

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

ESTUDO COMPARATIVO ENTRE AS RESPOSTAS DE EDIFICAÇÕES SUBMETIDAS A
VENTOS EPS E TS

por

Auri Maciel Junior

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Engenheiro Mecânico.

Porto Alegre, dezembro de 2017.



Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Escola de Engenharia

Departamento de Engenharia Mecânica

ESTUDO COMPARATIVO ENTRE AS RESPOSTAS DE EDIFICAÇÕES SUBMETIDAS A
VENTOS EPS E TS

por

Auri Maciel Junior

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
ENGENHEIRO MECÂNICO
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA DO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Profa. Thamy Cristina Hayashi
Coordenadora do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: **Mecânica dos Sólidos**

Orientador: Profa. Dra. Letícia Fleck Fadel Miguel

Comissão de Avaliação:

Prof. Daniel Milbrath de Leon

Prof. Edson Hikaro Aseka

Profa. Letícia Fleck Fadel Miguel

Porto Alegre, 18 de dezembro de 2017.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Auri Maciel e Elisabete Terezinha Maciel, por todo esforço prestado e serem meus exemplos de vida.

A os meus irmãos, Daiana, Oana, Cleber e Cauan, por me apoiarem nos momentos mais difíceis.

À minha avó, Maria Cleria, por todo apoio neste tempo de estudo.

À professora Letícia Fleck Fadel Miguel, orientadora deste trabalho, por toda paciência, dedicação e comprometimento comigo.

A todas as amigas feitas neste período de graduação pelo companheirismo, momentos de descontração e ajuda no crescimento pessoal e profissional.

MACIEL, A. Jr. **Estudo Comparativo entre as Respostas de Edificações Submetidas a Ventos EPS e TS**. 2017. 20 folhas. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2017.

RESUMO

A norma brasileira de ventos atual é a NBR 6123 que está em vigor desde 1988, por ser uma norma muito bem concebida nunca foi atualizada em relação a conceitos, apenas sofreu uma atualização textual. A NBR 6123 leva apenas em consideração os ventos do tipo EPS (*extended pressure systems*), ignorando os ventos do tipo TS (*thunderstorms*). O objetivo do trabalho é provar que a ação do vento TS sobre estruturas é significativa, assim sendo necessária uma atualização da norma. Para avaliar a resposta estática da edificação foi realizada uma rotina numérica com o *software* MATLAB.

As características de eventos TS e EPS diferem consideravelmente, então a análise é válida. Os resultados obtidos através da simulação demonstram que a norma precisa de fato ser atualizada.

PALAVRAS-CHAVE: Vento EPS, Ventos TS, NBR 6123.

MACIEL, A. Jr. **Comparative Study Between Building Responses Subjected to EPS and TS Wind**. 2017. 20 pages. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2017.

ABSTRACT

The current Brazilian standard of winds is the NBR 6123 that has been in force since 1988, since it is a very well designed standard never updated with respect to concepts, it only underwent a textual update. The standard NBR 6123 only takes into account EPS (extended pressure systems), ignoring TS (thunderstorms) winds. The objective of the work is to prove that the wind TS action is significant, so an updating of the norm is necessary. To evaluate the static response of the building will be performed a numerical routine with the software MATLAB.

The characteristics of TS and EPS events differ considerably, so the analysis is valid. The results obtained through the simulation demonstrate that the standard needs to be updated..

KEYWORDS: Wind EPS, Wind TS, NBR 6123.

ÍNDICE	
1. INTRODUÇÃO.....	1
2. OBJETIVOS.....	1
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	2
4. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	2
4.1 VENTOS EPS (<i>EXTENDED PRESSURE SYSTEMS</i>).....	2
4.2 VENTOS TS (<i>THUNDERSTORMS</i>).....	3
4.3 DETERMINAÇÃO DAS RESPOSTAS DE ESTRUTURAS SOB A AÇÃO ESTÁTICAS DE VENTOS EPS A PARTIR DA NBR 6123/1988.....	3
4.4 DETERMINAÇÃO DAS RESPOSTAS DE ESTRUTURAS SOB A AÇÃO DINÂMICA DE VENTOS EPS A PARTIR DA NBR 6123/1988.....	4
4.4.1 MODELO CONTÍNUO SIMPLIFICADO.....	5
4.4.2 MODELO DISCRETO.....	5
4.5 DETERMINAÇÃO DAS RESPOSTAS ESTÁTICAS DE VENTOS TS A PARTIR DO MÉTODO DESENVOLVIDO POR RIERA (2016).....	7
4.5.1 MODELO SIMPLIFICADO DE LINHAS DE INSTABILIDADE.....	7
5. METODOLOGIA.....	9
6. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	11
7. CONCLUSÕES.....	14
7.1 ESTUDO FUTURO.....	14
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	14
ANEXOS.....	16

1. INTRODUÇÃO

Nos dias atuais, devido ao aumento de diferentes tipos de tempestades, os problemas para dimensionamento de estruturas se intensificam. Dentre estes tipos de tempestades se destacam a EPS (*extended pressure systems*) e a TS (*thunderstorms*).

A principal causa dos ventos naturais é a diferença na pressão atmosférica decorrente da variação de temperatura do ar aquecido pela energia solar. Os sistemas meteorológicos que dão origem a ventos de alta velocidade são denominados como tormentas independentemente de seu mecanismo de formação, sendo os mais comuns os ciclones, anticiclones, tormentas elétricas e tornados.

Uma das alternativas para facilitar os projetos de edificações é o conhecimento dos regimes do vento. A importância do conhecimento dos tipos de vento é grande, então a coleta de dados sobre os mesmos não pode haver erros consideráveis. Atualmente, as medições de vento são feitas em diversas estações meteorológicas espalhadas por diversas cidades do país.

Em geral, as normas técnicas para projetos de edificações que levam em consideração a ação do vento em estrutura, tratam o vento como “bem comportado” para definição das forças aerodinâmicas, além dos procedimentos para análise dinâmica das estruturas sob ação do vento. A norma brasileira atual, NBR6123, funciona com esses mesmos princípios, pois quando ela foi formulada (1988) não existiam muitos estudos sobre os tipos de ventos existentes, de lá para cá o Brasil passou a conviver com sistemas meteorológicos que exigem uma atenção maior. Mas por se tratar de uma norma muito bem escrita e com conceitos muito bem propostos, a NBR 6123 possivelmente não precisará ser totalmente trocada, apenas necessita de uma atualização com os conhecimentos agregados desde o período de sua criação. Um ponto a ser revisado são as chamadas “isopletas”, que são linhas de velocidade de ventos no gráfico, que atualmente são dados de aproximadamente 30 anos atrás.

A ação do vento deve ser sempre abordada para projetos de estruturas, principalmente nas com grandes alturas e pequenas larguras, pois o perfil de velocidade muda com os diferentes tipos de ventos. Para os ventos EPS o vetor de velocidade média está orientado em direção paralela ao solo, para eventos TS o campo de velocidade difere consideravelmente do modelo da maioria das normas aplicadas (Riera, 2016), o que leva a uma defasagem no momento do projeto. Existem outras diferenças importantes entre os diferentes tipos de tormenta, como os registros de estações em uma tormenta TS não podem ser considerados estacionários e também a componente flutuante da velocidade não pode ser governada pela rugosidade da superfície (Riera, 2016), como nos ventos EPS.

Segundo Cigré (2012), mais de 80% das falhas de torres de transmissão e linhas de transmissão atribuídas à ação do vento em climas temperados, são causadas por eventos TS.

A atualização dos dados auxilia laboratórios que ensaiam em túneis de vento e por isso se têm grande interesse nesses dados por parte de engenheiros projetistas, lembrando que uma norma mais criteriosa leva a uma segurança maior nos projetos de edificações, assim evitando ocorrência de falhas.

2. OBJETIVOS

Será realizado um estudo comparativo das respostas numéricas de edifícios submetidos a ventos dos tipos EPS e TS. Serão testados três métodos distintos, sendo eles, método para determinação das respostas estáticas de ventos EPS em edificações (norma NBR 6123/1988), método para determinação das respostas dinâmicas de ventos EPS em edificações (NBR 6123/1988) e método para determinação das respostas estáticas de ventos TS (RIERA, 2016).

Será elaborada uma rotina numérica para implementação no programa MATLAB.

O objetivo deste é mostrar que a diferença das respostas entre os ventos é considerável e, como a norma não leva em consideração o vento TS, o qual muitas vezes induz respostas superiores às obtidas com o vento EPS, prova-se que a norma precisa de fato ser atualizada.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O estudo de comportamento do vento na engenharia estrutural através da explicação inicial do conceito de tipos de ventos, desenvolvida por Blessmann em 1995, possibilita o conhecimento básico sobre os efeitos do vento nas construções.

Do ponto de vista e análise majoritariamente aerodinâmico, Blessmann/2011 oferece explicações mais fundamentadas do escoamento do ar através de edificações. Também presente nesta obra, os conceitos de sustentação e arrasto são trabalhados e explicados de forma estruturada.

Já direcionado ao ponto de vista de engenharia, a NBR 6123/1988 apresenta dois métodos (estático e dinâmico) utilizados historicamente em projetos de edificações submetidas a ventos EPS, assim como as variáveis para tais escolhas. Os conceitos de velocidade de projeto, pressão dinâmica e força de arrasto são introduzidos, seguidos dos coeficientes a serem utilizadas em projeto.

Na obra de Riera (2016) é apresentado um método para cálculo do perfil de velocidades do vento para eventos TS, baseado nas linhas de instabilidade e frequências do vento. Tal metodologia viabiliza um projeto mais refinado no ponto de vista de reações causadas pelo vento, levando em consideração a velocidade de projeto do vento assim como outras condições já previamente definidas e impostas.

Presente na obra de Loredou-Souza (2016), a afirmação que há pouco conhecimento a respeito da turbulência em um evento TS. Também é visto que há uma diferença considerável entre os perfis de velocidade de ventos TS com os ventos comportados presentes na atmosfera. O texto ressalta que essas características são bastante importantes em casos de estruturas esbeltas e altas.

4. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Existem diversas maneiras de considerar a ação do vento em uma estrutura, podem ser estáticos ou dinâmicos, e ainda diferem pelo tipo de vento. A norma NBR 6123/1988 leva em consideração tanto a forma estática quanto a forma dinâmica (simplificada), mas para ventos EPS apenas. Para o cálculo de respostas para ventos TS é necessário um método alternativo.

4.1 VENTOS EPS (*EXTENDED PRESSURE SYSTEMS*)

Os ciclones extratropicais são os fenômenos mais comuns que originam ventos fortes em regiões temperadas e apresentam comportamento de características bem conhecidas. Eles ocorrem devido ao efeito mecânico de cadeias de montanhas sobre correntes atmosféricas de grandes dimensões ou pela interação de massas de ar ao longo das frentes frias. Recebem o nome de sistemas de pressão estendidos ou tormentas EPS (*extended pressure systems*) quando se encontram em seu estágio “maduro”, por esta razão, doravante serão chamados apenas de tormentas EPS (BLESSMANN, 1995).

As tormentas EPS produzem ventos em equilíbrio dinâmico com a rugosidade da superfície terrestre. Sendo estes ventos os mais estudados e conhecidos, por este fato é utilizado na maioria das normas de projeto. Os ventos EPS podem manter suas características por até dezenas de horas.

4.2 VENTOS TS (THUNDERSTORMS)

As tormentas elétricas são caracterizadas por uma atmosfera verticalmente instável, elas podem ser isoladas ou associadas às frentes frias. Ela é caracterizada por formação de nuvens de grande altitude, às vezes superior a 22 km, produzida pela ascensão do ar quente e úmido. O gradiente vertical de temperatura provoca um violento movimento do ar na direção de formação das nuvens cumulonimbus. A força que movimenta o ar na direção ascendente pode ser oriunda de vários motivos, dentre eles, um aquecimento da superfície terrestre, um movimento de ar subindo encostas de montanhas, uma diferença de temperatura entre a terra e o mar ou uma frente fria. Ao tocarem a superfície da Terra, as correntes de ar descendentes geram um escoamento horizontal com velocidades de vento que podem atingir 67m/s.

O ciclo de vida de uma tempestade elétrica possui três estágios:

Primeiro estágio (cumulus): nuvens cumulus se juntam pela elevação do ar quente e úmido a uma altura de aproximadamente 8 km para criar uma única nuvem. Neste estágio, a temperatura do ar circundante é menor que a do ar ascendente.

Segundo estágio (maduro): ocorre a transformação da nuvem cúmulo em uma cumulonimbus, a uma altura de 12 km ou mais. A temperatura da nuvem é maior do que a do ar circundante, formando elementos de cristais de neve e partículas de gelo que precipitam. A intensidade de precipitação aumenta devido ao resfriamento do ar que ocorre em função da queda desses elementos, surgindo as correntes descendentes de ar. Essas correntes descendentes atingem o solo bruscamente e são acompanhadas de chuva torrencial. Este estágio dura entre 5 a 30 minutos.

Terceiro estágio (dissipação): as correntes descendentes se expandem e passam a fazer parte de toda a nuvem. As correntes ascendentes param por completo.

A Figura 4.1 apresenta os 3 estágios de uma tempestade elétrica (TS).

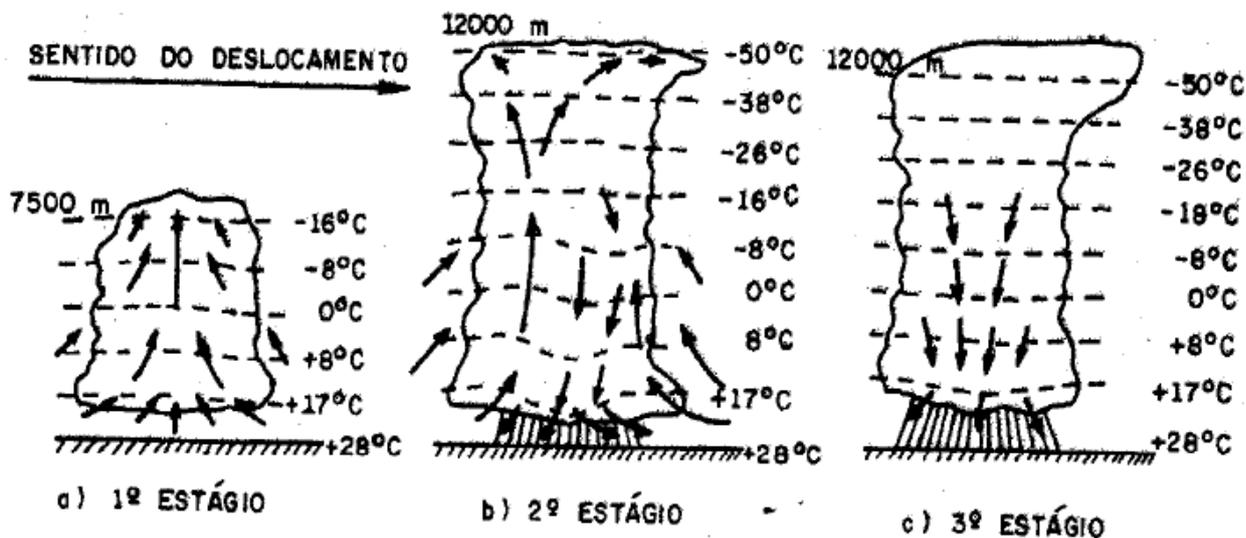


Figura 4.1 – Etapas de uma tempestade TS (BLESSMANN, 1995).

4.3 DETERMINAÇÃO DAS RESPOSTAS DE ESTRUTURAS SOB A AÇÃO ESTÁTICAS DE VENTOS EPS A PARTIR DA NBR 6123/1988

A norma NBR 6123/1988 apresenta em seu capítulo 4 um método para análise estática das forças causadas pelo vento em edificações. A norma apresenta que a velocidade básica do vento (V_0) é a velocidade de uma rajada de vento de 3 segundos, excedida em média

uma vez a cada 50 anos, a 10 metros acima do terreno, em campo aberto e plano. As isopletas da velocidade básica, V_0 , podem ser vistas no anexo I.

Para se encontrar a velocidade característica, V_k , do vento utiliza-se a velocidade básica do vento (V_0), multiplicada pelos fatores S_1 , S_2 e S_3 .

$$V_k = V_0 \cdot S_1 \cdot S_2 \cdot S_3 \quad (4.1)$$

Onde S_1 é o fator topográfico, S_2 é o fator que considera a combinação de fatores (como rugosidade do terreno, da variação da velocidade do vento com a altura acima do terreno e das dimensões da edificação) e S_3 é o fator estatístico.

O fator topográfico, S_1 , leva em consideração as variações do relevo do terreno. Para fins deste estudo, será adotado $S_1 = 1$, que é utilizado em terrenos planos ou fracamente acidentado. Uma abordagem mais aprofundada para análise do fator topográfico se encontra no anexo II.

O fator S_2 , que representa o aumento da velocidade do vento com o aumento da altura acima do terreno, pode ser representado pela equação

$$S_2 = b \cdot F_r \cdot \left(\frac{z}{10}\right)^p \quad (4.2)$$

Onde b , F_r e p são parâmetros meteorológicos que dependem da categoria e da classe do terreno, uma abordagem mais completa se encontra nos anexos III e IV. Os valores dos parâmetros meteorológicos se encontram no anexo V. A parcela z representa a altura acima do nível.

O fator estatístico, S_3 , representa, além dos conceitos estatísticos, o grau de segurança e a vida útil do edifício. No anexo VI podem ser vistos valores para este fator.

Com o conhecimento da velocidade característica do vento (V_k) é possível determinar a pressão dinâmica através da equação

$$q = 0,613 \cdot V_k^2 \quad (4.3)$$

Sendo que as unidades precisam estar no SI (sistema internacional de unidades), ou seja, q em $\frac{N}{m^2}$ e V_k em $\frac{m}{s}$.

A força total que atua em uma edificação é igual a soma vetorial das forças dos ventos que aí atuam. Uma componente da força total pode ser descrita como:

$$F_a = C_a \cdot q \cdot A_e \quad (4.4)$$

Onde C_a é o coeficiente de arrasto, fator que depende das dimensões do prédio, no anexo VII pode ser visto um gráfico, onde o C_a é encontrado a partir de parâmetros dimensionais da edificação. A_e é a área efetiva (em metros quadrados), perpendicular à direção do vento, também conhecida como "área de sombra".

4.4 DETERMINAÇÃO DAS RESPOSTAS DE ESTRUTURAS SOB A AÇÃO DINÂMICA DE VENTOS EPS A PARTIR DA NBR 6123/1988

Em seu capítulo 9 a norma apresenta dois métodos de análise para determinação dos efeitos dinâmicos do vento sobre uma edificação, são eles o modelo discreto e o método contínuo simplificado para solução do problema.

Inicialmente é calculada a velocidade de projeto \bar{V}_p , que é a velocidade média sobre 10 minutos e 10 metros de altura, em terreno de categoria II pode ser descrita como a equação

$$\bar{V}_p = 0,69 \cdot V_0 \cdot S_1 \cdot S_3$$

4.4.1 MODELO CONTÍNUO SIMPLIFICADO

Este método pode ser utilizado em prédios de seção constante e distribuição de massa aproximadamente uniforme. Além disso, o prédio deve ser apoiado apenas na sua própria base e ter uma altura inferior a 150 metros, sendo considerada na resposta dinâmica destas unicamente a contribuição do modo fundamental. No geral esse modelo apresenta respostas com erros de no máximo 10%.

Para fins de cálculo da resposta, a variação da pressão dinâmica com a altura pode ser descrita pela equação

$$q(z) = \bar{q}_0 \cdot b^2 \cdot \left[\left(\frac{z}{z_r} \right)^{2p} + \left(\frac{h}{z_r} \right)^p \cdot \left(\frac{z}{h} \right)^{\gamma} \cdot \frac{1+2\gamma}{1+\gamma+p} \cdot \xi \right] \quad (4.6)$$

Onde o primeiro termo dos colchetes representa a média e o segundo termo a amplitude máxima da resposta flutuante. O parâmetro z_r representa a altura de referência, que neste caso é adotada igual a 10 metros, z é a altura na qual se estuda a pressão e h representa a altura total da edificação. O expoente p e o parâmetro b são determinados pela categoria da rugosidade do terreno, que são apresentados no anexo VIII. O ξ é o coeficiente de amplificação dinâmica, que pode ser encontrado através de interpolação gráfica conjuntamente com a altura (h) do prédio, o gráfico para interpolação se encontra no anexo IX.

A pressão dinâmica \bar{q}_0 pode ser representada pela seguinte expressão:

$$\bar{q}_0 = 0,613 \cdot \bar{V}_p^2 \quad (4.7)$$

Todas as unidades precisam estar no SI, ou seja, \bar{q}_0 em $\left[\frac{N}{m^2} \right]$ e \bar{V}_p em $\left[\frac{m}{s} \right]$.

A força estática total, que engloba as ações estáticas e dinâmicas do vento, agindo sobre a estrutura pode ser descrita como

$$F_a = q(z) \cdot l_1 \cdot C_a \quad (4.8)$$

Sendo l_1 a largura ou diâmetro, em metros, da edificação.

4.4.2 MODELO DISCRETO

Para uma edificação com propriedades variáveis com a altura, o modelo discreto é o mais apropriado. Um exemplo de edifício com propriedades variáveis pode ser observado na Figura 4.2, retirada da NBR 6123/1988.

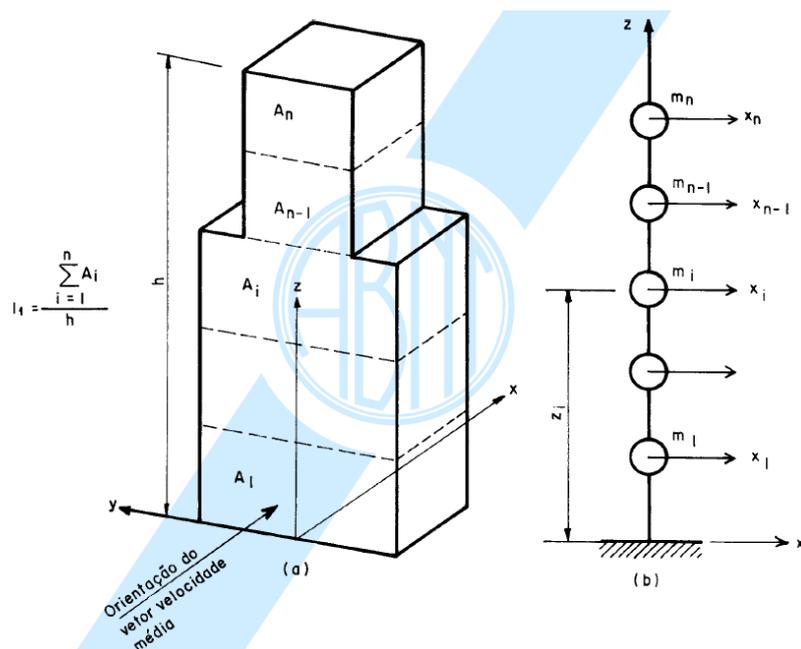


Figura 4.2 – Esquema para modelo dinâmico discreto (NBR6123/1988).

Onde, o x_i representa o deslocamento na coordenada i , A_i representa a área de influência na coordenada i , m_i é a massa discreta correspondente à coordenada i , C_{ai} é o coeficiente de arrasto correspondente à coordenada i , z_i é a altura do elemento i sobre o terreno e n é o número de graus de liberdade.

Em geral, um valor de $n = 10$ é suficiente para uma boa precisão dos resultados.

Para cada modo de vibração j , com componentes $(x_i)_j = x_i$, a força X_i devida a força na coordenada i pode ser escrita como

$$X_i = \bar{X}_i + \hat{X}_i \quad (4.9)$$

Onde a força média \bar{X}_i é dada por:

$$\bar{X}_i = q_0 \cdot b^2 \cdot C_{ai} \cdot A_i \cdot \left(\frac{z_i}{z_r}\right)^{2p} \quad (4.10)$$

A componente flutuante \hat{X}_i pode ser escrita como:

$$\hat{X}_i = F_H \cdot \psi_i \cdot x_i \quad (4.11)$$

Onde,

$$\psi_i = \frac{m_i}{m_0} \quad (4.12)$$

$$F_H = q_0 \cdot b^2 \cdot A_0 \cdot \frac{\sum_1^n \beta_i x_i}{\sum_1^n \psi_1 x_i^2} \cdot \xi \quad (4.13)$$

$$\beta_i = C_{ai} \frac{A_i}{A_0} \left(\frac{z_i}{z_r}\right)^p \quad (4.14)$$

Nas equações acima, m_0 e A_0 representam uma massa e uma área arbitrárias de referência ξ .

4.5 DETERMINAÇÃO DAS RESPOSTAS ESTÁTICAS DE VENTOS TS A PARTIR DO MÉTODO DESENVOLVIDO POR RIERA (2016)

Para Riera (2016) a consideração das correntes TS no projeto de edificações é muito importante. Riera (2016) fala sobre a importância da distribuição da probabilidade do acontecimento das velocidades máximas anuais ocasionadas por eventos TS, a qual deveria ser diferente da resultante de eventos EPS. Essas probabilidades mostram aproximações razoáveis da distribuição de ventos TS quando a nuvem cumulonimbus se desloca com baixa velocidade, mas hoje em dia já se sabe que os eventos TS provocam maior perigo se estiverem sendo “transportados” por um evento EPS, ou seja, sendo a soma dos dois eventos.

Com base na componente horizontal da velocidade a 10 metros sobre o solo, o perfil vertical do campo de velocidade dos ventos nas camadas inferiores da atmosfera é diferente para eventos EPS e TS. Como visto na NBR 6123, o perfil vertical do campo de ventos para um evento EPS se comporta como uma parábola, cujo expoente varia conforme a rugosidade do terreno. Já para vento TS, o campo de velocidades é 3D e não apresenta simetria (exceto quando não há vento de fundo ou velocidade de translação da nuvem causadora do evento).

Riera (2016) cita que para vento TS a velocidade máxima ocorre normalmente a alturas inferiores a 100 metros e que a velocidade decresce com rapidez para alturas superiores. E também os ventos TS não são representados por um único perfil vertical, mas sim por uma infinidade de perfis, que se baseiam na distância do centro da nuvem até o local estudado, porém como as nuvens estão geralmente em movimento deve ser considerada a velocidade de translação da nuvem e a velocidade da corrente descendente.

Um tópico importante que torna o estudo de um evento EPS mais acessível é que o fenômeno EPS pode ser tratado como um evento estacionário, enquanto o fenômeno TS não pode ser visto de tal forma.

4.5.1 MODELO SIMPLIFICADO DE LINHAS DE INSTABILIDADE

Com auxílio das informações citadas acima, Riera (2016) propôs um método para cálculo das velocidades de ventos TS para variadas alturas.

Como se sabe que a intensidade do vento é definida como a amplitude da sua velocidade horizontal a 10 metros acima do solo. Seja V_0 a velocidade de projeto, sendo a intensidade do vento para um tempo de exposição e probabilidade de ser excedida dado. A velocidade média de translação da corrente descendente pode ser dada como $0,35.V_0$ resultando em um plano vertical perpendicular à velocidade média do vento, conforme Figura 4.3. Essa demonstra um esquema de distribuição da velocidade na altura de referência, z_r , com dimensões de região trapezoidal (figura 4.3), sendo, d a largura do topo e b a largura da base. Fora da faixa de largura b , a velocidade total da corrente descendente é considerada nula.

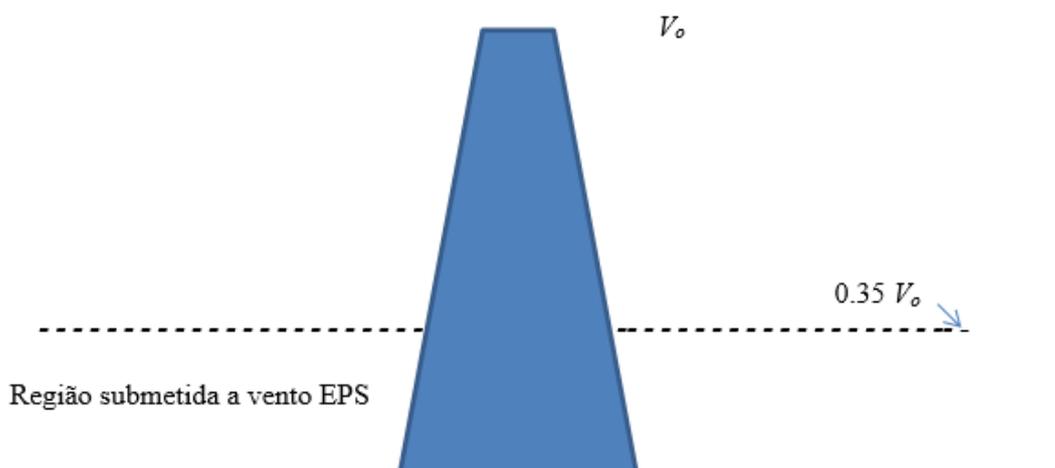


Figura 4.3 - Esquema da distribuição da velocidade na altura de referência em seção normal à orientação da mesma (RIERA, 2016).

A Figura 4.4 mostra a variação no tempo da velocidade TS (37,5 m/s) para três valores de tempo característicos.

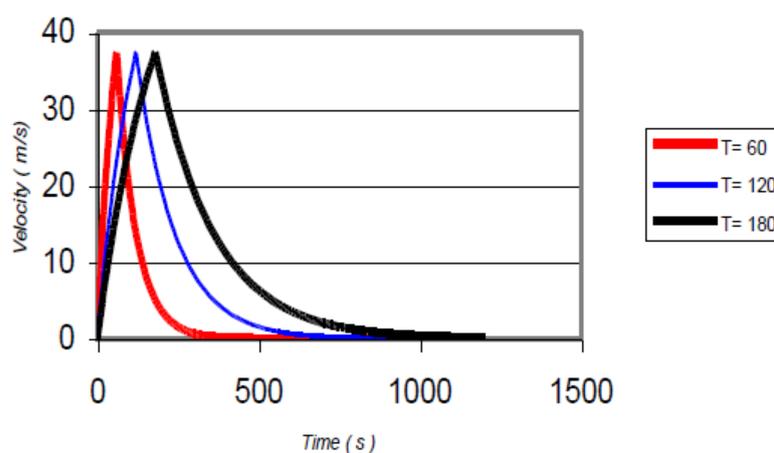


Figura 4.4- Variação no tempo da velocidade TS (RIERA, 2016).

Dentro da faixa de largura b (de acordo com a Tabela 4.1) pode se definir o perfil vertical da componente horizontal pela equação 4.15., fora dessa largura os ventos podem ser estudados como ventos bem comportados, ou seja, EPS, pois dependem da rugosidade do terreno.

$$\frac{V(\eta)}{V_{m\acute{a}x}} = \exp(-0,15.\eta) - \exp(-3,2175.\eta) \quad (4.15)$$

Onde,

$$\eta = \frac{z}{z_{m\acute{a}x}} \quad (4.16)$$

Sendo que $z_{m\acute{a}x}$ é a altura onde ocorre a velocidade máxima e com o conhecimento de V_0 pode ser encontrado na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 - Parâmetros das cinco categorias de correntes descendentes (CD) (RIERA, 2016).

Designação (CD)	V_o (m/s)	d (m)	b (m)	Altura de V_{max} z_{max} (m)	T (s)
CD 1	$V_o \leq 30$	10	40	20	60
CD 2	$30 < V_o \leq 40$	20	60	40	120
CD 3	$40 < V_o \leq 50$	40	100	80	180
CD 4	$50 < V_o \leq 60$	60	160	120	300
CD 5	$60 \leq V_o$	80	240	160	480

Sendo que a $V_{m\acute{a}x}$ será atingida apenas numa faixa de largura, a partir da qual a velocidade decai com a distância ao centro da CD até o valor de $0,35V_o$.

Essa análise possibilita a identificação de respostas de estruturas submetidas a ventos TS, com base de dados meteorológicos para países sul americanos em geral. Sua introdução nas normas atuais possibilitaria o projeto, para ventos descendentes, de construções com a largura inferior a d , neste caso seriam aplicáveis os mesmos coeficientes de arrasto, sustentação, e outras propriedades, utilizados no cálculo de ventos EPS.

5. METODOLOGIA

O problema será solucionado de forma numérica, através do *software* MATLAB. Serão realizadas três soluções distintas, são elas: determinação das forças estáticas devidas ao vento EPS, determinação dos efeitos dinâmicos do vento EPS e um método proposto por Jorge D. Riera (2016) para determinação das respostas estáticas causadas por ventos TS.

Para os testes o vento foi considerado como sendo de categoria II (anexo II) e classe A (anexo IV).

Para análise estática para ventos EPS de forças e momentos, foi utilizado o método proposto na seção 4.3, descrito anteriormente, que foi retirado da norma regulamentadora.

O estudo dinâmico para ventos EPS de forças e momentos, foi realizado conforme a seção 4.4.1, que é o modelo contínuo simplificado apresentado pela norma brasileira de ventos.

Foi retirado de um estudo realizado por Riera (2016) o método para cálculo de respostas estáticas para ventos TS, esse modelo foi apresentado na seção 4.5.1 deste trabalho, e é chamado de modelo simplificado de linhas de instabilidade. Foi considerado o vento de categoria de corrente descendente II, na análise TS.

O edifício terá alturas variadas, a fim de demonstrar as respostas para variadas situações de projeto.

A Figura 5.1 apresenta um desenho esquemático de um prédio análogo aos testados, sabendo que o mesmo possui base quadrada, mostrando suas divisões e o sentido das forças que nele atuam.

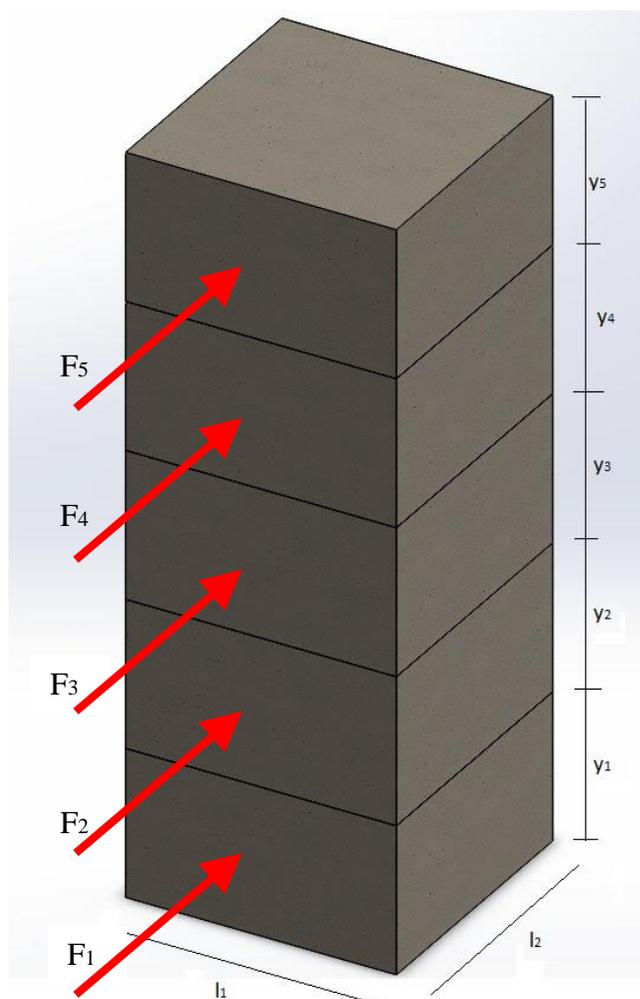


Figura 5.1 – Desenho esquemático para análise de respostas.

A altura total da edificação pode ser descrita como:

$$h = \sum_1^n y_n \quad (5.1)$$

A força resultante é o somatório das forças perpendiculares a área de cada bloco, conforme equação

$$F_{total} = \sum_1^n F_n \quad (5.1)$$

O momento fletor pode ser calculado conforme equação abaixo.

$$M = \sum_1^n [F_n \cdot (y_n - 5)] \quad (5.2)$$

Nas equações acima, n representa o número de divisões do prédio, lembrando que cada divisão equivale a 10 metros.

A Tabela 5.1 se apresenta os valores de entrada usados nos testes.

Tabela 5.1 – Dados de entrada.

DADOS DE ENTRADA			
DADO	NOTAÇÃO	UNIDADE	VALOR
Velocidade básica	V_0	m/s	40
Largura da base	l_1	m	15
Fator topográfico	S_1	adm	1
Fator estatístico	S_3	adm	1
Altura de referência	z_r	m	10
Parâmetro (S_2)	b	adm	1
Parâmetro (S_2)	F_r	adm	1
Parâmetro (S_2)	p	adm	0,085
Parâmetro ($q(z)$)	p	adm	0,15
Parâmetro ($q(z)$)	b	adm	1

6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Tabela 6.1 apresenta uma síntese dos resultados obtidos para a edificação de base quadrada de 15m com diferentes alturas (Figura 5.1), em termos de força cortante e momento fletor na base, para as condições apresentadas na Tabela 5.1. Estes resultados são graficados nas Figuras 6.1, a qual mostra a força cisalhante em função da altura do edifício, e 6.2, a qual mostra o momento fletor na base em função da altura do edifício.

Como se pode observar na Tabela 6.1 e nas Figuras 6.1 e 6.2, para a mesma velocidade de projeto a 10m de altura acima do nível do solo, a resposta determinada para o vento EPS, seguindo os procedimentos descritos pela NBR 6123/1988, é praticamente a mesma tanto pela análise estática quanto pela análise dinâmica indicada na referida norma.

Porém, ainda considerando a mesma velocidade de projeto a 10m de altura acima do nível do solo, a resposta determinada para o vento TS dentro das linhas de instabilidade, seguindo os procedimentos propostos por Riera (2016), excede a resposta para o vento EPS, no caso de edifícios de alturas abaixo de aproximadamente 180 a 240m. Para edifícios com alturas superiores a esta faixa, os ventos EPS controlam o projeto. Este fato pode ser explicado em função dos diferentes perfis de velocidades de ventos EPS e TS.

Tabela 6.1 – Respostas em termos de forças cisalhantes e momentos fletores na base.

	Altura do edifício (m)	EPS	EPS	TS
		Estático	Dinâmico	Estático
Força cisalhante (kN)	20	340	319	336
Momento fletor (kN.m)		3561	3780	4404
Força cisalhante (kN)	30	575	542	773
Momento fletor (kN.m)		9145	9864	15087
Força cisalhante (kN)	40	835	782	1284
Momento fletor (kN.m)		17794	19107	32488
Força cisalhante (kN)	50	1099	1023	1792
Momento fletor (kN.m)		29352	31274	54961
Força cisalhante (kN)	60	1471	1295	2329
Momento fletor (kN.m)		47259	47500	83204
Força cisalhante (kN)	90	2360	2260	3793
Momento fletor (kN.m)		114011	124500	187617
Força cisalhante (kN)	120	3462	3254	5112
Momento fletor (kN.m)		223330	237795	315233
Força cisalhante (kN)	150	4642	4334	6218
Momento fletor (kN.m)		374579	394271	451604
Força cisalhante (kN)	180	5929	5440	7190
Momento fletor (kN.m)		574367	590863	593067
Força cisalhante (kN)	240	8712	7947	8712
Momento fletor (kN.m)		1125981	1144514	864463
Força cisalhante (kN)	300	11847	11140	9904
Momento fletor (kN.m)		1914458	2006446	1113732

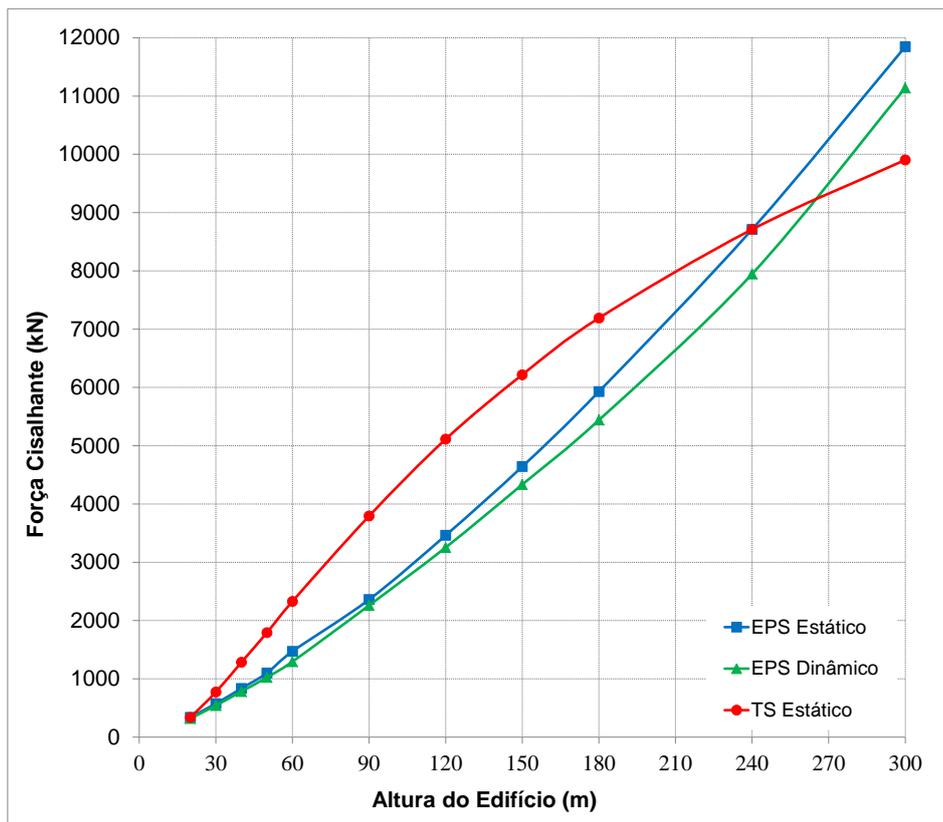


Figura 6.1 – Gráfico da força cisalhante em função da altura do edifício.

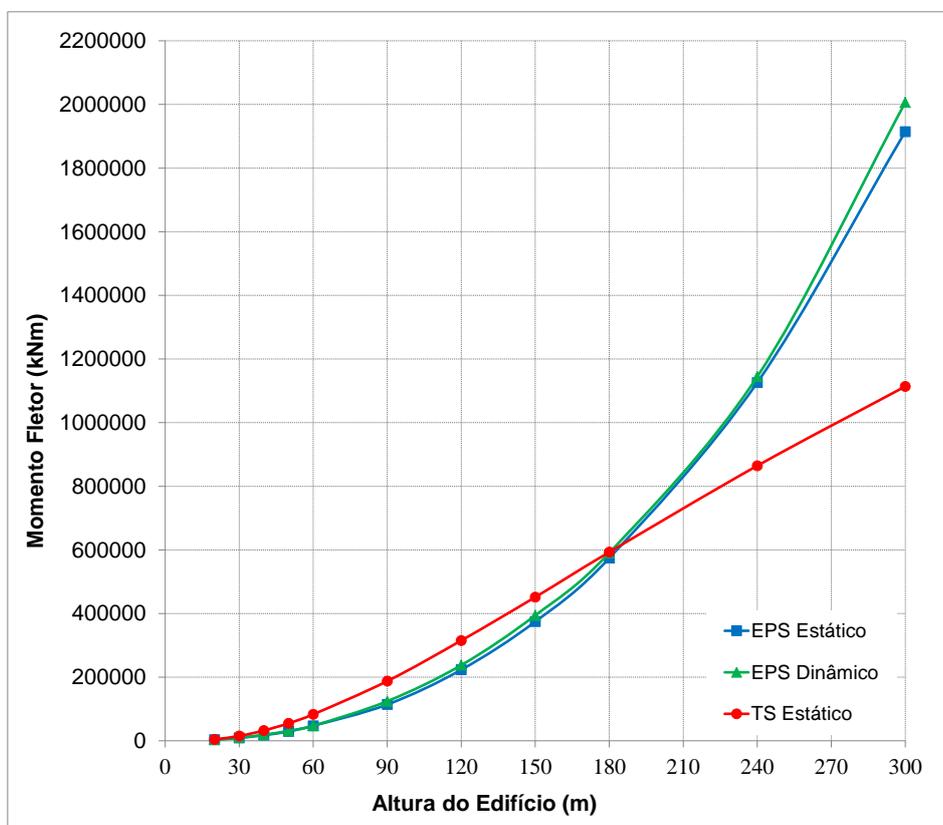


Figura 6.2 – Gráfico do momento fletor em função da altura do edifício.

Observa-se claramente nas Figuras 6.1 e 6.2 que as respostas produzidas pelo vento TS são ligeiramente superiores às produzidas por eventos EPS até alturas de aproximadamente 180 a 240m. Edificações com alturas superiores a estes limites podem ser projetadas considerando eventos EPS.

7. CONCLUSÕES

O tema é muito relevante e de extrema importância já que desastres naturais são cada vez mais recorrentes no dia-a-dia, então a não consideração de tal fato não pode ser mais aceita nos dias de hoje. Alguns estudos em torno desse assunto estão acontecendo e brevemente a NBR 6123/1988 sofrerá uma atualização.

Os métodos estático e dinâmico apresentados pela NBR 6123 não abordam diretamente ventos TS, então a norma não é apropriada para estimar a resposta para este tipo de evento. Isso leva à conclusão que a norma necessita de ajustes ou revisão, pois foi apresentada a evidência que eventos TS não podem ser mais ignorados na norma.

Notou-se também que as isopletas do vento devem ser atualizadas, visando o fato de que as “linhas de vento” que se encontram atualmente na norma são dados meteorológicos de mais de 30 anos atrás. Nesses quase 30 anos ocorreram diferentes velocidades que serviriam como dados preciosos na atualização. E dados inquestionáveis mostram que ventos TS estão ligados a essas altas velocidades de projeto, que ocorrem com uma menor frequência.

Vale a pena ressaltar que os novos estudos devem tratar os ventos EPS e TS como eventos independentes, ou seja, estudá-los separadamente.

Acredita-se que este método simplificado, proposto por Riera (2016), poderá ser incorporado na NBR 6123 como uma primeira tentativa de estimar os efeitos de ventos TS.

7.1 ESTUDO FUTURO

Um próximo estudo de grande interesse seria comparar a norma brasileira (NBR 6123) a normas estrangeiras, mostrando os pontos positivos e negativos da nossa norma.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BLESSMANN J., **“Acidentes causados pelo vento”**, 4ª ed., Editora da Universidade UFRGS, 2001, Porto Alegre, RS.

BLESSMANN J., **“Aerodinâmica das construções”**, 3ª ed., Editora da Universidade UFRGS, 2011, Porto Alegre, RS.

BLESSMANN J., **“O vento na engenharia estrutural”**, 1ª ed., Editora da Universidade UFRGS, 1995, Porto Alegre, RS.

CIGRÉ SC22 WG16 - (2002) **“Meteorology for overhead lines - Draft Report on Current Practices regarding Frequencies and Magnitude of High Intensity Winds”**, 2002.

LAWSON, T. V., **“Wind effects on buildings”**, vol. 1, London, 1980.

LOREDO-SOUZA, A. M.; LIMA, E. G.; VALLIS, M. B.; ROCHA, M. M.; WITTEWER, A. R.; OLIVEIRA, M. G. **“Full-scale down burst damage versus boundary layer wind tunnel pressures: a survey analysis”**, 8th International Colloquium on Bluff Body Aerodynamics and Applications, North eastern University, Boston, Massachusetts, 2016.

NBR-6123, "**Forças devidas ao vento em edificações**", 06/1988.

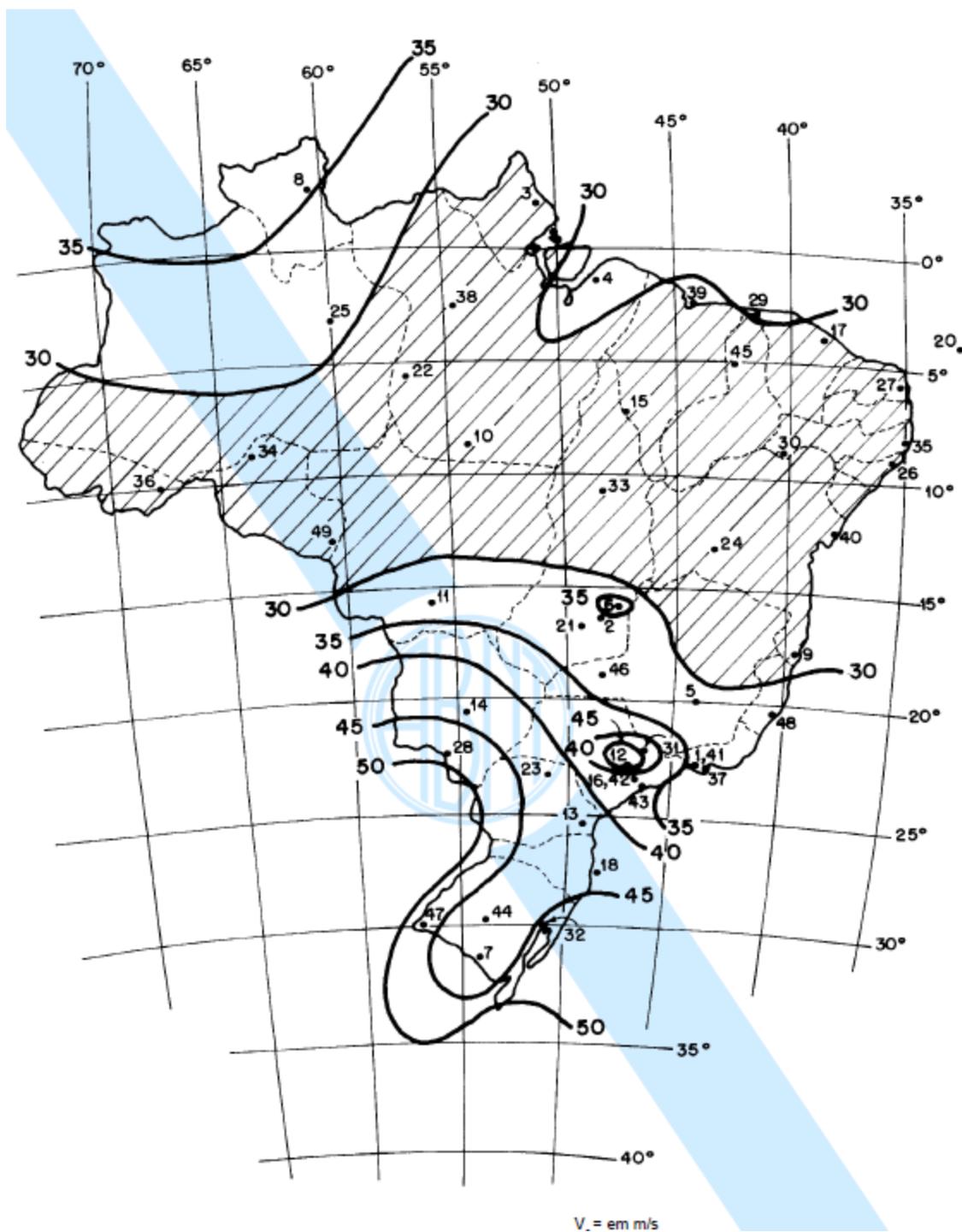
Ramalho, M. A., Corrêa, M. R. S., "**Projeto de edifícios de alvenaria estrutural**", São Paulo: Pini, 2003.

Riera, J. D., "**Sobre a definição do vento para projeto estrutural na Abnt nbr 6123 (1989) e outras normas sul americanas**", Revista Sul Americana de Engenharia Estrutural, v. 13 N° 3, PP. 1-27, 2016.

Soriano, L. S., "**Estática das estruturas**", 4ª edição, editora Ciência Moderna, Rio de Janeiro, 2014.

ANEXOS

- I. Isopletas da velocidade básica V_0 (NBR 6123 – Forças devidas ao vento em edificações).



II. Fator topográfico S_1 (NBR 6123 – Forças devidas ao vento em edificações).

a) terreno plano ou fracamente acidentado: $S_1 = 1,0$;

b) taludes e morros:

- taludes e morros alongados nos quais pode ser admitido um fluxo de ar bidimensional soprando no sentido indicado na Figura 2;

- no ponto A (morros) e nos pontos A e C (taludes):
 $S_1 = 1,0$;

- no ponto B: [S_1 é uma função $S_1(z)$]:

$\theta \leq 3^\circ$: $S_1(z) = 1,0$

$6^\circ \leq \theta \leq 17^\circ$: $S_1(z) = 1,0 +$

$$+ \left(2,5 - \frac{z}{d} \right) \text{tg}(\theta - 3^\circ) \geq 1$$

$\theta \geq 45^\circ$: $S_1(z) = 1,0 +$

$$+ \left(2,5 - \frac{z}{d} \right) 0,31 \geq 1$$

[interpolando linearmente para $3^\circ < \theta < 6^\circ < 17^\circ < \theta < 45^\circ$]

Onde:

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

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

θ = inclinação média do talude ou encosta do morro

Nota: Entre A e B e entre B e C, o fator S_1 é obtido por interpolação linear.

c) vales profundos, protegidos de ventos de qualquer direção: $S_1 = 0,9$.

III. Categoria do terreno (NBR 6123 – Forças devidas ao vento em edificações).

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 chamecas;
- fazendas sem sebes ou muros.

A cota média do topo dos obstáculos é considerada inferior ou igual a 1,0 m.

IV. Classes de edificações (NBR 6123 – Forças devidas ao vento em edificações).

Classe A: Todas as unidades de vedação, seus elementos de fixação e peças individuais de estruturas sem vedação. Toda edificação na qual a maior dimensão horizontal ou vertical não exceda 20 m.

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.

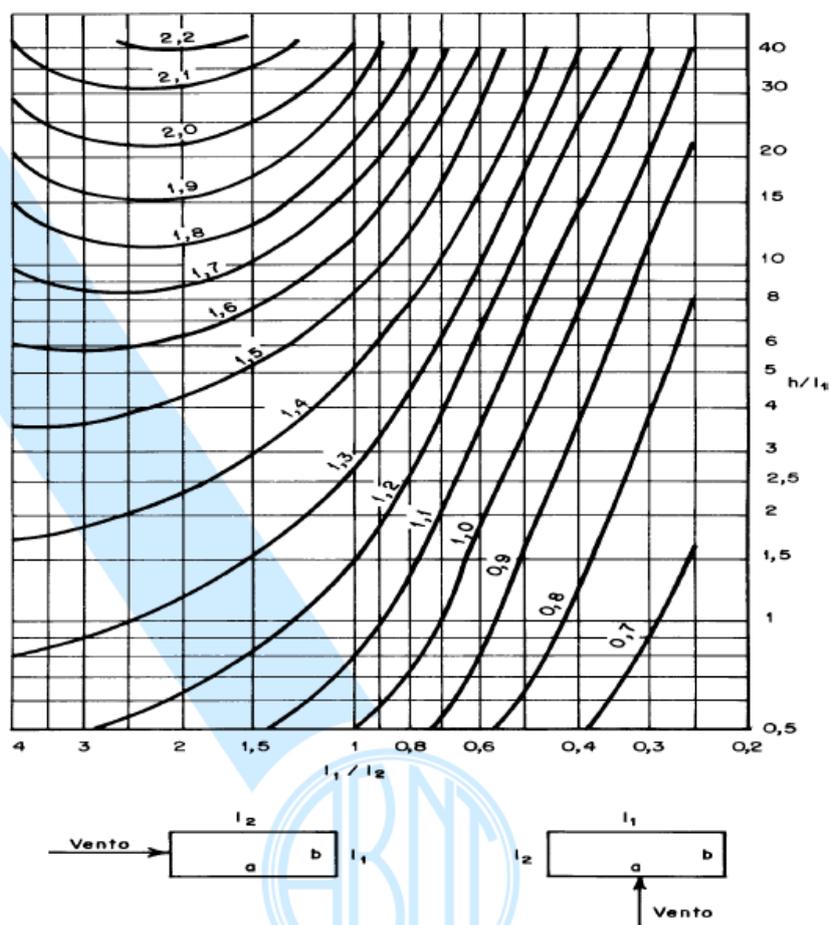
Classe C: Toda edificação ou parte de edificação para a qual a maior dimensão horizontal ou vertical da superfície frontal exceda 50 m.

V. Parâmetros meteorológicos para S_2 (NBR 6123 – Forças devidas ao vento em edificações).

Categoria	z_g (m)	Parâmetro	Classes		
			A	B	C
I	250	b	1,10	1,11	1,12
		p	0,06	0,065	0,07
II	300	b	1,00	1,00	1,00
		F_r	1,00	0,98	0,95
		p	0,085	0,09	0,10
III	350	b	0,94	0,94	0,93
		p	0,10	0,105	0,115
IV	420	b	0,86	0,85	0,84
		p	0,12	0,125	0,135
V	500	b	0,74	0,73	0,71
		p	0,15	0,16	0,175

VI. Fator S_3 (NBR 6123 – Forças devidas ao vento em edificações).

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

VII. Coeficiente de arrasto C_a (NBR 6123 – Forças devidas ao vento em edificações).

VIII. Exponente p e parâmetro b (NBR 6123 – Forças devidas ao vento em edificações).

Categoria de rugosidade	I	II	III	IV	V
p	0,095	0,15	0,185	0,23	0,31
b	1,23	1,00	0,86	0,71	0,50

IX. Coeficiente de amplificação dinâmica (NBR 6123 – Forças devidas ao vento em edificações).

