

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

**Marcelo Zanfelice Cavalcante**

**COEFICIENTES DE ARRASTO AERODINÂMICO EM  
TORRES TRELIÇADAS DE TRANSMISSÃO:  
CONSIDERAÇÕES SOBRE A NBR 6123/1988**

Porto Alegre  
dezembro 2015

**MARCELO ZANFELICE CAVALCANTE**

**COEFICIENTE DE ARRASTO AERODINÂMICO EM  
TORRES TRELIÇADAS DE TRANSMISSÃO:  
CONSIDERAÇÕES SOBRE A NBR 6123/1988**

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

**Orientador: Acir Mércio Loredou-Souza**

Porto Alegre  
dezembro 2015

**MARCELO ZANFELICE CAVALCANTE**

**COEFICIENTE DE ARRASTO AERODINÂMICO EM  
TORRES TRELIÇADAS DE TRANSMISSÃO:  
CONSIDERAÇÕES SOBRE A NBR 6123/1988**

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 pelos Coordenadores da disciplina Trabalho de Diplomação Engenharia Civil II (ENG01040) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Porto Alegre, dezembro de 2015

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

**BANCA EXAMINADORA**

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

**Gustavo Javier Zani Núñez (UFRGS)**  
D. Sc. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

**Mário Gustavo Klaus Oliveira**  
**(Vento-S Consultoria em Engenharia do Vento Ltda.)**  
D. Sc. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Dedico este trabalho a meus pais, que sempre me apoiaram e especialmente durante o período do meu Curso de Graduação estiveram ao meu lado.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço ao Prof. Acir Mércio Loredo-Souza, orientador deste trabalho, pela paciência e pelo aprendizado no desenvolvimento deste trabalho.

Agradeço a todos que um dia fizeram parte da equipe do Laboratório de Aerodinâmica das Construções e da empresa Vento-S Consultoria em Engenharia do Vento, pela amizade construída e pelo desenvolvimento profissional.

Agradeço aos amigos feitos durante o Curso de Graduação, pela companhia nas incontáveis horas de estudos.

Agradeço à minha família, pelo apoio moral.

Vento  
Pastor das nuvens  
*Mário Quintana*

## RESUMO

CAVALCANTE, M. Z. **Coefficiente de Arrasto Aerodinâmico em Torres Treliçadas de Transmissão**: considerações à NBR 6123/1988. 2015. 82 f. Trabalho de Diplomação (Graduação em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

A energia elétrica vem sendo usada na sociedade há mais de um século. De modo que, atualmente, diversas atividades ligadas aos setores da indústria, comércio e agricultura dependem exclusivamente de seu uso. Com isso, uma interrupção no seu fornecimento causada pelo colapso de torres de transmissão geraria grandes transtornos. Tais torres são, em sua maioria, estruturas treliçadas de aço de baixo peso próprio. Desse modo, o vento representa o principal carregamento e principal responsável pelo colapso de suas estruturas, por isso, torna-se essencial a consideração adequada desse carregamento nos procedimentos de cálculo atualmente adotados para projeto. Neste trabalho foram feitas considerações a respeito da norma que apresenta diretrizes para a estimativa de forças devidas ao vento, a NBR 6123/1988. Valores de coeficiente de arrasto medidos através de ensaios no túnel de vento Prof. Joaquim Blessmann de modelos seccionais de torres reais foram comparados com os valores preconizados pela norma a fim de verificar a diferença entre os mesmos. Conclui-se que a NBR 6123 é adequada somente em casos onde a torre de transmissão possui faces aproximadamente verticais e treliçamento igual em todas as faces. Em casos onde a geometria das estruturas treliçadas não são simétricas ou não possuem seção transversal quadrada ou triangular, os valores medidos dos ensaios são, em média, 20% diferentes dos indicados pela norma.

Palavras-chave: NBR 6123/1988. Torres de transmissão.  
Coeficiente de arrasto. Túnel de vento

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Diagrama das etapas do trabalho .....	20
Figura 2 – Isopletas de velocidade básica $V_0$ (m/s) .....	28
Figura 3 – Coeficientes de arrasto $C_a$ para reticulados planos formados por barras prismáticas .....	36
Figura 4 – Coeficientes de arrasto $C_a$ para reticulados planos formados por barras de seção circular .....	37
Figura 5 – Fator de proteção $\eta$ para dois ou mais reticulados paralelos igualmente espaçados .....	38
Figura 6 – Coeficiente de arrasto $C_a$ para torres reticuladas de seção quadrada e triangular equilátera, formadas por barras prismáticas de faces planas .....	40
Figura 7 – Perfil de velocidades médias do vento .....	41
Figura 8 – Planta baixa do túnel de vento do Laboratório de Aerodinâmica das Construções .....	46
Figura 9 – Dispositivos de geração de perfil de velocidade para expoente $p = 0,11$ .....	49
Figura 10 – Dispositivos de geração de perfil de velocidade para expoente $p = 0,23$ .....	49
Figura 11 – Dispositivos de geração de perfil de velocidade para expoente $p = 0,34$ .....	50
Figura 12 – Dispositivo para geração de vento suave e uniforme .....	50
Figura 13 – Dispositivo de grelha, para geração de vento turbulento e uniforme .....	51
Figura 14 – Perfis de velocidade média do vento para o eixo vertical de duas seções do túnel de vento Prof. Joaquim Blessmann .....	52
Figura 15 – Balança de força instalada sob o piso do túnel de vento .....	55
Figura 16 – Calibração da balança de força .....	56
Figura 17 – Detalhe da calibração da balança .....	56
Figura 18 – Curvas de calibração da balança de força .....	57
Figura 19 – Referência para o ângulo de incidência do vento da torre A33 .....	59
Figura 20 – Referência para o ângulo de incidência do vento da torre A55 .....	59
Figura 21 – Coeficientes de arrasto para a Extensão 6,00m da torre A33 .....	62
Figura 22 – Coeficientes de arrasto para a Extensão 12,00m da torre A33 .....	63
Figura 23 – Coeficientes de arrasto para as Pernas na altura 4,50m na configuração isolada da torre A33 .....	63
Figura 24 – Coeficientes de arrasto para as Pernas na altura 4,50m na configuração de afastamento relativo mínimo da torre A33 .....	64
Figura 25 – Coeficientes de arrasto para as Pernas na altura 4,50m na configuração de afastamento relativo máximo da torre A33 .....	64
Figura 26 – Coeficientes de arrasto para as Pernas na altura 9,00m na configuração isolada da torre A33 .....	65

Figura 27 – Coeficientes de arrasto para as Pernas na altura 9,00m na configuração de afastamento relativo mínimo da torre A33 .....	65
Figura 28 – Coeficientes de arrasto para as Pernas na altura 9,00m na configuração de afastamento relativo máximo da torre A33 .....	66
Figura 29 – Coeficientes de arrasto para a Extensão 6,00m da torre A55 .....	69
Figura 30 – Coeficientes de arrasto para a Extensão 12,00m da torre A55 .....	70
Figura 31 – Coeficientes de arrasto para as Pernas na altura 4,50m na configuração isolada da torre A55 .....	70
Figura 32– Coeficientes de arrasto para as Pernas na altura 4,50m na configuração de afastamento relativo mínimo da torre A55 .....	71
Figura 33 – Coeficientes de arrasto para as Pernas na altura 4,50m na configuração de afastamento relativo máximo da torre A55 .....	71
Figura 34 – Coeficientes de arrasto para as Pernas na altura 10,50m na configuração isolada da torre A55 .....	72
Figura 35 – Coeficientes de arrasto para as Pernas na altura 10,50m na configuração de afastamento relativo mínimo da torre A55 .....	72
Figura 36 – Coeficientes de arrasto para as Pernas na altura 10,50m na configuração de afastamento relativo máximo da torre A55 .....	73
Figura 37 – Identificação dos módulos da Torre A33 .....	78
Figura 38 – Identificação dos módulos da Torre A55 .....	79
Figura 39 – Módulo da Extensão 6,00m da Torre A33 .....	81
Figura 40 – Módulo da Extensão 12,00m da Torre A33 .....	81
Figura 41 – Módulo das Pernas 4,50m da torre A33 na configuração isolada .....	82
Figura 42 – Módulo das Pernas 4,50m da torre A33 na configuração afastamento relativo mínimo .....	82
Figura 43 – Módulo das Pernas 4,50m da torre A33 na configuração afastamento relativo máximo .....	82
Figura 44 – Módulo das Pernas 9,00m da torre A33 na configuração isolada .....	83
Figura 45 – Módulo das Pernas 9,00m da torre A33 na configuração afastamento relativo mínimo .....	83
Figura 46 – Módulo das Pernas 9,00m da torre A33 na configuração afastamento relativo máximo .....	83
Figura 47 – Módulo da Extensão 6,00m da Torre A55 .....	84
Figura 48 – Módulo da Extensão 12,00m da Torre A55 .....	84
Figura 49 – Módulo das Pernas 4,50m da torre A55 na configuração isolada .....	84
Figura 50 – Módulo das Pernas 4,50m da torre A55 na configuração afastamento relativo mínimo .....	85
Figura 51 – Módulo das Pernas 4,50m da torre A55 na configuração afastamento relativo máximo .....	85

Figura 52 – Módulo das Pernas 10,50m da torre A55 na configuração isolada .....	86
Figura 53 – Módulo das Pernas 10,50m da torre A55 na configuração afastamento relativo mínimo .....	86
Figura 54 – Módulo das Pernas 10,50m da torre A55 na configuração afastamento relativo máximo .....	86

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Fator $S_2$ .....	30
Quadro 2 – Fator probabilístico $S_3$ .....	31
Quadro 3 – Valores do fator de redução $K$ para barras de comprimento infinito .....	33
Quadro 4 – Coeficientes de força $C_x$ e $C_y$ para barras prismáticas de faces planas de comprimento infinito .....	34
Quadro 5 – Coeficientes de arrasto $C_a$ para barras prismáticas de seção circular e de comprimento infinito .....	35

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Coeficientes de arrasto para a Extensão 6,00m da torre A33 .....	60
Tabela 2 – Coeficientes de arrasto para a Extensão 12,00m da torre A33 .....	60
Tabela 3 – Coeficientes de arrasto para as Pernas na altura 4,50m na configuração isolada da torre A33 .....	60
Tabela 4 – Coeficientes de arrasto para as Pernas na altura 4,50m na configuração de afastamento relativo mínimo da torre A33 .....	61
Tabela 5 – Coeficientes de arrasto para as Pernas na altura 4,50m na configuração de afastamento relativo máximo da torre A33 .....	61
Tabela 6 – Coeficientes de arrasto para as Pernas na altura 9,00m na configuração isolada da torre A33 .....	61
Tabela 7 – Coeficientes de arrasto para as Pernas na altura 9,00m na configuração de afastamento relativo mínimo da torre A33 .....	61
Tabela 8 – Coeficientes de arrasto para as Pernas na altura 9,00m na configuração de afastamento relativo máximo da torre A33 .....	62
Tabela 9 – Coeficientes de arrasto para a Extensão 6,00m da torre A55 .....	66
Tabela 10 – Coeficientes de arrasto para a Extensão 12,00m da torre A55 .....	67
Tabela 11 – Coeficientes de arrasto para as Pernas na altura 4,50m na configuração isolada da torre A55 .....	67
Tabela 12 – Coeficientes de arrasto para as Pernas na altura 4,50m na configuração de afastamento relativo mínimo da torre A55 .....	67
Tabela 13 – Coeficientes de arrasto para as Pernas na altura 4,50m na configuração de afastamento relativo máximo da torre A55 .....	68
Tabela 14 – Coeficientes de arrasto para as Pernas na altura 10,50m na configuração isolada da torre A55 .....	68
Tabela 15 – Coeficientes de arrasto para as Pernas na altura 10,50m na configuração de afastamento relativo mínimo da torre A55 .....	68
Tabela 16 – Coeficientes de arrasto para as Pernas na altura 10,50m na configuração de afastamento relativo máximo da torre A55 .....	69

## **LISTA DE SIGLAS**

ABNT– Associação Brasileira de Normas Técnicas

NBR – Norma Brasileira

LAC – Laboratório de Aerodinâmica das Construções

UFRGS – Universidade Federal do Rio Grande do Sul

TS – *Thunderstorm*

HP – *Horsepower*

PVC – Policloreto de polivinila

## LISTA DE SÍMBOLOS

$V_k$  – velocidade característica do vento

$V_0$  – velocidade básica do vento

$S_1$  – fator topográfico

$S_2$  – fator que considera o efeito combinado da rugosidade do terreno, da variação da velocidade do vento com a altura acima do terreno e das dimensões da edificação

$S_3$  – fator estatístico

$q$  – pressão dinâmica

$F_a$  – força de arrasto

$C_a$  – coeficiente de arrasto

$A_a$  – área frontal efetiva

$\lambda$  – alongamento

$l$  – comprimento

$C_a$  – comprimento da barra prismática medida em direção perpendicular à direção do vento

$C_f$  – coeficiente de força na direção  $f$

$K$  – fator de redução

$c$  – dimensão de referência na seção transversal

$Re$  – número de Reynolds

$D$  – diâmetro

$\phi$  – índice de área exposta

$A_e$  – área frontal efetiva do reticulado

$A_t$  – área frontal da superfície limitada pelo contorno do reticulado

$C_{an}$  – coeficiente de arrasto de planos múltiplos paralelos

$C_{a1}$  – coeficiente de arrasto de um plano reticulado isolado

$n$  – número de planos reticulados

$\eta$  – fator de proteção

$C_{a\alpha}$  – coeficiente de arrasto de torres com seção quadrada e ângulo de incidência do vento  $\alpha$

$\bar{V}_{(z)}$  – velocidade do vento à altura desejada

$\bar{V}_{(z_{ref})}$  – velocidade do vento à altura desejada

$z$  – altura

$z_d$  – altura da subcamada sobre a superfície

$z_{ref}$  – altura de referência

$p$  – expoente que representa o tipo de terreno

$u_*$  – velocidade de corte

$\kappa$  – constante de Von Kàrman

$z_0$  – rugosidade aerodinâmica

$\beta$  – ângulo da balança de força em relação ao eixo do túnel de vento

$\alpha$  – ângulo de incidência do vento

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	17
<b>2 DIRETRIZES DA PESQUISA</b> .....	18
2.1 QUESTÃO DA PESQUISA .....	18
2.2 OBJETIVOS DA PESQUISA .....	18
<b>2.2.1 Objetivo Principal</b> .....	18
<b>2.2.2 Objetivo Secundário</b> .....	18
2.3 PRESSUPOSTO .....	18
2.4 PREMISSE .....	19
2.5 DELIMITAÇÕES .....	19
2.6 LIMITAÇÕES .....	19
2.7 DELINEAMENTO .....	19
<b>3 HISTÓRICO</b> .....	22
3.1 ACIDENTES .....	22
3.2 MUDANÇAS CLIMÁTICAS .....	23
3.3 TIPOS DE VENTOS FORTES .....	25
<b>3.3.1 Ciclones extratropicais</b> .....	25
<b>3.3.2 Ciclones tropicais</b> .....	25
<b>3.3.3 Tormentas TS</b> .....	25
<b>3.3.4 Explosões descendentes (<i>Downburst</i>)</b> .....	26
<b>3.3.5 Tornados</b> .....	26
<b>3.3.6 Linhas de tormenta</b> .....	26
<b>3.3.7 Ventos regionais</b> .....	26
<b>4 PROCEDIMENTOS NORMATIVOS</b> .....	27
4.1 FORÇA ESTÁTICA DO VENTO .....	27
<b>4.1.1 Velocidade característica</b> .....	27
4.1.1.1 Velocidade básica .....	28
4.1.1.2 Fator topográfico $S_1$ .....	29
4.1.1.3 Fator $S_2$ .....	29
4.1.1.4 Fator probabilístico $S_3$ .....	31
<b>4.1.2 Pressão dinâmica</b> .....	31
<b>4.1.3 Força de arrasto</b> .....	31
4.2 FORÇA DO VENTO EM RETICULADOS .....	32
<b>4.2.1 Barras prismáticas isoladas</b> .....	32

<b>4.2.2 Planos isolados</b> .....	35
<b>4.2.3 Planos múltiplos paralelos</b> .....	37
<b>4.2.4 Torres reticuladas</b> .....	39
<b>5 ESCOAMENTO DO VENTO NATURAL</b> .....	41
5.1 PERFIL DE VELOCIDADES MÉDIAS DO VENTO .....	41
<b>5.1.1 Perfil de velocidades médias em Lei de Potência</b> .....	42
<b>5.1.2 Perfil de velocidades médias em Lei Logarítmica</b> .....	43
5.2 SIMULAÇÃO DO VENTO NATURAL .....	43
<b>5.2.1 Simulação das características do vento natural</b> .....	44
<b>5.2.2 Túnel de vento Prof. Joaquim Blessmann</b> .....	45
<b>6 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL</b> .....	53
6.1 MODELOS ENSAIADOS .....	53
6.2 BALANÇA DE FORÇA .....	54
<b>7 ANÁLISE DE RESULTADOS</b> .....	58
7.1 TORRE A33 .....	60
7.2 TORRE A55 .....	66
<b>8 CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS</b> .....	74
REFERÊNCIAS .....	75
ANEXO A .....	77
ANEXO B .....	80

## 1 INTRODUÇÃO

Devido ao estágio atual do desenvolvimento humano, o consumo de energia elétrica tornou-se, com o passar dos anos, um elemento imprescindível para o bem-estar humano. Diversas atividades ligadas aos setores da agricultura, à indústria e ao comércio são fortemente dependentes de energia elétrica e sua interrupção representa graves problemas aos setores da sociedade.

As linhas de transmissão de energia são o principal meio de fornecimento de energia elétrica para todo o País. Tais linhas são suspensas por torres treliçadas, sendo que, colapsos dessas estruturas ocorrem com frequência elevada em razão dos ventos fortes, causando a interrupção do fornecimento de energia elétrica.

As estruturas treliçadas de linhas de transmissão são executadas com componentes de aço e são, do ponto de vista de projeto, esbeltas e de baixo peso próprio. Deste modo, o vento representa o principal carregamento em sua estrutura. Assim, é essencial que sejam feitas estimativas de carregamento do vento confiáveis para projeto da estrutura.

Atualmente, existem duas Normas Brasileiras que apresentam diretrizes para a estimativa das forças devidas ao vento nessas estruturas: NBR 5422/1985 e NBR 6123/1988. Entretanto, as recomendações nessas Normas são aplicáveis somente a estruturas que apresentam faces verticais e seção transversal quadrada ou triangular equilátera, com treliçamento igual em todas as faces. Embora seja rotina a consideração dos carregamentos devidos ao vento nos procedimentos de cálculo atualmente empregados, ainda ocorrem colapsos de torres de transmissão devidos à força do vento.

Portanto, a principal motivação para a execução do trabalho é propor uma contribuição à NBR 6123/1988, através da comparação dos coeficientes de arrasto resultantes dos ensaios em túnel de vento de torres de transmissão com os coeficientes de arrasto preconizado pelas Normas Brasileiras para estas mesmas torres. O trabalho desenvolve-se com base no trabalho de Rippel (2005)

## **2 DIRETRIZES DA PESQUISA**

As diretrizes para desenvolvimento do trabalho são descritas nos próximos itens.

### **2.1 QUESTÃO DE PESQUISA**

A questão de pesquisa do trabalho é: conhecidos os resultados de ensaios em túnel de vento comparativamente aos que a Normas Brasileiras preconizam, que sugestões podem ser dadas para aprimorar a NBR 6123/1988?

### **2.2 OBJETIVOS DA PESQUISA**

Os objetivos da pesquisa estão classificados em principal e secundários e são descritos a seguir.

#### **2.2.1 Objetivo principal**

O objetivo principal do trabalho é a apresentação de contribuições, em termos de valores de coeficientes de arrasto, para o aperfeiçoamento da NBR 6123/1988 quanto aos estudos de vento em torres treliçadas de transmissão.

#### **2.2.2 Objetivos secundários**

O objetivo secundário do trabalho é a verificação dos resultados dos coeficientes de arrasto de ensaios em modelo reduzido de torres de transmissão em túnel de vento comparados com os valores da NBR 6123.

### **2.3 PRESSUPOSTO**

O trabalho tem por pressuposto que os dados de ensaios realizados em túnel de vento fornecem valores mais próximos da realidade.

## 2.4 PREMISSA

O trabalho tem por premissa que, apesar de a consideração dos carregamentos do vento ser rotina nos procedimentos de cálculo de projeto atualmente empregados, ainda ocorrem colapsos de estruturas de torres treliçadas devidos a ventos fortes.

## 2.5 DELIMITAÇÕES

O trabalho delimita-se à utilização de resultados de ensaios de modelos específicos de torres de transmissão de Furnas Centrais Elétricas realizados no Laboratório de Aerodinâmica das Construções.

## 2.6 LIMITAÇÕES

São limitações do trabalho:

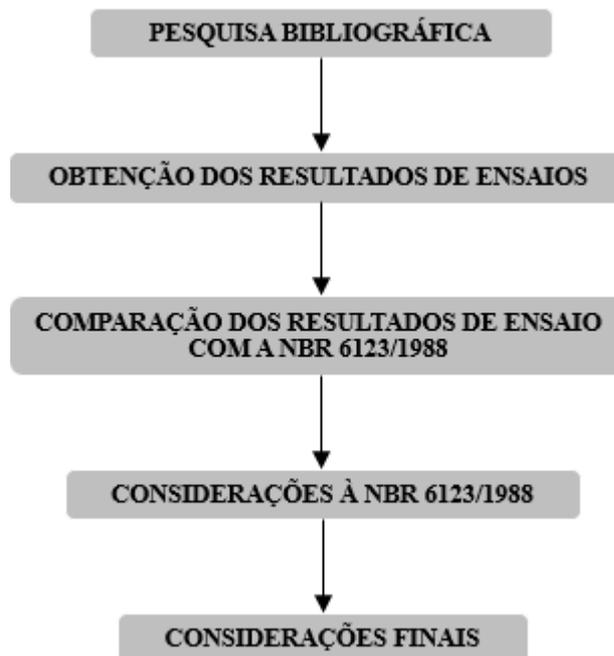
- a) os ensaios foram realizados com dois modelos distintos em escala reduzida;
- b) para a obtenção de dados de ensaio, foi utilizada uma balança de força unidirecional horizontal instrumentada com extensômetros elétricos de resistência;
- c) os ângulos de incidência do vento sobre as torres foram de 0°, 45° e 90° para a torre denominada A33 e 0°, 30°, 56° e 90° para a torre denominada A55;
- d) os dados analisados são dos módulos da Extensão e das Pernas de ambas as torres.

## 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) obtenção dos resultados de ensaios em túnel de vento das torres treliçadas em estudo;
- c) comparação dos resultados dos ensaios com a NBR 6123/1988;
- d) contribuições à NBR 6123/1988;
- e) considerações finais.

Figura 1 – Diagrama das etapas do trabalho



(fonte: elaborado pelo autor)

Primeiramente, foi realizada a **pesquisa bibliográfica** possibilitando um profundo conhecimento e embasamento no assunto a ser estudado. Para isso, foram utilizadas as Normas brasileiras vigentes, artigos científicos, trabalhos de conclusão, teses, dissertações e, principalmente, obras de autoria do Prof. Joaquim Blessmann, que são referências técnicas na engenharia do vento.

Em seguida, foi realizada a **obtenção dos resultados de ensaios** disponibilizados pelo Laboratório de Aerodinâmica das Construções das torres de transmissão estudadas, sendo possível visualizar, através de gráficos, diagramas e tabelas, os valores de coeficiente de arrasto aerodinâmico para cada ângulo de incidência do vento das torres de transmissão.

Logo após conhecer os valores de coeficiente de arrasto dos ensaios, juntamente com os valores que a norma indica para a utilização do projeto das torres de transmissão em estudo, pode ser feita a **comparação dos resultados de ensaio com a NBR 6123/1988**. Nesta etapa, foram elaborados gráficos comparativos dos valores de coeficiente de arrasto medido em túnel de vento com os valores indicados pela NBR 6123/1988.

De posse da comparação dos resultados de ensaio com a NBR 6123/1988, foram feitas **considerações à NBR 6123/1988**, através de uma análise dos resultados obtidos.

Finalmente, foram realizadas as **considerações finais**, onde realizou-se uma análise final de todo o trabalho para, futuramente, dar sequência ao processo de contribuições à NBR 6123/1988.

### 3 HISTÓRICO

Antigamente, o vento não representava grandes esforços nas estruturas, pois as edificações eram, em suma, relativamente baixas, robustas e apresentavam pesadas paredes grossas, de modo que o vento podia ser desconsiderado no carregamento global das edificações. Mas, gradativamente, as estruturas passaram a ser mais esbeltas e altas. As estruturas passaram a ser construídas no limite do conhecimento, possuindo formato e alturas desafiadoras para a engenharia. Além disso, as empresas passaram a demonstrar uma preocupação maior com economia e otimização dos projetos, utilizando menos material para a construção das estruturas. Assim sendo, a consideração dos carregamentos devidos ao vento nessas edificações, para um correto dimensionamento de suas estruturas e acabamento, tornou-se necessária. Entretanto, nem sempre esses carregamentos são considerados de forma correta.

A energia elétrica, inicialmente, era transmitida apenas para poucas localidades e em menor escala. Entretanto, ainda no início do século XX, por aumento na demanda, a transmissão de energia logo precisou ser aumentada, necessitando a construção de grandes torres por onde é transmitida toda a energia de uma determinada região.

Além disso, o aumento da necessidade do consumo de energia elétrica das últimas décadas devido a dependência de atividades dos diversos setores da sociedade provocou um aumento na capacidade de transmissão energia das linhas elétricas, sendo preciso torres ainda maiores e mais altas para sustentar essas linhas, sofrendo assim um maior carregamento do vento.

#### 3.1 ACIDENTES

A humanidade atingiu um ponto em que o consumo de energia elétrica tornou-se imprescindível para a manutenção da ordem e do bem-estar da população. Por isso, a interrupção do fornecimento de energia por longos períodos de tempo tornou-se inadmissível. E essa interrupção do fornecimento é causada, principalmente, pelo colapso das torres de linha de transmissão, que ocorrem devidos a fenômenos meteorológicos que causam ventos fortes.

Além disso, ao colapsar uma torre, pode desencadear o efeito cascata, definido por Bentes (2013, p. 37) como:

O efeito cascata nas linhas de transmissão é o colapso progressivo em larga escala de várias estruturas individuais as quais colapsam uma após a outra semelhante ao chamado efeito dominó. A cascata pode ocorrer tanto no sentido transversal, quanto no sentido longitudinal da linha, dependendo da origem do carregamento e de qual elemento estrutural tenha atingido a ruptura. Nas últimas décadas a maioria das cascatas ocorridas foi longitudinal, quando desencadeadas pela falha de algum elemento estrutural que mantinha a tensão nos condutores. Contudo, quando uma estrutura de suspensão falha na direção transversal, os vãos adjacentes tornam-se muito maiores e, também, altos valores de solicitação são induzidos nas estruturas adjacentes, originando significantes carregamentos em desequilíbrio na transversal e na longitudinal. Se estas estruturas falham, um colapso progressivo pode ser desencadeado, originando uma cascata transversal.

Em setembro de 2014, a região oeste do estado do Paraná foi atingida por uma tempestade que derrubou cinco torres de transmissão de energia, em Cafelândia. As torres, que tinham catorze toneladas e mais de quarenta metros de altura, foram construídas para resistir a ventos de até 150 km/h e, recentemente, haviam recebido um reforço para suportar ventos de até 190 km/h. Ainda assim, as rajadas de vento foram suficientes para derrubar as referidas torres (TORRES..., 2014).

Em 2013, mais 170.000 pessoas ficaram, por aproximadamente 20 horas, sem energia elétrica devido à queda de torres de transmissão ocasionada por ventos fortes em três cidades no sul do Rio de Janeiro (QUEDA..., 2013).

Em 2014, às vésperas da Copa do Mundo, a queda de duas torres de transmissão da linha Foz do Iguaçu-Ivaiporã limitou a operação da usina de Itaipu. Voltando a funcionar na sua totalidade somente um dia antes do início do Mundial. Em 2009, a queda de torres dessa mesma linha provocou um apagão que afetou dezoito estados brasileiros (QUEDA..., 2014).

### 3.2 MUDANÇAS CLIMÁTICAS

Blessmann (2001, p. 106) alertou sobre os indícios de que, devido ao efeito estufa, as condições climáticas estavam para ser alteradas no Brasil, ocasionando um aumento considerável nas velocidades do vento na região costeira, inclusive a possibilidade de ocorrência de fenômenos ainda mais destruidores, como ciclones tropicais, até então inéditos nesta região.

Os ciclones tropicais, ou furacões, frequentes no hemisfério Norte do Oceano Atlântico e nos Oceanos Índico e Pacífico em ambos os hemisférios, são grandes tempestades na atmosfera terrestre, podendo chegar 1000 km de diâmetro e núcleo de 20 km, são caracterizados por uma região onde a pressão é menor e a temperatura ambiente é ligeiramente maior do que sua

vizinhança. São formados a partir do ar úmido e quente presentes sobre as grandes extensões de água com temperatura igual ou superior a 27 °C (BLESSMANN, 2001).

A costa brasileira estava livre desses fenômenos pois, devido à uma corrente marítima fria vinda da Antártica, a temperatura da água não chegava aos 27 °C necessários para a ocorrência de tal evento. Entretanto, devido à emissão descontrolada de gases causadores do efeito estufa (clorofluocarbonados e dióxido de carbono) e ao desmatamento quase por completo das florestas na Europa e da América do Norte, a temperatura da água marinha na costa brasileira está em elevação. Este aumento propicia novas ocorrências de furacões na costa brasileira e um aumento na frequência de grandes tempestades (BLESSMANN, 2001).

Em março de 2004 foi registrado o primeiro furacão na costa brasileira, o Catarina. Inicialmente, por achar pouco provável a ocorrência de furacões no Brasil, meteorologistas informavam que não passava de um fenômeno rotineiro, com chuva e ventos moderados. Enquanto isso, as imagens de satélite mostravam claramente um furacão em desenvolvimento, com seu núcleo bem definido e diâmetro de, aproximadamente, 800 km. Entretanto, o Centro de Informações de Recursos Ambientais e de Hidro meteorologia de Santa Catarina já considerava o fenômeno como furacão e, ainda no dia 26 de março, um dia antes da tempestade chegar à costa, batizara-o como Catarina. Embora tenha sido classificado como Categoria 1 de furacões, ou seja, nível fraco de destruição, o Catarina teve ventos de 136 km/h a 144 km/h. Os resultados desse despreparo, tanto das autoridades e meteorologistas para alertar a população sobre o fenômeno em formação, quanto das estruturas, não preparadas para suportar ventos tão fortes, foram algumas mortes e a destruição de cidades inteiras no sul do Brasil. Em Torres, houve a queda de torres de transmissão de energia e de telefonia móvel, deixando a cidade sem energia elétrica e sem comunicação por mais de doze horas (BLESSMANN, 2013).

Em 2010, o sistema internacional de monitoramento de ciclones tropicais da Marinha dos Estados Unidos emitiu uma nota, alertando sobre a possibilidade eminente da formação de um novo furacão na costa brasileira. A tempestade tropical Anita, como foi chamado posteriormente, teve características de furacão desde o dia 9 de março. Contudo, no dia 11 de março, a tempestade perdeu força e mudou de direção, ainda no oceano, sem causar qualquer dano à edificações ou a pessoas. Portanto, pode-se dizer que este foi o segundo furacão registrado no Hemisfério Sul do Oceano Atlântico (BLESSMANN, 2013).

### 3.3 TIPO DE VENTO FORTES

Segundo Blessmann (2013), o vento se origina pelas diferenças na pressão atmosférica, causadas pela energia proveniente do Sol, gerando um aquecimento não uniforme da atmosfera, ocasionando variações na temperatura do ar.

A seguir, serão apresentados alguns tipos de ventos de altas velocidades (ventos fortes) capazes de causar o colapso de torres de transmissão, independentemente de seu mecanismo de formação.

#### 3.3.1 Ciclones extratropicais

De acordo com Blessmann (2013, p. 26, grifo do autor), os ciclones extratropicais, ou tormentas EPS (*extended mature pressure systems* ou *extratropical pressure systems*), definem-se por:

[Ciclones extratropicais] são movimentos circulatórios de ar em torno de centros de baixa pressão, originados por **ação mecânica** de cadeias de montanhas sobre correntes atmosféricas de grandes dimensões ou pelo **contraste térmico** entre duas massas de ar, uma de origem polar (fria, seca e pesada) e outra situada na zona subtropical, com ar mais quente, úmido e leve do que a massa polar. Ao se encontrarem podem formar ondulações na atmosfera. Em certas circunstâncias essas ondulações aumentam em amplitude e de encurvamento, enrolam-se em forma de vórtices, dando origem a ciclones extratropicais.

#### 3.3.2 Ciclones tropicais

Blessmann (2013, p. 27) também definiu ciclones tropicais:

[Ciclones tropicais] são semelhantes na forma aos ciclones extratropicais, porém podem chegar a ter maiores dimensões. Formam-se a partir do ar úmido e quente existente sobre grandes extensões de água com temperatura acima de 26,8 °C, em regiões tropicais e subtropicais dos oceanos.

#### 3.3.3 Tormentas TS

Segundo Blessmann (2013, p. 34, grifo do autor), tormentas elétricas TS (*Thunderstorm*) definem-se como:

[Tormentas elétricas TS] são caracterizadas por uma atmosfera verticalmente instável, isto é, com gradiente térmico vertical considerável, **superadiabático**. Há violentos movimentos verticais de ar, com formação de nuvens a grandes alturas, às vezes acima de 22 km.

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

### 3.3.4 Explosões descendentes (*Downburst*)

Explosões descendentes, ou *Downburst*, são definidas por Blessmann (2013, p. 36): “[Explosões descendentes] têm sua origem em ventos violentos, súbitos (*burst*), que se deslocam como um forte jato de ar, que desce mais ou menos verticalmente, e que ao chegar próximo do solo é desviado em todas as direções.”.

### 3.3.5 Tornados

Segundo Blessmann (2013, p. 39, grifo do autor):

Tornado vem a ser um redemoinho no interior do qual o ar move-se circularmente, atingindo altas velocidades em sua região central. Um modelo matemático que descreve muito bem o fenômeno (e que permite o cálculo das forças nele geradas) é o do **vórtice combinado de Rankine**. A parte central desse vórtice, o **núcleo**, comporta-se como um **vórtice forçado**, com a velocidade tangencial proporcional à distância ao centro do tornado (**eixo**). Fora desse núcleo o comportamento é o de um **vórtice livre**, com a velocidade inversamente proporcional à distância ao eixo.

### 3.3.6 Linhas de tormenta

Ainda segundo Blessmann (2013, p. 49):

As linhas de tormenta (*squall lines*) são regiões instáveis da atmosfera, de grande extensão na direção transversal à direção do movimento de uma frente fria (com até algumas centenas de quilômetros). Originam-se quando uma frente fria, com movimento rápido, desloca-se contra uma massa de ar quente, úmido e de instabilidade acentuada.

### 3.3.7 Ventos regionais

Segundo Blessmann (2013, p. 50): “[Ventos regionais] são ventos em que condições locais peculiares originam características próprias, pela influência de vales, montanhas, desníveis bruscos no terreno, etc.”.

## 4 PROCEDIMENTOS NORMATIVOS

As torres de linhas de transmissão, por apresentarem baixo peso próprio, possuem o vento como o principal carregamento de forças nas estruturas para fins de cálculo. Por isso, é essencial que os efeitos do vento sejam considerados no cálculo de projeto dessas estruturas. A NBR 6123/1988 é a norma brasileira que apresenta as diretrizes para determinar esses carregamentos para fins de cálculo de projeto.

### 4.1 FORÇA ESTÁTICA DO VENTO

A força estática global do vento pode ser calculada segundo a NBR 6123/1988. O procedimento de cálculo é apresentado a seguir.

#### 4.1.1 Velocidade característica

A velocidade característica do vento é definida em função da velocidade básica do vento para uma determinada região e de fatores topográficos e probabilísticos considerados no projeto.

$$V_k = V_0 \times S_1 \times S_2 \times S_3 \quad (\text{fórmula 1})$$

Onde:

$V_k$  = velocidade característica do vento [m/s];

$V_0$  = velocidade básica do vento [m/s];

$S_1$  = fator topográfico [adim];

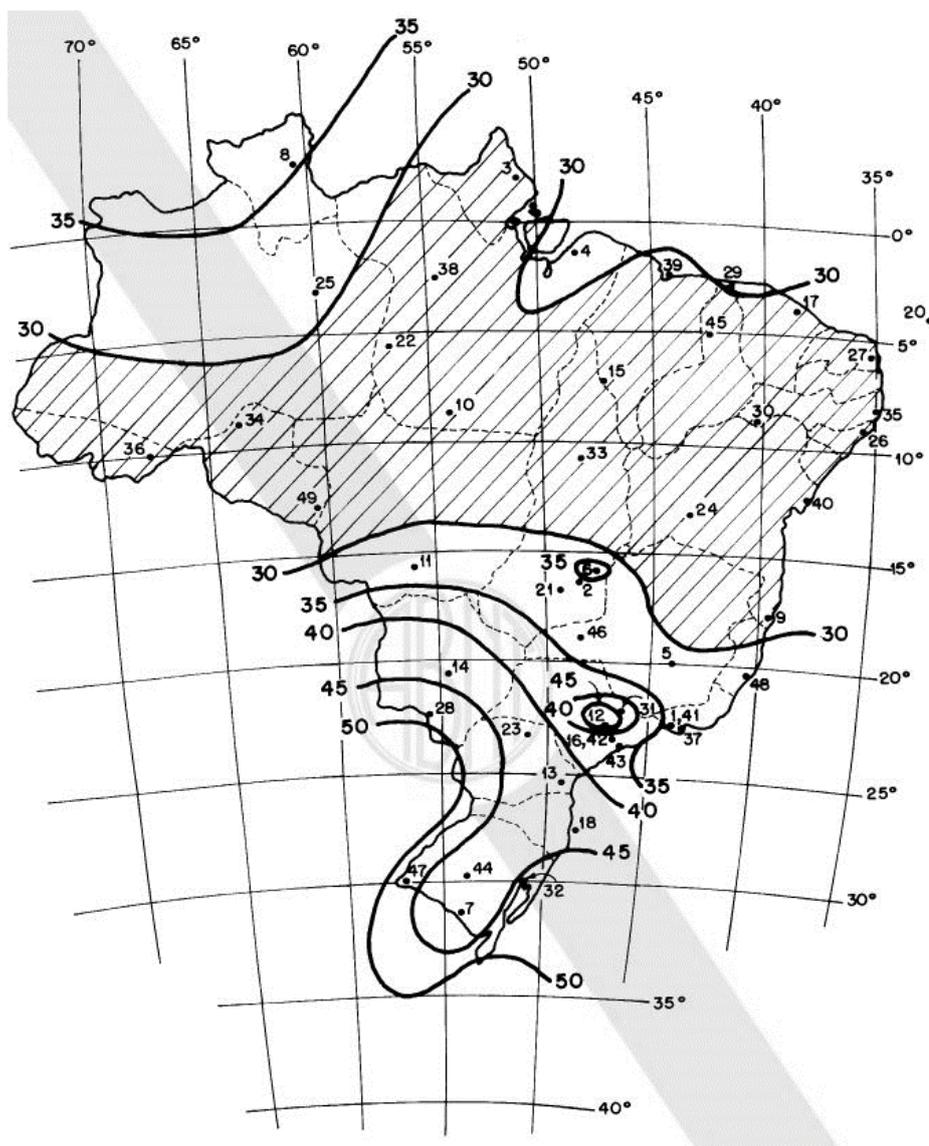
$S_2$  = fator que considera o efeito combinado da rugosidade do terreno, da variação da velocidade do vento com a altura acima do terreno e das dimensões da edificação [adim];

$S_3$  = fator estatístico [adim].

#### 4.1.1.1 Velocidade básica

Os valores de velocidade básica do vento situam-se entre 30 e 50 m/s e são definidos por uma rajada de três segundos de duração, excedida uma vez a cada cinquenta anos, a dez metros de altura sobre terreno plano e aberto. Essas velocidades são apresentadas através do mapa de isopleias, que foi obtido através de registros de rajadas máximas de quarenta e nove estações, situadas em diversos aeroportos do País (BLESSMANN, 1990a, p. 7).

Figura 2 – Isopleias de velocidade básica  $V_0$  (m/s)



(fonte: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1988, p. 6)

#### 4.1.1.2 Fator topográfico $S_1$

O fator topográfico  $S_1$ , que leva em consideração as variações do relevo do terreno, é apresentado por Klein (2004, p. 15-16, grifo do autor):

O fator topográfico  $S_1$  depende somente das características do relevo do terreno, levando em consideração o aumento da velocidade do vento na presença de morros e taludes. Então,  $S_1$ , será menor que a unidade nos raros casos de proteção topográfica, igual à unidade para terrenos ao menos aproximadamente em nível e maior que um quando o terreno apresentar morros, taludes, colinas.

#### 4.1.1.3 Fator $S_2$

A Associação Brasileira De Normas Técnicas (1988) classifica os terrenos 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. Exemplos,
  - mar calmo;
  - lagos e rios;
  - pântanos sem vegetação
- b) categoria II: terrenos abertos em nível ou aproximadamente em nível, com poucos obstáculos isolados, tais como árvores e edificações baixas. Exemplos,
  - zonas costeiras planas;
  - pântanos com vegetação rala;
  - campos de aviação;
  - pradarias e charnecas;
  - fazendas sem sebes ou muros;
- c) categoria III: terrenos planos ou ondulados com obstáculos, tais como sebes e muros, poucos quebra-ventos de árvores, edificações baixas e esparsas: Exemplo,
  - granjas e casas de campo, com exceção das partes com matos;
  - fazendas com sebes;
  - subúrbios a considerável distância do centro, com casas baixas e esparsas;
- d) categoria IV: terrenos cobertos por obstáculos numerosos e pouco espaçados, em zona florestal, industrial ou urbanizada. Exemplo,
  - parques e florestas com muitas árvores;
  - cidades pequenas;
- e) categoria V: terrenos cobertos por obstáculos numerosos, grandes, altos e pouco espaçados. Exemplos,
  - florestas com árvores altas, de copas isoladas;
  - centro de grandes cidades;

– complexos industriais bem desenvolvidos.

A Associação Brasileira De Normas Técnicas (1988, p. 9) classifica as dimensões das edificações como:

- 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.

Assim, o fator  $S_2$  para as categorias de terreno e classes de edificações é obtido através do Quadro 1:

Quadro 1 – Fator  $S_2$

z (m)	Categoria														
	I			II			III			IV			V		
	Classe			Classe			Classe			Classe			Classe		
	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C
≤ 5	1,06	1,04	1,01	0,94	0,92	0,89	0,88	0,86	0,82	0,79	0,76	0,73	0,74	0,72	0,67
10	1,10	1,09	1,06	1,00	0,98	0,95	0,94	0,92	0,88	0,86	0,83	0,80	0,74	0,72	0,67
15	1,13	1,12	1,09	1,04	1,02	0,99	0,98	0,96	0,93	0,90	0,88	0,84	0,79	0,76	0,72
20	1,15	1,14	1,12	1,06	1,04	1,02	1,01	0,99	0,96	0,93	0,91	0,88	0,82	0,80	0,76
30	1,17	1,17	1,15	1,10	1,08	1,06	1,05	1,03	1,00	0,98	0,96	0,93	0,87	0,85	0,82
40	1,20	1,19	1,17	1,13	1,11	1,09	1,08	1,06	1,04	1,01	0,99	0,96	0,91	0,89	0,86
50	1,21	1,21	1,19	1,15	1,13	1,12	1,10	1,09	1,06	1,04	1,02	0,99	0,94	0,93	0,89
60	1,22	1,22	1,21	1,16	1,15	1,14	1,12	1,11	1,09	1,07	1,04	1,02	0,97	0,95	0,92
80	1,25	1,24	1,23	1,19	1,18	1,17	1,16	1,14	1,12	1,10	1,08	1,06	1,01	1,00	0,97
100	1,26	1,26	1,25	1,22	1,21	1,20	1,18	1,17	1,15	1,13	1,11	1,09	1,05	1,03	1,01
120	1,28	1,28	1,27	1,24	1,23	1,22	1,20	1,20	1,18	1,16	1,14	1,12	1,07	1,06	1,04
140	1,29	1,29	1,28	1,25	1,24	1,24	1,22	1,22	1,20	1,18	1,16	1,14	1,10	1,09	1,07
160	1,30	1,30	1,29	1,27	1,26	1,25	1,24	1,23	1,22	1,20	1,18	1,16	1,12	1,11	1,10
180	1,31	1,31	1,31	1,28	1,27	1,27	1,26	1,25	1,23	1,22	1,20	1,18	1,14	1,14	1,12
200	1,32	1,32	1,32	1,29	1,28	1,28	1,27	1,26	1,25	1,23	1,21	1,20	1,16	1,16	1,14
250	1,34	1,34	1,33	1,31	1,31	1,31	1,30	1,29	1,28	1,27	1,25	1,23	1,20	1,20	1,18
300	-	-	-	1,34	1,33	1,33	1,32	1,32	1,31	1,29	1,27	1,26	1,23	1,23	1,22
350	-	-	-	-	-	-	1,34	1,34	1,33	1,32	1,30	1,29	1,26	1,26	1,26
400	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1,34	1,32	1,32	1,29	1,29	1,29
420	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1,35	1,35	1,33	1,30	1,30	1,30
450	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1,32	1,32	1,32
500	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1,34	1,34	1,34

(fonte: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1988, p. 10)

#### 4.1.1.4 Fator probabilístico $S_3$

O valor do fator probabilístico  $S_3$  considera a segurança necessária da edificação e é dado pelo Quadro 2. Para o caso de torres de transmissão, o valor considerado é 1.

Quadro 2 – Fator probabilístico  $S_3$

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

(fonte: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1988, p. 10)

#### 4.1.2 Pressão dinâmica

Através da velocidade característica do vento, pode-se calcular a pressão dinâmica:

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

Onde:

$q$  = pressão dinâmica [N/m<sup>2</sup>];

$V_k$  = velocidade característica do vento [m/s].

#### 4.1.3 Força de arrasto

A força de arrasto aerodinâmico sobre uma edificação é obtida por:

$$F_a = C_a \times q \times A_e \quad (\text{fórmula 3})$$

Onde:

$F_a$  = força de arrasto [N];

$C_a$  = coeficiente de arrasto [adim];

$q$  = pressão dinâmica [N/m<sup>2</sup>];

$A_e$  = área frontal efetiva [m<sup>2</sup>].

## 4.2 FORÇA DO VENTO EM RETICULADOS

Em estruturas reticuladas, devido ao seu baixo peso próprio, o vento representa o principal carregamento. Sendo assim, é necessária uma correta estimativa da força exercida pelo vento.

### 4.2.1 Barras prismáticas isoladas

Os coeficientes de forças para barras prismáticas, resultantes da ação do vento, são determinados para escoamento bidimensional. Este escoamento ocorre quando, em qualquer plano perpendicular ao eixo da barra, as características são iguais. Para isso, as barras devem ser de grande alongamento ou ter placas perpendiculares ao eixo em seus extremos, desprezando as ações próximas às extremidades (BLESSMANN, 1990a, p. 33).

Segundo a Associação Brasileira de Normas Técnicas (1988), as barras prismáticas de comprimento infinito são multiplicadas por um coeficiente  $K$ , que depende do alongamento da barra e das características aerodinâmicas da seção, sendo considerado três casos típicos: barras prismáticas de seção circular em regime subcrítico, barras prismáticas de seção circular em regime crítico e barras prismáticas de faces planas

A fórmula 4 apresenta a definição de alongamento da barra.

$$\lambda = l / C_{\alpha} \quad (\text{fórmula 4})$$

Onde:

$\lambda$  = alongamento da barra [adim];

$l$  = comprimento da barra [m];

$C_{\alpha}$  = comprimento da barra prismática medida em direção perpendicular à direção do vento [m].

Os valores do coeficiente  $K$  encontram-se no Quadro 3.

Quadro 3 – Valores do fator de redução  $K$  para barras de comprimento infinito

$l/c_{\alpha}$ ou $l/d$	2	5	10	20	40	50	100	$\infty$
Barras prismáticas de seção circular em regime subcrítico ( $Re < 4,2 \cdot 10^5$ )	0,58	0,62	0,68	0,74	0,82	0,87	0,98	1,0
Barras prismáticas de seção circular em regime acima do crítico ( $Re \geq 4,2 \cdot 10^5$ )	0,80	0,80	0,82	0,90	0,98	0,99	1,0	1,0
Barras prismáticas de faces planas	0,62	0,66	0,69	0,81	0,87	0,90	0,95	1,0

(fonte: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1988, p. 25)

Para barras prismáticas de face plana, são definidos dois eixos de referência perpendiculares entre si,  $x$  e  $y$ , e os coeficientes de força são  $C_x$  e  $C_y$ , respectivamente, e o Quadro 4 apresenta estes coeficientes para quatro ângulos de incidência do vento, porém sempre perpendicular ao eixo longitudinal da barra.

Quadro 4 – Coeficientes de força  $C_x$  e  $C_y$  para barras prismáticas de faces planas de comprimento infinito

$\alpha$	$C_x$	$C_y$	$C_x$	$C_y$	$C_x$	$C_y$	$C_x$	$C_y$
0°	+1,9	+0,95	+1,8	+1,8	+1,75	+0,1	+1,6	0
45°	+1,8	+0,8	+2,1	+1,8	+0,85	+0,85	+1,5	-0,1
90°	+2,0	+1,7	-1,9	-1,0	+0,1	+1,75	-0,95	+0,7
135°	-1,8	-0,1	-2,0	+0,3	-0,75	+0,75	-0,5	+1,05
180°	-2,0	+0,1	-1,4	-1,4	-1,75	-0,1	-1,5	0
$\alpha$	$C_x$	$C_y$	$C_x$	$C_y$	$C_x$	$C_y$	$C_x$	$C_y$
0°	+2,0	0	+2,5	0	+1,4	0	+2,05	0
45°	+1,2	+0,9	+1,85	+0,6	+1,2	+1,6	+1,95	+0,6
90°	-1,6	+2,15	0	+0,6	0	+2,2	+0,5	+0,9
135°	-1,1	+2,4	-1,6	+0,4	-	-	-	-
180°	-1,7	$\pm 2,1$	-1,8	0	-	-	-	-
$\alpha$	$C_x$	$C_y$	$C_x$	$C_y$	$C_x$	$C_y$	$C_x$	$C_y$
0°	+1,6	0	+2,0	0	+2,1	0	+2,0	0
45°	+1,5	+1,5	+1,8	+0,1	+1,4	+0,7	+1,55	+1,55
90°	0	+1,9	0	+0,1	0	+0,75	0	+2,0

(fonte: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1988, p. 25)

Com isso, é possível calcular as forças correspondentes  $F_x$  e  $F_y$ .

$$F = C_f \times K \times q \times l \times c \quad (\text{fórmula 5})$$

Onde:

$C_f$  = coeficiente de força na direção desejada [adim];

$K$  = fator de redução [adim];

$q$  = pressão dinâmica de referência [ $N/m^2$ ];

$l$  = comprimento da barra [m];

$c$  = dimensão de referência na seção transversal [m].

Para barras de seção circular, o coeficiente de força depende do número de Reynolds do regime de escoamento e são apresentados no Quadro 5.

Quadro 5 – Coeficientes de arrasto  $C_a$  para barras prismáticas de seção circular e de comprimento infinito

Regime de fluxo ( $Re = 70000 V_k d$ ) [ $V_k$ em m/s; $d$ em m]		$C_a$
Subcrítico	$Re < 4,2 \cdot 10^5$	1,2
Acima do crítico	$4,2 \cdot 10^5 \leq Re < 8,4 \cdot 10^5$	0,6
	$8,4 \cdot 10^5 \leq Re < 2,3 \cdot 10^6$	0,7
	$Re \geq 2,3 \cdot 10^6$	0,8

(fonte: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1988, p. 26)

Em reticulados compostos por barras de seção circular, o número de Reynolds é dado por:

$$Re = 70000 \times V_k \times d \quad (\text{fórmula 6})$$

Onde:

$V_k$  = velocidade característica da região [m/s];

$d$  = diâmetro das barras [m].

#### 4.2.2 Planos isolados

De acordo com Blessmann (1990a, p. 38), a ação do vento em planos isolados pode ser obtida tanto por análise dos coeficientes de força individualmente em cada barra, quanto por um

coeficiente de força global, considerando a estrutura como um todo. Para tanto, é necessário conhecer o conceito de índice de área exposta, referente à relação entre área efetiva do reticulado e área total de contorno, de modo que sua magnitude varia entre 0 e 1, onde este último representa uma estrutura totalmente sólida.

$$\varphi = A_e / A_t \quad (\text{fórmula 7})$$

Onde:

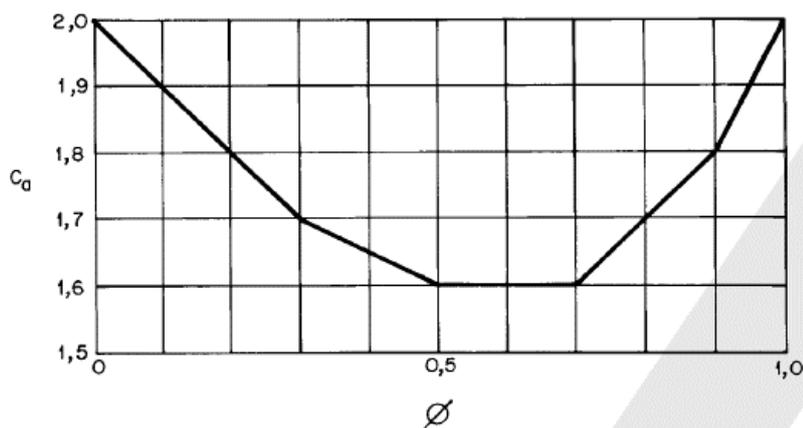
$\varphi$  = índice de área exposta [adim];

$A_e$  = área frontal efetiva do reticulado [m<sup>2</sup>];

$A_t$  = área frontal da superfície limitada pelo contorno do reticulado [m<sup>2</sup>].

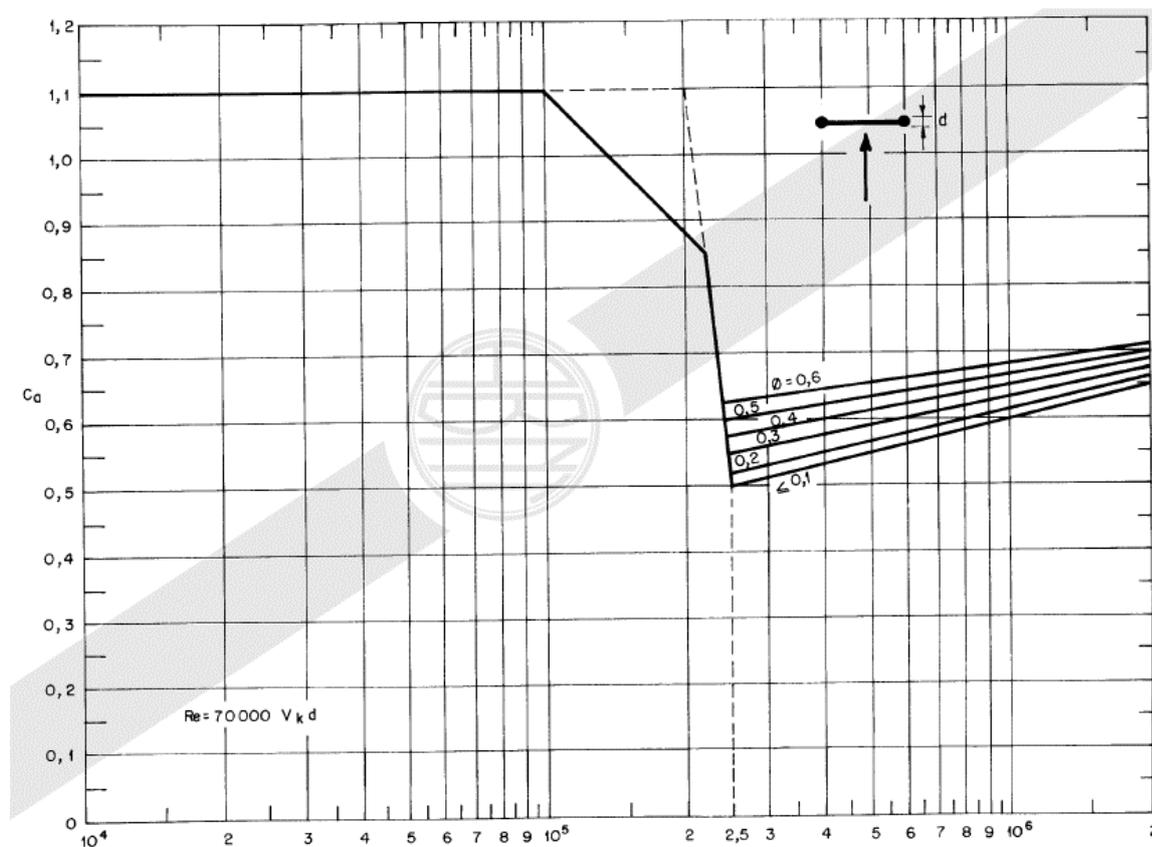
Os coeficientes de arrasto para reticulados planos isolados formados por barras de seção de face plana e de seção circular são obtidos através das Figuras 3 e 4.

Figura 3 – Coeficientes de arrasto  $C_a$  para reticulados planos formados por barras prismáticas



(fonte: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1988, p. 27)

Figura 4 – Coeficientes de arrasto  $C_a$  para reticulados planos formados por barras de seção circular



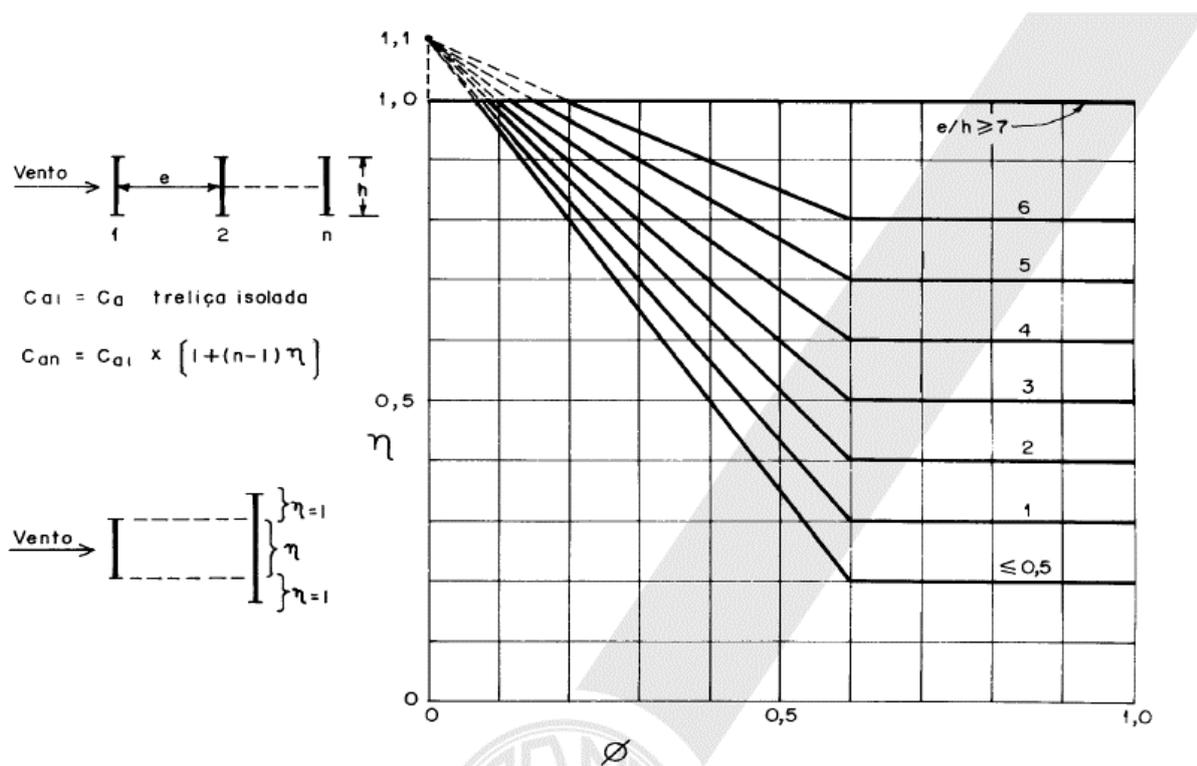
(fonte: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1988, p. 28)

### 4.2.3 Planos múltiplos paralelos

Em planos reticulados paralelos equidistantes nota-se um efeito de proteção dos efeitos do vento sobre os planos a sotavento gerado pelo plano a barlavento. Este efeito de proteção é determinado através do fator de proteção  $\eta$ , que depende do índice de área exposta e do afastamento relativo entre dois reticulados (BLESSMANN, 1990a, p. 42).

Para determinar o fator de proteção  $\eta$  usa-se a Figura 5.

Figura 5 – Fator de proteção  $\eta$  para dois ou mais reticulados paralelos igualmente espaçados



(fonte: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1988, p. 29)

Para determinar o coeficiente de arrasto de planos múltiplos deve-se levar em conta o número de planos reticulados iguais, paralelos e igualmente espaçados, o efeito de proteção gerado pelo plano a barlavento e o coeficiente de arrasto de um plano reticulado isolado (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1988).

$$C_{an} = C_{a1} [1 + (n-1) \eta] \quad (\text{fórmula 8})$$

Onde:

$C_{an}$  = coeficiente de arrasto de planos múltiplos paralelos [adim];

$C_{a1}$  = coeficiente de arrasto de um plano reticulado isolado [adim];

$n$  = número de planos reticulados [adim];

$\eta$  = fator de proteção [adim].

#### 4.2.4 Torres reticuladas

Torres reticuladas são estruturas formadas por mais de um plano, geralmente com seção constante retangular ou triangular equilátera. Entretanto, os resultados podem se aplicar a casos em que as faces das torres têm uma leve inclinação.

A força de arrasto do vento, para incidência paralela às faces das torres, pode ser considerada nula. Por isso, quando o vento está incidindo perpendicularmente a uma face sobre uma torre de seção retangular, uma torre reticulada pode ser tratada como reticulado plano paralelo, ignorando o efeito de proteção sobre as faces paralelas ao vento (BLESSMANN, 1990a, p. 45).

Um caso particular é quando a seção da torre é quadrada. Neste caso, o coeficiente de arrasto é multiplicado a um fator  $K_\alpha$ , e varia conforme o ângulo de incidência do vento perpendicularmente sobre a face.

$$C_{a\alpha} = K_\alpha \times C_{a1} \quad (\text{fórmula 9})$$

Onde:

$C_{a\alpha}$  = coeficiente de arrasto de torres com seção quadrada e ângulo de incidência do vento  $\alpha$  [adim];

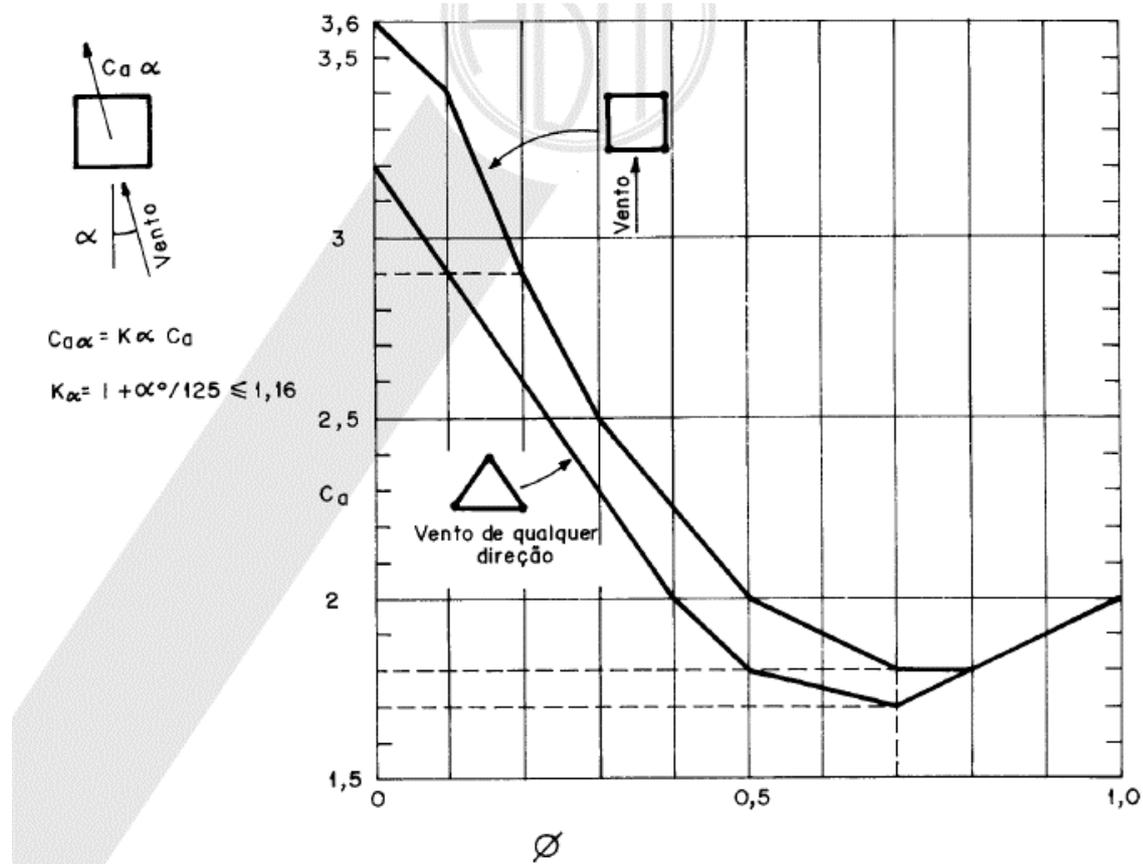
$C_{a1}$  = coeficiente de arrasto de um plano reticulado isolado [adim];

$K_\alpha = 1 + \alpha^\circ / 125$ , para  $0^\circ < \alpha \leq 20^\circ$  [adim];

$K_\alpha = 1,16$ , para  $20^\circ < \alpha \leq 45^\circ$  [adim].

Para torres reticuladas de seção retangular ou triangular equilátera composta por barras prismáticas de faces planas, os coeficientes de arrasto são apresentados na Figura 6.

Figura 6 – Coeficiente de arrasto  $C_a$  para torres reticuladas de seção quadrada e triangular equilátera, formadas por barras prismáticas de faces planas



(fonte: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1988, p. 29)

Para torres reticuladas de seção retangular ou triangular equilátera composta por barras de seção circular, o coeficiente de arrasto depende do número de Reynolds, do ângulo de incidência do vento sobre as faces e da seção da torre.

## 5 ESCOAMENTO DO VENTO NATURAL

A velocidade do vento é afetada diretamente pelo atrito do vento com a rugosidade da superfície terrestre. Assim, é possível definir uma camada na região da troposfera onde esse atrito é considerado, a camada limite atmosférica.

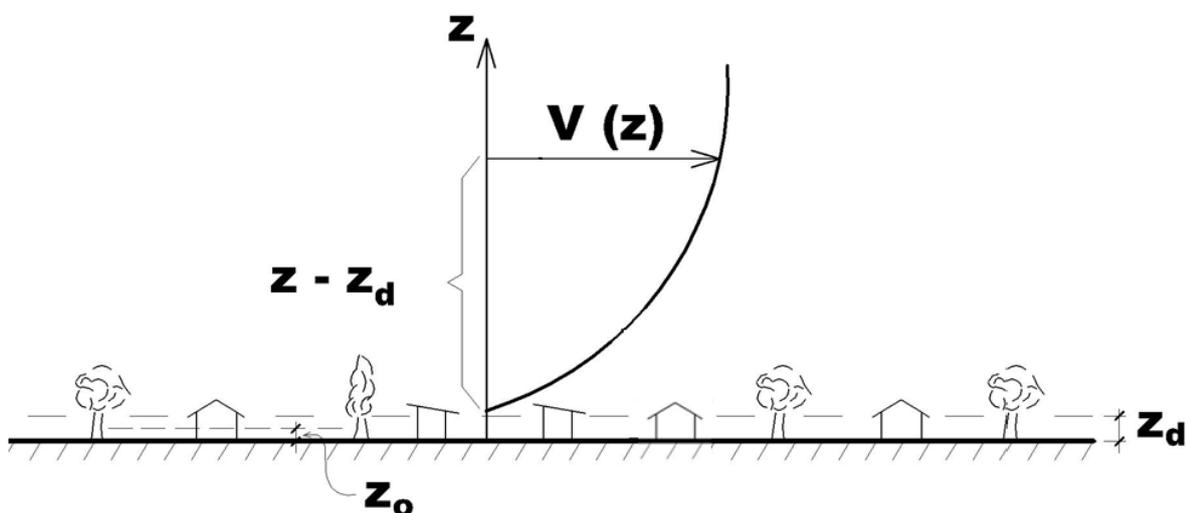
### 5.1 PERFIL DE VELOCIDADES MÉDIAS DO VENTO

Blessmann (2013, p.52) explica que:

Na camada limite atmosférica velocidade média do vento varia desde zero, junto à superfície terrestre, até a velocidade gradiente, na altura gradiente. Quando maior a rugosidade do solo e mais importantes em número e dimensões os grandes obstáculos (árvores, morros, edifícios, torres, etc.), maiores serão a agitação do ar, o intercâmbio turbulento de quantidade de movimento e a altura interessada neste processo. Consequentemente, a altura gradiente será maior em uma cidade do que em campo aberto, por exemplo.

Segundo Loredo-Souza et al. (2004, p. 137), o perfil de velocidades médias do vento é representado pela variação da velocidade do ar em função da altura, conforme representa a figura 7.

Figura 7 – Perfil de velocidades médias do vento



(fonte: adaptado de LOREDO-SOUZA et al., 2004, p. 138)

Ainda segundo Loredou-Souza et al. (2004, p. 138, grifo do autor),  $z_d$  é chamado de **deslocamento do plano-zero** e representa uma fina subcamada da camada limite atmosférica que está localizada junto à superfície terrestre e corresponde à altura média dos edifícios. Em regiões de grandes cidades, o vento tende a se deslocar por cima desta subcamada, onde forma-se uma região de estagnação. O valor de  $z_d$  não é significativo quando a rugosidade superficial é pequena (campos abertos e mar).

Loredou-Souza et al. (2004, p. 139) explica que, na área de Engenharia do Vento, os perfis de velocidades médias utilizados são: o perfil em lei de potência e o perfil logarítmico.

### 5.1.1 Perfil de velocidades médias em Lei de Potência

A fórmula 10 representa a forma geral do perfil de velocidades médias do vento em lei de potência (LOREDO-SOUZA et al., 2004, p.139):

$$\frac{\bar{V}_{(z)}}{\bar{V}_{(z_{ref})}} = \left( \frac{z - z_d}{z_{ref}} \right)^p \quad (\text{fórmula 10})$$

Onde:

$\bar{V}_{(z)}$  = velocidade do vento à altura desejada [m/s];

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

$z$  = altura desejada [m];

$z_d$  = altura da subcamada sobre a superfície [m];

$z_{ref}$  = altura de referência [m];

$p$  = expoente que representa o tipo de terreno [adim].

Apesar de não apresentar justificativa teórica, a lei de potência representa bem o perfil médio de velocidades, entretanto, por ser válida para quaisquer valores de  $(z - z_d)$  positivo ou nulo, a equação não reconhece o topo da camada limite atmosférica, aumentando a velocidade do vento indefinidamente conforme aumenta a altura de interesse. Além disso, o modelo apresenta bom

comportamento na camada de *Ekman*, mas na camada próxima à superfície este ajuste não é tão confiável. Porém, nos túneis de vento de camada limite é possível resolver esse problema com técnicas adequadas.

O expoente  $p$  é caracterizado pelo tipo de terreno, variando de 0,11, para superfícies lisas como mar e campos abertos, a 0,34, para centro de cidades com grande densidade de prédios altos.

### 5.1.2 Perfil de velocidades médias em Lei Logarítmica

O perfil de velocidades médias em Lei logarítmica é dado pela fórmula 11 a seguir (LOREDO-SOUZA et al., 2004, p. 139):

$$\frac{\bar{V}_{(z)}}{u_*} = \frac{1}{\kappa} \ln \left( \frac{z - z_d}{z_0} \right) \quad (\text{fórmula 11})$$

Onde:

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

$u_*$  = velocidade de corte [m/s];

$\kappa$  = constante de Von Kàrman,  $\kappa \cong 0,4$  [adim];

$z$  = altura de interesse [m];

$z_d$  = altura da subcamada sobre a superfície [m];

$z_0$  = rugosidade aerodinâmica [m].

Por considerar a velocidade de corte e a rugosidade aerodinâmica na equação, que dependem das características físicas do terreno e do vento, esta lei apresenta um bom ajuste na camada próxima ao solo, em contraposição à lei potencial.

## 5.2 SIMULAÇÃO DO VENTO NATURAL

Blessmann (1990b, p. 108) explica que os primeiros túneis vento foram construídos para o estudo de modelos geometricamente simples. Porém, com o advento da aviação, os estudos

foram voltados para a engenharia aeronáutica, onde interessa-se no deslocamento dos aviões em atmosfera calma, sem turbulência. Estes eram os chamados túneis aerodinâmicos, geralmente com uma relação comprimento/altura em torno de dois.

Apesar de diversos estudos em modelos reduzidos de construção civil terem sido feitos nestes túneis aerodinâmicos, os resultados não representam fielmente a realidade.

### 5.2.1 Simulação das características do vento natural

Blessmann (1990b, p.110) explica que, para a correta simulação das características do vento natural, é necessário cobrir o piso do túnel de vento a barlavento do modelo a ser estudado com um material de rugosidade adequada. Além disso, é necessário que o túnel de vento tenha grande relação comprimento/altura para gerar a turbulência necessária e a correta formação do perfil de velocidades do vento da atmosfera terrestre.

Outra forma de simulação das características do vento natural é a utilização de obstáculos colocados bem a barlavento do modelo a ser ensaiado, no início da câmara de ensaios. Blessmann (1990b, p.111) cita alguns dos dispositivos usados e a característica do vento natural gerada:

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

Blessmann (1990b, p.112) ainda explica que existe outro método puramente aerodinâmico para simular as características do vento natural, sem a utilização de obstáculos, que causam um

bloqueio e, conseqüentemente, perda de velocidade e escoamento: a utilização de jatos de ar perpendicularmente ao escoamento principal no túnel de vento.

### **5.2.2 Túnel de vento Prof. Joaquim Blessmann**

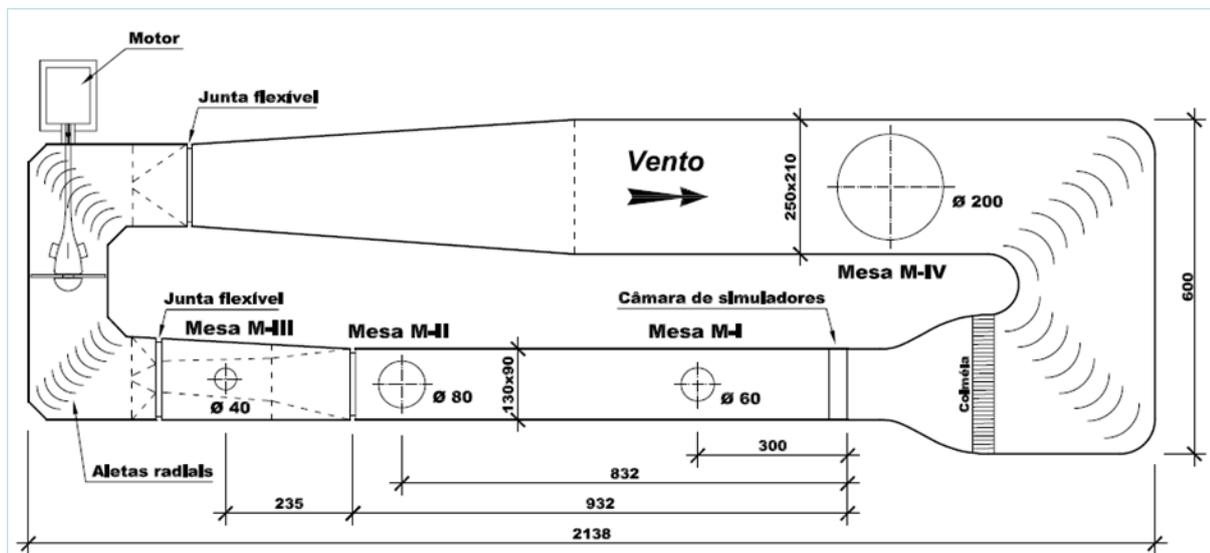
O túnel de vento do LAC é considerado o primeiro túnel de vento da América Latina, pois, diferentemente de outros túneis existentes chamados túneis aerodinâmicos (usados para ensaios do tipo aeronáuticos, em automóveis e aviões) que geram ventos uniformes, de turbulência pequena e velocidade alta, o túnel de vento do LAC possui circuito de retorno fechado e simula a camada limite, ou seja, reproduz a turbulência da camada atmosférica, representando as principais características dos ventos naturais. Essa simulação é feita através de dispositivos instalados no túnel de vento, por exemplo, para simular ventos de média turbulência, ou seja, ventos em subúrbios de cidades ou florestas com poucas árvores, deve-se instalar pequenos blocos de madeira no “chão” do túnel de vento, além disso, deve-se colocar duas gavetas na câmara de simuladores: uma com três aletas com furos circulares na metade inferior e outra com uma grelha baixa (BLESSMANN, 1990b).

O túnel de vento funciona através de um motor elétrico de 100 HP controlado por um inversor de frequência. Antigamente, o motor localizava-se no interior de prédio onde se localiza o túnel, mas devido ao alto ruído gerado pelo seu funcionamento e pela alta frequência de ensaios realizados, o motor foi realocado para a parte externa do prédio.

O túnel de vento apresenta quatro câmaras de ensaios, compostas por mesas giratórias para diferentes ângulos de incidência do vento sobre o modelo, cada uma possui uma aplicação específica para diferentes tipos de modelos e escoamento diversos a serem ensaiados. Além disso, o túnel de vento possui um dispositivo para a estabilização do vento antes de chegar às câmaras de ensaio, a colmeia. Composta por canos PVC de 50 mm de diâmetro e 20 cm de comprimento dispostos uniformemente do “piso” ao “teto” do túnel (BLESSMANN, 1990b).

A Figura 8 apresenta uma planta baixa do túnel de vento, localizando as quatro câmaras de ensaio, nomeadas M-I, M-II, M-III e M-IV, o motor, a colmeia e as principais dimensões do túnel.

Figura 8 – Planta baixa do túnel de vento  
Prof. Joaquim Blessmann



(fonte: trabalho não publicado)<sup>1</sup>

Na mesa M-I é possível realizar ensaios do tipo aeronáutico, com modelos reduzidos posicionados próximos ao piso do túnel, pois a camada limite não se forma por completo nesta sessão do túnel de vento, possuindo pequena espessura e baixa turbulência. São realizados, também, ensaios para estudos de formas geométricas simples em modelos bi ou tridimensionais (BLESSMANN, 1990b).

A mesa M-II possui seção transversal com dimensões de 124 cm de largura por 90 cm de altura, com isso, a velocidade de escoamento chega a seu valor máximo, ultrapassando 46 m/s. Nesta câmara, o túnel apresenta a relação comprimento/altura superior a 10, ideal para a formação da camada limite. Desse modo, utilizando os blocos no piso do túnel de vento e geradores de turbulência na câmara de simuladores, os ensaios estáticos e dinâmicos podem ser simulados com vento natural (BLESSMANN, 1990b).

Na mesa M-III, a seção túnel é maior que em M-I e M-II, portanto, possui velocidade máxima em torno de 29 m/s. Nesta câmara são realizados ensaios dinâmicos em estruturas muito altas, como chaminés, pilares de viadutos, torres de televisão, etc. (BLESSMANN, 1990b).

<sup>1</sup> Esta figura foi elaborada pelo Laboratório de Aerodinâmica das Construções da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

A mesa M-IV possui dimensões de 251 cm de largura e 212 cm de altura, alcançando uma velocidade máxima de 9 m/s. Originalmente, o perfil de velocidades do vento da camada limite não era formado nesta câmara de ensaios, o que tornava-a ineficiente para ensaios de estruturas da construção civil. Sendo adequada somente para estudos de poluição de ar, dispersão de fumaça, eficiência de coberturas sob a ação de chuva e influência de topografia local sobre as edificações. Contudo, foram realizadas alterações na região da mesa M-IV para possibilitar a formação do perfil do vento natural, possibilitando ensaios de estruturas da construção civil. (BLESSMANN, 1990b).

Blessmann (1990b, p. 119-120) enunciou diversas atividades realizadas no túnel de vento da UFRGS:

Entre as pesquisas puras e aplicadas que podem ser desenvolvidas no túnel de vento TV-2, citamos:

- a) simulação de ventos naturais;
- b) efeitos estáticos e dinâmicos do vento em estruturas, paredes, telhados, esquadrias, vidros e painéis de revestimento em geral;
- c) efeitos sobre transeuntes, veículos e plantas (velocidade excessiva e turbulência);
- d) efeitos sobre usuários das edificações (vibrações, ruídos, infiltração de água e pó);
- e) poluição.

Ou, mais detalhadamente:

- a) simulação de ventos naturais: estudo de suas características, tais como: perfil de velocidades médias, intensidade, micro e macro escala da turbulência, espectros de potência, auto correlação e correlação cruzada;
- b) estudo de características de camadas limites em geral: perfil de velocidades médias, espessuras, tensões de Reynolds, características da turbulência, etc.;
- c) ensaios estáticos e dinâmicos de modelos reduzidos de edificações, tais como: pavilhões industriais, igrejas, salões, hangares, residências isoladas ou em conjuntos, edifícios, marquises, pontes, pilares de viadutos, torres de refrigeração;
- d) torres de linha de transmissão de energia elétrica, torres e antenas para radar e micro-ondas, chaminés, guindastes, pórticos de manobras de barragens, etc.;
- e) estudo das alterações causadas por edificações sobre os ventos próximo à superfície (conforto de pedestres, esforço em veículos, etc.);
- f) estudos de visualização do fluxo em torno de edificações;
- g) estudos de ventilação interna;

- h) estudos de dispersão de gases e resíduos sólidos na atmosfera: localização de indústrias, dissipação de descargas de chaminés residenciais e industriais, etc.;
- i) estudo de quebra-ventos para evitar os efeitos nocivos de ventos sobre pessoas, veículos, mercadorias em depósitos abertos, etc.;
- j) ensaios estáticos e dinâmicos em placas de sinalização de estradas, postes e luminárias, quadros de propaganda, etc.;
- h) ensaios em modelos de veículo, tanto para verificar os esforços causados pelo vento como para determinação da resistência ao avanço;
- l) estudos hidráulicos por via aerodinâmicos;
- m) pesquisa básica sobre formas geométricas simples: instabilidade aerodinâmica, pressões flutuantes, características de esteiras, pontos de deslocamento, etc.

Os perfis de velocidades médias do vento são simulados referentes ao expoente  $p$  da Lei de Potência (fórmula 10) e correspondem às diferentes categorias de rugosidade do terreno da NBR 6123/1988. A relação dos expoentes mais usuais no túnel de vento Prof. Joaquim Blessmann com as categorias de rugosidade do terreno da NBR 6123/1988 é representado na seguinte forma:

- a) expoente  $p = 0,11$  corresponde a terrenos com rugosidade categoria I da NBR 6123/1988;
- b) expoente  $p = 0,23$  corresponde a terrenos com rugosidade entre as categorias III e IV da NBR 6123/1988;
- c) expoente  $p = 0,34$  corresponde a terrenos com rugosidade categoria V da NBR 6123/1988.

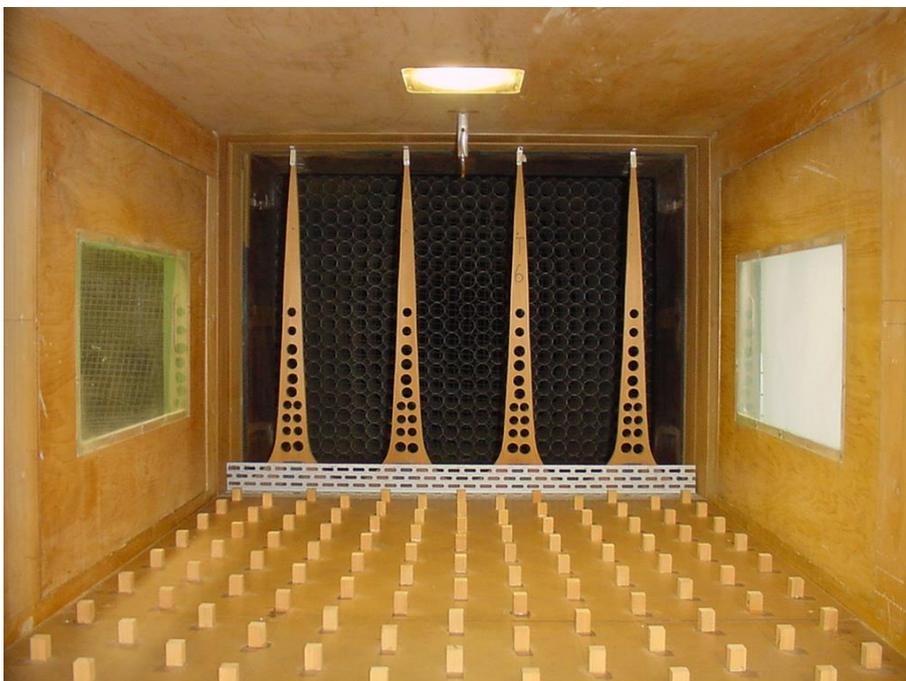
Os dispositivos utilizados para simular os perfis de velocidades médias do vento relativos aos expoentes 0,11, 0,23 e 0,34 bem como para a simulação de vento suave uniforme e turbulento uniforme são mostrados nas figuras 9 a 13.

Figura 9 – Dispositivos de geração de perfil de velocidade para expoente  $p = 0,11$



(fonte: trabalho não publicado)<sup>2</sup>

Figura 10 – Dispositivos de geração de perfil de velocidade para expoente  $p = 0,23$



(fonte: trabalho não publicado)<sup>3</sup>

<sup>2</sup> Esta figura foi elaborada pelo Laboratório de Aerodinâmica das Construções da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

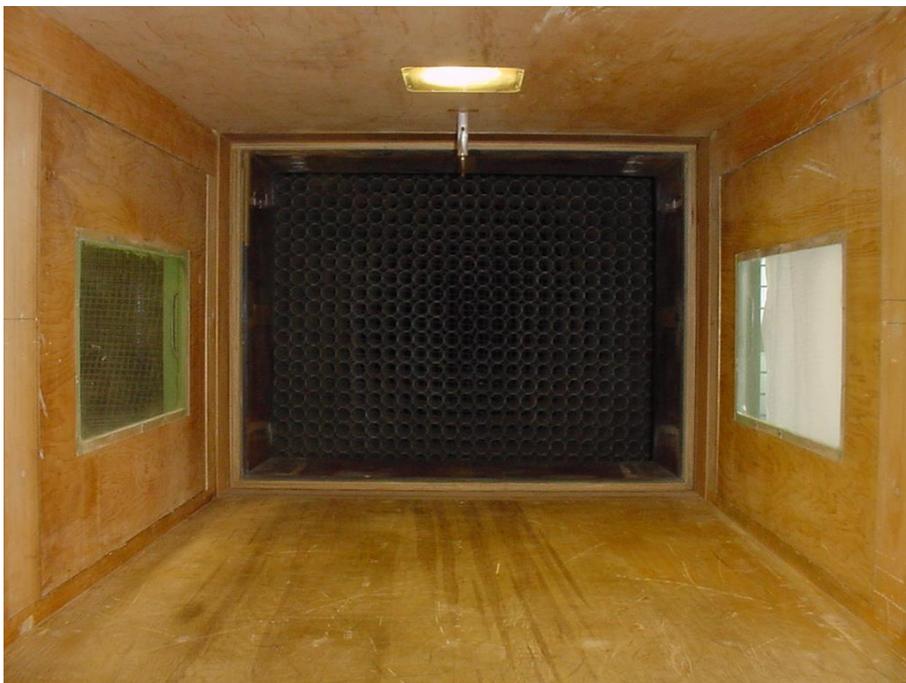
<sup>3</sup> Idem.

Figura 11 – Dispositivos de geração de perfil de velocidade para expoente  $p = 0,34$



(fonte: trabalho não publicado)<sup>4</sup>

Figura 12 – Dispositivo para geração de vento suave e uniforme



(fonte: trabalho não publicado)<sup>5</sup>

<sup>4</sup> Esta figura foi elaborada pelo Laboratório de Aerodinâmica das Construções da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

<sup>5</sup> Idem.

Figura 13 – Dispositivo de grelha, para geração de vento turbulento e uniforme



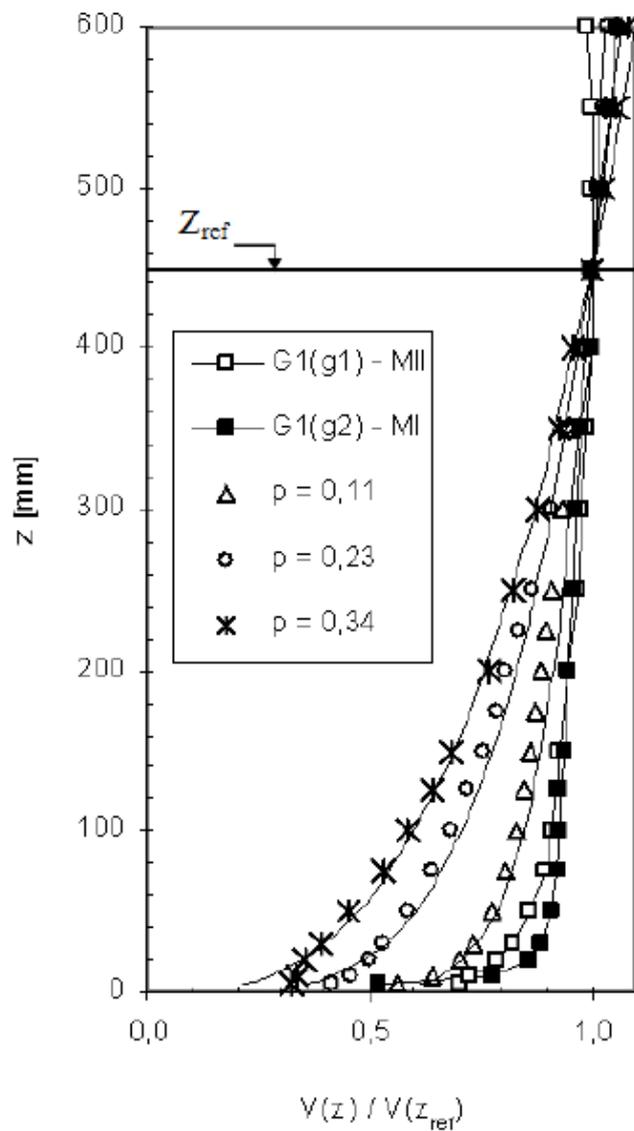
(fonte: trabalho não publicado)<sup>6</sup>

Na figura 14, são apresentados por Loredou-Souza et al. (2004, p.151) os perfis de velocidade média do vento correspondente à lei potencial com os expoentes  $p = 0,11, 0,23$  e  $0,34$ , além do perfil gerado pela grelha na mesas M-I e M-II.

---

<sup>6</sup> Esta figura foi elaborada pelo Laboratório de Aerodinâmica das Construções da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Figura 14 – Perfis de velocidade média do vento para o eixo vertical de duas seções do túnel de vento Prof. Joaquim Blessmann



(fonte: LOREDO-SOUZA et al, 2004, p.151)

## 6 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

### 6.1 Modelos ensaiados

Existem duas maneiras de se estimar a ação do vento em torres treliçadas:

- a) Através da determinação do carregamento em cada elemento da torre separadamente, somando-se as forças individuais para obter a força total. Para isto devem-se conhecer as propriedades geométricas de cada elemento bem como seu coeficiente de força aerodinâmico e velocidade de projeto. Para uma torre típica, constituída de diversos elementos (barras prismáticas), este é um processo que consome muito tempo;
- b) Através da determinação das forças do vento em partes ou trechos da estrutura contendo vários elementos de barras retas (reticulados). Estas partes são aqui chamadas de módulos, e os coeficientes de força devem estar disponíveis para estas configurações específicas. A força total é também obtida a partir da soma das forças parciais, porém de uma maneira mais prática e rápida em relação ao processo descrito em (a) acima. Este é, portanto, o método que foi utilizado para a realização dos ensaios em túnel de vento deste trabalho.

Os modelos confeccionados a partir dos projetos das torres A33 e A55 de Furnas Centrais Elétricas foram, então, divididos em módulos, onde cada módulo representa um grupo de membros das torres. A divisão e a identificação dos módulos dos modelos ensaiados são apresentadas no Anexo A. Maiores detalhes em Rippel (2005).

Para este trabalho, foram considerados apenas os ensaios realizados nos módulos Extensão e Pernas de ambas as torres. Os oito módulos ensaiados, suas medidas reais e as configurações de ensaios consideradas são listadas a seguir:

- a) módulo da Extensão 6,00m da torre A33 (escala 1:15);
- b) módulo da Extensão 12,00m da torre A33 (escala 1:15);
- c) módulo das Pernas 4,50m da torre A33 (escala 1:13) nas configurações isolada e afastamento relativo mínimo e máximo;
- d) módulo das Pernas 9,00m da torre A33 (escala 1:13) nas configurações isolada e afastamento relativo mínimo e máximo;
- e) módulo da Extensão 6,00m da torre A55 (escala 1:15);
- f) módulo da Extensão 12,00m da torre A55 (escala 1:15);

g) módulo das Pernas 4,50m da torre A55 (escala 1:13) nas configurações isolada e afastamento relativo mínimo e máximo;

h) módulo das Pernas 10,50m da torre A55 (escala 1:13) nas configurações isolada e afastamento relativo mínimo e máximo.

Fotografias dos modelos reduzidos dos módulos das torres A33 e A55 instalados no túnel de vento são mostradas no Anexo B.

## 6.2 Balança de força

Para a determinação da força de arrasto aerodinâmico sobre os modelos reduzidos das torres, foi utilizada uma balança de força unidirecional instalada na base dos modelos e alinhada ao eixo do túnel de vento.

A balança é constituída de duas placas rígidas horizontais unidas por lâminas verticais de aço inox temperado. A placa inferior é rigidamente fixada a um tripé fixo sob o túnel de vento, enquanto que a placa superior é fixada à base do modelo, deslocando-se junto com este no sentido do escoamento, na proporção da força de arrasto aerodinâmico atuante.

As lâminas verticais da balança foram instrumentadas com extensômetros elétricos de resistência, que são sensores que têm como característica alterar sua resistência elétrica ao sofrer uma deformação. Sendo assim, a variação da resistência elétrica é proporcional à variação da deformação das lâminas verticais e, dentro de certos limites, as deformações nas lâminas são linearmente dependentes da força de arrasto a ser medida. A figura 15 mostra a balança de força instalada sob o piso do túnel de vento.

Figura 15 – Balança de força instalada sob o piso do túnel de vento



(fonte: trabalho não publicado)<sup>7</sup>

A balança foi estaticamente calibrada através de forças horizontais conhecidas para quatro ângulos distintos de aplicação  $\beta$  ( $0^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $45^\circ$  e  $60^\circ$ ), buscando identificar a ocorrência de alguma sensibilidade transversal significativa. Desta forma, depois de realizar certas correções de temperatura ambiente no momento do ensaio e de efeitos de segunda ordem causados pelo peso do conjunto modelo mais plataforma, foram traçadas curvas de calibração através de um ajuste linear para pontos de medida de tensão versus força aplicada. Contudo, as correções não são necessárias nos casos onde a balança é alinhada com os eixos principais dos modelos. Neste caso, a balança estará medindo sempre a componente da força na direção de seu próprio eixo. O mecanismo para a calibração da balança, na qual o peso das massas acrescentado é convertido em força horizontal, e os curvas de calibração são mostrados nas figuras 16 a 18.

---

<sup>7</sup> Esta figura foi elaborada pelo Laboratório de Aerodinâmica das Construções da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Figura 16 – Calibração da balança de força



(fonte: trabalho não publicado)<sup>8</sup>

Figura 17 – Detalhe da calibração da balança



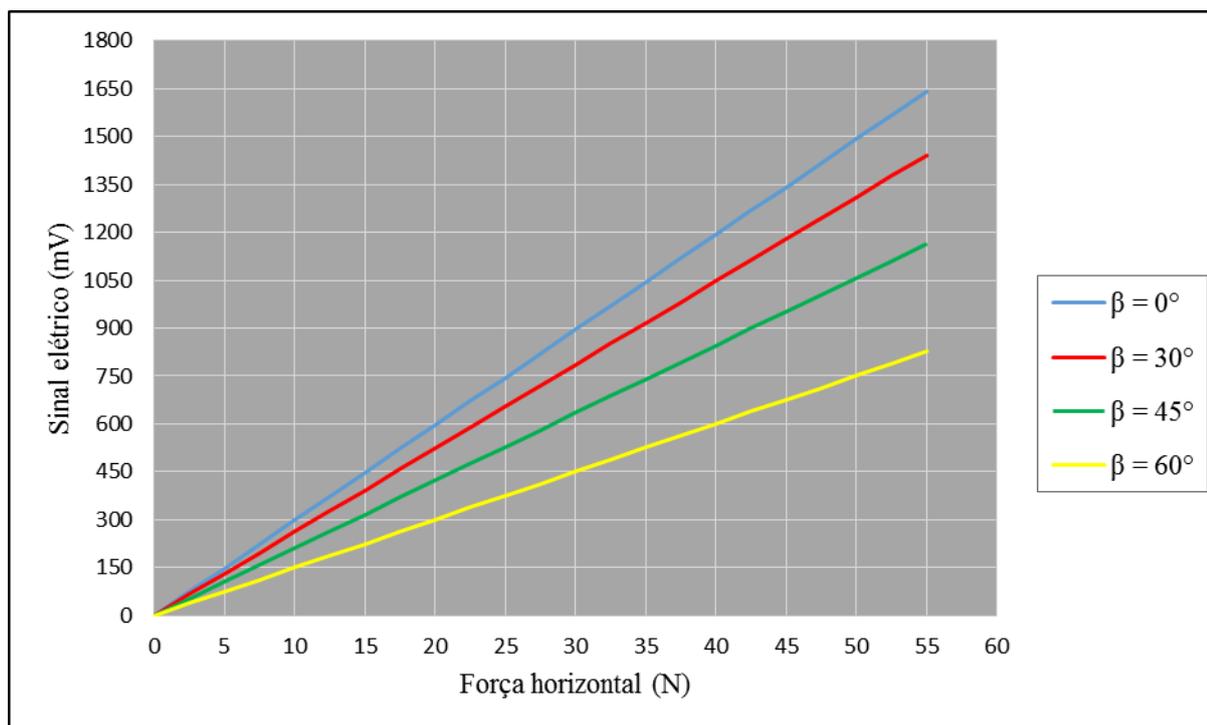
(fonte: trabalho não publicado)<sup>9</sup>

---

<sup>8</sup> Esta figura foi elaborada pelo Laboratório de Aerodinâmica das Construções da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

<sup>9</sup> Idem.

Figura 18 – Curvas de calibração da balança de força



(fonte: elaborado pelo autor)

As constantes de calibração que relacionam a leitura de tensão no sistema de aquisição de dados com a força de arrasto atuante no modelo são da ordem de 0,0333 N/mV, ou seja, multiplicando-se a leitura em tensão por este número conhece-se a força de arrasto atuante no modelo. Maiores detalhes deste tipo de trabalho são encontrados em Machado (2003)

## 7 ANÁLISE DE RESULTADOS

Para a determinação dos coeficientes de arrasto experimentais, foi utilizada a fórmula 3. Para o cálculo da pressão dinâmica, foi utilizada a velocidade média de referência do vento ao nível da altura média do trecho reticulado e a área frontal efetiva foi determinada através da medida de projeções do modelo 3d usando o programa AutoCAD. A força de arrasto foi indiretamente estimada através da diferença de potencial medida pela deformação dos extensômetros da balança de força multiplicada pela constante de calibração.

Para a verificação dos valores de coeficiente de arrasto preconizados pela NBR 6123/1988 foram calculados os índices de área exposta utilizando as áreas frontais efetivas extraídas diretamente dos desenhos de projeto das torres, sendo adotado como área de referência a projeção ortogonal às faces dos módulos.

Nos modelos reduzidos da torre A33, por suas seções transversais possuírem dupla simetria, suas faces longitudinais e transversais possuem mesmo treliçamento. Por isso, foi utilizado o mesmo índice de área exposta para ambos os ângulos de incidência do vento.

Quanto aos modelos reduzidos da torre A55, suas seções transversais possuem simetria em apenas um eixo. Por isso, suas faces possuem índices de área exposta distintos. Nos ângulos de incidência do vento oblíquos às faces dos modelos reduzidos, ambos os índices de área exposta foram considerados para a comparação com os coeficientes que a NBR 6123 preconiza.

A fim de verificar a influência do número de Reynolds nos valores de coeficientes de arrasto medidos, foram realizados registros de força de arrasto média para quatro valores distintos de velocidades do vento com intervalos variados, os quais variavam conforme o modelo ensaiado. Assim, foi obtido um intervalo de valores de coeficiente de arrasto medidos, sendo considerados o maior deles.

A seguir, nas figuras 19 e 20, são apresentadas as referências para os ângulos de incidência do vento para ambas as torres, onde  $\alpha$  é o ângulo de incidência do vento, em graus.

Figura 19 – Referência para o ângulo de incidência do vento da torre A33

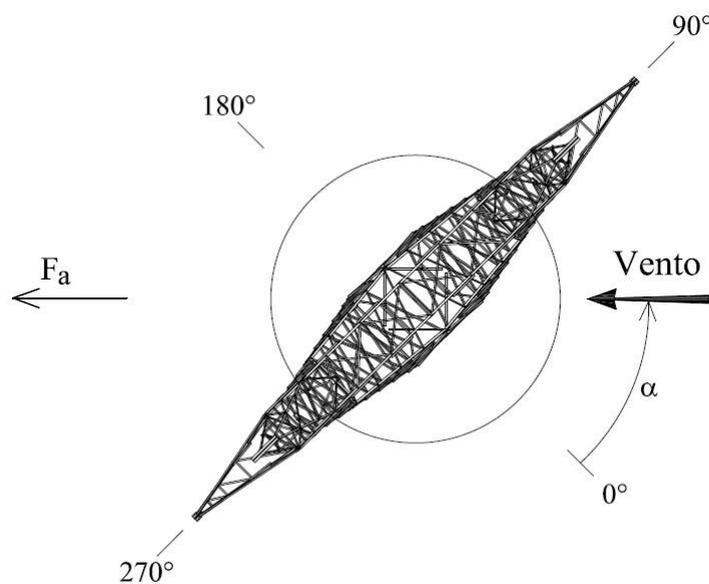
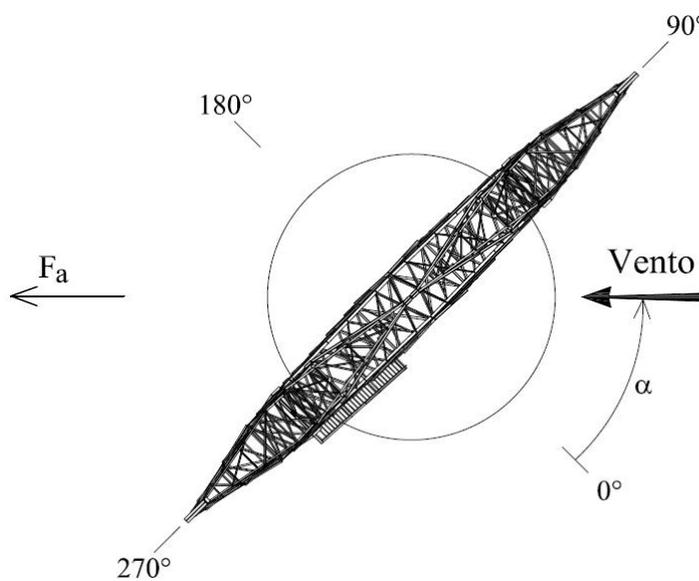
(fonte: trabalho não publicado)<sup>10</sup>

Figura 20 – Referência para o ângulo de incidência do vento da torre A55

(fonte: trabalho não publicado)<sup>11</sup>

<sup>10</sup> Esta figura foi elaborada pelo Laboratório de Aerodinâmica das Construções da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

<sup>11</sup> Idem.

## 7.1 Torre A33

A seguir, nas tabelas 1 a 8, são apresentados os índices de área exposta, os intervalos de velocidade do vento e os coeficientes de arrasto medidos dos ensaios em túnel de vento para os ângulos de incidência do vento ensaiados nas distintas configurações dos módulos Extensão e Pernas da torre A33.

Tabela 1 – Coeficientes de arrasto para a Extensão 6,00m da torre A33

<b>Ângulo de incidência do vento</b>	<b><math>\phi</math></b>	<b>Velocidade do vento [m/s]</b>	<b>Coefficiente de arrasto medido</b>
<b>0°</b>	0,16	9,26 - 36,23	2,98 - 3,16
<b>45°</b>	0,16	9,41 - 35,65	3,36 - 3,53
<b>90°</b>	0,16	9,26 - 36,23	2,98 - 3,16

(fonte: elaborado pelo autor)

Tabela 2 – Coeficientes de arrasto para a Extensão 12,00m da torre A33

<b>Ângulo de incidência do vento</b>	<b><math>\phi</math></b>	<b>Velocidade do vento [m/s]</b>	<b>Coefficiente de arrasto medido</b>
<b>0°</b>	0,12	10,51 - 26,06	3,37 - 3,43
<b>45°</b>	0,12	10,37 - 26,09	3,70 - 3,80
<b>90°</b>	0,12	10,51 - 26,06	3,37 - 3,43

(fonte: elaborado pelo autor)

Tabela 3 – Coeficientes de arrasto para as Pernas na altura 4,50m na configuração isolada da torre A33

<b>Ângulo de incidência do vento</b>	<b><math>\phi</math></b>	<b>Velocidade do vento [m/s]</b>	<b>Coefficiente de arrasto medido</b>
<b>0°</b>	0,26	14,72 - 32,55	1,80 - 1,97
<b>45°</b>	0,26	13,69 - 34,90	2,44 - 2,56
<b>90°</b>	0,26	14,72 - 34,55	1,80 - 1,97

(fonte: elaborado pelo autor)

Tabela 4 – Coeficientes de arrasto para as Pernas na altura 4,50m na configuração de afastamento relativo mínimo da torre A33

<b>Ângulo de incidência do vento</b>	<b><math>\phi</math></b>	<b>Velocidade do vento [m/s]</b>	<b>Coeficiente de arrasto medido</b>
<b>0°</b>	0,26	12,86 - 32,68	3,32 - 3,37
<b>45°</b>	0,26	13,36 - 32,82	3,81 - 3,91
<b>90°</b>	0,26	12,86 - 32,68	3,32 - 3,37

(fonte: elaborado pelo autor)

Tabela 5 – Coeficientes de arrasto para as Pernas na altura 4,50m na configuração de afastamento relativo máximo da torre A33

<b>Ângulo de incidência do vento</b>	<b><math>\phi</math></b>	<b>Velocidade do vento [m/s]</b>	<b>Coeficiente de arrasto medido</b>
<b>0°</b>	0,26	13,31 - 32,24	3,44 - 3,50
<b>45°</b>	0,26	13,44 - 32,19	3,93 - 4,01
<b>90°</b>	0,26	13,31 - 32,24	3,44 - 3,50

(fonte: elaborado pelo autor)

Tabela 6 – Coeficientes de arrasto para as Pernas na altura 9,00m na configuração isolada da torre A33

<b>Ângulo de incidência do vento</b>	<b><math>\phi</math></b>	<b>Velocidade do vento [m/s]</b>	<b>Coeficiente de arrasto medido</b>
<b>0°</b>	0,27	10,82 - 26,36	1,99 - 2,12
<b>45°</b>	0,27	11,04 - 26,60	2,41 - 2,51
<b>90°</b>	0,27	10,82 - 26,36	1,99 - 2,12

(fonte: elaborado pelo autor)

Tabela 7 – Coeficientes de arrasto para as Pernas na altura 9,00m na configuração de afastamento relativo mínimo da torre A33

<b>Ângulo de incidência do vento</b>	<b><math>\phi</math></b>	<b>Velocidade do vento [m/s]</b>	<b>Coeficiente de arrasto medido</b>
<b>0°</b>	0,27	10,91 - 26,39	3,47 - 3,54
<b>45°</b>	0,27	10,37 - 26,45	3,94 - 4,00
<b>90°</b>	0,27	10,91 - 26,39	3,47 - 3,54

(fonte: elaborado pelo autor)

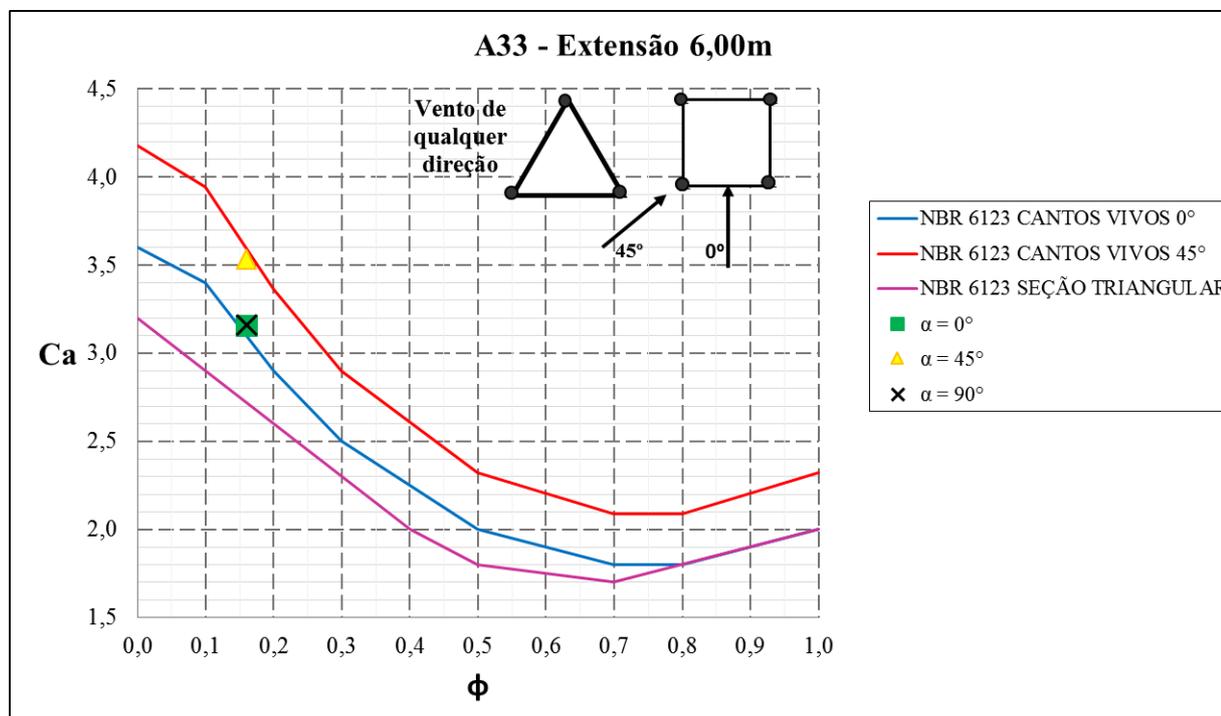
Tabela 8 – Coeficientes de arrasto para as Pernas na altura 9,00m na configuração de afastamento relativo máximo da torre A33

Ângulo de incidência do vento	$\phi$	Velocidade do vento [m/s]	Coefficiente de arrasto medido
0°	0,27	10,50 - 26,72	3,55 - 3,60
45°	0,27	10,63 - 26,37	4,00 - 4,11
90°	0,27	10,50 - 26,72	3,55 - 3,60

(fonte: elaborado pelo autor)

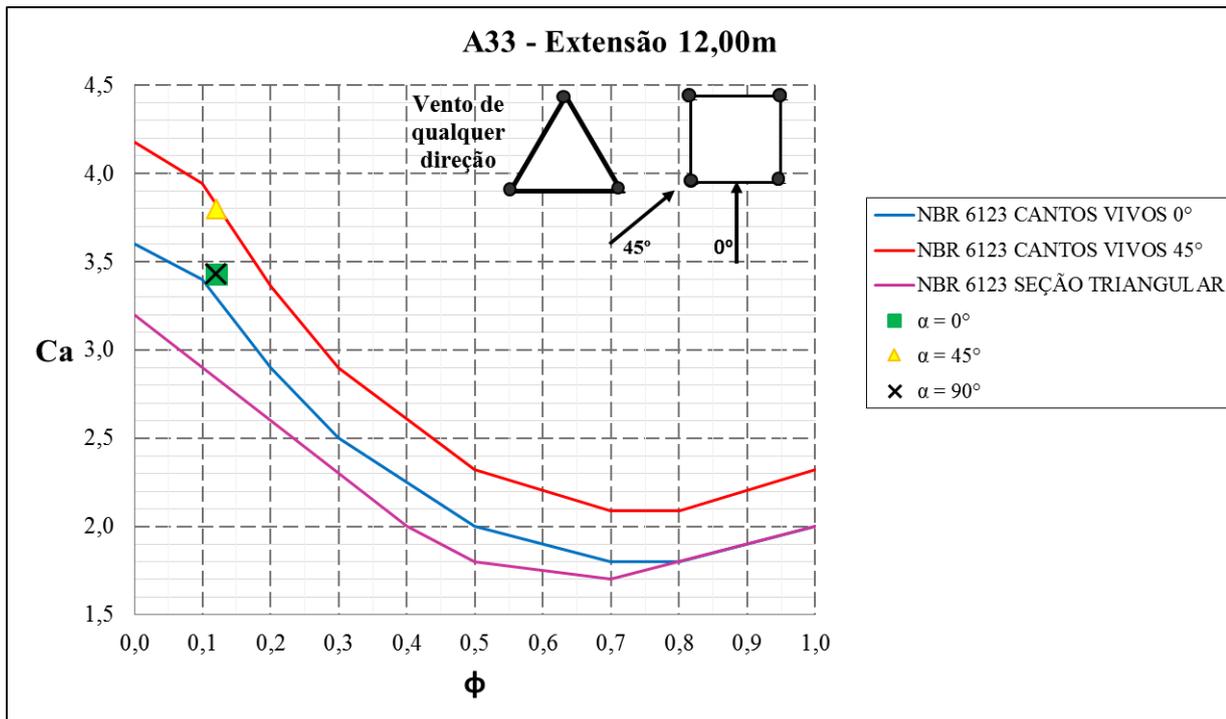
A comparação dos coeficientes de arrasto medidos nos ensaios em túnel de vento da torre A33 com os coeficientes de arrasto preconizados pela NBR 6123 de acordo com cada índice de área exposta são apresentadas nas figuras 21 a 28. As curvas são oriundas da figura 6, onde a curva azul refere-se ao ângulo de incidência do vento 0° para seções transversais retangulares, a curva vermelha, após o cálculo do coeficiente  $K_a$ , refere-se ao ângulo de incidência do vento 45° para seções transversais retangulares e a curva na cor magenta refere-se a seções transversais triangulares equiláteras.

Figura 21 – Coeficientes de arrasto para a Extensão 6,00m da torre A33



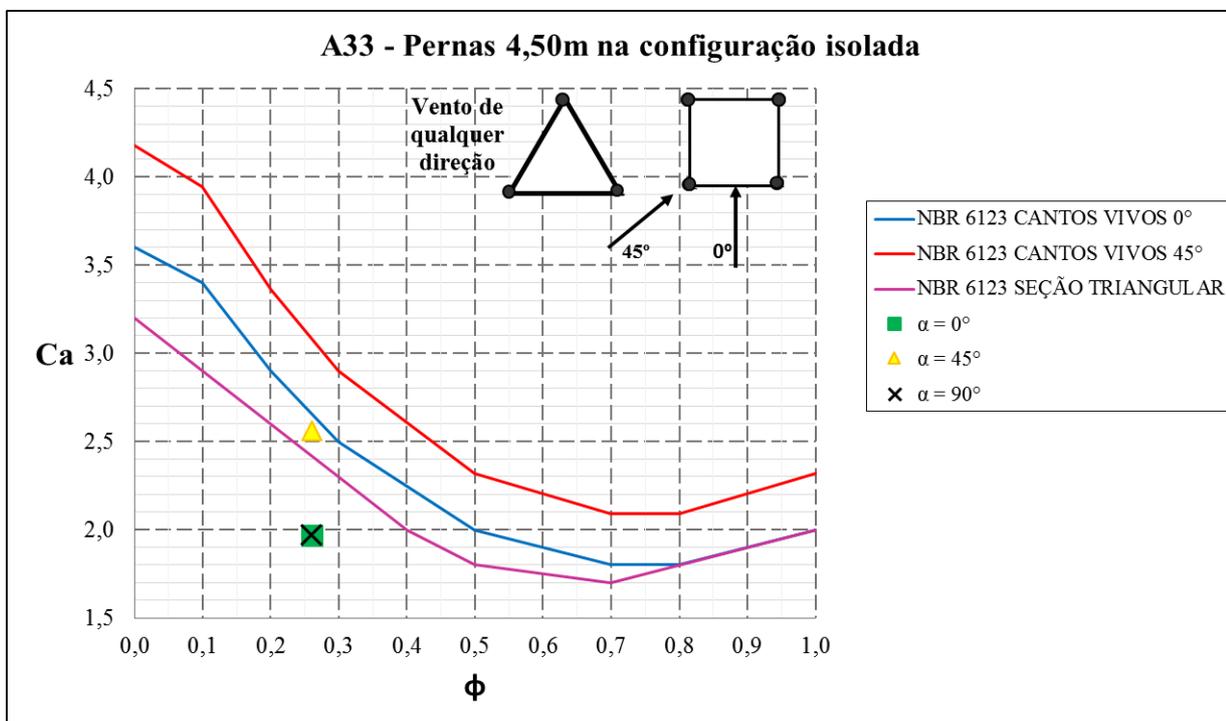
(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 22 – Coeficientes de arrasto para a Extensão 12,00m da torre A33



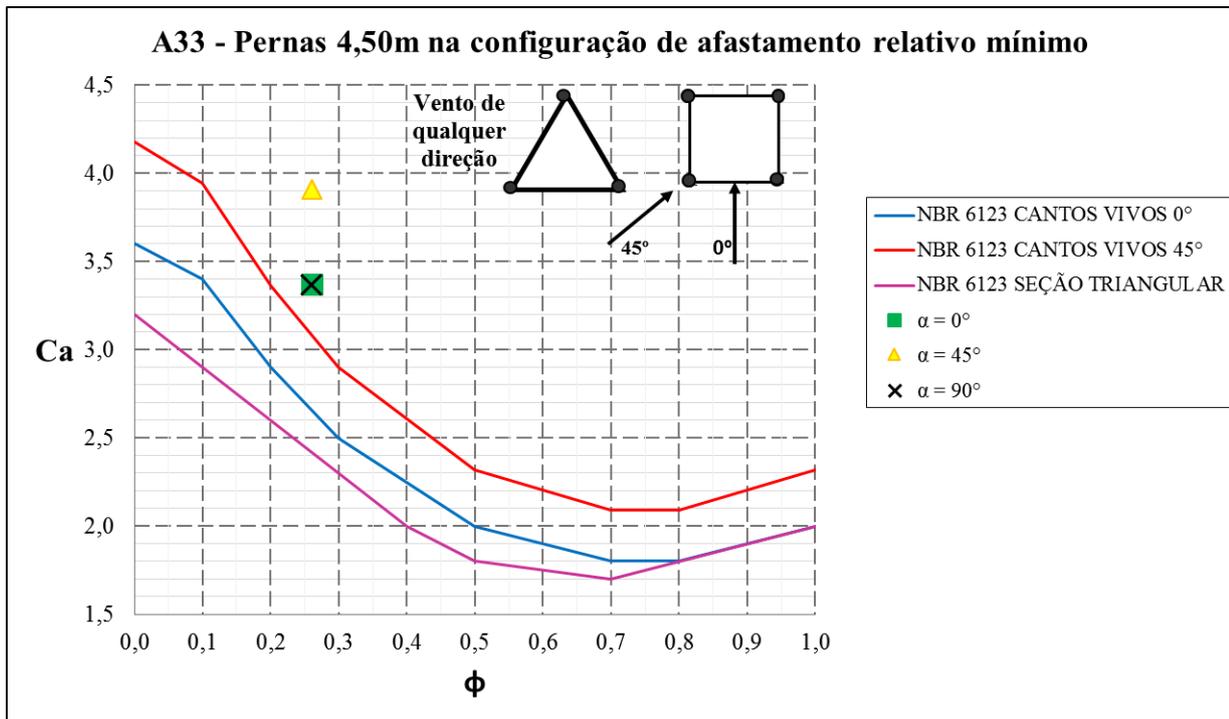
(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 23 – Coeficientes de arrasto para as Pernas na altura 4,50m na configuração isolada da torre A33



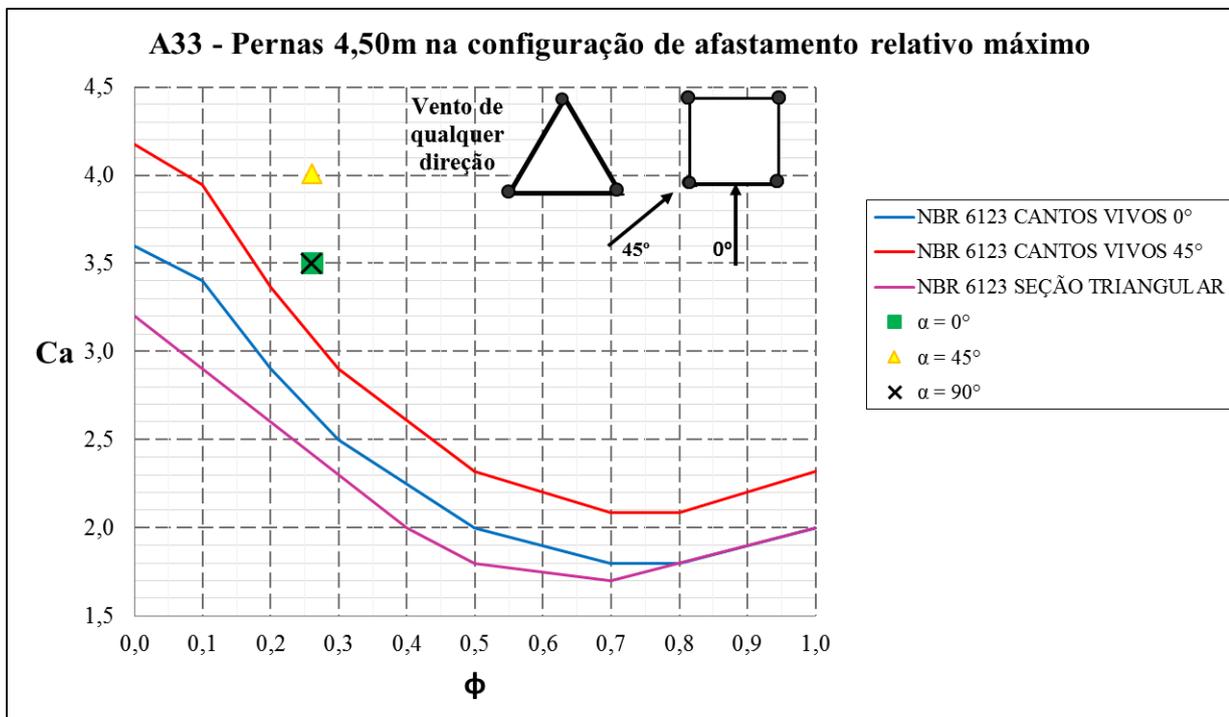
(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 24 – Coeficientes de arrasto para as Pernas na altura 4,50m na configuração de afastamento relativo mínimo da torre A33



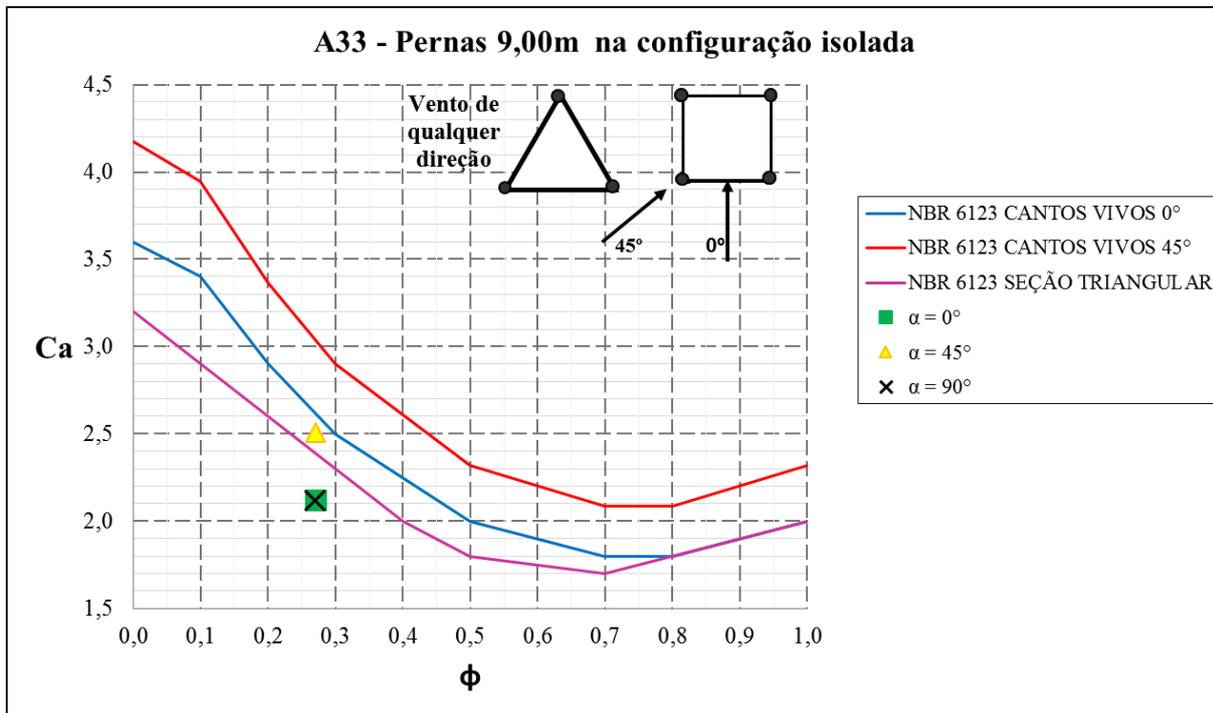
(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 25 – Coeficientes de arrasto para as Pernas na altura 4,50m na configuração de afastamento relativo máximo da torre A33



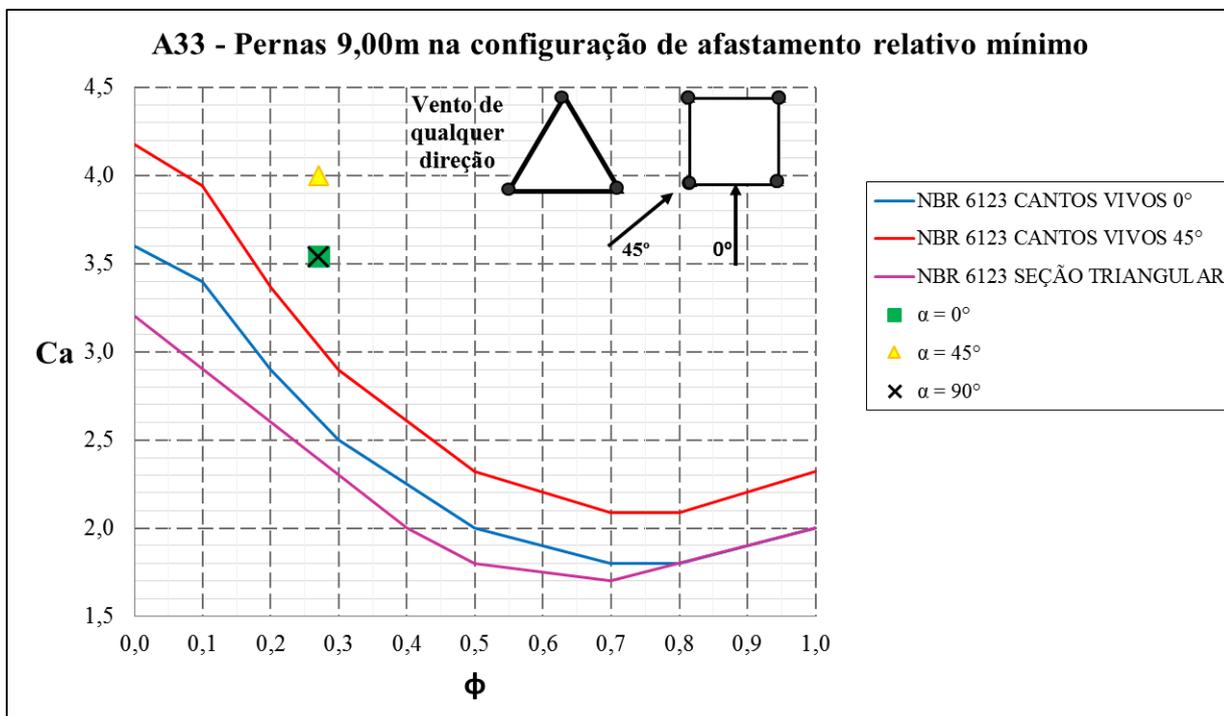
(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 26 – Coeficientes de arrasto para as Pernas na altura 9,00m na configuração isolada da torre A33



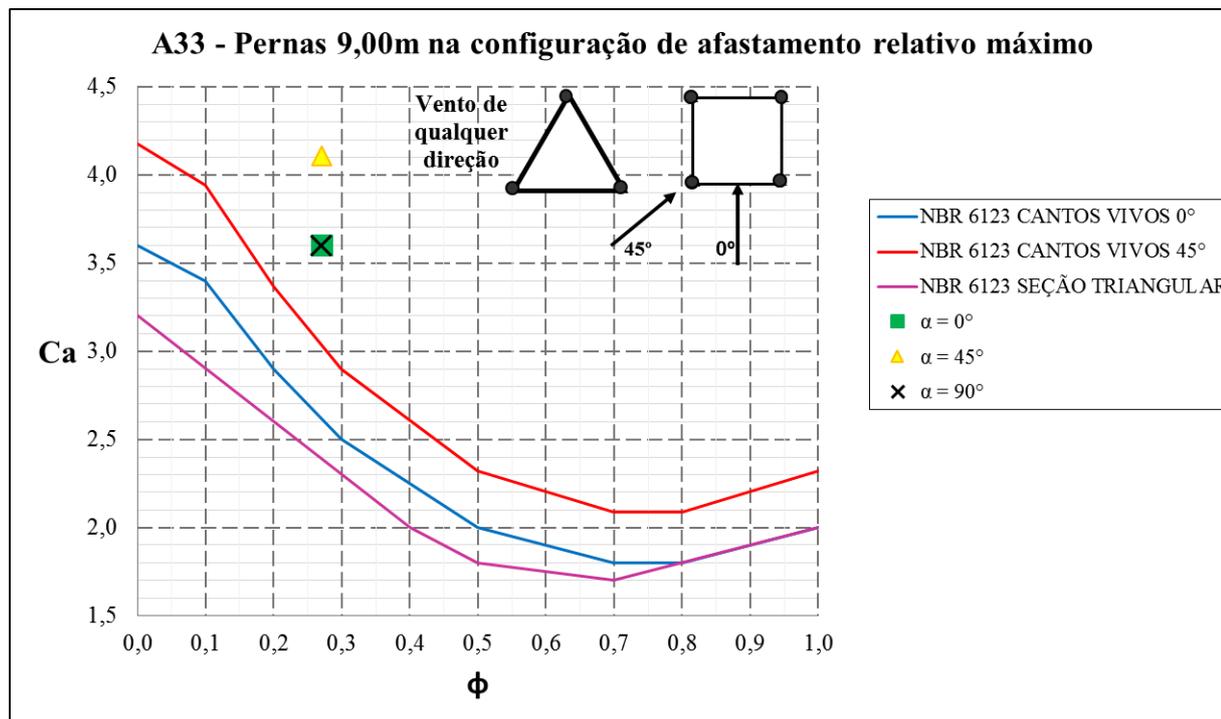
(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 27 – Coeficientes de arrasto para as Pernas na altura 9,00m na configuração de afastamento relativo mínimo da torre A33



(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 28 – Coeficientes de arrasto para as Pernas na altura 9,00m na configuração de afastamento relativo máximo da torre A33



(fonte: elaborado pelo autor)

## 7.2 Torre A55

A seguir, nas tabelas 9 a 16, são apresentados os índices de área exposta para as faces longitudinal e transversal, os intervalos de velocidade do vento e os coeficientes de arrasto medidos em túnel de vento para os ângulos de incidência do vento ensaiados nas distintas configurações dos módulos Extensão e Pernas da torre A55.

Tabela 9 – Coeficientes de arrasto para a Extensão 6,00m da torre A55

Ângulo de incidência do vento	$\phi$	Velocidade do vento [m/s]	Coefficiente de arrasto medido
0°	0,14	10,61 - 29,90	3,52 - 3,58
30°	0,14	10,61 - 26,35	3,85 - 3,99
	0,18		
56°	0,14	10,67 - 28,81	3,37 - 3,49
	0,18		
90°	0,18	10,22 - 32,71	3,28 - 3,42

(fonte: elaborado pelo autor)

Tabela 10 – Coeficientes de arrasto para a Extensão 12,00m da torre A55

<b>Ângulo de incidência do vento</b>	<b><math>\phi</math></b>	<b>Velocidade do vento [m/s]</b>	<b>Coeficiente de arrasto medido</b>
<b>0°</b>	0,12	11,29 - 20,70	3,65 - 3,71
<b>30°</b>	0,12	11,35 - 20,74	4,16 - 4,22
	0,15		
<b>56°</b>	0,12	11,39 - 21,05	3,56 - 3,62
	0,15		
<b>90°</b>	0,15	11,19 - 23,57	3,45 - 3,53

(fonte: elaborado pelo autor)

Tabela 11 – Coeficientes de arrasto para as Pernas na altura 4,50m na configuração isolada da torre A55

<b>Ângulo de incidência do vento</b>	<b><math>\phi</math></b>	<b>Velocidade do vento [m/s]</b>	<b>Coeficiente de arrasto medido</b>
<b>0°</b>	0,24	13,44 - 32,65	1,80 - 1,98
<b>30°</b>	0,24	13,44 - 32,65	1,95 - 2,03
	0,30		
<b>56°</b>	0,24	13,44 - 32,65	1,83 - 1,89
	0,30		
<b>90°</b>	0,30	13,44 - 32,65	1,64 - 1,74

(fonte: elaborado pelo autor)

Tabela 12 – Coeficientes de arrasto para as Pernas na altura 4,50m na configuração de afastamento relativo mínimo da torre A55

<b>Ângulo de incidência do vento</b>	<b><math>\phi</math></b>	<b>Velocidade do vento [m/s]</b>	<b>Coeficiente de arrasto medido</b>
<b>0°</b>	0,24	12,93 - 29,33	3,05 - 3,09
<b>30°</b>	0,24	12,80 - 29,97	3,52 - 3,63
	0,30		
<b>56°</b>	0,24	13,35 - 29,38	3,09 - 3,15
	0,30		
<b>90°</b>	0,30	13,20 - 29,27	2,81 - 2,85

(fonte: elaborado pelo autor)

Tabela 13 – Coeficientes de arrasto para as Pernas na altura 4,50m na configuração de afastamento relativo máximo da torre A55

Ângulo de incidência do vento	$\phi$	Velocidade do vento [m/s]	Coeficiente de arrasto medido
0°	0,24	12,79 - 30,48	3,08 - 3,13
30°	0,24	13,86 - 30,15	3,76 - 3,81
	0,30		
56°	0,24	13,68 - 30,48	3,24 - 3,27
	0,30		
90°	0,30	12,79 - 30,48	2,96 - 2,99

(fonte: elaborado pelo autor)

Tabela 14 – Coeficientes de arrasto para as Pernas na altura 10,50m na configuração isolada da torre A55

Ângulo de incidência do vento	$\phi$	Velocidade do vento [m/s]	Coeficiente de arrasto medido
0°	0,20	13,29 - 29,41	2,27 - 2,37
30°	0,20	13,41 - 29,36	2,30 - 2,36
	0,27		
56°	0,20	13,35 - 29,36	2,23 - 2,27
	0,27		
90°	0,27	13,36 - 29,33	2,04 - 2,11

(fonte: elaborado pelo autor)

Tabela 15 – Coeficientes de arrasto para as Pernas na altura 10,50m na configuração de afastamento relativo mínimo da torre A55

Ângulo de incidência do vento	$\phi$	Velocidade do vento [m/s]	Coeficiente de arrasto medido
0°	0,20	9,69 - 21,29	3,82 - 3,91
30°	0,20	9,96 - 19,54	4,26 - 4,41
	0,27		
56°	0,20	10,49 - 20,74	3,65 - 3,74
	0,27		
90°	0,27	11,44 - 22,38	3,40 - 3,46

(fonte: elaborado pelo autor)

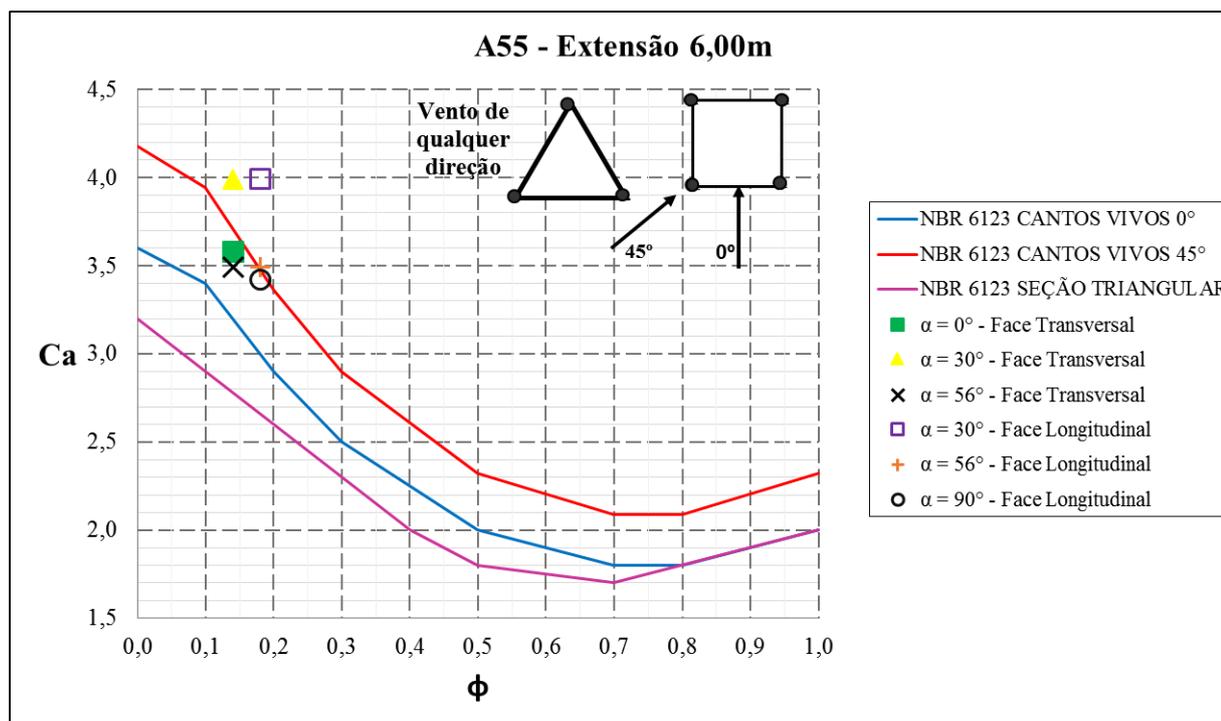
Tabela 16 – Coeficientes de arrasto para as Pernas na altura 10,50m na configuração de afastamento relativo máximo da torre A55

Ângulo de incidência do vento	$\phi$	Velocidade do vento [m/s]	Coefficiente de arrasto medido
0°	0,20	9,80 - 19,27	3,96 - 4,05
30°	0,20	10,43 - 19,68	4,55 - 4,65
	0,27		
56°	0,20	10,05 - 19,22	3,75 - 3,86
	0,27		
90°	0,27	10,25 - 21,59	3,55 - 3,62

(fonte: elaborado pelo autor)

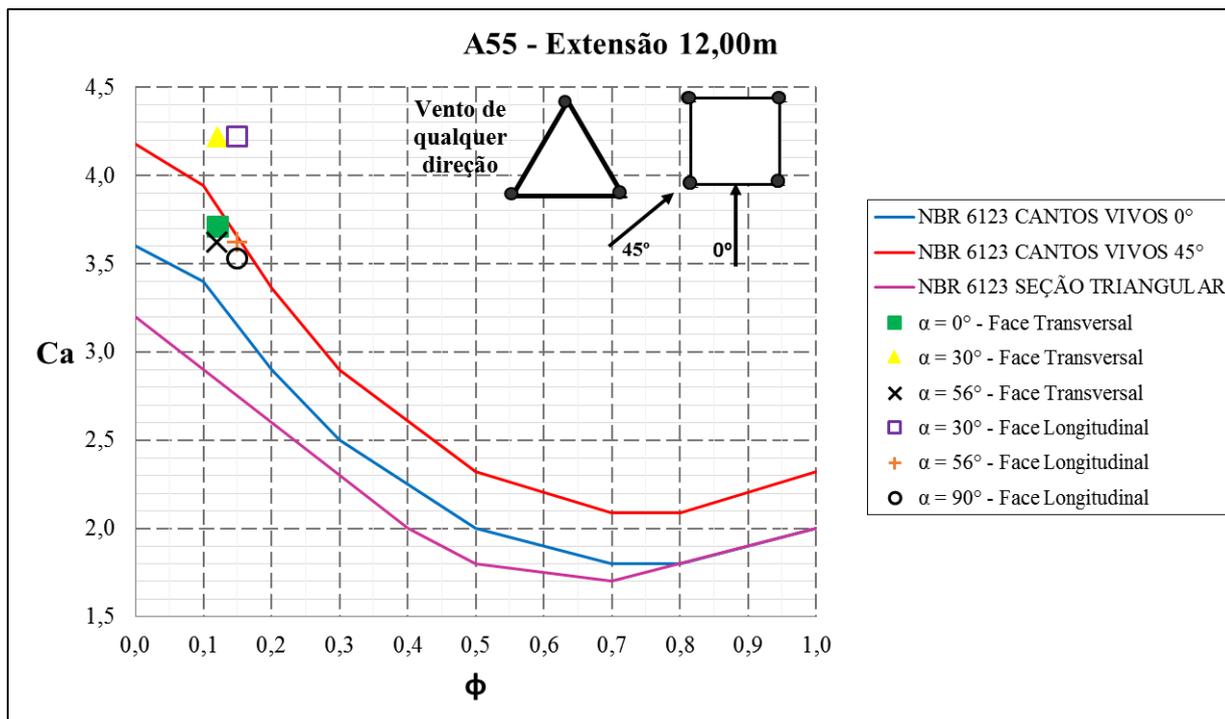
A comparação dos coeficientes de arrasto medidos nos ensaios em túnel de vento da torre A55 com os coeficientes de arrasto preconizados pela NBR 6123 de acordo com cada índice de área exposta são apresentadas nas figuras 29 a 36. As curvas são oriundas da figura 6, onde a curva azul refere-se ao ângulo de incidência do vento 0° para seções transversais retangulares, a curva vermelha, após o cálculo do coeficiente  $K_a$ , refere-se ao ângulo de incidência do vento 45° para seções transversais retangulares e a curva na cor magenta refere-se a seções transversais triangulares equiláteras.

Figura 29 – Coeficientes de arrasto para a Extensão 6,00m da torre A55



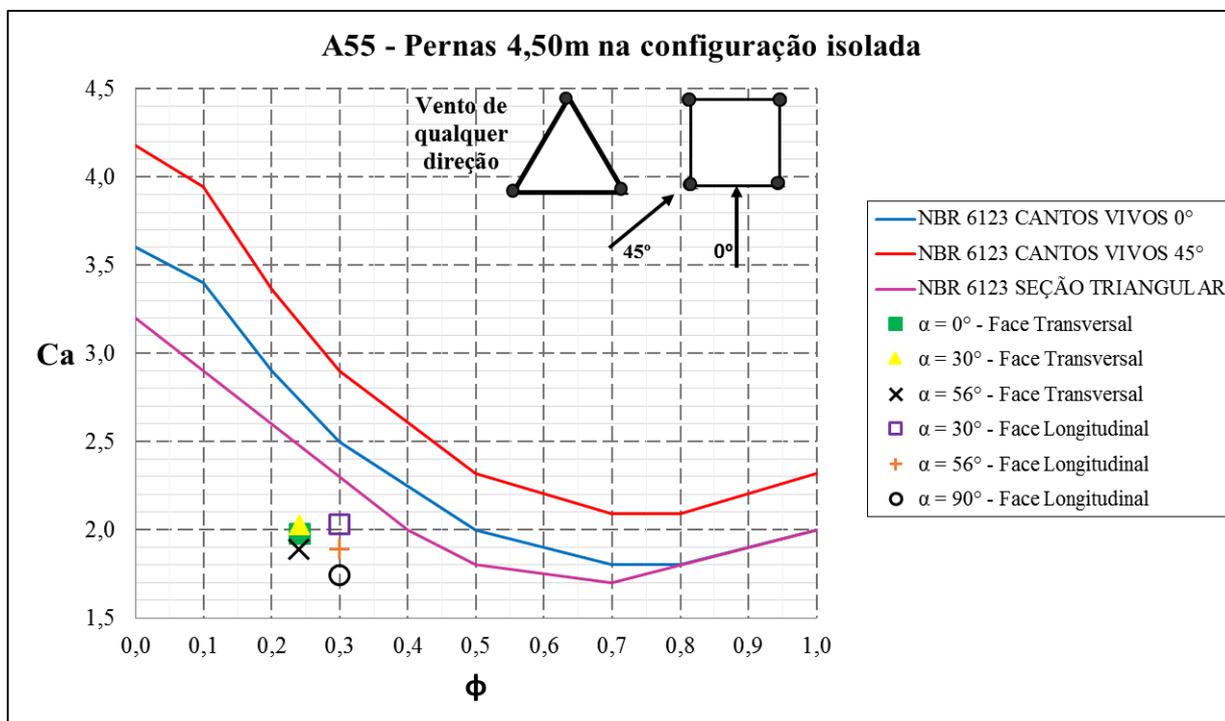
(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 30 – Coeficientes de arrasto para a Extensão 12,00m da torre A55



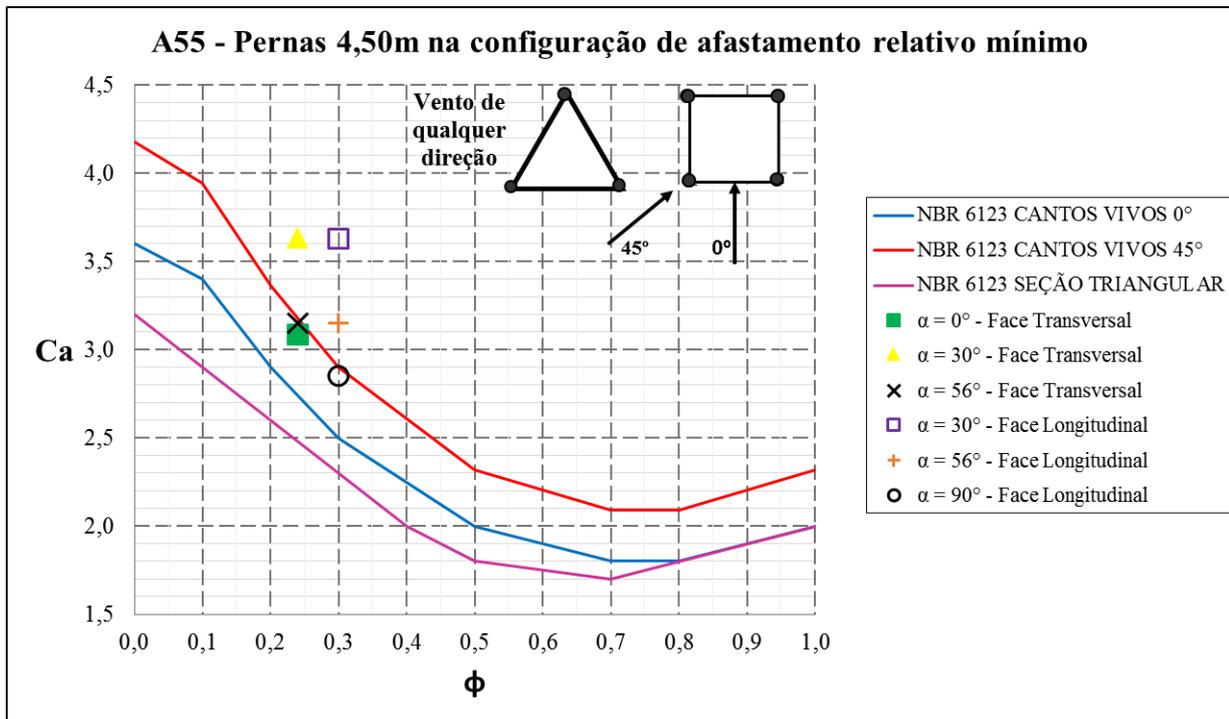
(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 31 – Coeficientes de arrasto para as Pernas na altura 4,50m na configuração isolada da torre A55



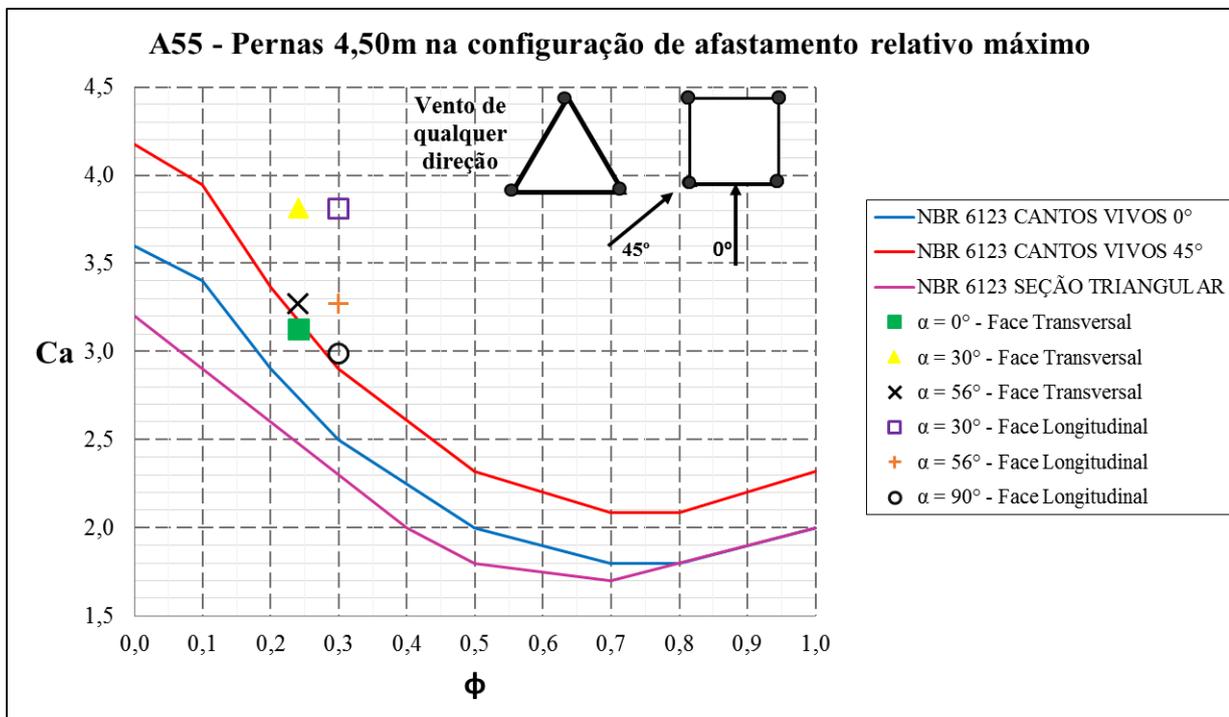
(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 32 – Coeficientes de arrasto para as Pernas na altura 4,50m na configuração de afastamento relativo mínimo da torre A55



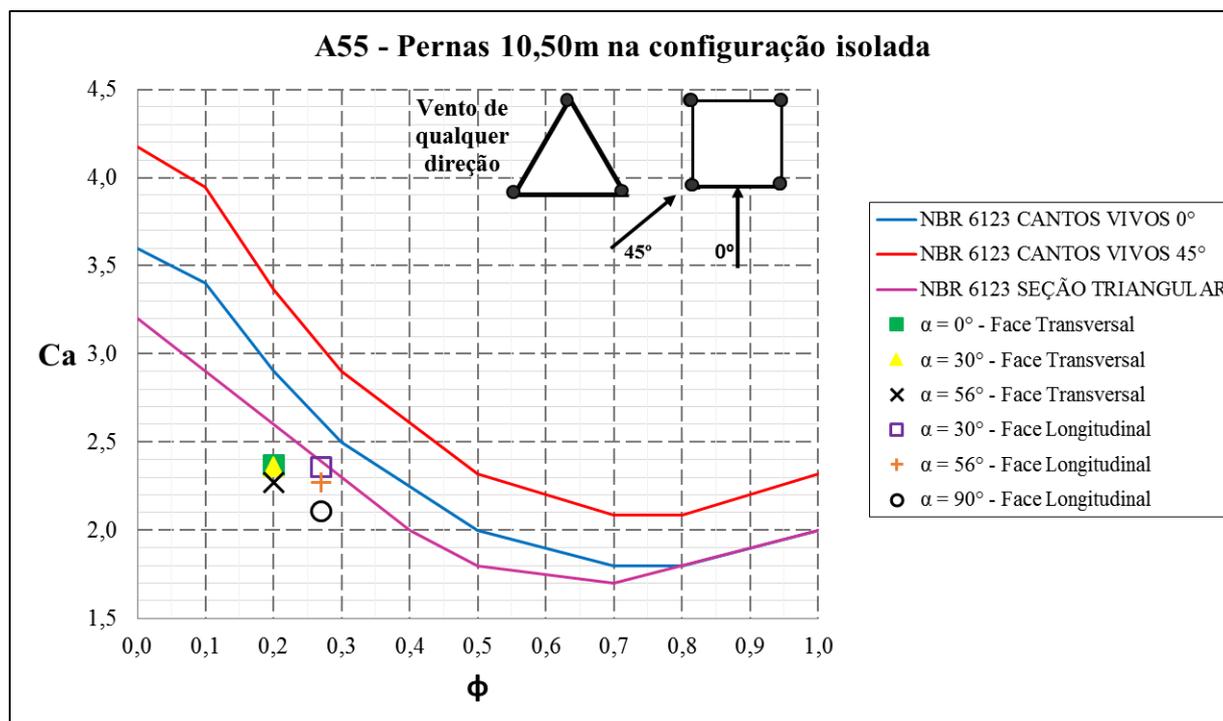
(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 33 – Coeficientes de arrasto para as Pernas na altura 4,50m na configuração de afastamento relativo máximo da torre A55



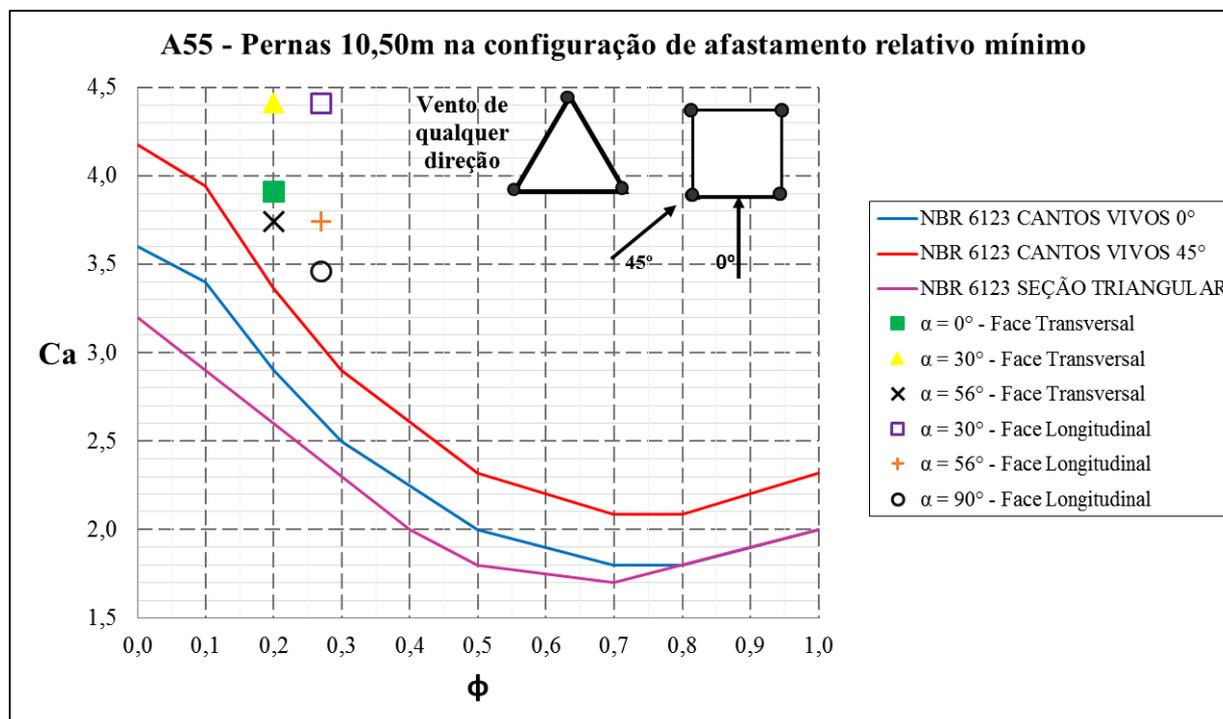
(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 34 – Coeficientes de arrasto para as Pernas na altura 10,50m na configuração isolada da torre A55



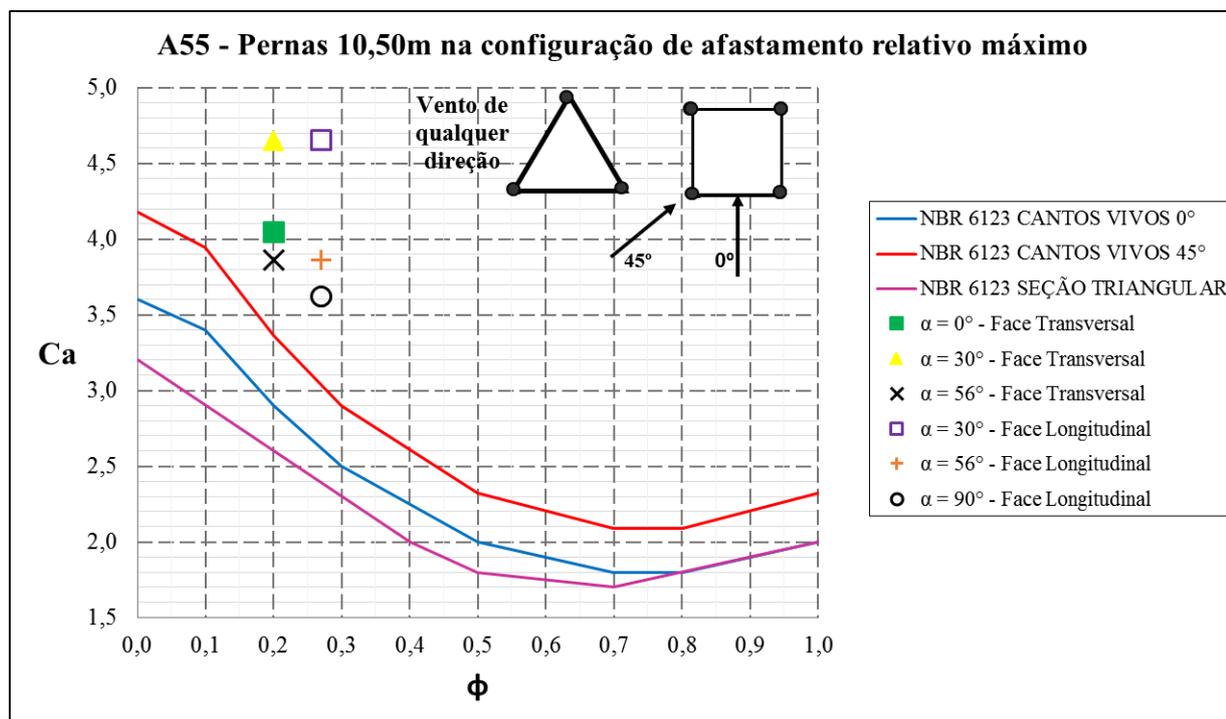
(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 35 – Coeficientes de arrasto para as Pernas na altura 10,50m na configuração de afastamento relativo mínimo da torre A55



(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 36 – Coeficientes de arrasto para as Pernas na altura 10,50m na configuração de afastamento relativo máximo da torre A55



(fonte: elaborado pelo autor)

## 8 CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

Para a Torre A33, os coeficientes de arrasto medidos durante os ensaios para os módulos da Extensão, que apresenta seção transversal retangular, estão condizentes com os coeficientes de arrasto preconizados pela NBR 6123. Entretanto, para os módulos das Pernas, que apresentam seção transversal triangular, os coeficientes de arrasto medidos em túnel de vento apresentam afastamento consideravelmente grande em comparação aos valores indicados pela norma. Nota-se que, na configuração isolada, os valores de coeficientes de arrasto medidos estão sempre abaixo dos valores da norma, enquanto nas configurações de afastamento relativo mínimo e máximo os valores estão acima dos indicados.

A Torre A55, por sua vez, possui coeficientes de arrasto medidos discrepantes dos preconizados pela NBR 6123 em todas as configurações dos módulos ensaiados. No módulo da Extensão, em ambas as configurações, os valores de coeficientes de arrasto medidos experimentalmente possuem magnitude superior aos indicados pela NBR 6123. Além disso, no módulo das Pernas os valores de coeficientes de arrasto possuem comportamento similar ao observado para a Torre A33, apresentando valores medidos abaixo dos valores preconizados pela norma na configuração isolada e acima nas configurações de afastamento relativo mínimo e máximo.

No caso da Torre A55, para todos os modelos e configurações ensaiadas, os coeficientes de arrasto medidos de maior magnitude foram obtidos com ângulo de incidência do vento de 30°, tanto para a face longitudinal quanto para a face transversal.

Observou-se que, em casos onde os elementos das torres de transmissão não possuem faces com treliçamento igual e inclinação aproximadamente vertical, os valores de coeficientes de arrasto indicados pela NBR 6123 para cálculo de projeto das estruturas não se adequam aos valores medidos experimentalmente para estes determinados tipos de estruturas.

Considerando a complexidade do escoamento do vento sobre torres de transmissão, um estudo do coeficiente de arrasto sobre os outros elementos das torres e a realização de estudos adicionais contemplando outras configurações de torres são algumas sugestões para a continuidade do trabalho de contribuições à NBR 6123.

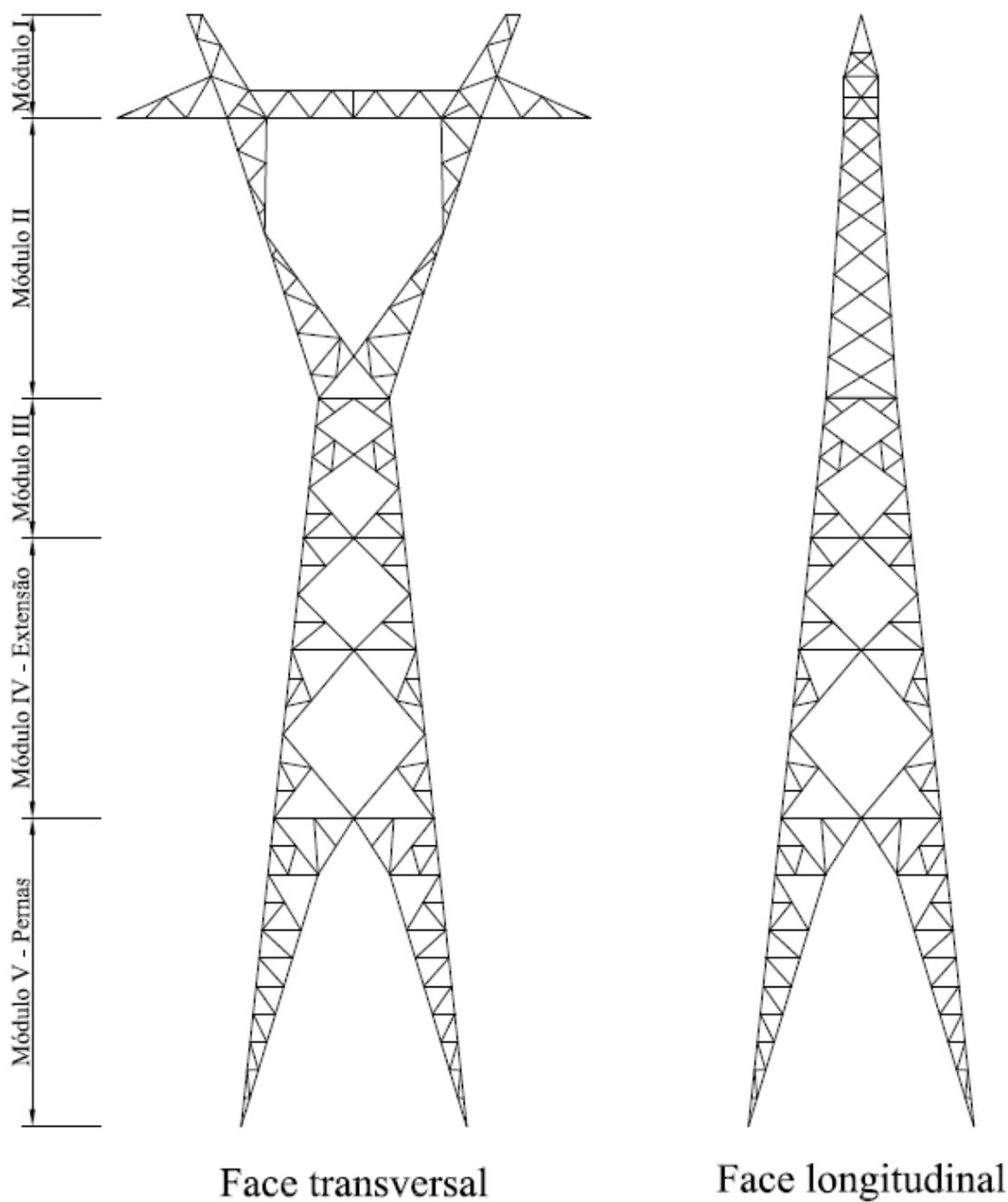
## REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6123**: forças devidas ao vento em edificações. Rio de Janeiro, 1988.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5422**: Projeto de linhas aéreas de linha de transmissão de energia elétrica. Rio de Janeiro, 1985.
- BENTES, J.L. **Análise dinâmica da ruptura de cabos em torres autoportantes e estaiadas de linhas de transmissão**. 2013. 163 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013.
- BLESSMANN, J. **Tópicos de normas de vento**. 2. ed. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 1990a.
- \_\_\_\_\_. **Aerodinâmica das construções**. 2. ed. Porto Alegre: Sagra, 1990b.
- \_\_\_\_\_. **Acidentes causados pelo vento**. 4. ed. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 2001.
- \_\_\_\_\_. **O vento na engenharia estrutural**. 2. ed. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 2013.
- KLEIN, T. **Estudo em túnel de vento das características aerodinâmicas de torres metálicas treliçadas**. 2004. 123 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004.
- LOREDO-SOUZA, A. M.; SCHTTINI, E. B. E.; PALUCH, M. J. Simulação da Camada Limite Atmosférica em Túnel de Vento. In: MÖLER, S. V.; SILVESTRINI, J. H. (Org.). **Turbulência**. Porto Alegre: ABCM, 2004. P.137-163.
- MACHADO, A. C. **Caracterização das propriedades aerodinâmicas de torres metálicas para determinação da resposta devida ao vento**. 2003. 137f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004.
- QUEDA de torres causa mais de 20 horas de falta de energia no Sul do RJ. **G1**. 19 out. 2013. Disponível em <<http://g1.globo.com/rj/sul-do-rio-costa-verde/noticia/2013/10/queda-de-torres-causa-mais-de-20-horas-de-falta-de-energia-no-sul-do-rj.html>>. Acesso em: 15 nov. 2014.
- QUEDA de torres limita operação de Itaipu até véspera da Copa; ONS descarta risco. **Folha de São Paulo**. 6 jun. 2014. Disponível em <<http://www1.folha.uol.com.br/mercado/2014/06/1466564-queda-de-torres-limita-operacao-de-itaipu-ate-vespera-da-copa-ons-descarta-risco.shtml>>. Acesso em: 15 nov. 2014.
- RIPPEL, L. I. **Estudo em túnel de vento do arrasto aerodinâmico sobre torres treliçadas de linhas de transmissão**. 2005. 129f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004

TORRES de Furnas derrubadas por tempestade no PR são reconstruídas. **G1**. 25 set. 2014. Disponível em <<http://g1.globo.com/pr/oeste-sudoeste/noticia/2014/09/torres-de-furnas-derrubadas-por-tempestade-no-pr-sao-reconstruidas.html>>. Acesso em: 15 nov. 2014.

## **ANEXO A – Identificação dos módulos**

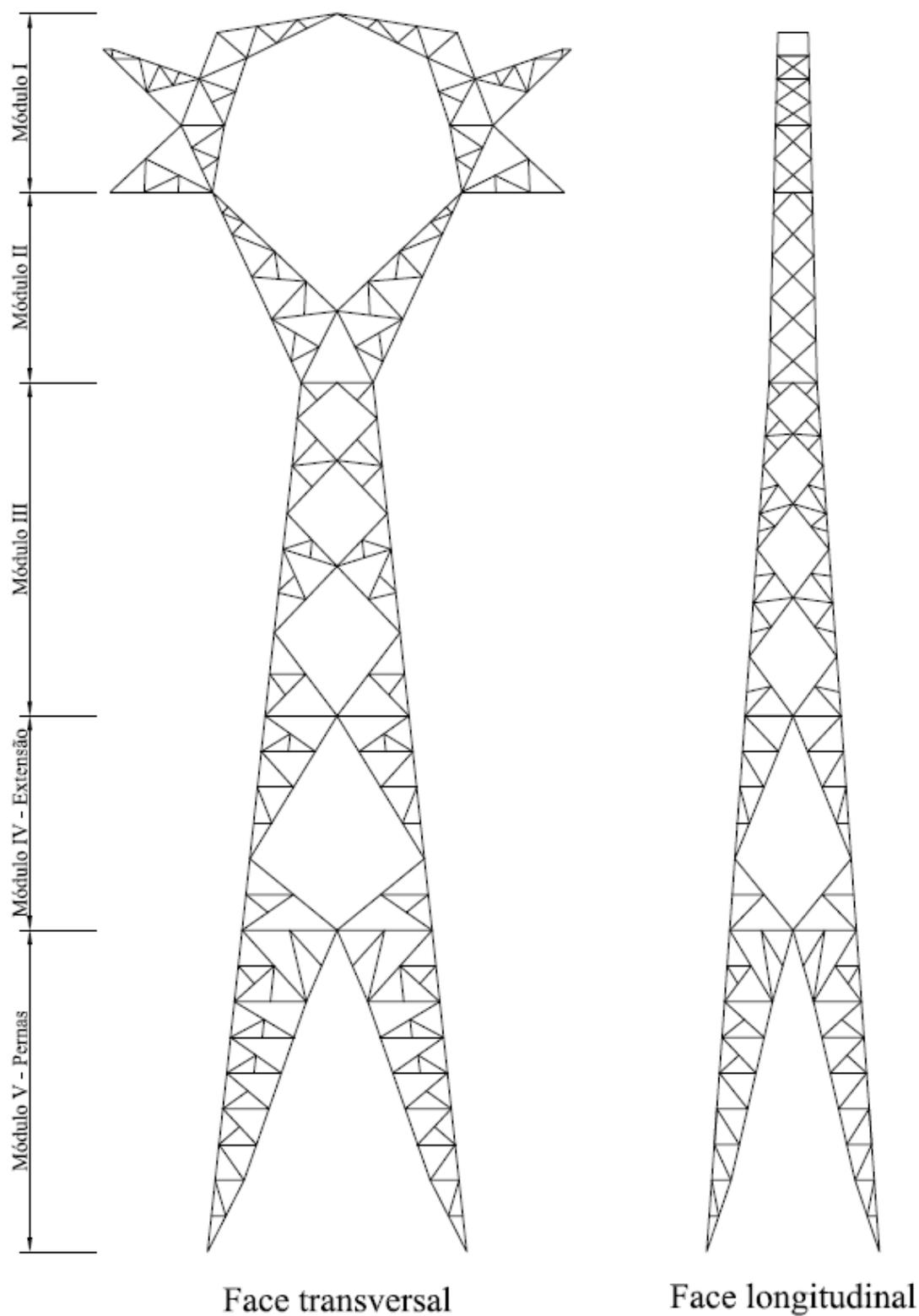
Figura 37 – Identificação dos módulos da Torre A33



(fonte: trabalho não publicado)<sup>12</sup>

<sup>12</sup> Esta figura foi elaborada pelo Laboratório de Aerodinâmica das Construções da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Figura 38 – Identificação dos módulos da Torre A55



(fonte: trabalho não publicado)<sup>13</sup>

<sup>13</sup> Esta figura foi elaborada pelo Laboratório de Aerodinâmica das Construções da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

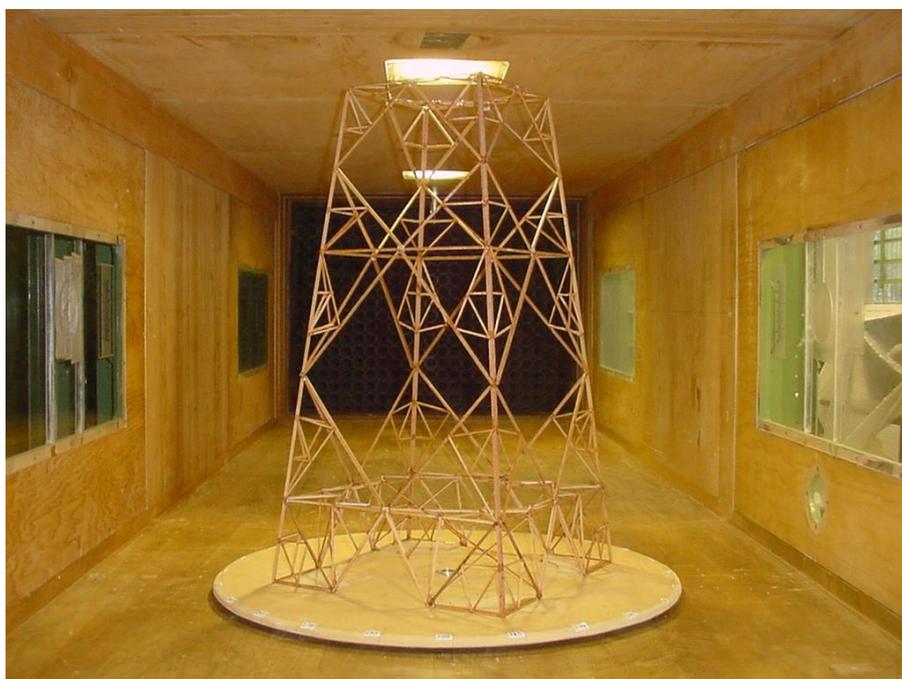
## **ANEXO B – Fotografias dos modelos reduzidos ensaiados**

Figura 39 – Módulo da Extensão 6,00m da Torre A33



(fonte: trabalho não publicado)<sup>14</sup>

Figura 40 – Módulo da Extensão 12,00m da Torre A33



(fonte: trabalho não publicado)<sup>15</sup>

---

<sup>14</sup> Esta figura foi elaborada pelo Laboratório de Aerodinâmica das Construções da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

<sup>15</sup> Idem.

Figura 41 – Módulo das Pernas 4,50m da torre A33 na configuração isolada



(fonte: trabalho não publicado)<sup>16</sup>

Figura 42 – Módulo das Pernas 4,50m da torre A33 na configuração afastamento relativo mínimo



(fonte: trabalho não publicado)<sup>17</sup>

Figura 43 – Módulo das Pernas 4,50m da torre A33 na configuração afastamento relativo máximo



(fonte: trabalho não publicado)<sup>18</sup>

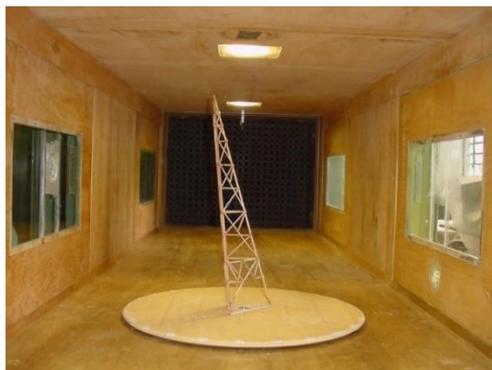
---

<sup>16</sup> Esta figura foi elaborada pelo Laboratório de Aerodinâmica das Construções da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

<sup>17</sup> Idem.

<sup>18</sup> Idem.

Figura 44 – Módulo das Pernas 9,00m da torre A33 na configuração isolada



(fonte: trabalho não publicado)<sup>19</sup>

Figura 45 – Módulo das Pernas 9,00m da torre A33 na configuração afastamento relativo mínimo



(fonte: trabalho não publicado)<sup>20</sup>

Figura 46 – Módulo das Pernas 9,00m da torre A33 na configuração afastamento relativo máximo



(fonte: trabalho não publicado)<sup>21</sup>

---

<sup>19</sup> Esta figura foi elaborada pelo Laboratório de Aerodinâmica das Construções da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

<sup>20</sup> Idem.

<sup>21</sup> Idem.

Figura 47 – Módulo da Extensão 6,00m da Torre A55



(fonte: trabalho não publicado)<sup>22</sup>

Figura 48 – Módulo da Extensão 12,00m da Torre A55



(fonte: trabalho não publicado)<sup>23</sup>

---

<sup>22</sup> Esta figura foi elaborada pelo Laboratório de Aerodinâmica das Construções da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

<sup>23</sup> Idem.

Figura 49 – Módulo das Pernas 4,50m da torre A55 na configuração isolada



(fonte: trabalho não publicado)<sup>24</sup>

Figura 50 – Módulo das Pernas 4,50m da torre A55 na configuração afastamento relativo mínimo



(fonte: trabalho não publicado)<sup>25</sup>

Figura 51 – Módulo das Pernas 4,50m da torre A55 na configuração afastamento relativo máximo



(fonte: trabalho não publicado)<sup>26</sup>

---

<sup>24</sup> Esta figura foi elaborada pelo Laboratório de Aerodinâmica das Construções da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

<sup>25</sup> Idem.

<sup>26</sup> Idem.

Figura 52 – Módulo das Pernas 10,50m da torre A55 na configuração isolada



(fonte: trabalho não publicado)<sup>27</sup>

Figura 53 – Módulo das Pernas 10,50m da torre A55 na configuração afastamento relativo mínimo



(fonte: trabalho não publicado)<sup>28</sup>

Figura 54 – Módulo das Pernas 10,50m da torre A55 na configuração afastamento relativo máximo



(fonte: trabalho não publicado)<sup>29</sup>

---

<sup>27</sup> Esta figura foi elaborada pelo Laboratório de Aerodinâmica das Construções da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

<sup>28</sup> Idem.

<sup>29</sup> Idem.