

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

JONATHAN DALLAGNOL

**Análise dos efeitos decorrentes de tormentas TS em
estruturas reticuladas**

FLORIANÓPOLIS, 2014



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

Análise dos efeitos decorrentes de tormentas TS em estruturas reticuladas

Trabalho de Conclusão do Curso para obtenção de grau de Engenheiro Civil pelo curso de Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC.

Orientador: Leandro Fleck Fadel Miguel

FLORIANÓPOLIS, 2014

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Dallagnol, Jonathan de Castro

Análise dos efeitos decorrentes de tormentas TS em estruturas reticuladas / Jonathan de Castro Dallagnol ; orientador, Leandro Fleck Fadel Miguel Miguel - Florianópolis, SC, 2014.

51 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico. Graduação em Engenharia Civil.

Inclui referências

1. Engenharia Civil. 2. Tormenta TS. 3. Ventos. 4. Velocidade de Vento. 5. Estrutura Reticulada. I. Miguel, Leandro Fleck Fadel Miguel. II. Universidade Federal de Santa Catarina. Graduação em Engenharia Civil. III. Título.

JONATHAN DE CASTRO DALLAGNOL

**ANÁLISE DOS EFEITOS DECORRENTES DE
TORMENTAS TS EM ESTRUTURAS RETICULADAS**

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do Título de Engenheiro Civil, e aprovado em sua forma final pelo Departamento de Engenharia Civil.

Florianópolis, 27 de Novembro de 2014.

Prof. Luis Alberto Gómez, Dr.
Coordenador do Curso

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Leandro Fleck Fadel Miguel
Orientador

Prof. Ivo José Padaratz, PhD.
Universidade Federal de Santa Catarina

Eng. Rafael Rodrigues de Souza
Universidade Federal de Santa Catarina

AGRADECIMENTOS

Agradeço a minha mãe Sandra R. X. de Castro por tornar possível a realização de um sonho e jamais duvidar de mim.

Ao meu pai Alcir Dallagnol por ser o meu maior exemplo de vontade e dedicação.

Ao meu irmão Deiviz Dallagnol por viver a vida de forma tão leve e simples e estar sempre comigo.

Ao meu irmão Adriano Dallagnol por me ensinar algumas coisas que não se aprende sem vive-las.

A minha irmã Analu Dallagnol por sempre me ajudar quando necessário e pelo conforto que sempre me proporcionou.

Ao meu irmão Andrio Dallagnol por me mostrar o caminho da alegria por mais difícil que o isso pareça.

A minha namorada Ana Luíza Bonamigo por todo o companheirismo e compreensão e pelo carinho e amor, eu te amo.

Aos meus amigos Sandra e Eduardo por me ajudarem na etapa final desse processo tão almejado.

Aos engenheiros Dalvo K. Júnior e Rodrigo Ludwig por transmitirem suas experiências e conhecimentos.

Aos meus amigos da graduação que tornaram muito mais divertida a minha faculdade, rir com vocês se tornou rotina nesses cinco anos.

Ao professor orientador Leandro F. F. Miguel pela paciência, competência e confiança no meu trabalho.

A todas as pessoas, amigos e colegas que passaram por mais esta etapa na minha vida, vocês fizeram desses anos os mais fáceis de serem vividos.

RESUMO

Este trabalho foi elaborado com o objetivo de propor o modelo mais adequado de perfil de velocidades de ventos para obtenção de forças oriundas de linhas de tormenta TS ou *ThunderStorm* em uma estrutura reticulada além de uma comparação com o modelo atual de norma ABNT NBR 6123:1988 – Forças devidas ao vento em edificações.

Tormentas TS são fenômenos atmosféricos causados por nuvens do tipo cúmulo-nimbo ou no latim *cumulonimbus*, que causam fortes jatos verticais descendentes de vento localizados e em contato com o solo se deslocam para todas as direções e com velocidades variadas.

O dimensionamento de estruturas reticuladas, em relação aos efeitos do vento segue a norma ABNT NBR 6123:1988 – Forças devidas ao vento em edificações, porém o tratamento de uma Tormenta TS requer uma análise mais sofisticada, pois uma Tormenta TS possui características singulares que a diferem de outros eventos de ventos.

Será desenvolvido neste trabalho um estudo comparativo entre um modelo probabilístico que descreve uma tormenta TS e o modelo da NBR 6123:1988 em uma estrutura reticulada e uma análise dos possíveis perfis de velocidade de uma tormenta TS. A estrutura será submetida a dois diferentes carregamentos, de acordo com os modelos descritos anteriormente.

Os resultados dos dois carregamentos são apresentados e discutidos além da análise dos possíveis perfis de velocidades apresentados.

Palavras chaves: Tormenta TS, Estruturas Reticuladas, Perfil de velocidades dos ventos

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	1
1.1 OBJETIVOS	2
1.1.1 Objetivo geral.....	2
1.1.2 Objetivos específicos.....	2
1.1.3 Metodologia.....	2
1.1.4 Estrutura do Trabalho	3
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
2.1 TORMENTA TS OU <i>THUNDERSTORM</i>	4
2.1.1 Formação.....	5
3 MODELO PROBABILÍSTICO DE UMA TORMENTA TS	9
3.1.1 Velocidade de translação.....	13
3.1.2 Variáveis.....	14
3.1.2.1 Região geográfica de interesse	14
3.1.2.2 Dimensões da área de simulação.....	14
3.1.2.3 Frequência média de Tormentas TS na região	15
3.1.2.4 Queda de pressão.....	15
3.1.2.5 Tempo Característico.....	16
3.1.2.6 Modelo probabilístico de vento de traslado.....	16
3.1.2.7 Altura da nuvem cumulonimbus.....	16
3.1.3 Modelo MatLab	16
4 DESCRIÇÃO DO MODELO DA NORMA ABNT NBR 6123:1988	17
4.1.1 Coeficiente de Arrasto.....	17
4.1.2 Pressão Dinâmica.....	18
4.1.3 Velocidade Característica do Vento.....	19
4.1.4 Fator topográfico S1.....	19
4.1.5 Fator S2	20
4.1.6 Fator Estatístico S3.....	22
4.1.7 Velocidade básica do vento	22
4.1.8 Diferenças entre os modelos.....	23
5 ANÁLISE NUMÉRICA	24
5.1 GEOMETRIA DA TORRE	24
5.2 TEMPO DE RETORNO	25
5.3 MÉDIA	27
5.4 FATORES DE REFERENCIA	30
5.4.1 Coeficiente de Arrasto.....	30
5.4.2 Fator topográfico S1.....	31
5.4.3 Fator S2	31
5.4.4 Fator estatístico S3.....	32

5.4.5 Velocidade Básica do vento.....	32
5.4.6 Força de arrasto.....	32
5.5 RESULTADOS	34
6 CONCLUSÕES	37
7 TRABALHOS FUTUROS.....	38
8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	39

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Tormenta TS.....	4
Figura 2 - Etapa de Contato.....	5
Figura 3 - Etapa de Explosão	6
Figura 4 - Ventos das etapas de contato e explosão	6
Figura 5 - Etapa de Almofada	7
Figura 6 - Ventos - Etapa de Almofada.....	7
Figura 7 - Linha de Fluxo em tormenta TS	11
Figura 8 - Função densidade de probabilidade de queda de pressão em uma Evento TS aleatório	15
Figura 9 - Coeficiente de Arrasto, C_a , para torres reticulares de seção triangular equilátera formadas por barras prismáticas de cantos vivos ou levemente arredondados.....	18
Figura 10 - Fator S_1 - Topográfico	20
Figura 11 - Mapa de Isopletas da Velocidade Básica de Vento	23
Figura 12 - Esquema isométrico da torre	25
Figura 13 - Velocidade Horizontal - Tempo de Retorno 50 anos.....	28
Figura 14 - Velocidade Horizontal - Média	28
Figura 15 - Comparação entre os perfis de velocidade	29
Figura 16 - Esquema de divisão de painéis	30
Figura 17 - Componentes da força de arrasto nas faces de torres reticuladas de seção quadrada ou triangular equilátera.	33
Figura 18 - Localização de cada barra na estrutura.....	36

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Valores S2	21
Tabela 2 - Fator Estatístico S3	22
Tabela 3 - Valores Tempo de Retorno - Velocidade Horizontal	27
Tabela 4 - Velocidade Horizontal - Média	27
Tabela 5 - Tabela Ca	31
Tabela 6 - Tabela S2.....	32
Tabela 7 - Resultados - Esforços internos em montantes e diagonais em cada painel.....	35

1 Introdução

Fenômenos meteorológicos que causam ventos fortes próximos à superfície terrestre tem fundamental importância para o dimensionamento de estruturas de engenharia. Esses fenômenos incluem tempestades tropicais e extratropicais, tornados, furacões e Tormentas TS ou *ThunderStorms*.

Diversos modelos para tratar estes fenômenos vêm sendo desenvolvidos nas últimas décadas. Este trabalho foi baseado no modelo de Ponte & Riera (2007), Ponte & Riera (2010) e Miguel & Riera (2013) que trata de um evento não-estacionário no tempo e no espaço para determinar valores de velocidades de vento em uma tormenta TS para alturas até 50 m.

Tormenta TS é um fenômeno meteorológico onde uma coluna de vento descendente retilínea localizada provida de uma nuvem *cumulonimbus* é lançada ao solo e quando em contato com o mesmo se espalha em todas as direções.

Um evento de tormenta TS costuma não levar mais de cinco minutos e tem caráter localizado, além disso a nuvem causadora pode ser carregada por outras frentes de tempestade ou ventos que circulam na região aumentando o valor das velocidades de ventos.

O modelo probabilístico descrito neste trabalho leva em conta a região geográfica de interesse, dimensões da área onde a simulação de eventos TS é feita, frequência média de eventos nesta região, um modelo probabilístico de queda de pressão, um modelo probabilístico de intensidade e orientação do vento que carrega a tempestade, o chamado vento de translado, um modelo probabilístico de tempo característico do evento, que é o tempo desde o início da tempestade até o vento atingir seu valor máximo, e um modelo probabilístico da altura da nuvem até o solo.

A norma ABNT NBR 6123:1988 - Forças devido aos ventos trata de um conjunto simplificado de sistemas de pressão de ventos ou em inglês *Extended pressure systems* (EPS), para estes fenômenos o perfil de velocidades de ventos ou a ação do vento em estruturas depende do local, tipo de terreno e dos obstáculos. A velocidade do vento é majorada ou minorada conforme estas características. Estes eventos caracterizam-se por durarem horas e atingirem grandes regiões.

Riera e Nanni (1989) apresentam evidências estatísticas confirmando que velocidades de ventos máximas possuem diferentes distribuições de probabilidade para eventos TS e EPS. Evidências similares também foram detectadas em dados de quatro estações

meteorológicas por Twisdale e Vickery (1976), concluindo que ventos originados em tormentas TS merecem uma análise separada.

Este trabalho fará uma comparação entre o modelo de norma ABNT NBR 6123:1988 e o modelo probabilístico de uma tormenta TS não-estacionária, além de uma análise do perfil de velocidades apresentado por este modelo.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo geral

Comparar os efeitos do vento gerados por tormentas TS estacionárias ou não em uma estrutura reticulada com os efeitos produzidos por ventos de acordo com a Norma ABNT NBR 6123:1988 – Forças devidas ao vento em edificações.

1.1.2 Objetivos específicos

- Propor e comparar perfis de velocidades de vento para uma linha de tormenta TS;
- Analisar numericamente e comparar o modelo probabilístico de uma tormenta TS e o modelo da norma ABNT NBR 6123:1988.
- Analisar os efeitos de uma linha de tormenta TS em estruturas reticuladas

1.1.3 Metodologia

Primeiramente foi feita uma revisão bibliográfica mostrando em ordem cronológica as etapas para elaboração do modelo probabilístico usado neste trabalho, posterior a parte introdutória foi dada uma noção básica sobre a formação e as etapas de uma tormenta TS e um comparativo com tempestades do tipo EPS. A seguir descreve-se totalmente o modelo probabilístico, suas considerações e variáveis, o tratamento usado para cada uma, além de discretizar o modelo usado pela norma ABNT NBR 6123:1988 – Forças devidas ao vento em edificações para o carregamento de estruturas reticuladas. O modelo probabilístico de uma tormenta TS foi descrito matematicamente no programa computacional MatLab através de uma rotina computacional elaborada

por Ponte & Riera (2007) para alturas até 10 m e adaptado por Miguel & Riera (2013) para alturas até 50 m.

Obtendo as velocidades máximas dos ventos anuais horizontais no MatLab, analisou-se o perfil de velocidades utilizando fatores estatísticos como período de retorno de 50 anos através de uma distribuição Gumbel e a média destes valores, então foi possível determinar o carregamento de uma estrutura reticulada e elaborar uma comparação com o modelo da norma ABNT NBR 6123:1988. A modelagem da estrutura se deu através da ferramenta computacional STRAP 2013, assim como a determinação dos esforços internos. Com os esforços internos determinados para as duas estruturas foi elaborado um comparativo entre os modelos citados anteriormente.

1.1.4 Estrutura do Trabalho

O presente trabalho está estruturado em oito capítulos, onde o primeiro capítulo traz uma introdução sobre o trabalho e o objetivo geral e os específicos do mesmo, além da metodologia usada para elaboração do mesmo.

O segundo capítulo trata da revisão bibliográfica, onde explica a tormenta TS e suas premissas e normas utilizadas neste trabalho.

O terceiro capítulo descreve o modelo probabilístico utilizado para a obtenção de valores de velocidades máximas anuais para cada altura e discretiza as variáveis utilizadas neste modelo.

O quarto capítulo para efeito comparativo mostra o modelo utilizado na norma para cálculo de esforços de ventos em estruturas reticuladas.

O quinto capítulo demonstra a análise numérica para os dois modelos, além dos passos que foram seguidos para comparação entre os modelos.

O sexto capítulo trata da conclusão do trabalho, o sétimo capítulo dá sugestões de trabalhos futuros na área e o oitavo capítulo mostra as referências bibliográficas.

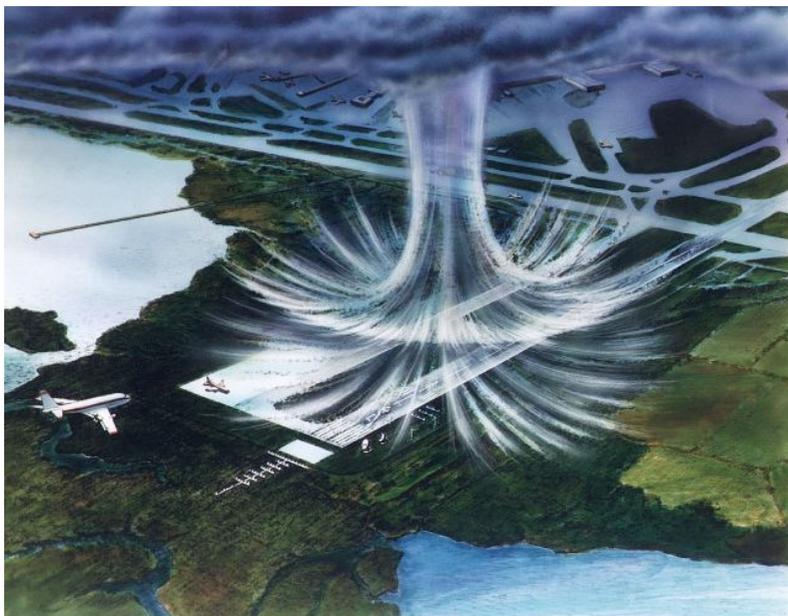
2 Revisão Bibliográfica

2.1 Tormenta TS ou *ThunderStorm*

Também chamado de *downburst* o termo descreve uma coluna localizada de descarga de ar causada por uma corrente descendente oriunda de nuvens *cumulonimbus*, este fenômeno tem caráter local e costuma durar poucos minutos.

Como pode-se observar na figura 1, a tormenta é caracterizada por uma coluna de ar, uma rajada descendente que ao atingir o nível do solo, se espalha em todas as direções produzindo ventos que podem possuir variáveis direções e velocidades.

Figura 1 - Tormenta TS



Fonte:

<http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/4/4e/Microburstnasa.J>
PG Acesso em 29/10/2014

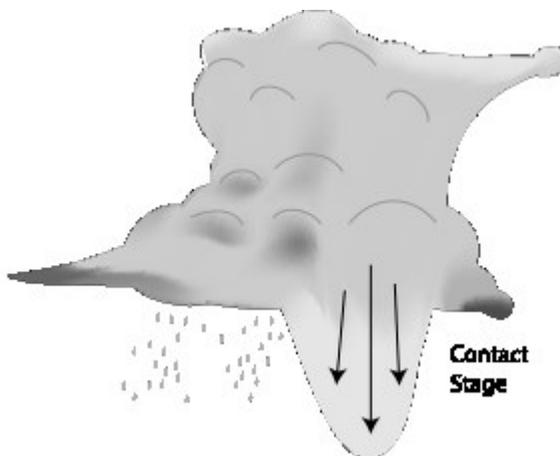
2.1.1 Formação

As formações dessas tempestades variam muito, porém a maioria começa com granizo ou grandes gotas de chuva que derretem ou evaporam através do ar mais seco e quente, essa transferência de calor resfria o ar consideravelmente, o mesmo circundado pelo ar mais quente tem a tendência de descer, já que o ar mais frio possui uma densidade mais elevada. Quando esse atinge o solo, ele se espalha e forma a chamada frente de rajada. A área que sofre essa descarga imediata do ar mais frio tem a ocorrência de chuvas e ventos mais fortes. Ao se espalhar o vento perde velocidade.

A tormenta TS tende a durar pouco tempo, mas suas consequências podem ser de extrema importância. A tormenta TS, segundo Fujita (1985) é dividida em três etapas:

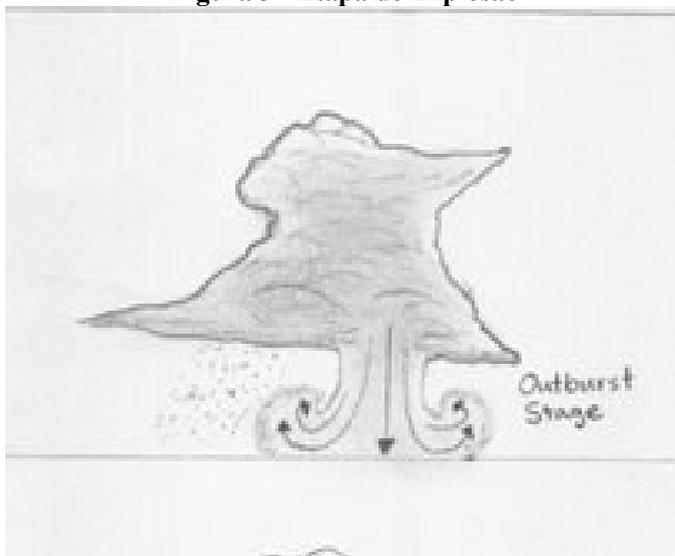
Etapa de contato (*Contact Stage*), esta etapa caracteriza-se pelo jato descendente até a iminência de tocar o solo.

Figura 2 - Etapa de Contato



Fonte: http://upload.wikimedia.org/wikipedia/en/7/74/Contact_stage.svg
Acesso em 29/10/2014

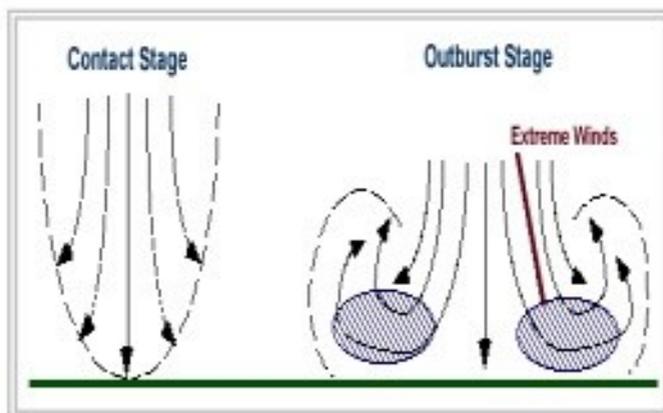
Etapa de Explosão (*Outburst Stage*), é nessa etapa que os ventos se propagam em todas as direções após o contato com o solo, onde ondas de ar frio se movem longe do ponto de impacto com o solo.

Figura 3 - Etapa de Explosão

Fonte:

<http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/c/cc/Outburststage.jpg>

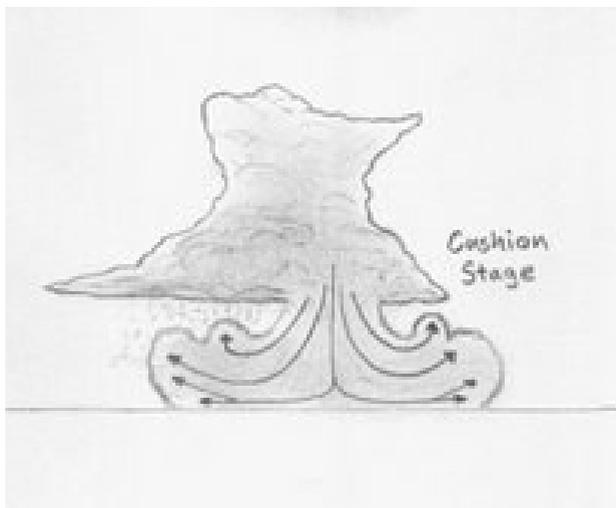
Acesso em 29/10/2014

Figura 4 - Ventos das etapas de contato e explosão

Fonte: Ponte & Riera (2007)

Etapa de almofada (*Cushion Stage*), devido ao atrito com a superfície, os ventos próximos a ela perdem força, enquanto os ventos acima continuam a acelerar conforme a figura 6 formando uma espécie de almofada entre o solo e o jato de ar.

Figura 5 - Etapa de Almofada

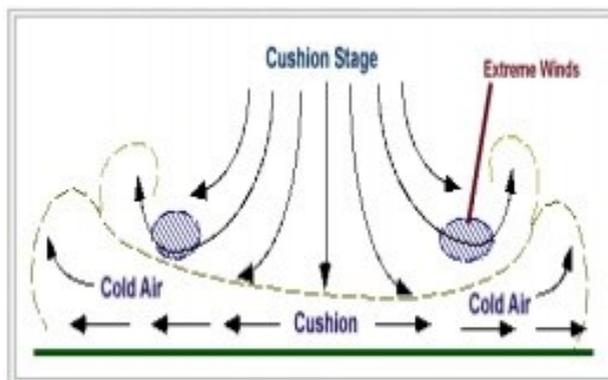


Fonte:

<http://upload.wikimedia.org/wikipedia/en/9/9f/Cushionstage.jpg>

Acesso em 29/10/2014

Figura 6 - Ventos - Etapa de Almofada



Fonte: Ponte & Riera (2007)

Tormenta TS se tornou assunto frequente em pesquisas acadêmicas nas últimas décadas devido principalmente aos efeitos destrutivos da tempestade. Na década de 80, os estudos focaram principalmente na formação e caracterização de uma tormenta TS.

Este fenômeno teve sua identificação aprimorada com Caracena et al. (1977) que descreveu melhor suas características e suas variações, além de ajudar na sua identificação visual. Seu trabalho foi motivado devido principalmente a acidentes aéreos e ajuda a entender melhor uma Tormenta TS.

Fujita (1976) e Fujita & Byers (1977) descrevem fortes concentrações de descargas de ventos verticais próximas ao aeroporto internacional J. F. Kennedy, em Nova Iorque, em um acidente na linha 66 que liga Nova Orleans a Nova York em Junho de 1975. Outro episódio de tormenta TS ocorreu em agosto de 1975 em Denver – Colorado e também foi objeto de estudo por Caracena (1976) e Fujita e Caracena (1977). Estes acidentes despertaram o interesse dos pesquisadores em estudar os efeitos e as características de uma Tormenta TS.

A formação de uma Tormenta TS se deve principalmente com a perda de calor do ar mais quente para grandes gotas de chuva ou granizo que evaporam com esta transferência, o ar é resfriado e com maior peso específico tende a descer, produzindo uma rajada descendente de ar localizada.

Tormentas TS ou *downburst* podem ser divididas em *microburst* ou *macroburst* dependendo da escala ou ainda *wet* ou *dry* dependendo da presença ou não de precipitação, essa divisão foi proposta por Fujita em 1985. O autor também divide a tormenta TS em três etapas, etapa de contato (*contact stage*), etapa de explosão (*Outburst stage*) e etapa de almofada (*cushion stage*) que foram descritas anteriormente.

Baseado em mecânicas dos fluidos, Zhu & Etkin (1988) descrevem um modelo tridimensional que determina os componentes axial e radial da velocidade do vento ao longo de uma linha de fluxo, além de determinar as direções em coordenadas cartesianas.

Este modelo levava em conta que a nuvem causadora era estacionária, somente com a introdução do vento de translado que são ventos translacionais que podem carregar a tempestade, ou seja, a nuvem causadora é carregada por ventos externos. Holmes & Oliver (2000) levaram em consideração a evolução das velocidades com o tempo, introduzindo o fator tempo característico, definindo um processo transiente, ou seja, que a velocidade do vento muda com o passar do tempo. Este tempo característico é definido como o tempo desde o início

da tempestade até o momento em que a velocidade atinge seu valor máximo.

Ponte & Riera (2007) propõem um modelo baseado em representações semi empíricas de linhas de fluxo simétricas axialmente que descreve um campo estacionário levando em conta a evolução da tempestade com o tempo utilizando variáveis meteorológicas. O tratamento destas variáveis assim como o modelo probabilístico usado neste trabalho baseia-se no modelo elaborado por Ponte & Riera (2007).

Para latitudes médias, Ponte & Riera (2010) elaboraram um modelo através de dados observados em duas estações meteorológicas, Uruguaiana e Porto Alegre, para determinar velocidades a 10 metros de altura e os esforços internos em uma estrutura reticulada, além de comparar os dados simulados com os dados observados.

Em 2013, Miguel & Riera, estenderam o procedimento para alturas até 50 metros simulando series de máximas anuais de momentos fletores e esforços cortantes causados por eventos TS em estruturas reticuladas.

3 Modelo probabilístico de uma tormenta TS

Para descrever os ventos oriundos de uma tempestade TS foi utilizado o modelo descrito por Ponte & Riera (2007). Este modelo assume que no caso de nuvens *cumulonimbus* estacionárias, o perfil de ventos é axissimétrico, ou seja é simétrico em relação ao eixo vertical da nuvem causadora e depende de fatores como a queda de pressão, velocidade do vento de translado, direção do vento de translado, altura do nível do solo até o centro da nuvem, raio da nuvem base, tempo característico da tempestade.

O modelo é baseado em representações semi-empíricas, ou seja em dados observados em estações meteorológicas, de fluxos axialmente simétricos que descrevem um campo estacionário, modulado por funções empíricas.

O modelo descrito por Ponte & Riera (2007) assume condições atmosféricas usuais durante a ocorrência da Tormenta TS e geometria simplificada da nuvem *cumulonimbus* causadora, a mesma tem a forma de um cilindro de base circular com um eixo vertical, e as linhas de fluxo também são axialmente simétricas em relação ao eixo vertical da nuvem.

O teorema de Bernoulli é usado para determinar a velocidade tangencial em uma linha de fluxo a uma altura z do solo, assumindo que a base da nuvem está a uma altura h do solo, através da equação (1):

$$V_t = \left[2 \int (dp/\rho) \right]^{1/2} \quad (1)$$

Em que dp é a diferença de pressão e ρ é a massa específica. A diferença de pressão varia linearmente de zero para a altura h e ΔP_0 no nível do solo. A massa específica depende da altura e essa dependência é dada pela equação (2).

$$\rho(z) = \rho_0 \exp(-\beta z) \quad (2)$$

Onde z está restrito a valores entre 0 e 10000 m. Os parâmetros na equação (2), estimados usando dados de Mc Donald & Fox (1995), são $\rho_0 = 1,019 \text{ kg/m}^3$ e $\beta = 0,0001$. A pressão na altura z é descrita pela equação (3).

$$p = \Delta P_0 (1 - z/h) \quad (3)$$

Introduzindo as equações (1) e (2) na equação (3), e resolvendo a integral a seguinte expressão (4) para velocidade tangencial é obtida:

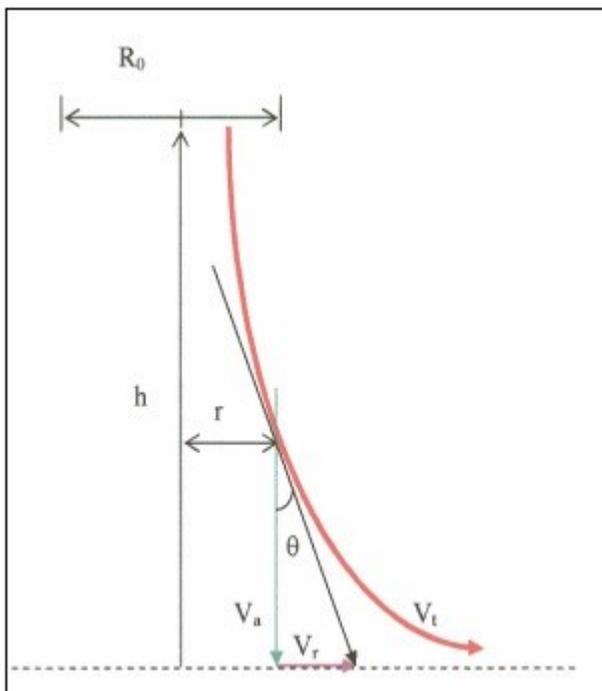
$$V_t = \left[(2\Delta P_0) / (h\rho_0\beta) \right]^{1/2} \left[\exp(\beta h) - \exp(\beta z) \right]^{1/2} \quad (4)$$

Segundo Ponte & Riera (2007):

Informações disponíveis sugerem que o queda de pressão total ΔP_0 fique em torno de 100 a 500 Pa, no entanto nenhum dado foi encontrado para elaborar uma função densidade de probabilidade para ΔP_0 , que deve ser modelada unicamente tendo como base os valores máximos e mínimos estimados. Para qualquer valor dado de ΔP_0 , a Eq. (4) permite a determinação da velocidade tangencial.

Na Fig. 7 é mostrada uma curva de linha de fluxo característica para uma tormenta TS:

Figura 7 - Linha de Fluxo em tormenta TS



Fonte: Ponte & Riera (2007)

Zhu & Etkin (1988) apresentaram um modelo tridimensional simplificado onde os componentes axial e radial da velocidade tangencial podem ser determinadas, o modelo, chamado de “*doublet sheet model*”, foi baseado em considerações de fluidos mecânicos. Para fins de engenharia o modelo foi simplificado, porém mantendo a ideia de simetria axial. A linha de fluxo é descrita por:

$$z(r) = k/r \quad (5)$$

Onde k é uma constante e r é a distância do eixo vertical da nuvem até a curva em uma altura z de interesse. Para uma linha de fluxo específica a derivada de z em relação a r define a tangente do ângulo em relação ao eixo. No ponto (r_p, h) , a componente radial e axial da velocidade para qualquer altura z de interesse é:

$$V_r = V_t \left\{ 1 / [1 + z^2 (r_p)] \right\}^{1/2} \quad (6)$$

$$V_a = V_t \left\{ z^2 (r_p) / [1 + z^2 (r_p)] \right\}^{1/2} \quad (7)$$

$$r = [x^2 + y^2]^{1/2} \quad (8)$$

$$\sin \theta = \left\{ 1 / [1 + z^2 (r_p)] \right\}^{1/2} \quad (9)$$

$$\cos \theta = \left\{ z^2 (r_p) / [1 + z^2 (r_p)] \right\}^{1/2} \quad (10)$$

Onde θ denota o ângulo entre tangente da linha de fluxo e o eixo vertical Oz , finalmente:

$$V_a = V_t \left[r_p^2 h^2 / (r_p^2 h^2 + r^4) \right]^{1/2} \quad (11)$$

$$V_r = V_t \left[r^4 / (r_p^2 h^2 + r^4) \right]^{1/2} \quad (12)$$

Os componentes da velocidade na direção dos eixos de coordenadas são dados por:

$$V_x = V_t \sin \theta \cos \beta = V_r \cos \beta \quad (13)$$

$$V_y = V_t \sin \theta \sin \beta = V_r \sin \beta \quad (14)$$

$$V_z = V_t \cos \theta = V_a \quad (15)$$

Onde β denota o ângulo entre a projeção da linha de fluxo no plano horizontal e o eixo Ox .

3.1.1 Velocidade de translação

Além dos ventos oriundos da tormenta, na maioria dos casos, a nuvem causadora é carregada por ventos que circulam na região, os chamados ventos de translado, o que faz com que a nuvem deixe de ser estacionária. O modelo assume que os ventos de translado possuem velocidades constantes e na mesma direção que o vento que circula geralmente na área de interesse. Segundo Ponte & Riera (2007) e Miguel & Riera (2013):

Em raras ocasiões, no entanto, nuvens *cumulonimbus* maduras são carregadas por frentes de tempestades. Então, a partir disso, são chamadas de *squall lines*, que resulta em maiores intensidades de ventos porque a velocidade resultante da tormenta TS é acrescida com a velocidade de translação da tempestade.

Primeiramente devemos transformar em coordenadas cartesianas, se V_0 é o módulo do vetor velocidade do vento no ponto, que forma um ângulo γ com o eixo Ox , então os componentes da velocidade resultante no sistema Coordenadas-cartesianas são dados por:

$$V_{Rx} = V_r \cos \beta + V_0 \cos \gamma \quad (16)$$

$$V_{Ry} = V_r \sin \beta + V_0 \sin \gamma \quad (17)$$

$$V_{Rz} = V_z \quad (18)$$

Para levar em consideração a evolução da velocidade dos ventos, que varia linearmente, com o tempo definindo um processo transiente, Holmes & Oliver (2000) introduziram as seguintes equações:

$$V_{(t)} = 1,58V_t [1 - \exp(-t/T)] \quad \rightarrow \quad t \leq T \quad (19)$$

$$V_{(t)} = V_t \exp[-(t-T)/T] \quad \rightarrow \quad t > T \quad (20)$$

Onde T é o *tempo característico* da tempestade, definido como o tempo prescrito do início da tempestade até o instante onde a velocidade do vento alcança o valor máximo.

3.1.2 Variáveis

Para a elaboração deste modelo de tormenta TS, foram levadas em conta as seguintes variáveis:

- Região geográfica de interesse
- Dimensões da área de simulação
- Frequência média de Tormentas TS na região
- Modelo probabilístico de queda de pressão
- Distribuição de probabilidade da intensidade e orientação do vento de translado
- Modelo probabilístico de tempo característico da tormenta
- Modelo probabilístico da altura do solo até a nuvem causadora

A seguir serão discretizadas todas as variáveis e o tratamento usado em cada um.

3.1.2.1 Região geográfica de interesse

As velocidades de ventos extremos foram coletadas em estações meteorológicas no sudeste brasileiro por Riera *et al* (1989), os dados coletados foram divididos em tormentas TS e fenômenos extratropicais (EPS) e processados separadamente. Para a aplicação deste modelo proposto, foram usados os dados de Porto Alegre e Uruguaiana pois o modelo inicial foi baseado em dados coletados em ambas as estações.

3.1.2.2 Dimensões da área de simulação

A área considerada neste trabalho foi um quadrado com lados de 20 km, ou seja 400 km². O local onde a simulação de ventos ocorre está localizado no centro do quadrado, a área deveria garantir que a região fosse ampla o suficiente para assegurar a passagem da tempestade.

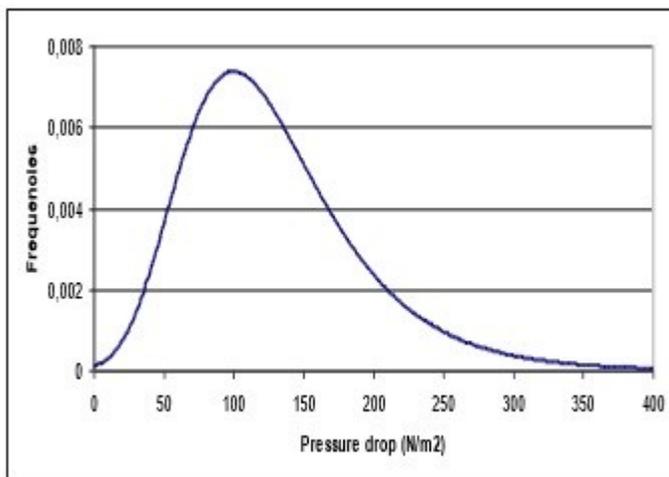
3.1.2.3 Frequência média de Tormentas TS na região

Para garantia do modelo, ou seja, tornar o modelo suficientemente confiável, devemos ter um número suficientemente grande de tempestades na área de interesse. Este número é tomado através da gravação de eventos pelo operador da estação meteorológica. Portanto, erros podem ocorrer e são admitidos pois o operador dificilmente consegue gravar dados quando a nuvem causadora fica mais longe que 10 Km. Os números médios de eventos TS por ano neste exemplo são de 20 para Porto Alegre e 30 para Uruguaiana.

3.1.2.4 Queda de pressão

Dados obtidos mostram que em Porto Alegre podem ser encontradas taxas de 7 milibars por hora de queda. Caracema *et al* (1987) sugere que em tormentas TS de menor intensidade a queda de pressão varie entre 2,4 e 5 mb. Foi adotada uma distribuição Gumbel com fator de forma $\alpha = 50 \text{ N/m}^2$ e fator de escala $\gamma = 100 \text{ N/m}^2$ conforme mostra a curva de valores.

Figura 8 - Função densidade de probabilidade de queda de pressão em uma Evento TS aleatório



Fonte: Ponte & Riera (2007)

3.1.2.5 Tempo Característico

O tempo característico, por definição, é o tempo desde o início da tempestade até o momento em que as velocidades atingem seus valores máximos. Não foram encontrados dados estatísticos, portanto para este trabalho foram utilizados dados adquiridos nas estações meteorológicas. A média e o desvio padrão para as seis tempestades cujo o tempo característico foi gravado são de 380 s e 164 s respectivamente. Com estes valores foi admitida uma distribuição de Gumbel utilizando o fator de forma $\alpha = 127$ s e fator de escala $\gamma = 306$ s. Estes valores se baseiam em registros de seis tempestades cujo o tempo característico foi gravado nas estações meteorológicas citadas anteriormente.

3.1.2.6 Modelo probabilístico de vento de translado

Para este trabalho foi assumida uma distribuição Weibull com parâmetros de forma $\beta = 2,5$ e de escala $\theta = 3,0$ m/s para o vento de translado. Estes valores foram obtidos de dados de 50 anos do mapa eólico do Rio Grande do Sul. Nenhuma referência foi obtida para a orientação do vento de translado, portanto foi adotado uma distribuição uniforme.

3.1.2.7 Altura da nuvem cumulonimbus

Também nenhuma referência foi encontrada na literatura. Parece não haver dependência entre a localização geográfica e a altura da nuvem. Neste trabalho foi adotado uma distribuição com média de $\mu = 10000$ m e desvio padrão $\sigma = 500$ m.

3.1.3 Modelo MatLab

Com este modelo foi elaborado na ferramenta computacional MatLab uma rotina computacional por Ponte & Riera para alturas até 10 m e posteriormente por Miguel & Riera contemplando alturas até 50 m.

A rotina computacional levou em conta as variáveis citadas anteriormente e o tratamento probabilístico de cada uma, com essa rotina computacional obteve-se cinquenta valores de velocidades máximas anuais horizontais, estes valores encontram-se no anexo I.

4 Descrição do modelo da norma ABNT NBR 6123:1988

Para a determinação dos esforços em uma estrutura reticulada, que são estruturas formadas por barras retas, foi utilizado a ABNT NBR 6123:1988 – Forças devidas ao vento, serão apresentados os critérios estabelecidos para determinar os valores de cada variável.

4.1.1 Coeficiente de Arrasto

Segundo a norma citada acima, força de arrasto é uma força na direção do vento, estática que segue a relação abaixo, tem como unidade o N.

$$F_a = C_a \times q \times A_e \quad (21)$$

A_e = Área Efetiva

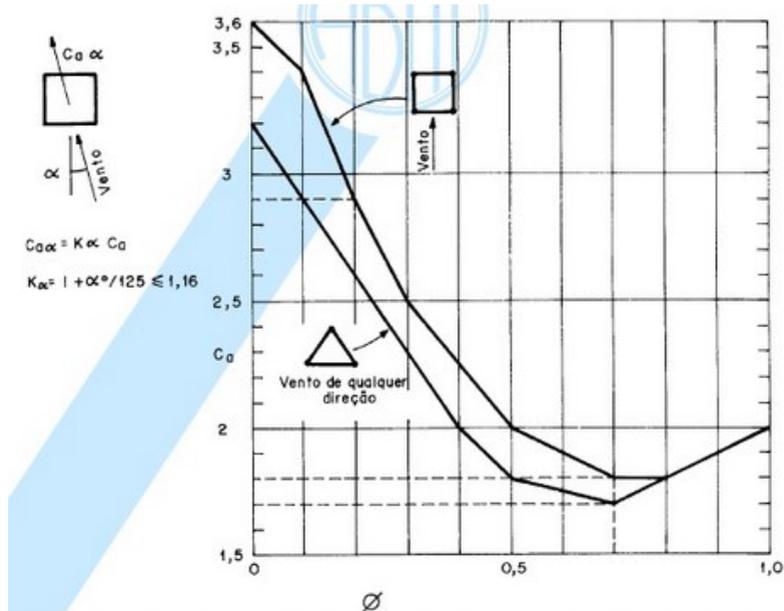
C_a = Coeficiente de Arrasto

q = Pressão dinâmica

Os coeficientes de arrasto são obtidos através de ensaios em túneis de vento, geralmente são fornecidos nos catálogos dos fabricantes e é adimensional.

No caso de uma estrutura com seção triangular constituídas por barras de cantos vivos o coeficiente de arrasto é fornecido pela figura 9, presente na norma:

Figura 9 - Coeficiente de Arrasto, C_a , para torres reticulares de seção triangular equilátera formadas por barras prismáticas de cantos vivos ou levemente arredondados



Fonte: ABNT NBR 6123: 1988

No gráfico apresentado acima utilizaremos a segunda curva pela seção da nossa torre e portanto, ignora a direção do vento para o cálculo de coeficiente de arrasto. O símbolo \emptyset representa índice de área exposta que é igual a área de uma face efetiva do reticulado dividida pela área definida pelo contorno do reticulado.

4.1.2 Pressão Dinâmica

A pressão dinâmica do vento é dada pela expressão abaixo e tem como unidade N/m^2 .

$$q = 0,613 \times V_k^2 \quad (22)$$

$V_k =$ Velocidade característica do vento

4.1.3 Velocidade Característica do Vento

A velocidade característica é a velocidade do vento majorada ou minorada por fatores que dependem da topografia, rugosidade do terreno, dimensões da estrutura, e ainda um fator estatístico que leva em conta a importância que a estrutura tem.

$$V_k = V_0 \times S_1 \times S_2 \times S_3 \quad (23)$$

4.1.4 Fator topográfico S1

O fator S1 leva em consideração o relevo do terreno e segundo a norma é determinado do seguinte modo.

- a) Terrenos planos ou fracamente acidentados: $S1 = 1,0$
- b) Talude e morros:

- No ponto A (morros) e nos pontos A e C (taludes) conforme figura 10: $S1 = 1,0$

- No ponto B: [S1 é uma função $S1(z)$]:

$$\theta \leq 3^\circ : S1(z) = 0 \quad (24)$$

$$6^\circ \leq \theta \leq 17^\circ : S1(z) = 1,0 + \left(2,5 - \frac{z}{d}\right) \text{tg}(\theta - 3^\circ) \geq 1,0 \quad (25)$$

$$\theta \geq 45^\circ : S1(z) = 1,0 + \left(2,5 - \frac{z}{d}\right) 0,31 \geq 1,0 \quad (26)$$

Interpolar linearmente para $3^\circ < \theta < 6^\circ < 17^\circ < \theta < 45^\circ$

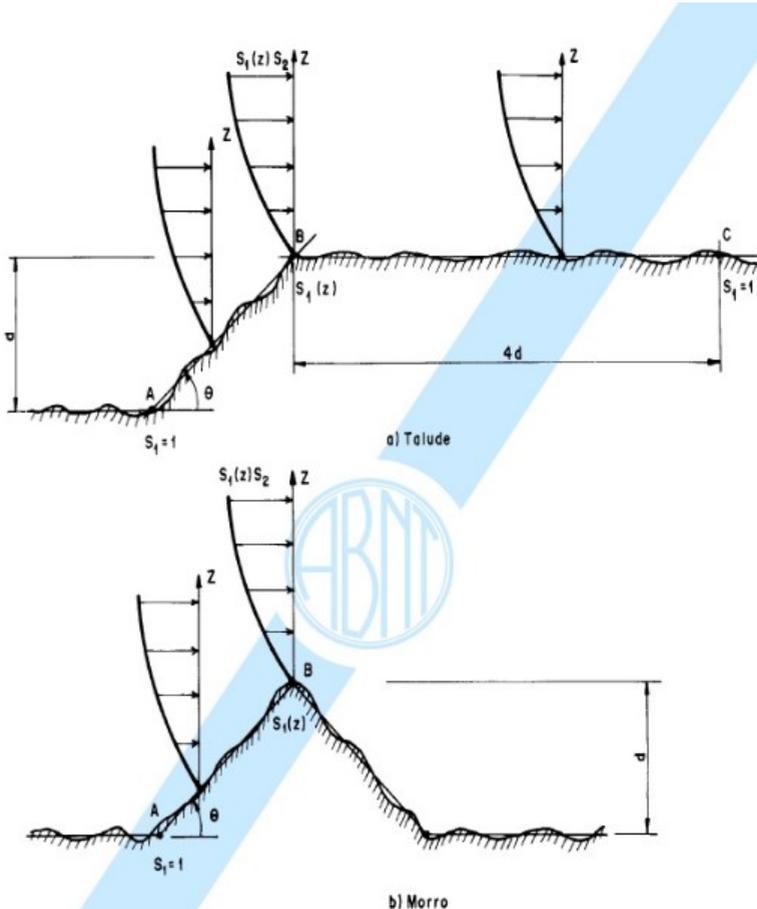
z = altura medida a partir da superfície do terreno no ponto considerado

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

θ = inclinação média do talude ou encosta do morro

- c) Vales profundos, protegidos de ventos de qualquer direção,
 $S_1 = 0,9$

Figura 10 - Fator S_1 - Topográfico



Fonte: ABNT NBR 6123: 1988

4.1.5 Fator S_2

O fator S_2 leva em conta a rugosidade do terreno, as dimensões da edificação e altura sobre o terreno.

Quanto a rugosidade do terreno a norma classifica em cinco categorias. A velocidade de vento varia continuamente, e seu valor médio pode ser calculado sobre qualquer intervalo de tempo. Foi verificado que o intervalo mais curto das medidas usuais (3s) corresponde a rajadas cujas dimensões envolvem convenientemente obstáculos de até 20 metros na direção do vento médio.

Quanto maior o intervalo de tempo no cálculo da velocidade média, tanto maior a distância abrangida pela rajada.

Os valores de S2 podem ser obtidos conforme tabela 1:

Tabela 1 - Valores S2

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: ABNT NBR 6123: 1988

4.1.6 Fator Estatístico S3

O fator estatístico S3 é baseado em conceitos estatísticos, e considera o grau de segurança requerido e a vida útil da edificação. O fator S3 também leva o fato de a velocidade V_0 , que é a velocidade de vento que apresenta um tempo de recorrência de 50 anos, apresentar uma probabilidade de 63% de ser igualada ou superada nesse tempo. O valor do fator S3 segue a tabela 2.

Tabela 2 - Fator Estatístico S3

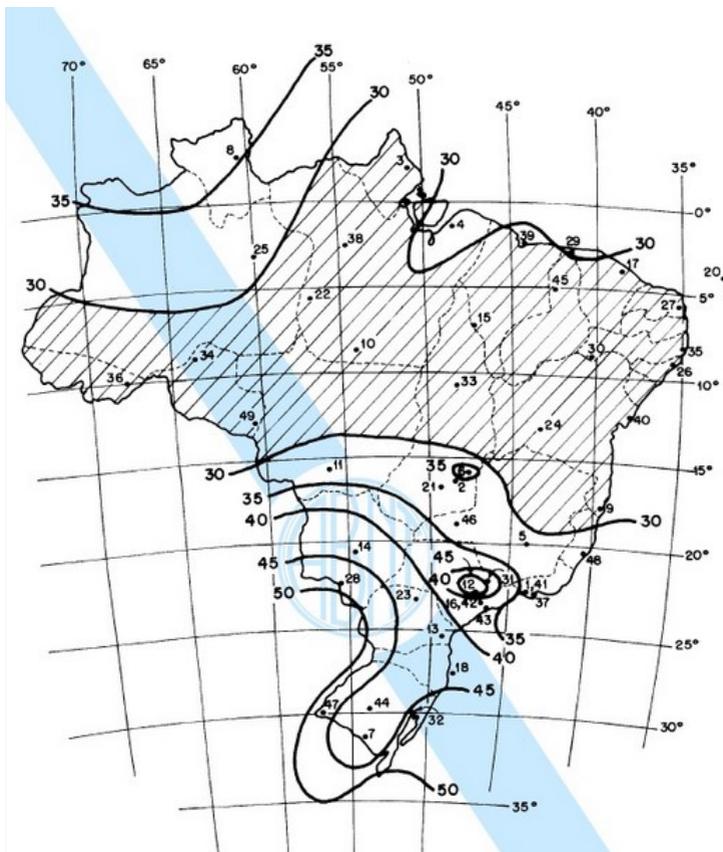
Grupo	Descrição	S ₃
1	Edificações cuja ruína total ou parcial pode afetar a segurança ou possibilidade de socorro a pessoas após uma tempestade destrutiva (hospitais, quartéis de bombeiros e de forças de segurança, centrais de comunicação, etc.)	1,10
2	Edificações para hotéis e residências. Edificações 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: ABNT NBR 6123: 1988

4.1.7 Velocidade básica do vento

Para o modelo utilizando a norma ABNT NBR 6123:1988, o valor da velocidade básica do vento é obtido no mapa de isopletas presente na norma e na figura 11. O valor para esta velocidade depende do local de interesse, para o caso deste trabalho o valor usado foi de 46m/s, pois o local de interesse é Porto Alegre – RS (ponto 32 no mapa).

Figura 11 - Mapa de Isopletas da Velocidade Básica de Vento



Fonte: ABNT NBR 6123: 1988

4.1.8 Diferenças entre os modelos

A norma ABNT NBR 6123:1988 – Forças devidas ao vento em edificações trata a aplicação de esforços nas estruturas de forma estática equivalente a forma dinâmica que ocorre na realidade. A norma trata de ventos contínuos que podem durar horas e que crescem exponencialmente conforme a altura aumenta. Os fenômenos EPS também tem caráter global, ou seja atinge grandes áreas.

O que difere um pouco das características de uma tormenta TS, conforme descrito acima, uma tormenta TS dura no máximo dois minutos e os valores tendem a aumentar horizontalmente conforme a descarga se aproxima do solo, como mostrados nas figuras anteriores, além de possuir um caráter local.

Além do mais, em muitos casos tormentas TS são carregadas por ventos que circulam na região ou em casos mais raros por frentes de tempestades, o que tende a uniformizar o perfil de velocidades quando em conjunto com uma tormenta TS, pois esses ventos que carregam a tormenta, chamados ventos de traslado, tendem a possuir valores maiores de velocidade que aumentam exponencialmente conforme a altura aumenta, o que difere de uma tormenta TS que tem um perfil contrário, ou seja, os valores de velocidades de ventos tendem a diminuir conforme a aumenta a altura.

5 Análise Numérica

5.1 Geometria da Torre

Na escolha da torre, optou-se por uma torre autoportante de base triangular de 3 m, e abertura no topo 1,5 m, a torre tem uma altura de aproximadamente 50 m, com uma área exposta de 7,19 m². Como o intuito deste trabalho não é o dimensionamento da torre em si e sim o perfil de velocidades para posterior dimensionamento da torre, não foi necessário a instalação de outros elementos, como antenas, escadas, capacidade de reserva entre outros.

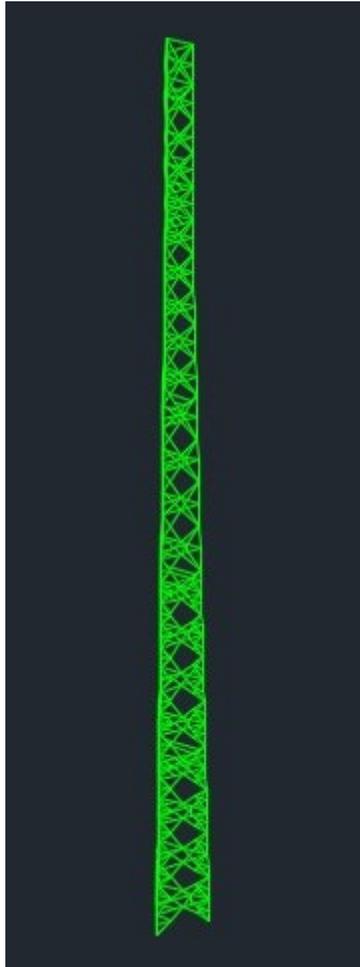
Para o cálculo da força devido ao vento, a estrutura foi dividida em painéis de 10 m de altura, para o cálculo de área efetiva optou-se por uma torre fictícia com todas as barras com a mesma geometria, cantoneiras de abas iguais de 3” projetada no plano que passa na base da torre perpendicular ao vento, nos tópicos abaixo será melhor discretizada cada etapa.

O modelo utilizando a norma necessita calcular o fator s_2 para cada painel pois o fator S_2 varia conforme a altura de interesse, o fator s_2 e a velocidade do vento foram calculados para o centro geométrico do painel e o coeficiente de arrasto foi determinado para cada painel.

No caso da modelagem usando o modelo probabilístico da tormenta TS, utilizou-se o fator estatístico tempo de retorno, ou seja a velocidade característica é dada simplesmente pelas velocidades encontradas na rotina computacional no MatLab.

A estrutura da torre é mostrada abaixo:

Figura 12 - Esquema isométrico da torre



Fonte: Do autor

5.2 Tempo de Retorno

Com os 50 valores de velocidades encontrados no programa MatLab, optou-se por calcular valores característicos de velocidade utilizando o tempo de retorno e a média.

A função distribuição de probabilidade das velocidades obedece uma distribuição de Gumbell ou distribuição de eventos extremos. O tempo de retorno adotado é de 50 anos, padrão para o dimensionamento de estruturas.

Para o cálculo de valores em uma distribuição de Gumbell, a determinação de parâmetros de escala ν e de forma α é necessária que são parâmetros que definem o quão aberto é a curva da função densidade de probabilidade.

Estes parâmetros são dados pelas seguintes equações:

$$\nu = \nu + 0,45\sigma \quad (27)$$

$$\alpha = \frac{\sigma}{1/(\sqrt{6/\pi})} \quad (28)$$

$$\nu = \frac{\sum x_i}{N} = \text{Média} \quad (29)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{(n-1)} \sum (x_i - \bar{x})^2} = \text{Desvio Padrão} \quad (30)$$

E a distribuição de gumbell é dada por:

$$V(t) = \nu - \alpha(\ln(\ln 1 - 1/T)) \quad (31)$$

$T = \text{tempo de retorno}$

Para os dados obtidos no MatLab foram calculados os seguintes valores de velocidades horizontais para cada faixa de altura tendo como base o tempo de retorno:

Tabela 3 - Valores Tempo de Retorno - Velocidade Horizontal

H (m)	10	20	30	40	50
Média	22,66	22,51	21,79	20,70	19,09
Desvio	3,08	3,39	4,07	4,78	6,14
Parametro de escala gumbel (v)	21,27	20,99	19,95	18,55	16,33
Parametro de forma (α)	2,40	2,65	3,17	3,73	4,78
V_3	23,44	23,38	22,82	21,91	20,65
V_{10}	26,67	26,94	27,09	26,94	27,10
V_{50}	30,63	31,31	32,33	33,09	35,00
V_{100}	32,31	33,16	34,55	35,70	38,34
V_{150}	33,28	34,23	35,84	37,21	40,29
V_{250}	34,51	35,59	37,47	39,12	42,74

Fonte: Do autor

5.3 Média

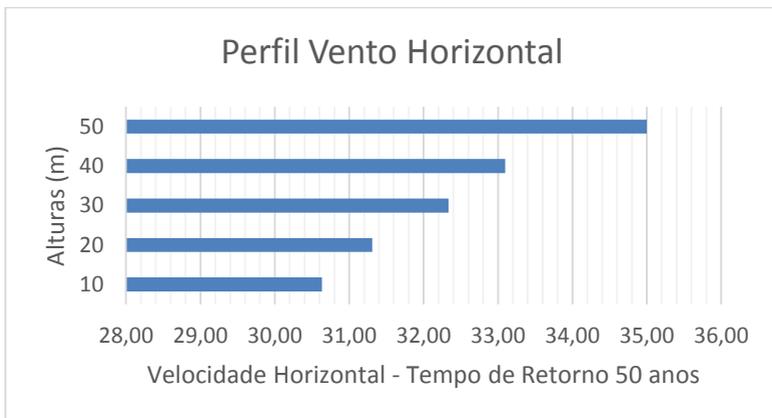
Outro tratamento proposto utilizou-se da média em cada altura de referência para obtenção do perfil de velocidades. Os valores encontrados foram:

Tabela 4 - Velocidade Horizontal - Média

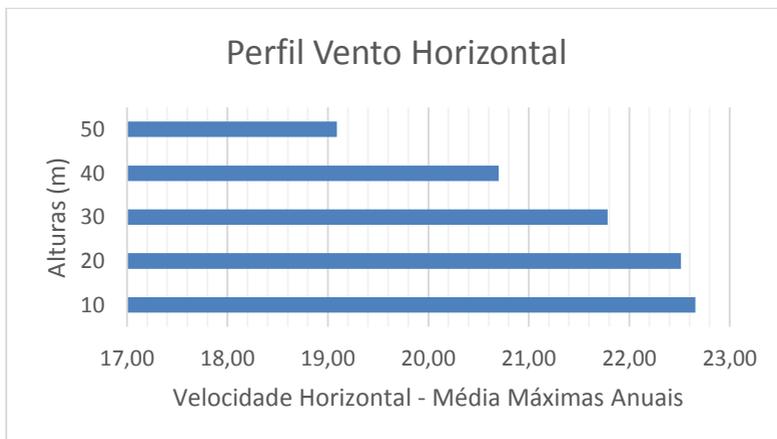
Velocidade Horizontal (m/s)	
Altura (m)	Média
10,00	22,66
20,00	22,51
30,00	21,79
40,00	20,70
50,00	19,09

Fonte: Do autor

Com esses dados foram elaborados os gráficos a seguir:

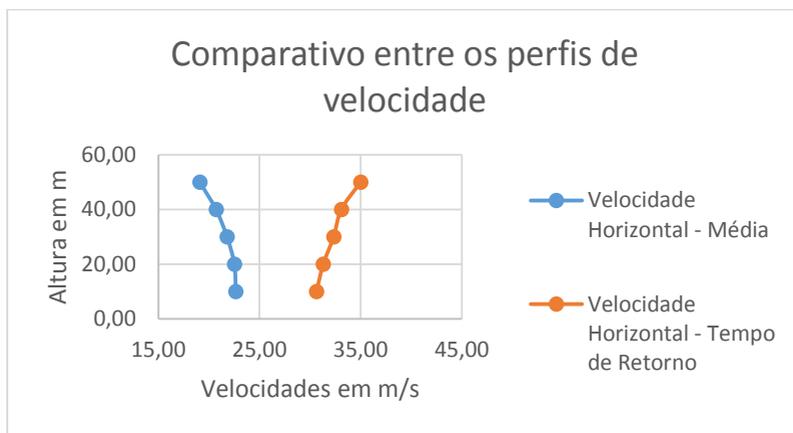
Figura 13 - Velocidade Horizontal - Tempo de Retorno 50 anos

Fonte: Do autor

Figura 14 - Velocidade Horizontal - Média

Fonte: Do autor

Figura 15 - Comparação entre os perfis de velocidade



Fonte: Do autor

Conforme os gráficos mostram, dependendo do tratamento usado o perfil de velocidades horizontais varia. Isso se deve ao desvio padrão aumentar conforme a altura aumenta, pois quando a tormenta se afasta da torre, as velocidades acima da linha de tormenta ou da linha limite da tormenta não são determinadas, ou seja, os dados acima da linha de tormenta são mais escassos o que aumenta o desvio padrão.

Conforme as equações para o cálculo de valores com tempo de retorno de 50 anos, o desvio padrão é proporcional a velocidade, o que gera valores maiores em altura onde o desvio padrão é maior.

Para uma melhor comparação optou-se por carregar uma estrutura com os ventos usando a norma de ventos e uma versão simplificada da mesma com as velocidades encontradas nos gráficos acima para o tempo de retorno.

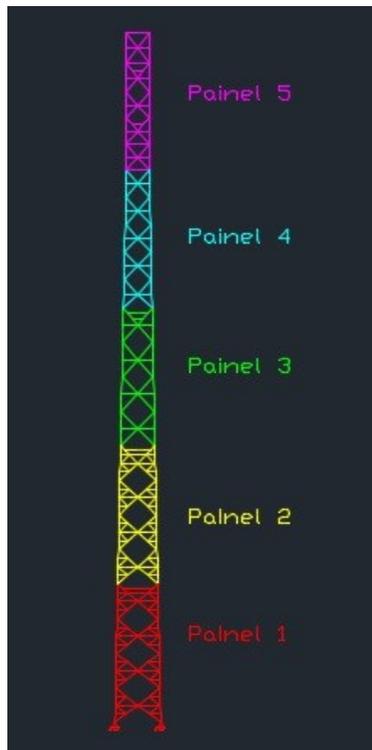
Optou-se pelo tempo de retorno, por ser mais conservador e usual em estruturas e também pela imprecisão na obtenção dos dados em alturas maiores, pode-se notar na figura 15 que os valores utilizando o critério tempo de retorno são maiores em qualquer faixa de altura.

5.4 Fatores de referencia

5.4.1 Coeficiente de Arrasto

O coeficiente de arrasto foi calculado conforme gráfico da figura 8, para o cálculo de \emptyset foi necessário determinar a área efetiva projetada e a área definida pelo perímetro de cada painel. A área efetiva projetada depende do tamanho das peças e do ângulo de inclinação da torre e a área definida pelo perímetro é função da geometria do painel, como dado anteriormente cada painel tem 10 m de altura e as bases menores e maiores dependem da posição do painel na torre conforme esquema abaixo:

Figura 16 - Esquema de divisão de painéis



Fonte: Do autor

Para efeito demonstrativo, segue abaixo o cálculo de $\emptyset 1$ (\emptyset do painel 1), a área efetiva é dada pelo programa e o ângulo de inclinação é calculado através da altura e da base. Em seguida a figura 19 mostra todos \emptyset , Coeficientes de arrasto e as áreas efetivas.

$$A_e = 6,57 \text{ m}^2$$

$$\alpha = \tan^{-1} \frac{h}{B - b/2} = \tan^{-1} \frac{49,9}{(3 - 1,5)/2} = 89,13^\circ$$

$$A_p = \frac{(B + b) * h}{2} = \frac{(3 + 2,7) * 10}{2} = 28,5 \text{ m}^2$$

$$\emptyset = \frac{A_e}{A_p} = \frac{6,57 * \sin(89,13)}{28,5} = 0,23$$

$$C_a = 2,47$$

Tabela 5 - Tabela Ca

Painel	Ae	Aprojetada	\emptyset	Ca
Painel 1	6,57	28,5	0,23	2,47
Painel 2	6,02	25,5	0,24	2,48
Painel 3	3,86	22,5	0,17	2,69
Painel 4	3,56	21,0	0,17	2,69
Painel 5	3,97	16,5	0,24	2,48

Fonte: Do autor

5.4.2 Fator topográfico S1

Neste trabalho optou-se por adotar o valor de S1 para terrenos planos ou fracamente acidentados: $S1 = 1,0$

5.4.3 Fator S2

Para classificação quanto a categoria optou-se pela categoria III, por ser uma faixa intermediária e quanto as dimensões, verificou-se que a estrutura encontra-se na classe B, portanto o valor de S2 varia conforme a altura em que o painel se encontra, sendo determinado conforme a

posição do centro geométrico de cada painel. A figura 20 mostra o valor do S2 para cada painel.

Tabela 6 - Tabela S2

Painel	S2
Painel 1	0,86
Painel 2	0,96
Painel 3	1,01
Painel 4	1,04
Painel 5	1,07

Fonte: Do autor

5.4.4 Fator estatístico S3

Para o fator estatístico S3 optou-se pelo valor de 1,0, somente para simplificação do modelo.

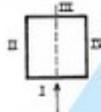
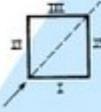
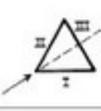
5.4.5 Velocidade Básica do vento

Foram elaborados dois modelos e para cada modelo foi utilizado uma velocidade básica de vento diferente. Para os modelos utilizando o modelo probabilístico de Tormenta TS foram usados os valores encontrados usando o tempo de retorno de 50 anos e para o modelo da norma ABNT NBR 6123:1988.

5.4.6 Força de arrasto

Em função da face a barlavento estar protegendo as demais faces, a força aplicada nas faces a sotavento deve ser minorada pelos coeficientes fornecidos pela norma, que dependem da direção do vento e da seção da torre conforme figura a seguir.

Figura 17 - Componentes da força de arrasto nas faces de torres reticuladas de seção quadrada ou triangular equilátera.

Direção do vento		Face I	Face II	Face III	Face IV
	n	$\frac{i}{1+\eta}$	0	$\frac{\eta}{1+\eta}$	0
	t	0	0	0	0
	n	0,20	0,20	0,15	0,15
	t	0,20	0,20	0,15	0,15
	n	0,57	0,11	0,11	—
	t	0	0,19	0,19	—
	n	0,50	0	0,37	—
	t	0,29	0	0,21	—
	n	0,14	0,14	0,43	—
	t	0,25	0,25	0	—
n : componente perpendicular à face t : componente paralela à face					

Fonte: ABNT NBR 6123: 1988

Para o caso deste trabalho, a torre tem seção triangular equilátera e o vento está perpendicular a face a barlavento, portanto os coeficientes que devem multiplicar a força de arrasto são 0,57 para a face I, 0,11 para a componente normal e 0,19 para a componente tangencial nas faces II e III.

Os valores de cada força estão no Anexo II e a aplicação das mesmas se dá através de uma carga distribuída nos nós de cada painel, ou seja, multiplicando o número de nós pela carga distribuída, obtém-se o valor da carga total de cada painel.

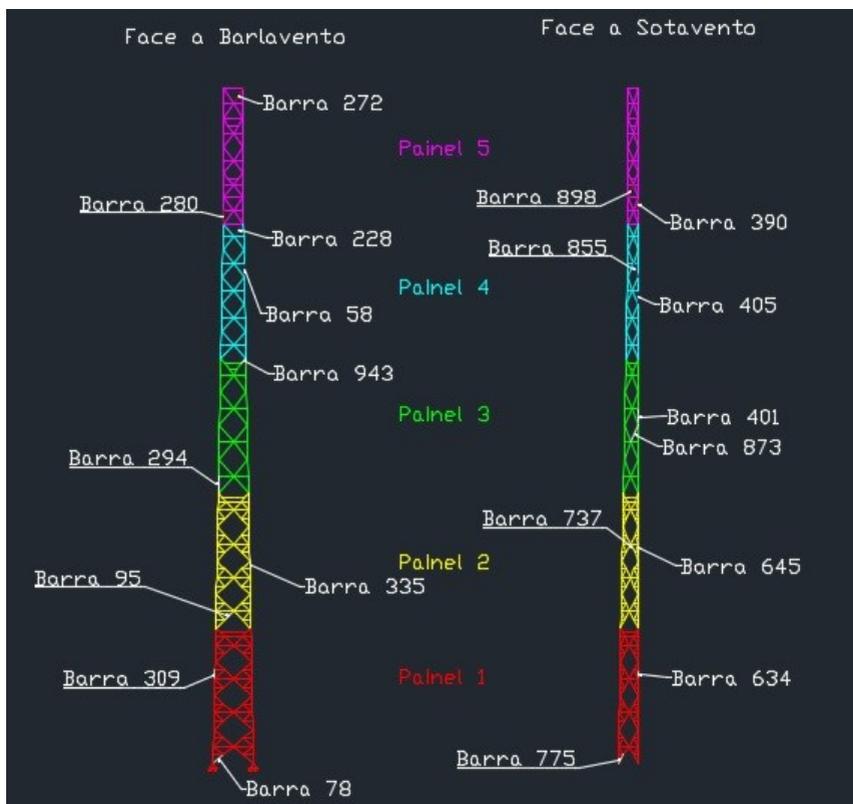
5.5 Resultados

A seguir os resultados dos dois carregamentos para barras localizadas em cada painel variando entre diagonais e montantes comprimidos e tracionados e a localização de cada barra.

Tabela 7 - Resultados - Esforços internos em montantes e diagonais em cada painel

Painel	Barra	Nó inicial	Nó final	Carregamento	Esforços Normais (kN)	Tensão Axial (MPa)
1	309	118	51	NBR	415,5	448,0
				T50	196,6	212,0
	78	1	140	NBR	37,4	40,3
				T50	17,9	19,3
	634	217	260	NBR	-831,4	-896,5
				T50	-393,3	-424,1
2	775	339	1	NBR	19,4	21,0
				T50	10,1	10,9
	95	156	95	NBR	11,1	12,0
				T50	5,3	5,7
	335	130	32	NBR	321,4	346,6
				T50	151,4	163,2
3	645	269	221	NBR	-573,5	-618,4
				T50	-269,9	-291,0
	737	362	327	NBR	-29,6	-31,9
				T50	-14,0	-15,1
	294	63	11	NBR	235,8	254,3
				T50	111,0	119,6
4	401	204	225	NBR	-357,5	-385,5
				T50	-168,4	-181,6
	873	204	330	NBR	16,1	17,4
				T50	7,5	8,1
	943	189	38	NBR	3,0	3,2
				T50	1,4	1,5
5	58	41	78	NBR	66,1	71,3
				T50	31,3	33,8
	228	25	107	NBR	4,8	5,2
				T50	2,3	2,5
	405	208	229	NBR	-166,0	-179,0
				T50	-78,6	-84,7
5	855	209	336	NBR	-12,5	-13,5
				T50	-5,9	-6,4
	390	211	232	NBR	-54,1	-58,4
				T50	-25,7	-27,7
	898	375	20	NBR	6,0	6,5
				T50	2,9	3,1
5	272	26	180	NBR	0,3	0,3
				T50	0,1	0,2
	280	81	2	NBR	27,1	29,2
				T50	12,9	13,9

Fonte: Do autor

Figura 18 - Localização de cada barra na estrutura

Fonte: Do autor

6 CONCLUSÕES

Como esperado pelos valores dos carregamentos, os valores apresentados pela norma ABNT NBR 6123: 1988 acarretaram em esforços maiores, pois a velocidade básica de vento em Porto Alegre era 46 m/s e a maior velocidade usada no modelo probabilístico é de 35 m/s, além do fator S_2 que varia de 0,86 até 1,07, e essa diferença é elevada ao quadrado para o cálculo de pressão dinâmica. A diferença observada se manteve praticamente constante variando de 48 a 53%, tal condição pode ser explicada, pois o perfil utilizando o tempo de retorno para uma tormenta TS se aproxima ao apresentado na norma. Os valores mostrados no capítulo anterior seguem a lógica do carregamento, pois a face carregada a barlavento apresenta os montantes tracionados enquanto as demais faces os mesmos estão sob esforços de compressão. Para efeito de dimensionamento a norma ABNT NBR 6123: 1988 apresentou valores maiores de velocidades, mesmo não levando em consideração os efeitos de uma Tormenta TS, mas não pode ser considerada antieconômica, pois os valores apresentados para o dimensionamento levam em conta os ventos de eventos EPS.

7 Trabalhos futuros

Este trabalho teve como objetivo determinar esforços internos em uma estrutura reticulada através do modelo da norma e o modelo probabilístico de uma tormenta TS e compara-los, porém utilizando o perfil de velocidades com o tempo de retorno de 50 anos para as velocidades máximas anuais de um evento TS.

Para trabalhos futuros recomenda-se o uso do fator média com devidas correções para o cálculo dos esforços, além do cálculo de esforços internos utilizando todas as velocidades máximas anuais encontradas e a elaboração de funções densidade de probabilidade para encontrar o melhor perfil de velocidades de uma tormenta TS.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABC – Site Wjla - <<http://www.wjla.com/articles/2012/06/bladensburg-microburst-damages-several-residences-structures-77231.html>>. Acesso em 10/10/2014.

ABNT NBR 6123:1988. NBR 6123:1988 - Forças devidas ao vento em edificações. 1988.

ABNT NBR 8850:2003. NBR 8850 - Execução de suportes metálicos treliçados para linhas de transmissão – Procedimento, 2003.

ABNT NBR 5419:1987. NBR 5419 – Proteção de estruturas contra descargas atmosféricas, Rio de Janeiro.

Caracena, F., Holle, R. L. and Dosswe, C.A., 1977. *Microbursts: A handbook for visual identification*, NOAA, National Severe Storm Laboratories, USA.

Fujita, T. T., 1985. *The downburst – Microburst and Macrobust*. University of Chicago, 1985.

Holmes, J.D., Oliver, S.E., 2000. An empirical model of a downburst, *Engin. Structures*, 22, 1167-72.

McDonald, A. T., Fox, R. W., 2007. *Introdução à Mecânica dos Fluidos*, Ed. Guanabara Koogan S. A. 4ª. Edição.

Ponte Jr., J., Riera. J. D., 2007. Wind Velocity Field during Thunderstorms. *Wind and Structures*, 10, 287-300.

Ponte Jr., J., Riera. J. D., 2010. Simulation of extreme Wind series caused by thunderstorms in temperate latitudes. *Structural Safety*, 32, 231-237.

PROBST, Renan Diego - Análise Estrutural De Torre Metálica Autoportante Para Telecomunicações E Dimensionamento De Reforço – Estudo De Caso. TCC. Florianópolis, 2013.

Riera, J. D., Viegas, F. B. and dos Santos, M. L. W., 1989. Probabilistic assessment of Wind loading for structural analysis. ICOSAR 89, Austria, Vol. 1, 55-62.

Riera, J. D., Miguel, L. F. F., 2013. Loads induced on tall structures by thunderstorms Wind in temperate latitudes.

Wikipédia – Microburst. < <http://en.wikipedia.org/wiki/Microburst>>. Acesso em: 17/10/2014

Zhu, S., Etkin, B., 1988. Model of the Wind field in a downburst, *Journal of Aircraft* 1988, 22, N° 7, 595-601.

Anexo I – Valores de Velocidades Horizontais Anuais em m/s

VH (Dados)	Ano	1	2	3	4	5	6	7
	10	23,85	32,95	21,46	27,59	22,07	17,72	21,23
	20	24,13	33,55	21,75	28,55	21,92	18,04	20,45
	30	23,97	34,06	16,69	29,06	21,96	12,93	19,25
	40	24,33	34,45	8,62	28,74	21,77	12,75	19,32
	50	24,35	34,80	5,17	23,44	16,44	9,42	19,32
VH (Dados)	Ano	8	9	10	11	12	13	14
	10	18,07	26,04	21,15	22,77	20,25	31,03	18,53
	20	18,17	26,94	21,08	23,01	19,60	30,63	18,47
	30	18,28	27,44	20,97	19,25	18,13	30,78	15,12
	40	18,21	27,83	21,45	18,90	18,26	25,51	13,80
	50	18,27	28,16	21,47	7,04	18,22	26,00	13,68
VH (Dados)	Ano	15	16	17	18	19	20	21
	10	21,89	21,15	25,90	20,30	23,46	21,46	21,31
	20	23,27	21,10	26,89	20,16	22,03	17,61	21,57
	30	24,08	21,31	27,47	20,34	22,07	17,96	20,16
	40	24,68	21,41	27,93	20,38	21,99	17,86	20,15
	50	25,15	21,49	28,29	14,78	16,63	17,36	20,19
VH (Dados)	Ano	22	23	24	25	26	27	28
	10	21,13	21,79	21,97	24,18	23,39	26,06	27,76
	20	18,35	21,77	18,36	24,43	23,36	26,16	26,64
	30	18,34	21,12	18,35	24,47	23,54	23,87	27,57
	40	18,23	21,53	18,33	19,54	23,78	19,84	28,26
	50	18,25	21,84	17,60	10,72	23,61	11,34	28,80
VH (Dados)	Ano	29	30	31	32	33	34	35
	10	24,16	21,44	19,21	20,51	27,27	19,52	22,03
	20	24,31	21,63	18,99	20,43	26,24	19,47	22,23
	30	24,44	21,87	19,02	20,47	18,09	19,67	21,59
	40	12,89	22,00	18,16	16,78	17,07	18,05	21,53
	50	6,77	21,87	17,81	15,34	17,29	16,80	21,73
VH (Dados)	Ano	36	37	38	39	40	41	42
	10	21,69	22,59	21,18	19,85	20,93	22,78	19,39
	20	21,70	23,04	21,11	20,04	20,78	22,94	19,48
	30	21,66	22,81	21,47	20,06	17,44	20,20	18,77
	40	21,53	20,86	20,26	20,12	15,21	20,21	17,13
	50	21,62	18,50	11,92	20,08	15,20	20,48	13,32
VH (Dados)	Ano	43	44	45	46	47	48	49
	10	23,75	26,01	24,95	20,82	19,44	22,84	23,76
	20	23,64	26,02	26,12	18,48	19,35	24,03	24,03
	30	20,50	26,17	26,83	18,41	17,25	24,79	24,73
	40	13,85	26,41	25,40	18,60	15,53	25,27	25,24
	50	13,86	26,18	25,88	18,41	15,42	24,59	24,03
VH (Dados)	Ano	50						
	10	22,32						
	20	23,67						
	30	24,50						
	40	25,11						
	50	25,59						

Anexo II – Valores de Forças aplicadas e número de nós por painel

Vento (T=50 anos) - kN			
Alturas (m)	Face 1(x3)	Face 2(x2)	Face 3(x1)
10	16,0	6,2	6,2
20	15,0	5,8	5,8
30	11,0	4,3	4,3
40	10,7	4,1	4,1
50	11,9	4,6	4,6
Vento (NBR 6123) - kN			
Alturas (m)	Face 1(x3)	Face 2(x2)	Face 3(x1)
10	26,6	10,3	10,3
20	30,5	11,8	11,8
30	23,5	9,1	9,1
40	23,2	8,9	8,9
50	25,0	9,7	9,7

Painel	Número de nós
1	137
2	140
3	68
4	59
5	65