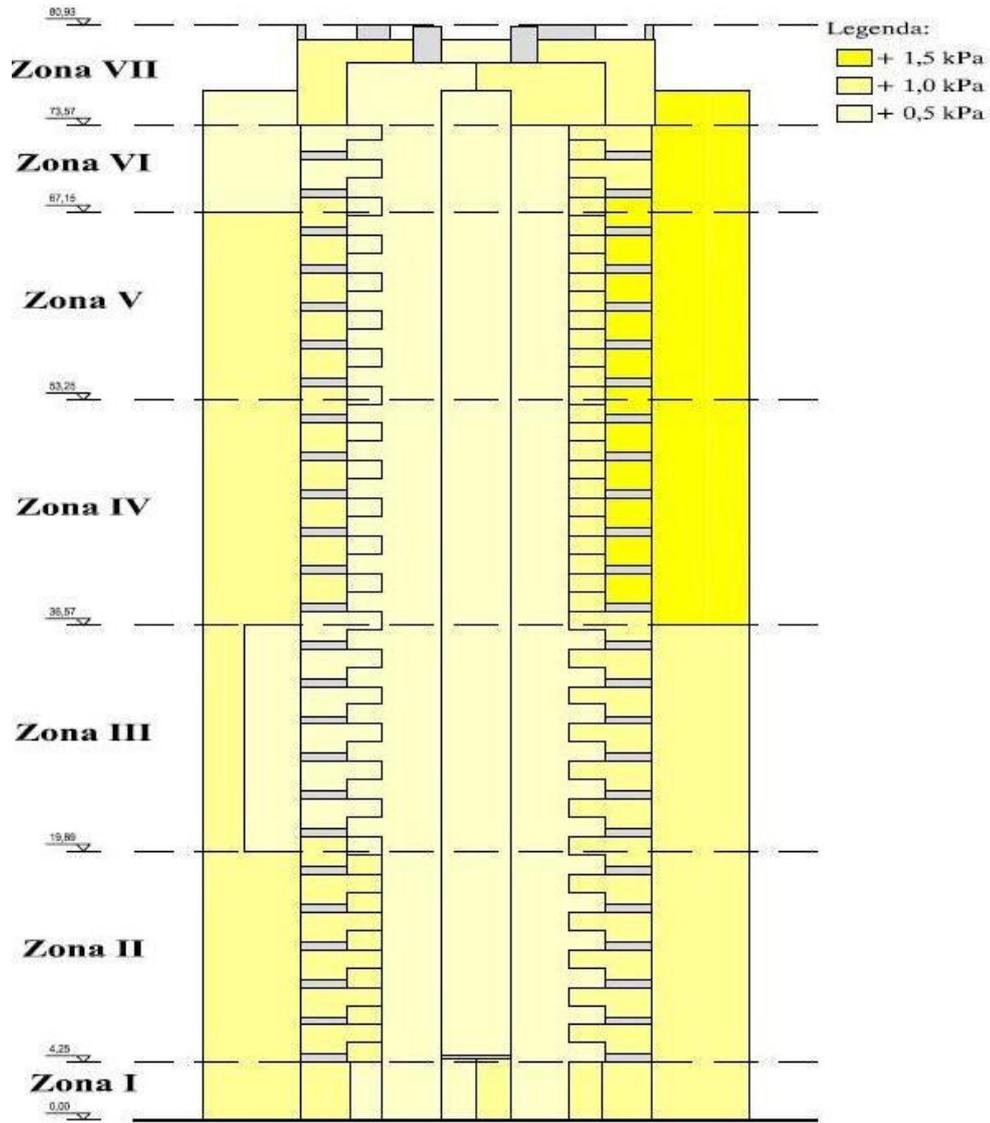


Figura 21: sobrepressões obtidas no túnel para a fachada da Torre Alegria do empreendimento Nuova Vita

### 5.2.2 Resultados pela NBR 6123/1988

Para os cálculos com a utilização da norma, foram considerados os parâmetros apresentados no quadro 9.

| $V_0$ (m/s) | $S_1$ | $S_2$ | $S_3$ | $V_k$ (m/s) | $q_k$ (Pa) |
|-------------|-------|-------|-------|-------------|------------|
| 45          | 1,0   | 1,158 | 1,0   | 52,11       | 1664,57    |

Quadro 9: parâmetros do cálculo pela Norma para a Torre Alegria do empreendimento Nuova Vita

Por recomendação da Norma (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1988, p. 9) o fator  $S_2$  foi calculado para o topo da edificação. Os valores dos coeficientes de pressão foram majorados em 30% devido aos efeitos de vizinhança. As sucções estão representadas na figura 22, e as sobrepressões na figura 23.

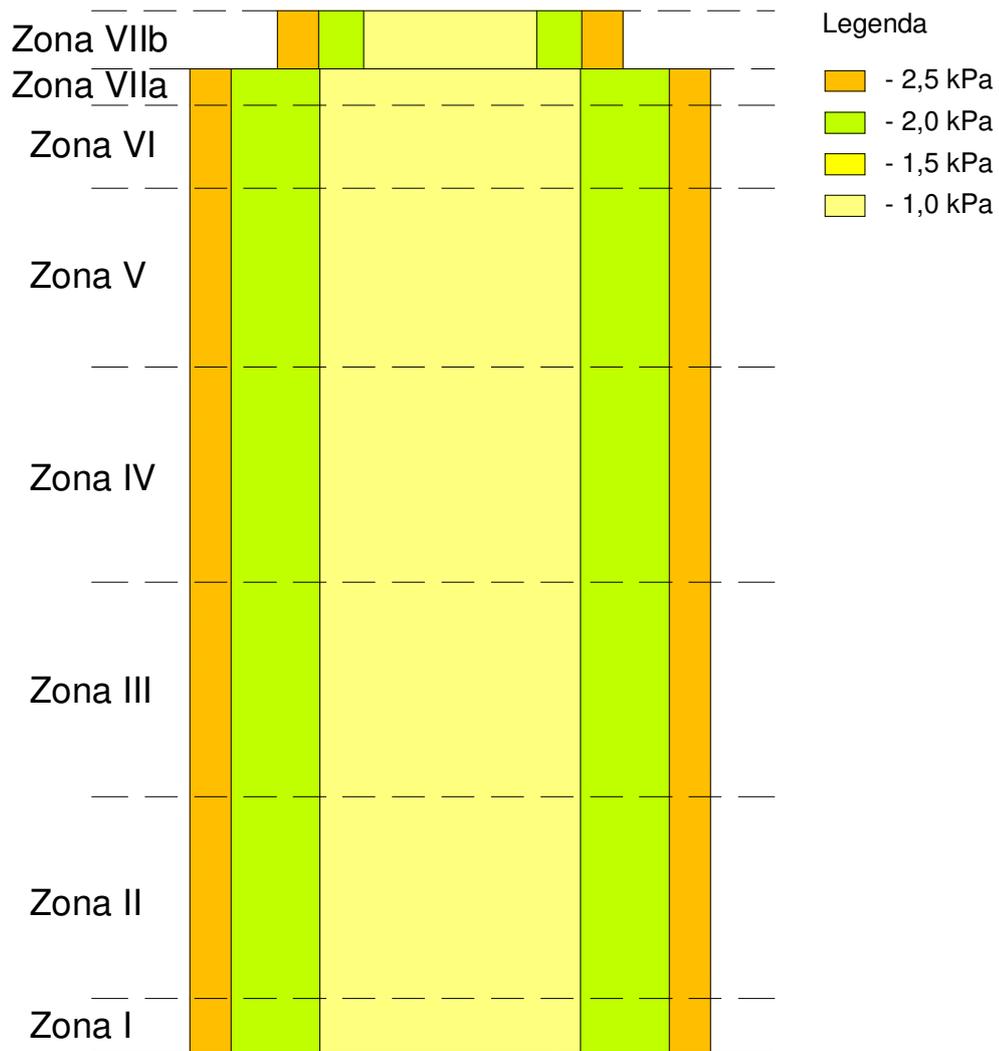


Figura 22: sucções obtidas pela Norma para a fachada da Torre Alegria do empreendimento Nuova Vita

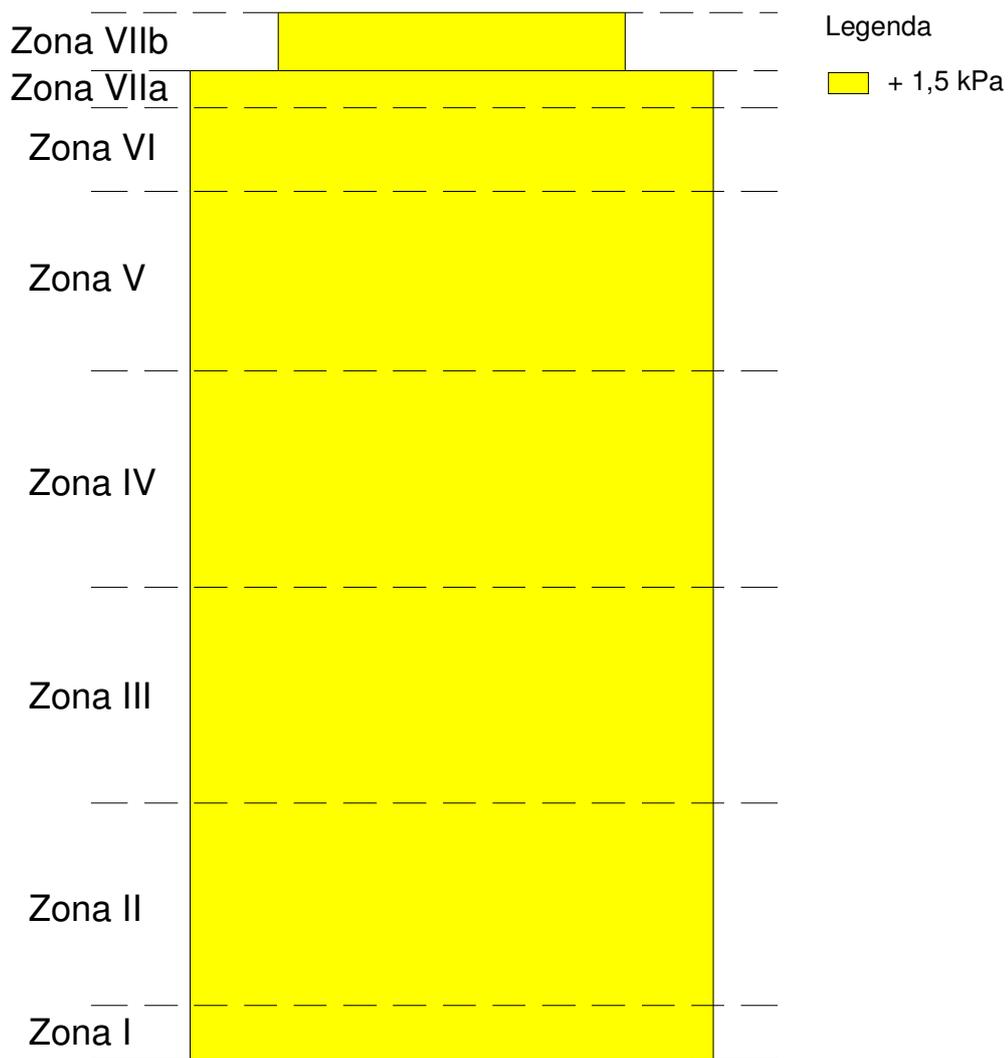


Figura 23: sobrepressões obtidas pela Norma para a fachada da Torre Alegria do empreendimento Nuova Vita

### 5.2.3 Comparativo dos resultados

A seguir encontram-se os quadros com o comparativo dos valores obtidos pela NBR 6123/1988 e pelo ensaio em túnel de vento para a Torre Alegria do empreendimento Nuova Vita. Foi considerada a divisão de zonas verticais do túnel de vento e a divisão de regiões horizontais obtidas através da Norma (ver apêndice A), adotando-se o maior valor presente dentro desses limites, exceção é feita para as sobrepressões, pois não há divisão de regiões, sendo consideradas apenas as zonas verticais. O quadro 10 apresenta o comparativo para as sucções, e o quadro 11, para as sobrepressões.

| Zona | Região 1  |             |           | Região 2  |             |           | Região 3  |             |           | Região 4  |             |           | Região 5  |             |           |
|------|-----------|-------------|-----------|-----------|-------------|-----------|-----------|-------------|-----------|-----------|-------------|-----------|-----------|-------------|-----------|
|      | NBR (kPa) | Túnel (kPa) | NBR/Túnel |
| VIIb | -2,5      | -2,0        | 1,25      | -2,0      | -2,0        | 1,00      | -1,0      | -2,0        | 0,50      | -2,0      | -2,0        | 1,00      | -2,5      | -2,0        | 1,25      |
| VIIa | -2,5      | -2,0        | 1,25      | -2,0      | -2,0        | 1,00      | -1,0      | -2,0        | 0,50      | -2,0      | -2,0        | 1,00      | -2,5      | -2,0        | 1,25      |
| VI   | -2,5      | -2,0        | 1,25      | -2,0      | -2,0        | 1,00      | -1,0      | -2,0        | 0,50      | -2,0      | -2,0        | 1,00      | -2,5      | -2,0        | 1,25      |
| V    | -2,5      | -2,0        | 1,25      | -2,0      | -2,0        | 1,00      | -1,0      | -2,0        | 0,50      | -2,0      | -2,0        | 1,00      | -2,5      | -2,0        | 1,25      |
| IV   | -2,5      | -2,0        | 1,25      | -2,0      | -2,0        | 1,00      | -1,0      | -2,0        | 0,50      | -2,0      | -2,0        | 1,00      | -2,5      | -2,0        | 1,25      |
| III  | -2,5      | -2,5        | 1,00      | -2,0      | -2,0        | 1,00      | -1,0      | -2,0        | 0,50      | -2,0      | -2,0        | 1,00      | -2,5      | -2,0        | 1,25      |
| II   | -2,5      | -2,0        | 1,25      | -2,0      | -2,0        | 1,00      | -1,0      | -2,0        | 0,50      | -2,0      | -2,0        | 1,00      | -2,5      | -2,0        | 1,25      |
| I    | -2,5      | -2,0        | 1,25      | -2,0      | -2,0        | 1,00      | -1,0      | -2,0        | 0,50      | -2,0      | -3,0        | 0,67      | -2,5      | -3,0        | 0,83      |

Quadro 10: comparativo dos resultados para sucções na fachada da Torre Alegria do empreendimento Nuova Vita

| Zona | NBR (kPa) | Túnel (kPa) | NBR/Túnel |
|------|-----------|-------------|-----------|
| VIIb | 1,5       | 1,0         | 1,50      |
| VIIa | 1,5       | 1,5         | 1,00      |
| VI   | 1,5       | 1,5         | 1,00      |
| V    | 1,5       | 1,5         | 1,00      |
| IV   | 1,5       | 1,5         | 1,00      |
| III  | 1,5       | 1,0         | 1,50      |
| II   | 1,5       | 1,0         | 1,50      |
| I    | 1,5       | 1,0         | 1,50      |

Quadro 11: comparativo dos resultados para sobrepressões na fachada da Torre Alegria do empreendimento Nuova Vita

Para as sucções, a Norma apresentou ótimos resultados para quase todas as regiões igualando o valor do túnel em praticamente todos os pontos, exceto na base das regiões 4 e 5. Entretanto, na região central, os valores da Norma chegaram a apenas 50% dos valores do túnel. Para as sobrepressões, a Norma mostrou-se bastante eficaz, igualando ou ultrapassando os valores do túnel em todas as zonas.

### 5.3 ODEBRECHT ATLANTA (trabalho não publicado)<sup>4</sup>

O empreendimento Odebrecht Atlanta é um edifício de base quadrada em que foram executados chanfros nas quinas para reduzir as sucções atuantes naquela região. Na figura 24,

<sup>4</sup> As informações contidas nesse item foram obtidas do relatório técnico Ação Estática do Vento sobre o Edifício do Empreendimento Odebrecht Atlanta, Alphaville-SP. Este relatório foi elaborado pelo Laboratório de Aerodinâmica das Construções da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, em dezembro de 2007. A autoria do relatório é do prof. Acir Mércio Loredo-Souza e equipe.

é apresentada uma perspectiva artística do empreendimento, na figura 25, são apresentadas as fachadas frontal e lateral do edifício em estudo, com suas respectivas dimensões da base e altura e a figura 26 apresenta a planta baixa da edificação.



Figura 24: perspectiva artística do empreendimento Odebrecht Atlanta

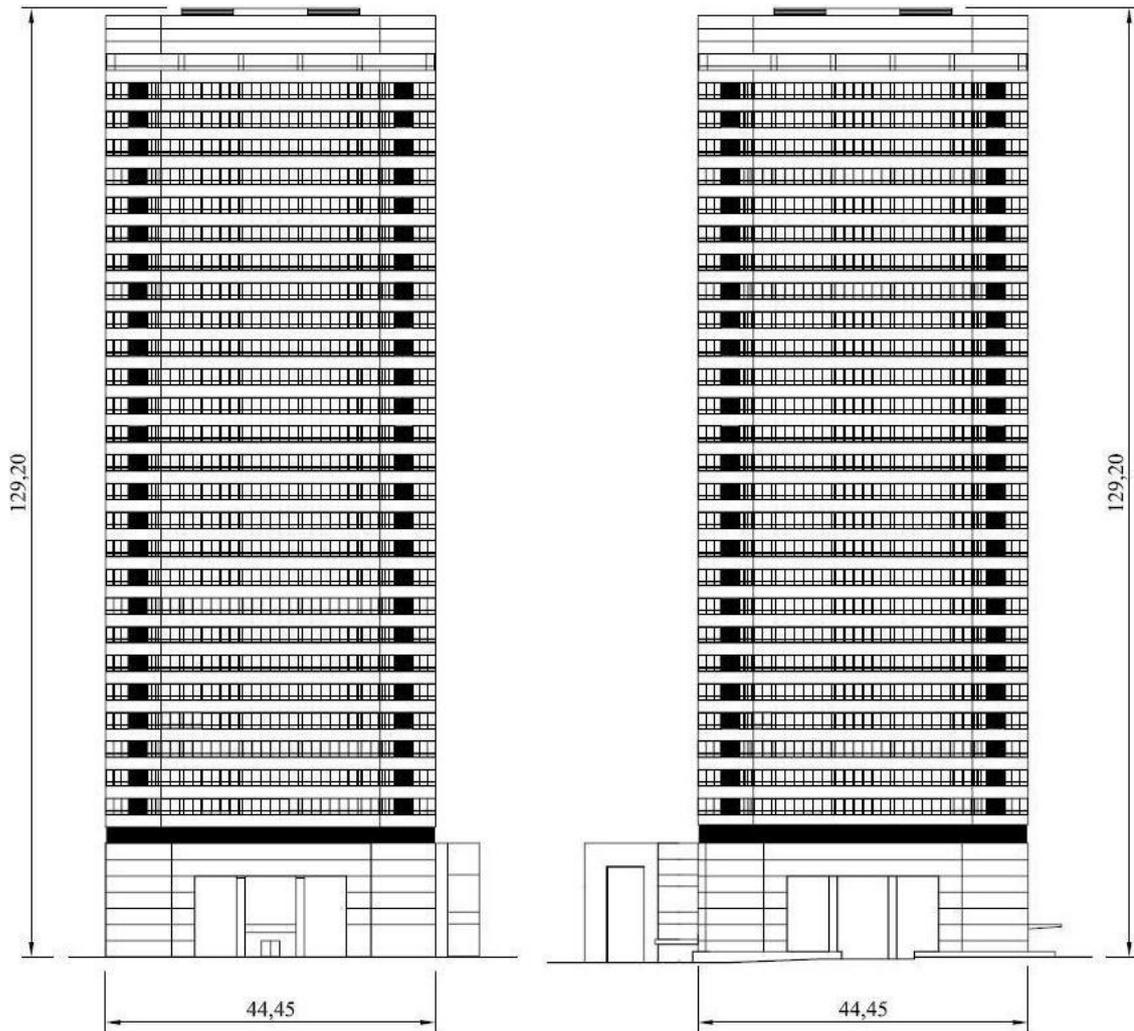


Figura 25: fachadas frontal e lateral do empreendimento Odebrecht Atlanta (medidas em metros)

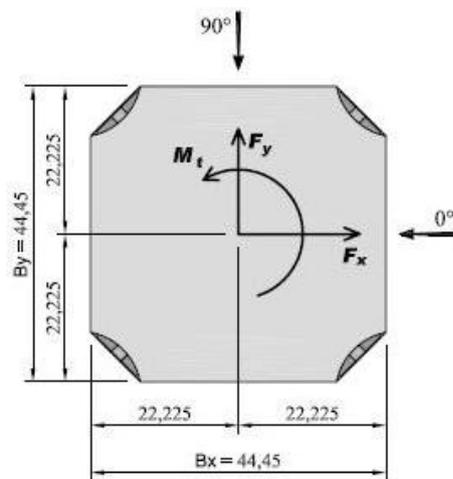


Figura 26: planta baixa do pavimento do empreendimento Odebrecht Atlanta (medidas em metros)

### 5.3.1 Ensaio Túnel de Vento

Foi construído um modelo reduzido em escala 1/400, sendo ele instrumentado com um total de 315 tomadas de pressão, distribuídas de modo a permitir um levantamento representativo das pressões em toda a edificação. O modelo foi girado de 360°, medindo as pressões a cada 15° de incidência do vento, totalizando 7560 registros de pressão. De acordo com as características da rugosidade do terreno em torno do empreendimento, foi simulado um vento com perfil potencial de velocidades médias de expoente  $p = 0,23$  (o que representa uma rugosidade entre as categorias III e IV). A figura 27 apresenta a área simulada no túnel.

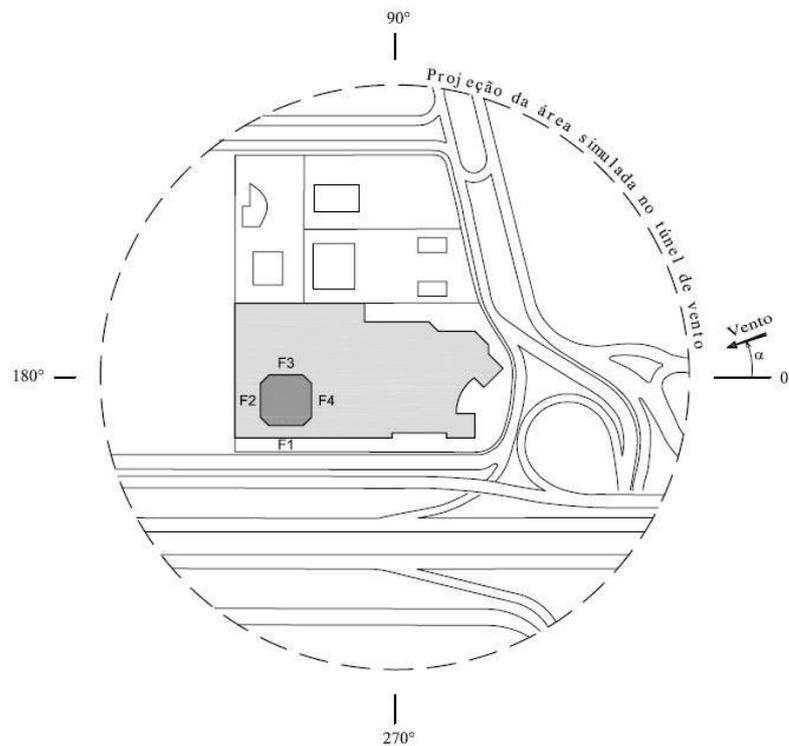


Figura 27: área simulada no túnel de vento para o empreendimento Odebrecht Atlanta

Para os cálculos no túnel de vento foram utilizados os parâmetros apresentados no quadro 12.

| $V_o$ (m/s) | $S_1$ | $S_3$ | $S_2$ |      | $V_k$ (m/s) |      | $q_k$ (Pa) |       |
|-------------|-------|-------|-------|------|-------------|------|------------|-------|
|             |       |       | 3s    | 1h   | 3s          | 1h   | 3s         | 1h    |
| 38          | 1     | 1     | 1,192 | 0,88 | 45,3        | 33,4 | 1257,7     | 685,5 |

Quadro 12: parâmetros do cálculo no túnel de vento para o empreendimento Odebrecht Atlanta

Os valores foram obtidos admitindo-se que todos os elementos de revestimento externo permaneçam fechados, gerando-se, assim, os diagramas de blocos da figura 28, para sucções, e da figura 29, para sobrepressões. Para este empreendimento é apresentada a fachada 1 (que se encontra voltada para o ângulo 270° na figura 27).

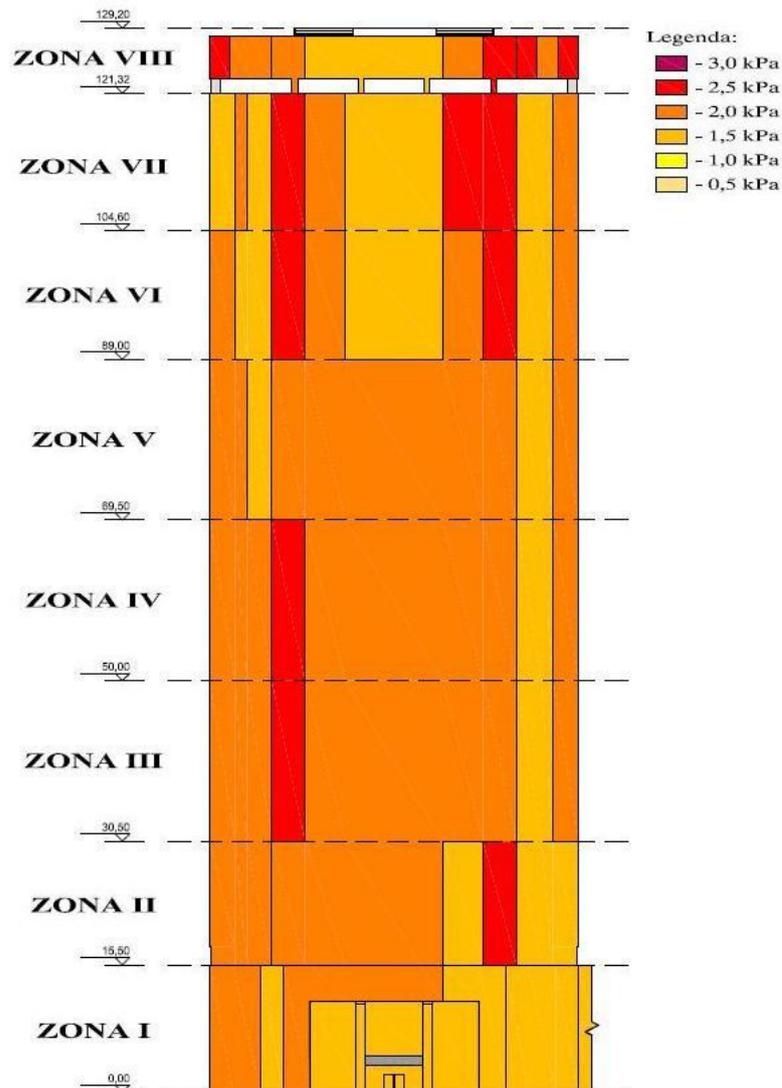


Figura 28: sucções obtidas no túnel para a fachada do empreendimento Odebrecht Atlanta

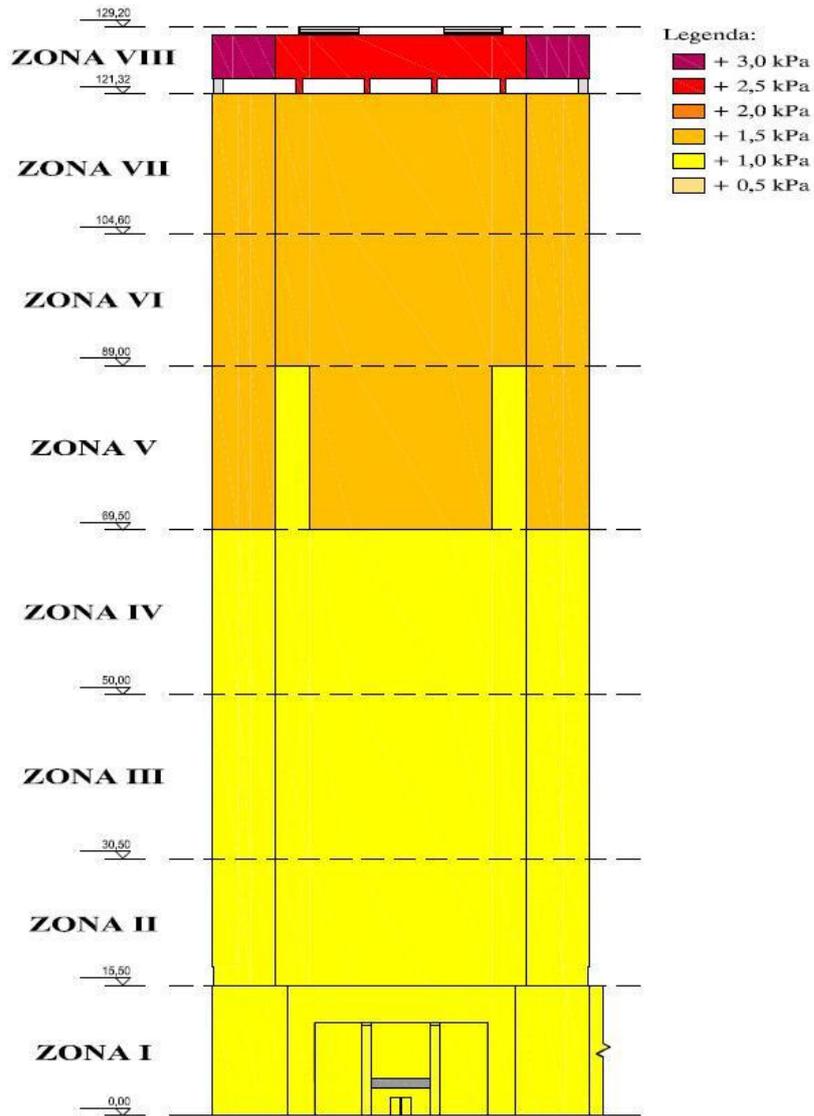


Figura 29: sobrepressões obtidas no túnel para a fachada do empreendimento Odebrecht Atlanta

### 5.3.2 Resultados pela NBR 6123/1988

Para os cálculos com a utilização da norma, foram considerados os parâmetros apresentados no quadro 13.

| $V_o$ (m/s) | $S_1$ | $S_2$  | $S_3$ | $V_k$ (m/s) | $q_k$ (Pa) |
|-------------|-------|--------|-------|-------------|------------|
| 38          | 1,0   | 1,2141 | 1,0   | 46,14       | 1304,77    |

Quadro 13: parâmetros do cálculo pela Norma para o empreendimento Odebrecht Atlanta

Por recomendação da Norma (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1988, p. 9) o fator  $S_2$  foi calculado para o topo da edificação. As sucções estão representadas na figura 30, e as sobrepressões na figura 31. Em cada zona, foi considerada a pressão obtida no seu nível superior:

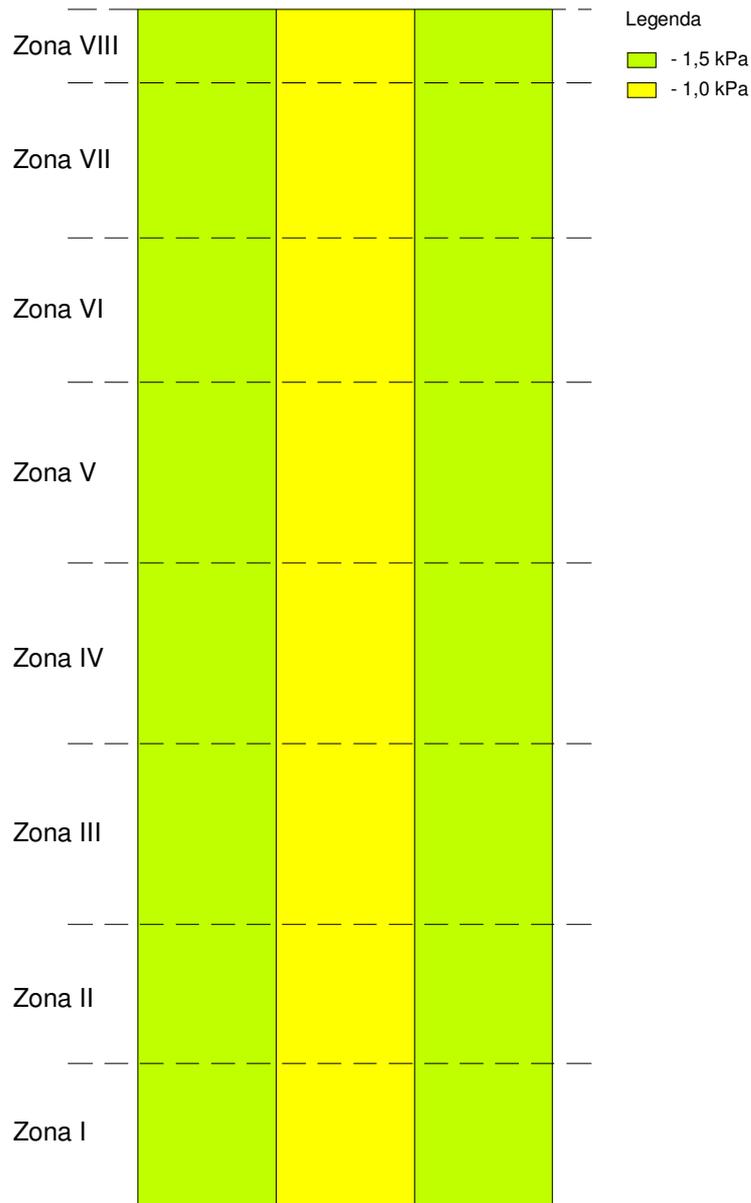


Figura 30: sucções obtidas pela Norma para a fachada do empreendimento Odebrecht Atlanta

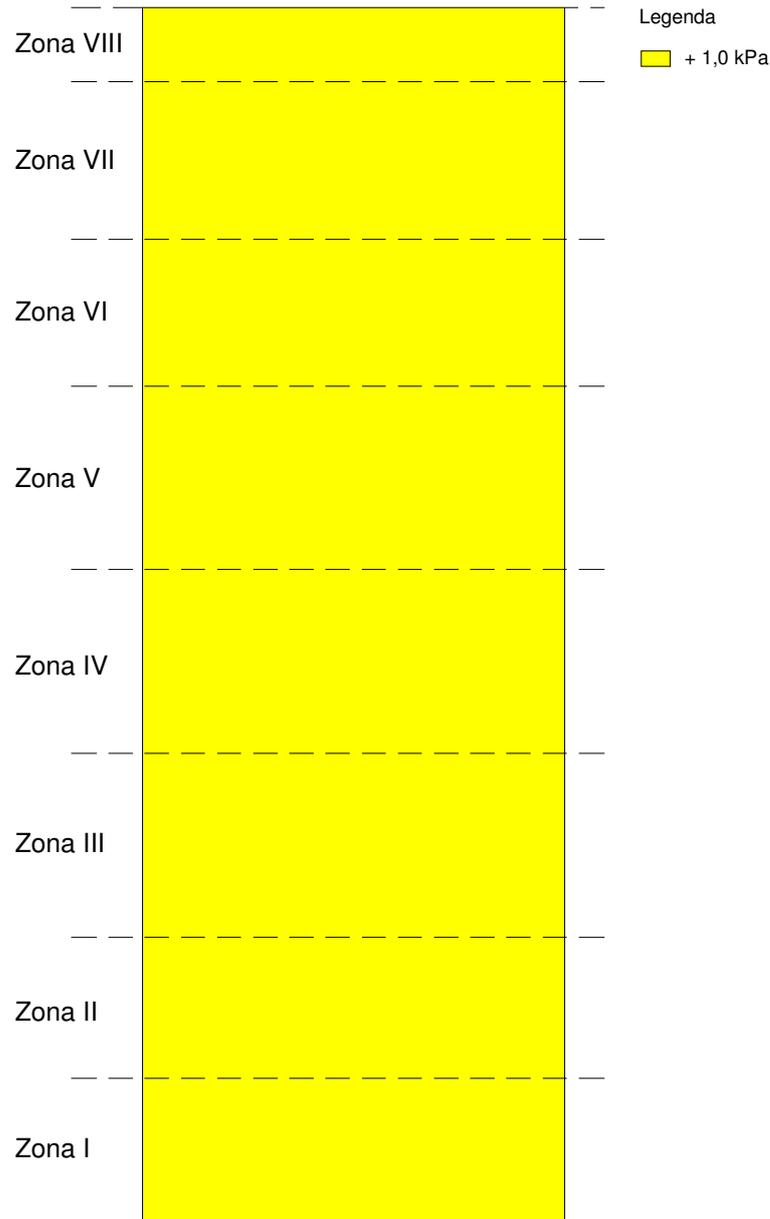


Figura 31: sobrepressões obtidas pela Norma para a fachada do empreendimento Odebrecht Atlanta

### 5.3.3 Comparativo dos resultados

A seguir encontram-se os quadros com o comparativo dos valores obtidos pela NBR 6123/1988 e pelo ensaio em túnel de vento para o empreendimento Odebrecht Atlanta. Foi considerada a divisão de zonas verticais do túnel de vento e a divisão de regiões horizontais obtidas através da Norma (ver apêndice A), adotando-se o maior valor presente dentro desses limites, exceção é feita para as sobrepressões, pois não há divisão de regiões, sendo

consideradas apenas as zonas verticais. O quadro 14 apresenta o comparativo para as sucções, e o quadro 15, para as sobrepressões.

| Zona | Região 1  |             |           | Região 2  |             |           | Região 3  |             |           |
|------|-----------|-------------|-----------|-----------|-------------|-----------|-----------|-------------|-----------|
|      | NBR (kPa) | Túnel (kPa) | NBR/Túnel | NBR (kPa) | Túnel (kPa) | NBR/Túnel | NBR (kPa) | Túnel (kPa) | NBR/Túnel |
| VIII | -1,5      | -2,5        | 0,60      | -1,0      | -1,5        | 0,67      | -1,5      | -2,5        | 0,60      |
| VII  | -1,5      | -2,5        | 0,60      | -1,0      | -1,5        | 0,67      | -1,5      | -2,5        | 0,60      |
| VI   | -1,5      | -2,5        | 0,60      | -1,0      | -1,5        | 0,67      | -1,5      | -2,5        | 0,60      |
| V    | -1,5      | -2,0        | 0,75      | -1,0      | -2,0        | 0,50      | -1,5      | -2,0        | 0,75      |
| IV   | -1,5      | -2,5        | 0,60      | -1,0      | -2,0        | 0,50      | -1,5      | -2,0        | 0,75      |
| III  | -1,5      | -2,5        | 0,60      | -1,0      | -2,0        | 0,50      | -1,5      | -2,0        | 0,75      |
| II   | -1,5      | -2,0        | 0,75      | -1,0      | -2,0        | 0,50      | -1,5      | -2,5        | 0,60      |
| I    | -1,5      | -2,0        | 0,75      | -1,0      | -2,0        | 0,50      | -1,5      | -1,5        | 1,00      |

Quadro 14: comparativo dos resultados para sucções na fachada do empreendimento Odebrecht Atlanta

| Zona | NBR (kPa) | Túnel (kPa) | NBR/Túnel |
|------|-----------|-------------|-----------|
| VIII | 1,0       | 3,0         | 0,33      |
| VII  | 1,0       | 1,5         | 0,67      |
| VI   | 1,0       | 1,5         | 0,67      |
| V    | 1,0       | 1,5         | 0,67      |
| IV   | 1,0       | 1,0         | 1,00      |
| III  | 1,0       | 1,0         | 1,00      |
| II   | 1,0       | 1,0         | 1,00      |
| I    | 1,0       | 1,0         | 1,00      |

Quadro 15: comparativo dos resultados para sobrepressões na fachada do empreendimento Odebrecht Atlanta

Para as sucções, todos os valores obtidos através da norma ficaram abaixo dos valores do túnel, exceto na base da região 3. A região 2 foi a mais crítica, onde a Norma atingiu apenas 50% dos valores do túnel. Para as sobrepressões, a Norma mostrou-se eficaz para as regiões mais baixas da edificação, sendo insuficiente a partir da zona V, onde atingiu 67% dos valores do túnel e menos ainda na zona VIII, onde atingiu 33%.

#### 5.4 PROSPERITAS (trabalho não publicado)<sup>5</sup>

O empreendimento Prosperitas é um edifício de formato irregular, com mudanças nas dimensões ao longo da altura, regiões inclinadas e regiões curvas. Na figura 32, é apresentada uma perspectiva artística do empreendimento, na figura 33, são apresentadas as fachadas frontal e lateral do edifício em estudo, com suas respectivas dimensões da base e altura e a figura 34 apresenta a planta baixa da edificação.



Figura 32: perspectiva artística do empreendimento Prosperitas

---

<sup>5</sup> As informações contidas nesse item foram obtidas do relatório técnico Ação Estática do Vento sobre Empreendimento Prosperitas, São Paulo. Este relatório foi elaborado pelo Laboratório de Aerodinâmica das Construções da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, em setembro de 2007. A autoria do relatório é do prof. Acir Mércio Loredo-Souza e equipe.

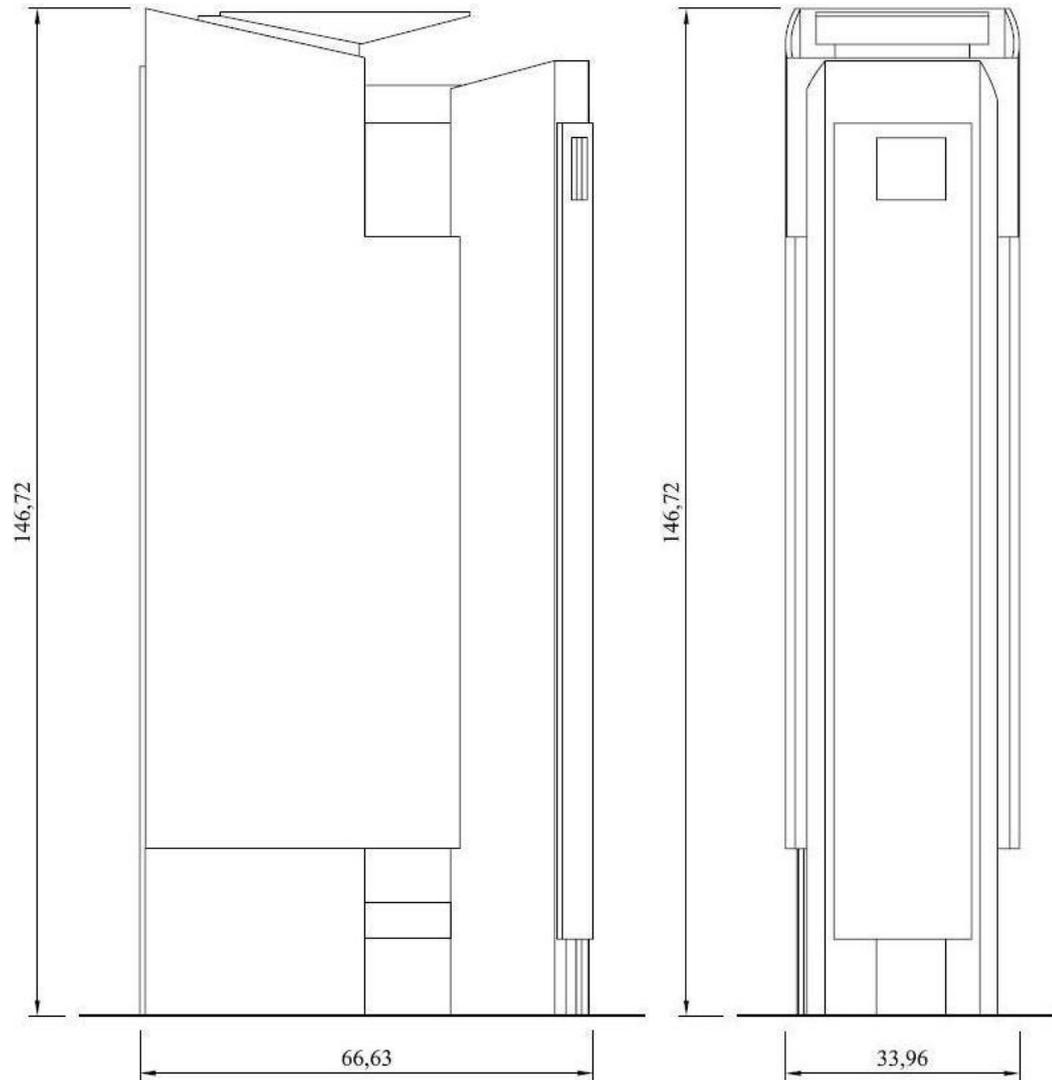


Figura 33: fachadas frontal e lateral do empreendimento Prosperitas (medidas em metros)

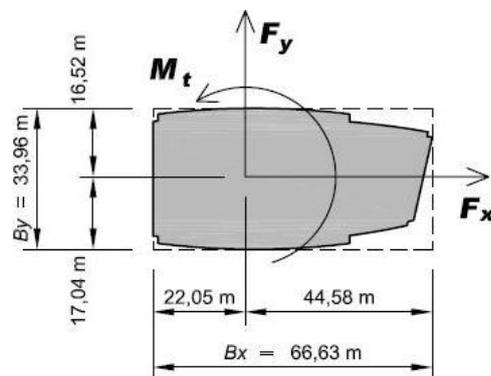


Figura 34: planta baixa do pavimento do empreendimento Prosperitas (medidas em metros)

### 5.4.1 Ensaio Túnel de Vento

Foi construído um modelo reduzido em escala 1/400, sendo ele instrumentado com um total de 268 tomadas de pressão, distribuídas de modo a permitir um levantamento representativo das pressões em toda a edificação. O modelo foi girado de 360°, medindo as pressões a cada 10° de incidência do vento, totalizando 9648 registros de pressão. De acordo com as características da rugosidade do terreno em torno do empreendimento, foi simulado um vento com perfil potencial de velocidades médias de expoente  $p = 0,23$  (o que representa uma rugosidade entre as categorias III e IV). A figura 35 apresenta a área simulada no túnel.

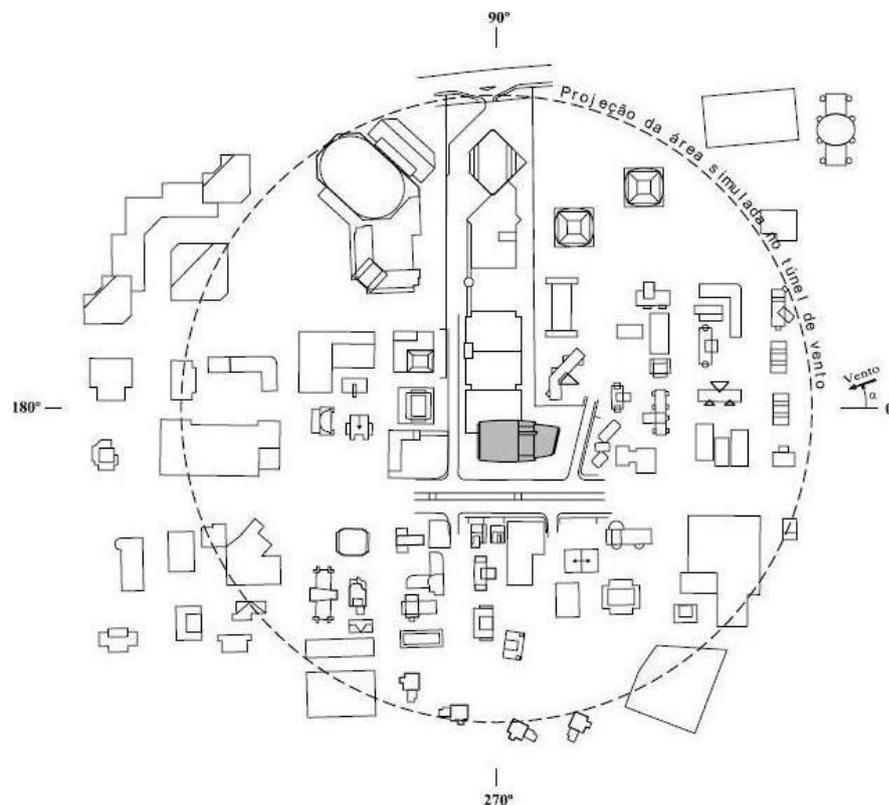


Figura 35: área simulada no túnel de vento para o empreendimento Prosperitas

Para os cálculos no túnel de vento foram utilizados os parâmetros apresentados no quadro 16:

| $V_0$ (m/s) | $S_1$ | $S_3$ | $S_2$ |      | $V_k$ (m/s) |      | $q_k$ (Pa) |     |
|-------------|-------|-------|-------|------|-------------|------|------------|-----|
|             |       |       | 3s    | 1h   | 3s          | 1h   | 3s         | 1h  |
| 38          | 1     | 1     | 1,21  | 0,91 | 45,9        | 34,4 | 1293       | 725 |

Quadro 16: parâmetros do cálculo no túnel de vento para o empreendimento Prosperitas

Os valores foram obtidos admitindo-se que todos os elementos de revestimento externo permaneçam fechados, gerando-se, assim, os diagramas de blocos da figura 36, para sucções, e da figura 37, para sobrepressões. Para este empreendimento é apresentada a fachada 3 (que se encontra voltada para o ângulo 90° na figura 35).

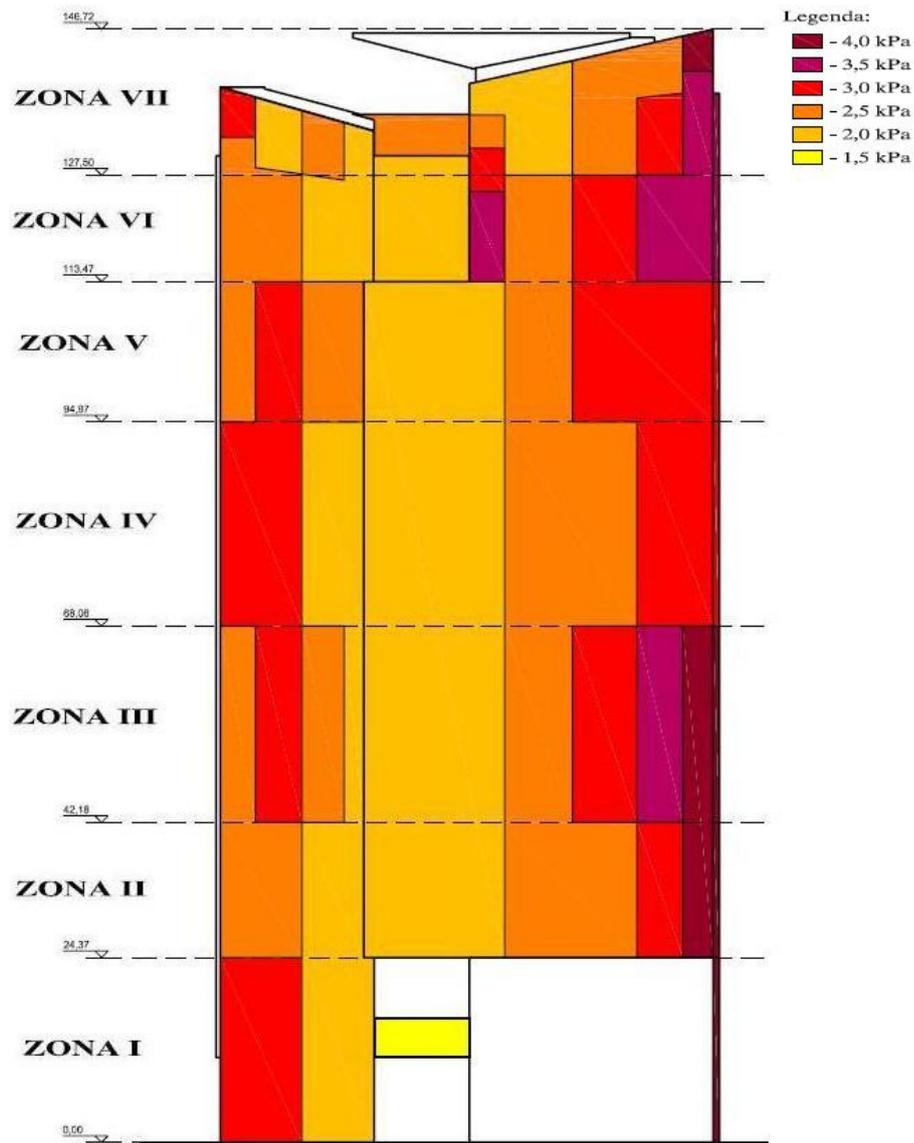


Figura 36: sucções obtidas no túnel para a fachada do empreendimento Prosperitas

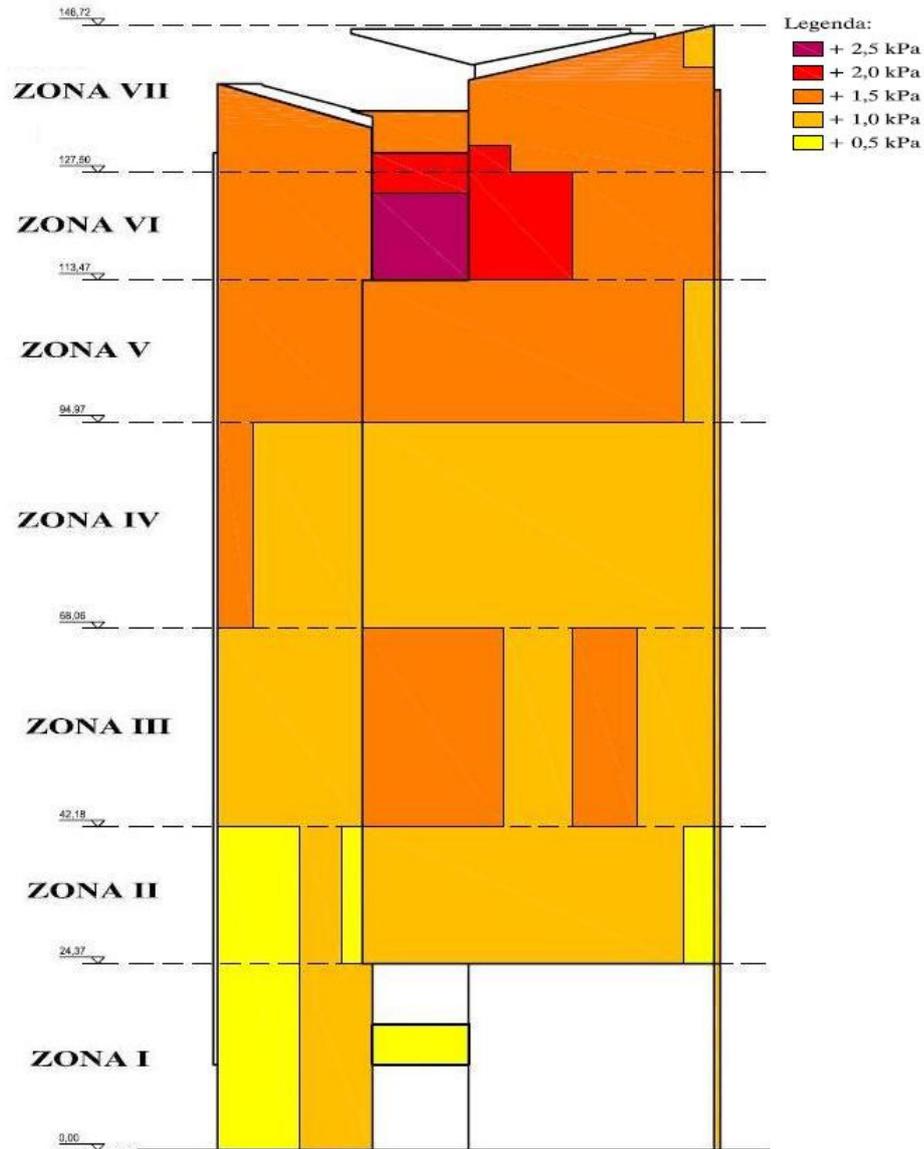


Figura 37: sobrepressões obtidas no túnel para a fachada do empreendimento Prosperitas

### 5.4.2 Resultados pela NBR 6123/1988

Para os cálculos com a utilização da norma, foram considerados os parâmetros apresentados no quadro 17:

| $V_o$ (m/s) | $S_1$ | $S_2$ | $S_3$ | $V_k$ (m/s) | $q_k$ (Pa) |
|-------------|-------|-------|-------|-------------|------------|
| 38          | 1,0   | 1,229 | 1,0   | 46,70       | 1337,00    |

Quadro 17: parâmetros do cálculo pela Norma para o empreendimento Prosperitas

Por recomendação da Norma (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1988, p. 9) o fator  $S_2$  foi calculado para o topo da edificação. As sucções estão representadas na figura 38, e as sobrepressões na figura 39.

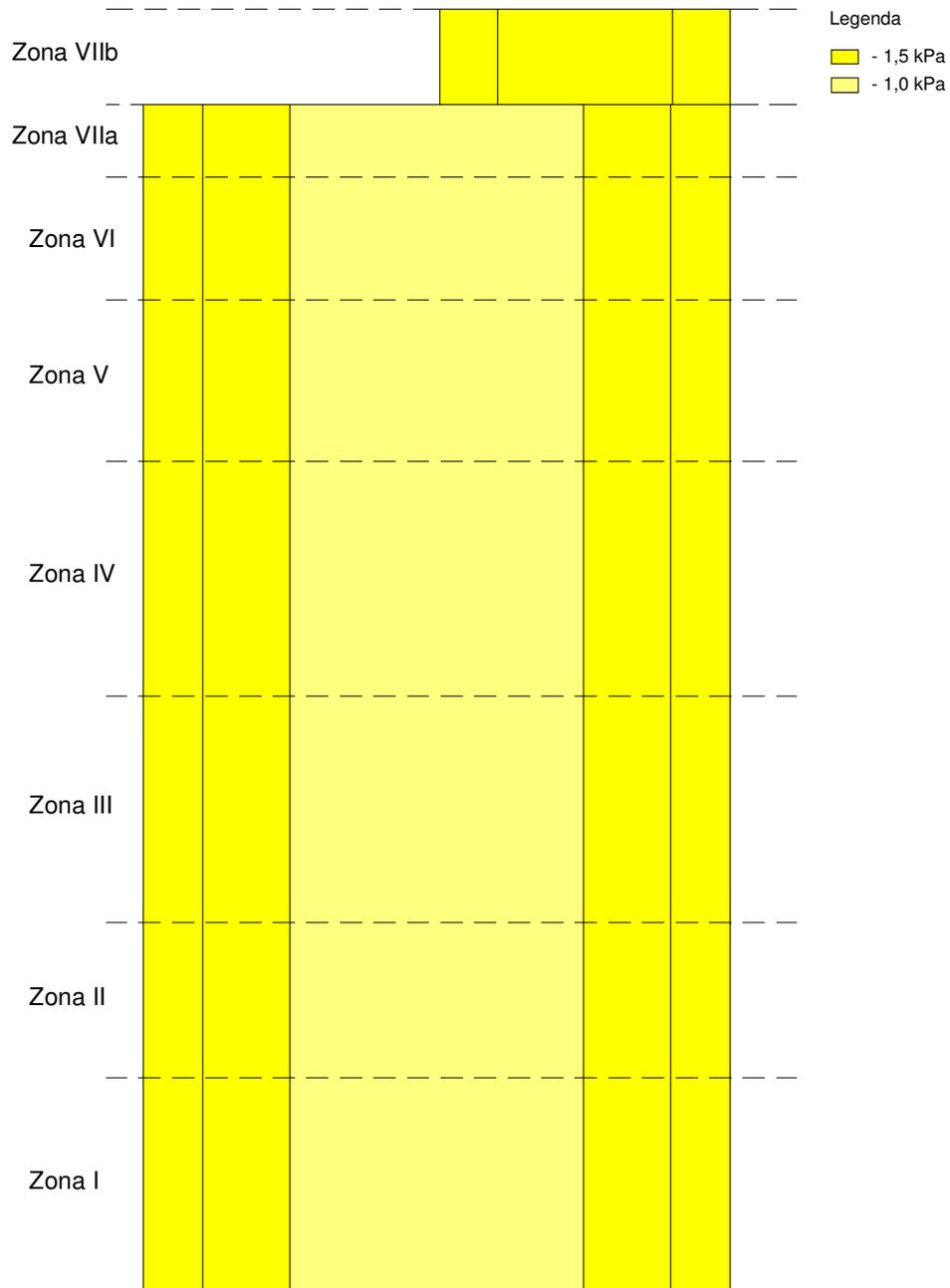


Figura 38: sucções obtidas pela Norma para a fachada do empreendimento Prosperitas



Figura 39: sobrepressões obtidas pela Norma para a fachada do empreendimento Prosperitas

### 5.4.3 Comparativo dos resultados

A seguir encontram-se os quadros com o comparativo dos valores obtidos pela NBR 6123/1988 e pelo ensaio em túnel de vento para o empreendimento Prosperitas. Foi considerada a divisão de zonas verticais do túnel de vento e a divisão de regiões horizontais obtidas através da Norma (ver apêndice A), adotando-se o maior valor presente dentro desses

limites, exceção é feita para as sobrepressões, pois não há divisão de regiões, sendo consideradas apenas as zonas verticais. O quadro 18 apresenta o comparativo para as sucções, e o quadro 19, para as sobrepressões.

| Zona | Região 1  |             |           | Região 2  |             |           | Região 3  |             |           | Região 4  |             |           | Região 5  |             |           |
|------|-----------|-------------|-----------|-----------|-------------|-----------|-----------|-------------|-----------|-----------|-------------|-----------|-----------|-------------|-----------|
|      | NBR (kPa) | Túnel (kPa) | NBR/Túnel |
| VIIb | -1,5      | -2,0        | 0,75      | -1,5      | -2,5        | 0,60      | -1,5      | -4,0        | 0,38      | -         | -           | -         | -         | -           | -         |
| VIIa | -1,5      | -3,0        | 0,50      | -1,5      | -2,5        | 0,60      | -1,0      | -3,0        | 0,33      | -1,5      | -3,0        | 0,50      | -1,5      | -3,5        | 0,43      |
| VI   | -1,5      | -2,5        | 0,60      | -1,5      | -2,5        | 0,60      | -1,0      | -3,5        | 0,29      | -1,5      | -3,5        | 0,43      | -1,5      | -3,5        | 0,43      |
| V    | -1,5      | -3,0        | 0,50      | -1,5      | -3,0        | 0,50      | -1,0      | -2,5        | 0,40      | -1,5      | -3,0        | 0,50      | -1,5      | -3,0        | 0,50      |
| IV   | -1,5      | -3,0        | 0,50      | -1,5      | -3,0        | 0,50      | -1,0      | -2,5        | 0,40      | -1,5      | -3,0        | 0,50      | -1,5      | -3,0        | 0,50      |
| III  | -1,5      | -3,0        | 0,50      | -1,5      | -3,0        | 0,50      | -1,0      | -2,5        | 0,40      | -1,5      | -3,5        | 0,43      | -1,5      | -4,0        | 0,38      |
| II   | -1,5      | -2,5        | 0,60      | -1,5      | -2,5        | 0,60      | -1,0      | -2,5        | 0,40      | -1,5      | -3,0        | 0,50      | -1,5      | -4,0        | 0,38      |
| I    | -1,5      | -3,0        | 0,50      | -1,5      | -3,0        | 0,50      | -1,0      | -1,5        | 0,67      | -         | -           | -         | -         | -           | -         |

Quadro 18: comparativo dos resultados para sucções na fachada do empreendimento Prosperitas

| Zona | NBR (kPa) | Túnel (kPa) | NBR/Túnel |
|------|-----------|-------------|-----------|
| VIIb | 1,0       | 1,5         | 0,67      |
| VIIa | 1,0       | 2,0         | 0,50      |
| VI   | 1,0       | 2,5         | 0,40      |
| V    | 1,0       | 1,5         | 0,67      |
| IV   | 1,0       | 1,0         | 1,00      |
| III  | 1,0       | 1,5         | 0,67      |
| II   | 1,0       | 1,0         | 1,00      |
| I    | 1,0       | 1,0         | 1,00      |

Quadro 19: comparativo dos resultados para sobrepressões na fachada do empreendimento Prosperitas

Para as sucções, a Norma não igualou o túnel em nenhuma parte, os piores resultados apresentaram-se na região central (região 3), variando de 29% a 67% a relação NBR/túnel. Nos demais pontos, os resultados variaram de 38% a 60%, atingindo 75% apenas na região 1 da zona VIIb. Para as sobrepressões, apenas três zonas igualaram os valores do túnel, ficando as outras entre 40% e 67%.

## 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Conseguiu-se, neste trabalho, fazer uma boa comparação dos métodos de cálculo de pressões em fachadas de edifícios. Alguns dos resultados obtidos pela NBR 6123/1988 conseguiram se igualar aos resultados obtidos no túnel de vento, entretanto, a grande maioria ficou abaixo destes, atingindo resultados inferiores ao que era esperado, definido nas hipóteses. Essas diferenças podem ser atribuídas às aproximações que tiveram que ser feitas com relação ao formato da edificação e também a consideração de poucos ângulos de incidência do vento.

Apesar de a Norma recomendar o uso de períodos de tempo maiores para a determinação da velocidade média, o valor utilizado para cálculo foi da velocidade média sobre 3 segundos, pois gera valores mais elevados para a pressão dinâmica. Mesmo com essa decisão ficando a favor da segurança, a Norma não apresentou bons resultados para as aproximações consideradas.

Seria necessária a realização de estudos específicos a respeito do valor dos coeficientes aerodinâmicos para esses diferentes formatos de edificações para incrementar a Norma, tornando-a mais abrangente. Outra sugestão que poderia ser dada com relação à Norma, seria a inclusão de coeficientes para as soluções de projeto mais adotadas para a redução das sucções, como no caso dos chanfros executados nas quinas do empreendimento Odebrecht Atlanta.

Com as diferenças obtidas, pode-se perceber a importância dos estudos em túnel de vento na determinação das pressões para se obter segurança e economia no projeto dessas edificações diferenciadas. Se, nesses casos, fosse aplicada somente a Norma, muitos problemas poderiam ocorrer durante o uso da edificação.

## REFERÊNCIAS

ALMEIDA, R. F. **Pressões externas devidas ao vento em fachadas de edifícios altos:** estudo comparativo entre resultados obtidos no túnel de vento e na NBR 6123/1988. 2009. 71 f. Trabalho de Diplomação (Graduação em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6123:** forças devidas ao vento em edificações. Rio de Janeiro, 1988.

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

\_\_\_\_\_. **Acidentes causados pelo vento.** 4. ed. rev. e amp. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 2001.

LOREDO-SOUZA, A. M. et al. Simulação da camada limite atmosférica em túnel de vento. In: MOLLER, S. V.; SILVESTRINI, J. H. **Turbulência:** coleção cadernos de turbulência. Vol. 4. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Engenharia e Ciências Mecânicas, 2004.

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL. Laboratório de Aerodinâmica das Construções. Porto Alegre, UFRGS. Apresenta uma explicação geral sobre o túnel. Disponível em: <<http://www.ufrgs.br/lac/tunel.htm>>. Acesso em: 17 nov. 2010a.

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL. Laboratório de Aerodinâmica das Construções. Porto Alegre, UFRGS. Apresenta os usos do túnel para edificações. Disponível em: <<http://www.ufrgs.br/lac/edificios.htm>>. Acesso em: 17 nov. 2010b.

## **APÊNDICE A – Divisão das regiões**

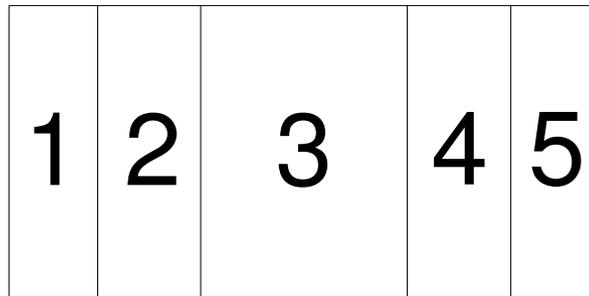


Figura A1: divisão horizontal em regiões para cada zona vertical (aplicável apenas para os diagramas de sucção)

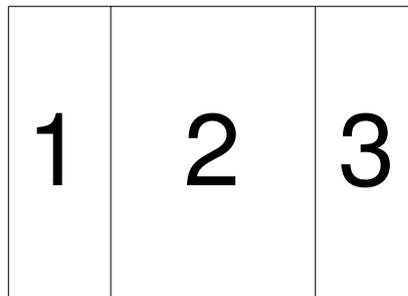


Figura A2: divisão horizontal em regiões para cada zona vertical, para o empreendimento Odebrecht Atlanta e para a Zona VIIb do empreendimento Prosperitas (aplicável apenas para os diagramas de sucção)