



FACULDADE DE CIÊNCIAS GERENCIAIS DE MANHUAÇU

**FORÇAS DEVIDAS AO VENTO EM EDIFICAÇÕES DE CONCRETO: AÇÕES  
FUNDAMENTAIS NO CÁLCULO ESTRUTURAL DE EDIFICAÇÕES ESTÁVEIS E  
DURADOURAS**

Bruna Coutinho Gama

Manhuaçu

2017



BRUNA COUTINHO GAMA

**FORÇAS DEVIDAS AO VENTO EM EDIFICAÇÕES DE CONCRETO: AÇÕES  
FUNDAMENTAIS NO CÁLCULO ESTRUTURAL DE EDIFICAÇÕES ESTÁVEIS E  
DURADOURAS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado no  
Curso Superior de Engenharia Civil da Faculdade  
de Ciências Gerenciais de Manhuaçu, como  
requisito parcial à obtenção do título de Bacharel  
em Engenharia Civil.

Área de Concentração: Estruturas de Concreto

Orientador: José Francisco Anuniação Pinto

Manhuaçu

2017



BRUNA COUTINHO GAMA

**FORÇAS DEVIDAS AO VENTO EM EDIFICAÇÕES DE CONCRETO: AÇÕES  
FUNDAMENTAIS NO CÁLCULO ESTRUTURAL DE ESTRUTURAS ESTÁVEIS E  
DURADOURAS**

Artigo apresentado no Curso Superior de Engenharia Civil da Faculdade de Ciências Gerenciais de Manhuaçu, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Área de Concentração: Estruturas de Concreto

Orientador: José Francisco Anuniação Pinto

Banca examinadora

Data da aprovação: \_\_/\_\_/\_\_

Mestre José Francisco Anuniação Pinto; FACIG.

Mestre Tauana De Oliveira Batista; FACIG.

Especialista Carlos Henrique Carvalho Júnior; FACIG.

Manhuaçu  
2017



## AGRADECIMENTOS

Agradeço em primeiro lugar a Deus, pois sem Ele, dando a direção por todos os caminhos, dando saúde e discernimento não seria possível a realização de algo tão importante. Agradeço aos meus pais que com paciência souberam entender minha ausência e sempre me aconselharam de maneira firme e amorosa. Agradeço também a minha família por estar ao meu lado todo esse tempo me dando força e apoio. Agradeço a instituição, a todos os meus professores e ao meu orientador José Francisco, que com dedicação e paciência sanaram as dúvidas que vinham sempre no decorrer do caminho. Por fim, agradeço aos meus amigos e colegas pela força, incentivo e por nunca me deixarem desistir.



## RESUMO

As forças devidas ao vento podem causar graves danos às edificações, conforme pode ser observado quando ocorrem fenômenos como furacões ou tornados, capazes de arrancar telhados, árvores, quebrar janelas e também por em risco a estabilidade das edificações. As correntes de ar possuem forças que mudam de velocidade e direção continuamente, atuando intensamente e durante poucos instantes, dificultando desta forma a determinação da pressão ou sucção exata aplicada à estrutura. Os efeitos desta ação do vento dependem de fatores que devem ser analisados e considerados na concepção do projeto, especificamente em cada tipo de edificação principalmente no cálculo estrutural, como sua velocidade, rugosidade, perfil do solo, influência de estruturas próximas, da forma e da rigidez da estrutura. Apesar de possuir peso próprio elevado comparado às estruturas metálicas e em madeira, as diferentes edificações em concreto sofrem uma ação significativa do vento o que não dispensa sua relevância. Diante desses fatos observa-se que as ações provocadas pelo vento em estruturas de concreto devem ser parte integrada do cálculo estrutural, quando se almeja a conservação da estabilidade e vida útil da estrutura. O presente estudo tem por objetivo mostrar a necessidade de considerar a ação do vento nessas edificações diante das consequências sofridas por essas estruturas ao serem calculadas sem as condições exigíveis das forças devidas à ação estática e dinâmica do vento em edificações. Embasados pelas prescrições da norma brasileira, ABNT NBR 6123:1988 – Forças devidas ao vento em edificações e com auxílio do software especializado em projeto estrutural Eberick V10, os resultados foram obtidos através de cálculos gerados pelo software onde foram analisados os efeitos da ação do vento à medida que uma edificação fictícia se torna mais alta.

**Palavras-chave:** Vento; Estruturas de concreto; Cálculo estrutural; Estabilidade.



## ABSTRACT

Due to the wind forces can cause serious damage to the buildings, as can be observed when occurring phenomena like hurricanes or tornadoes, able to rip roofs, trees, breaking Windows and also jeopardize the stability of the buildings. The air currents have forces that change their speed and direction continuously, working intensely and for a few moments, making the determination of the exact suction or pressure applied to the frame. The effects of this wind action depend on factors that must be analyzed and considered in the design of the project, specifically in each type of building mainly in structural calculation, like your speed, roughness, soil profile, influence of nearby structures , shape and rigidity of the structure. Despite having high weight compared to steel structures and wood, the different concrete buildings suffer a significant wind action that does not relieve your relevance. On these facts it is observed that the actions caused by wind in concrete structures must be integrated part of the structural calculation, when it aims to preserve stability and useful life of the structure. The present study aims to show the need to consider the action of the wind in these buildings on the consequences suffered by these structures to be calculated without the required conditions of the forces due to static and dynamic action of the wind on buildings. Based upon the requirements of the standard, brazilian ABNT NBR 6123:1988 – due to wind Forces on buildings and with the aid of specialized software in structural design Eberick V10, the results were obtained through calculations generated by software where we analyzed the effects of the action of the wind as a fictional building becomes higher.

**Keywords:** wind; Concrete structures; Structural calculation; Stability.



## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1- Linhas de fluxo em cobertura tipo duas águas .....	11
FIGURA 2-Colapso da Ponte Tacoma Narrows .....	12
FIGURA 3- Estados não deformados e deformados da estrutura .....	14
FIGURA 4- Sistemas de contraventamento .....	16
FIGURA 5- Isopletas da velocidade básica $V_0$ (m/s) .....	17
FIGURA 6- Fator topográfico $S_1(Z)$ .....	18
FIGURA 7- Fator $S_2$ .....	19
FIGURA 8- Valores mínimos do fator estatístico $S_3$ .....	20
FIGURA 9- Pórtico 3D (Vista lateral e fachada) .....	22
FIGURA 10- Deslocamentos finais.....	24



**LISTA DE TABELAS**

TABELA 1 - Deslocamentos horizontais e esforços aplicados .....22



## LISTA DE GRÁFICOS

GRÁFICO 1- Deslocamentos horizontais finais.....	23
GRÁFICO 2- Esforço aplicado (tf) .....	24



## SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO .....	10
2.	DESENVOLVIMENTO .....	11
	2.1. Referencial teórico .....	11
	2.1.1. A Formação do vento e seu impacto nas edificações .....	11
	2.1.2. Análise estrutural .....	13
	2.1.3. Deslocamento lateral e o contraventamento de estruturas .....	13
	2.1.4. Determinação da Velocidade e Pressão do vento .....	16
	2.1.4.1. Fator topográfico (S1) .....	17
	2.1.4.2. Rugosidade do terreno (S2) .....	18
	2.1.4.3. O fator estatístico (S3) .....	20
	2.1.4.4. Coeficiente de pressão interna e externa .....	20
	2.2. Metodologia .....	21
	2.3. Discussão de resultados .....	22
3.	CONCLUSÃO .....	25
4.	REFERÊNCIAS .....	25

## 1. INTRODUÇÃO

Segundo Gilbert *et al.* (2009), pode-se definir o vento sucintamente como a movimentação das massas de ar, oriundas das diferenças nas pressões atmosféricas. Sendo assim, devido a essa constante movimentação, a formação do vento pode se dar de diferentes maneiras, podendo surgir ventos com baixa e também com altíssimas velocidades, tais estes conhecidos por furacões e tornados, capazes de causar grandes devastações e sérios danos à sociedade. De acordo com os autores por ser um fluido em movimento constante, ao se chocar com algum obstáculo presente no ambiente, o vento causa uma determinada ação sobre este. Entretanto, devido à sua característica de se movimentar através das correntes de ar, a sua velocidade e direção mudam constantemente, o que torna difícil quantificar com exatidão a pressão que ele exerce quando age sobre determinado obstáculo. Esta ação causada pelo vento pode mudar de acordo com alguns fatores determinantes presentes no ambiente, como a variação de sua velocidade com a altura, rugosidade (vegetações e edificações), obstáculos próximos e o relevo. Reforçam ainda os autores que a velocidade do vento também pode ser influenciada pelo atrito do vento com o solo, exemplificada por eles na seguinte passagem:

Ventos passando por grandes áreas abertas e pavimentadas (por exemplo, pistas de decolagem de um aeroporto) ou superfícies aquáticas não tem a velocidade tão reduzida quanto ventos que sopram em áreas mais acidentadas e cobertas por vegetação, onde o atrito é maior (GILBERT *et al.*, 2009, P.43).

Diante desses fatos é possível identificar os efeitos que o vento pode causar à vida das pessoas e ao ambiente como um todo, e às edificações não seria diferente. Por suas variadas formas e tamanhos as edificações são uma das principais superfícies receptoras dos ventos e as que mais sofrem com a ação instantânea dele. Diante das dificuldades de obtenção exata dos valores de velocidade e pressão do vento, muitos calculistas acabam se descuidando desse tipo de ação, principalmente em estruturas de concreto por seu elevado peso próprio comparado aos das estruturas de madeira e metálica, o que infelizmente pode trazer consequências significativas, como a ruína parcial ou até mesmo total da edificação. Os profissionais de Engenharia Civil têm o suporte das normas brasileiras, sendo uma das principais que rege sobre o tema a NBR 6123:1988 (Forças devidas ao vento em edificações) que aponta todas as diretrizes a se considerar para o cálculo estrutural de edificações, desenvolvida pela ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas) e também o suporte de programas e softwares especializados, como o Eberick V10, por exemplo, (GONÇALVES *et al.*, 2004).

Desta forma, com o auxílio destes suportes e através de uma acurada revisão bibliográfica, o presente trabalho objetiva mostrar a necessidade de considerar a ação do vento na concepção do cálculo estrutural, diante das consequências que uma estrutura em concreto pode sofrer ao não serem cumpridas as condições exigíveis das forças devidas à ação estática e dinâmica do vento em edificações. Para isso serão analisados resultados de um cálculo estrutural obtidos pelo software Eberick V10, mostrando os efeitos do vento a uma edificação à medida que ela se torna mais alta.

## 2. DESENVOLVIMENTO

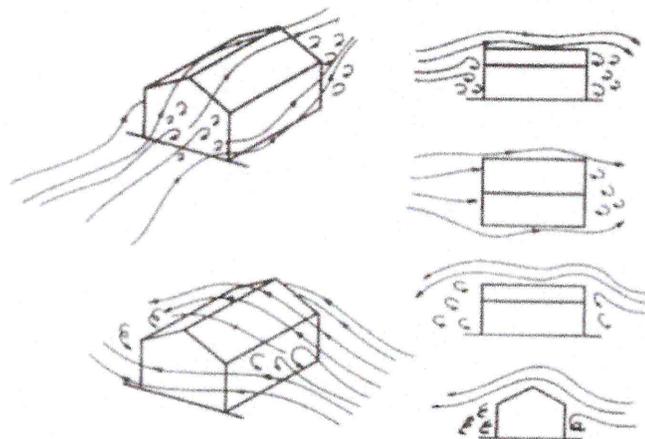
### 2.1. Referencial teórico

#### 2.1.1. A Formação do vento e seu impacto nas edificações

As variações na temperatura do ar surgem com a incidência de calor através da energia solar e causam pressões atmosféricas desiguais, gerando zonas de maior e menor pressão. As forças originadas desse processo tendem a movimentar-se causando um movimento do ar, definido como vento. Na engenharia estrutural conhecer a velocidade média com que o vento se movimenta e as flutuações em seu entorno é essencial quando o objetivo é conhecer seus efeitos em uma edificação. As flutuações acontecem quase que unicamente devido às turbulências (agitação mecânica do ar), formando turbilhões ou redemoinhos em grandes números. Essas flutuações são denominadas de rajadas, e suas frequências e intensidades ocorrem de forma desordenada. As rajadas de menor duração, que ocorrem em fração de segundos, são de elevada velocidade e sua área de atuação é pequena. Desse modo, uma sequência de rajadas irá agir muito mais na resposta da estrutura do que o efeito de apenas uma rajada, tornando importantes nessa sequência os efeitos de ressonância da estrutura e no outro caso, de rajadas com forças de intensidades menores, são consideradas somente para dimensionamento de elementos de fachada (BLESSMANN, 1995).

O desprendimento do telhado de uma edificação é um fato comum após a passagem de uma tempestade com fortes rajadas de vento. Esse efeito ocorre porque à medida que o vento ganha velocidade ocorre uma diminuição da pressão no telhado, o que eleva o vento e com ele as telhas, quando estas foram fixadas à estrutura de forma incorreta ou o efeito não considerado em projeto. A figura 1 demonstra este efeito sob um telhado tipo duas águas (GILBERT *et al.*, 2009):

FIGURA 1- Linhas de fluxo em cobertura tipo duas águas

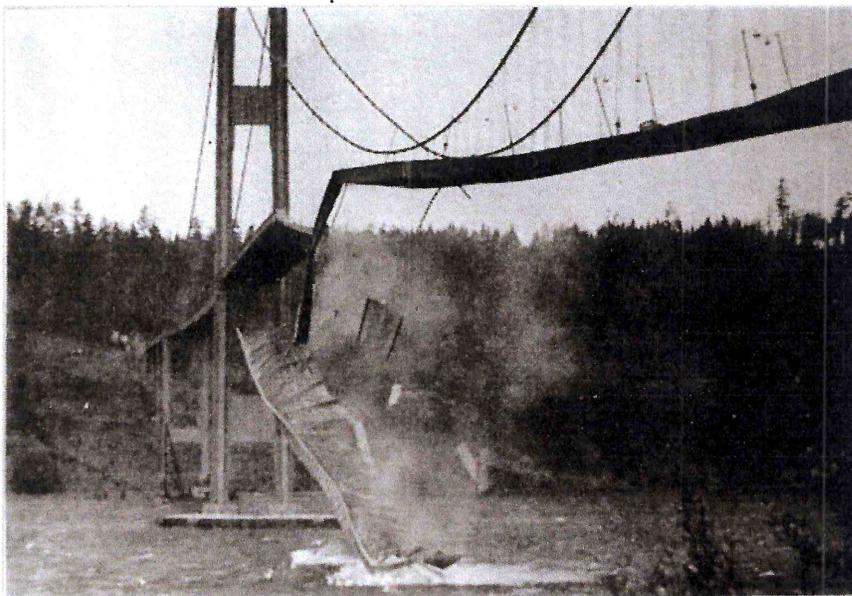


Fonte: Ação do vento nas edificações- Teoria e exemplos, 2004.

Outro tipo de efeito citado por Gilbert *et al.* (2009) é o desprendimento de vórtices, que se dá quando as correntes de ar se movimentam de modo circular ou giratório. Isso se explica pela diferença de pressão entre duas regiões próximas onde o fluido, nesse caso o vento, tende a equilibrar o sistema mudando a direção inicial de escoamento e à medida que isso ocorre a superfície que recebe esta carga apresenta alterações de pressão, causando oscilações na estrutura. Se o

desprendimento dos vórtices acontecerem em um intervalo de tempo próximo ao natural da estrutura, o aumento dessas oscilações tende a sacudi-la podendo levar a sua ruína. Segundo os autores essa foi considerada uma das falhas do colapso da famosa ponte de Tacoma Narrows em Washington nos Estados Unidos em 1940. Como mostra a figura 2, o rompimento de seu tabuleiro se deu depois de grandes oscilações causadas pelo vento levando ao seu rompimento sob o canal Puget.

FIGURA 2-Colapso da Ponte Tacoma Narrows



Fonte: AP/Wide Word Photos, 1940.

Um fator também importante sobre os efeitos do vento é a resposta dos edifícios às essas forças aerodinâmicas, que podem variar com a presença de edificações vizinhas. Em edifícios altos, por exemplo, esta ação pode aumentar ou diminuir significativamente. A proximidade de dois edifícios pode alterar a forma como certa ação do vento atua sobre ambos, agindo como bloqueio de acordo com suas posições. Isso se explica porque quando estão próximos os edifícios podem agir como protetores um do outro. Bênia (2013) apud Houghton e Carrutes (1976) exemplifica esse fato através de uma situação quando um edifício a barlavento (região onde sopra o vento em relação à edificação) age como protetor de um edifício a sotavento (Região oposta à que sopra o vento). Segundo a autora, nesse caso pode haver a redução das forças e do momento torçor sob o edifício a sotavento devido à presença de um edifício a barlavento, que absorve parte de toda pressão dinâmica do vento que agiria sob o edifício a sotavento. Entretanto nem sempre a proximidade das edificações trazem efeitos positivos para ambas, em certos casos pode causar o que a ABNT NBR 6123:1988 define como efeito Venturi. Ele é definido quando a área disponível para a passagem do ar é reduzida pela proximidade dos edifícios causando um afunilamento do vento, acelerando seu escoamento. Outro efeito é aquele causado por deflexão do vento na direção vertical que ocorre quando o vento encontra a fachada de um edifício alto desviando-o para baixo, aumentando sua velocidade nas regiões mais próximas do solo, o que gera um aumento das cargas de vento em edificações mais baixas próximas à edificação.

### 2.1.2. Análise estrutural

Gilbert *et al.* (2009) explicam que ao receber um projeto, o Engenheiro deve se munir de diversas ferramentas para executá-lo da melhor maneira, sendo estas utilizadas para a escolha de um sistema estrutural eficiente, econômico e seguro. Assim deve-se sempre dimensionar uma estrutura considerando todas as ações nela atuante para que diante de qualquer carregamento o risco de falhas e deformações não seja um problema. Para que o Engenheiro ou profissional calculista tenha sucesso em seu projeto, é necessária uma análise estrutural para adequar as solicitações das ações e cargas de projeto ao melhor modelo estrutural possível. Uma análise estrutural bem realizada é aquela em que os esforços solicitantes calculados, momentos fletores, flechas e deslocamentos são considerados de forma realista e precisa. Todo modelo estrutural é composto basicamente por elementos estruturais como vigas, pilares, lajes, tirantes, treliças e outros, que sofrem esforços diferentes quando são solicitados em uma estrutura e os autores ainda mostram que antes dos avanços tecnológicos na Construção Civil, modelos estruturais eram analisados isoladamente, subdividindo-se os sistemas tridimensionais em outros bidimensionais menores, com o intuito de facilitar e ganhar tempo na análise estrutural. Então com o passar dos anos e com o desenvolvimento dos computadores, de softwares especializados e construções cada vez mais altas e esbeltas, os engenheiros puderam analisar grandes sistemas tridimensionais, de maneira rápida e refinada.

As ações responsáveis por esses esforços nas estruturas especificamente neste trabalho as de concreto são diversas e estão citadas na Norma Brasileira ABNT NBR 6118:2014 (Projeto de estruturas de concreto – Procedimento), que estabelece as condições básicas exigíveis para um projeto de estruturas em concreto simples, armado e protendido, exceto para os demais tipos especiais de concreto. A norma trata basicamente de três ações, as ações permanentes (ligadas ao peso próprio da estrutura e todos seus elementos), ações variáveis (referentes a cargas acidentais como o vento e temperatura) e as ações excepcionais (abalos sísmicos, explosões, frenagem de veículos, entre outros) que podem agir simultaneamente ou não em uma estrutura em um dado período de tempo. Então para garantir a segurança e estabilidade da estrutura é necessário que no cálculo estrutural sejam considerados os piores casos, ou seja, aquele momento em que a estrutura será mais solicitada e para isso a norma apresenta os critérios das combinações de ações que verificam essa segurança considerando os estados limites últimos e estados limites de serviço. Logo, no dimensionamento de estruturas de concreto as combinações de ações tem importância significativa no conhecimento dos efeitos provocados por elas, compostas por forças que podem agir verticalmente e horizontalmente às estruturas. O seguinte trecho confirma:

As estruturas devem ser concebidas de modo a poderem resistir às ações horizontais e verticais a que possam estar submetidas ao longo de sua existência e que, além disto, independente do número de pavimentos e das dimensões em planta, seus sistemas de contraventamento devem ser estudados e adequadamente calculados (SUSSEKIND, 1984 apud BARROS, 2003, P.9).

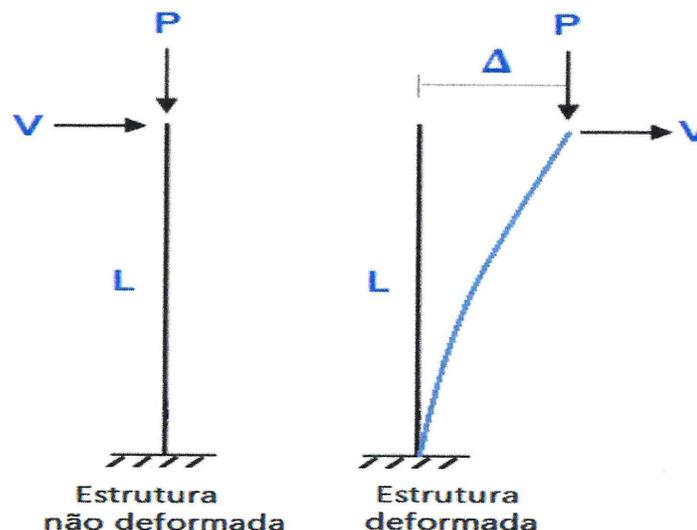
### 2.1.3. Deslocamento lateral e o contraventamento de estruturas

Para Blessmann (2001), o efeito do vento em edificações baixas e pesadas como as de concreto nas quais o carregamento vertical predomina, até então não era motivo de preocupação. Entretanto com o passar dos anos e com o surgimento

de edificações cada vez mais altas e esbeltas, onde o carregamento horizontal promovido pelo vento tem importância significativa, fatores como rigidez, ressonância e estabilidade tornaram-se cruciais na concepção de projetos estruturais.

As ações horizontais provocadas pela ação do vento e também dos sismos são responsáveis por determinadas deformações laterais na constituição de uma edificação. A forma, as dimensões, as condições do solo e o tipo de ligação usada entre os elementos estruturais são os principais fatores ligados diretamente à estabilidade de uma estrutura. Avaliar esta estabilidade é uma das etapas primordiais do projeto e que garante a segurança e durabilidade da estrutura, e para isso é possível obter resultados através de uma análise que considera um efeito conhecido como efeito P-Delta ( $P\Delta$ ). O valor de P-Delta considera o efeito não linear geométrico da estrutura e apresenta um valor de deslocamento através da relação entre a carga  $P$  e o momento fletor gerado por ela, modificando-se de acordo com o modelo estrutural a qual se aplica. Segundo a ABNT NBR 6118:2003, a análise de uma estrutura (figura 3) se dá de duas formas: Considerando o efeito de Primeira Ordem, em que o equilíbrio da estrutura é analisado no estado indeformável ou considerando o efeito de Segunda Ordem, quando essa análise é feita admitindo o efeito não linear dos materiais, ou seja, na sua configuração deformada, onde se obtém o valor de  $P\Delta$ . A norma ainda afirma que o efeito de segunda ordem deve ser desprezado somente quando o acréscimo nas ações e solicitações relevantes torna-se superior a 10% (KUSTER, 2014).

FIGURA 3- Estados não deformados e deformados da estrutura



Fonte: O efeito P-Delta nas estruturas de edifícios- AutoQi.

O efeito P-Delta pode ser utilizado para analisar qualquer tipo de estrutura e para efeito de cálculo e análise, é comum considerá-la como sendo de nós móveis ou de nós fixos. Estruturas consideradas de nós fixos são aquelas em que os efeitos globais de segunda ordem são inferiores a 10% dos respectivos esforços de primeira ordem, ou seja, mesmo sendo pequenos, os deslocamentos laterais não são nocivos à estrutura, podendo assim ser desconsiderados. Já as estruturas de nós móveis, são aquelas em que os efeitos de segunda ordem são superiores aos 10%, tornando-se necessário considerá-los na análise para garantir a estabilidade e segurança da estrutura (MONCAYO, 2011).

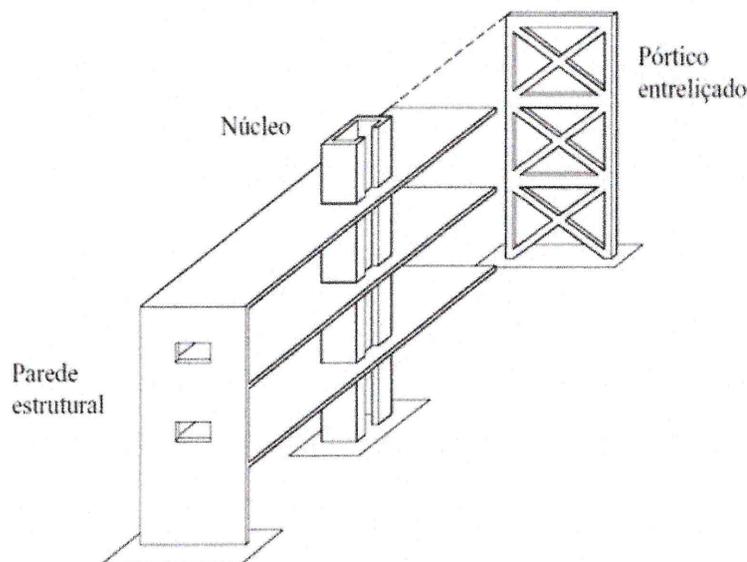
Um coeficiente importante quando se trata desta classificação da estrutura quanto à deslocabilidade dos nós é o coeficiente  $\gamma_z$ . Ele avalia a importância dos esforços de segunda ordem na estrutura para efeitos de cálculo, a partir de uma análise linear dos efeitos de primeira ordem. Após uma análise elástica considerando a configuração não linear física dos elementos a partir dos valores de rigidez, o valor de  $\gamma_z$  pode ser obtido pela relação dos momentos gerados pelas forças verticais e horizontais com os respectivos deslocamentos e a distância de aplicação à base da estrutura (momentos de tombamento) (PERGHER, 2015).

A ABNT NBR 6118/2014 estabelece no item 15.4.2 os seguintes critérios para a classificação das estruturas pelo coeficiente  $\gamma_z$ :

- a)  $\gamma_z \leq 1,1$  definem estruturas de nós fixos onde os efeitos globais de segunda ordem são desprezíveis podendo ser desconsiderados (inferiores a 10% dos respectivos esforços de primeira ordem), considerando somente os efeitos locais de segunda ordem.
- b)  $\gamma_z > 1,1$  definem as estruturas de nós móveis onde os efeitos globais de segunda ordem são significativos (superiores a 10% dos respectivos esforços de primeira ordem), tornando-se obrigatório considerar os esforços globais e locais de segunda ordem.
- c)  $\gamma_z \leq 1,3$  definem os esforços globais de segunda ordem a partir de uma avaliação dos efeitos de primeira e segunda ordem majorando-se os esforços horizontais da combinação de carregamento considerando  $0,95\gamma_z$ .

CARNEIRO E MARTINS (2008) mostram que os carregamentos verticais caracterizados pelo peso próprio e as sobrecargas da estrutura, são aplicados aos planos das lajes que transmitem as cargas para as vigas ou no caso das vigas mistas quando ambas trabalham em conjunto, e em determinados casos existe a transmissão dos esforços da laje diretamente para o pilar. Em sequência, as vigas descarregam sobre os pilares, que transferem o carregamento para o sistema de fundação. Já os carregamentos horizontais são representados principalmente pelas cargas de vento e dos sismos. Assim, o dimensionamento de uma edificação segura deve ser capaz de conter todos os efeitos causados por essas ações e para isso existem métodos eficazes, sendo os mais comuns os sistemas de contraventamento ou subestruturas, cuja função é absorver determinadas cargas, limitar prováveis deslocamentos, e em edifícios altos promover o aumento da rigidez e da segurança. Entretanto, Carneiro e Martins (2008, p.3) ressaltam ainda que a utilização do sistema de contraventamento tem importância significativa também em edifícios de baixo porte: "Contudo, mesmo em edifícios de baixo porte estes sistemas podem ser ainda mais importantes, como em naves, em que uma grande área é apenas coberta por uma estrutura bastante esbelta, dado o reduzido valor das cargas permanentes". De acordo com os autores os principais modelos de sistemas de contraventamento são: Os sistemas em pórticos planos ou tridimensionais, pórticos treliçados, painéis tipo parede e pórtico-parede, núcleos rígidos em Betão armado ou em aço e pilares isolados ou sistemas tubulares como mostra a figura 4. Esses sistemas são adotados e dimensionados a partir de uma análise estrutural apurada após a obtenção dos valores correspondentes as cargas verticais, e especificadamente no presente trabalho, as cargas horizontais promovidas pela ação do vento.

FIGURA 4- Sistemas de contraventamento



Fonte: Contraventamento de edifícios, 2008.

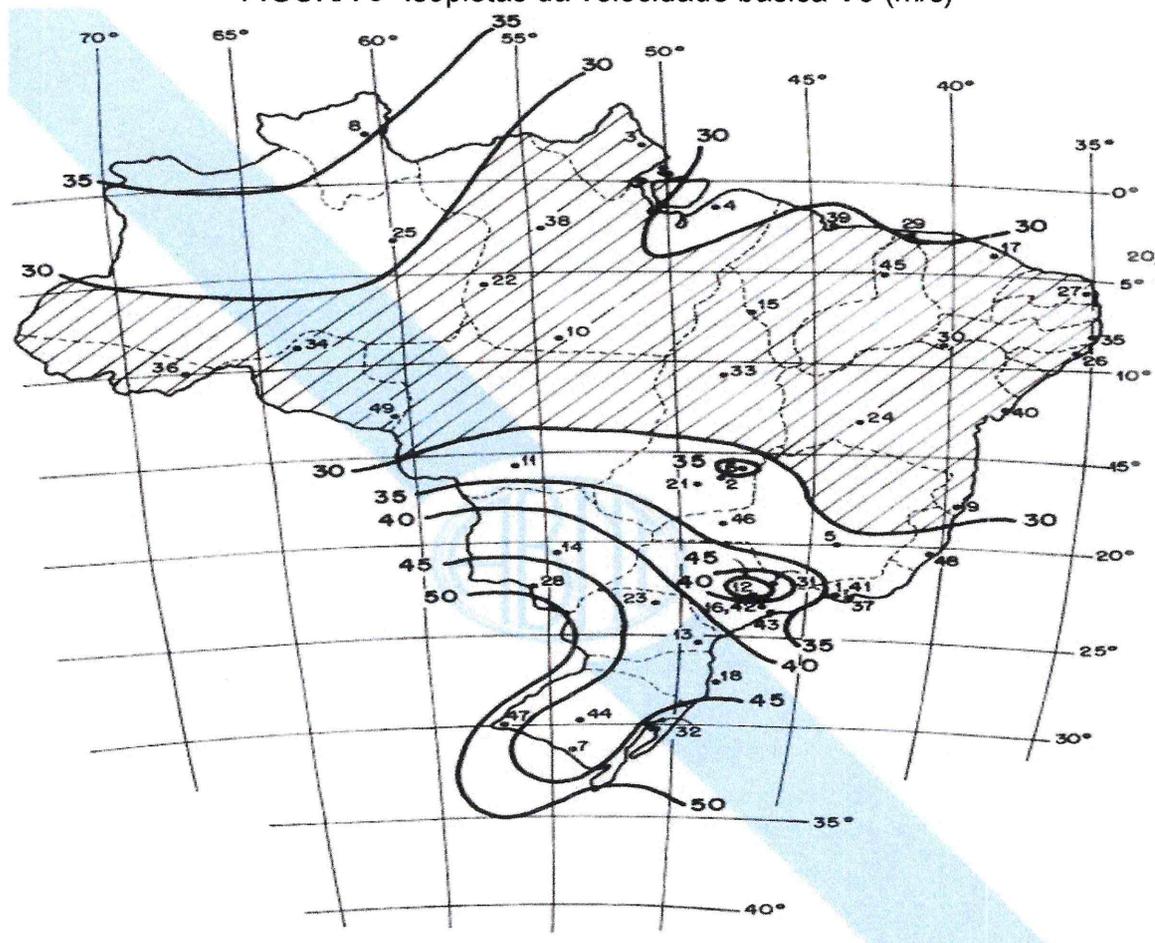
#### 2.1.4. Determinação da Velocidade e Pressão do vento

A ABNT NBR 6123:1988 (Forças devidas ao vento em edificações) baseada nos estudos de Joaquim Blessmann, estabelece parâmetros e diretrizes para o cálculo e análise do vento sobre as edificações, exceto para aquelas com forma, dimensões ou localização incomum, as quais não se aplicam os experimentos realizados para reger a norma. Através de experimentos realizados em um túnel de vento simulando as principais características do vento natural, a norma fornece dados necessários para obtenção de resultados utilizados para efeitos de cálculo. No item 4.2 da norma são definidas as forças estáticas devidas ao vento, caracterizadas por três principais fatores: A velocidade básica do vento ( $V_0$ ), A velocidade característica do vento ( $V_k$ ) e a Pressão dinâmica do vento ( $q$ ). Segundo a norma, ( $V_0$ ) é obtida de acordo com a velocidade do vento do local onde a edificação é construída, ( $V_k$ ) através da equação (1), produto de três fatores ( $S_1$ ), ( $S_2$ ) e ( $S_3$ ) junto a ( $V_0$ ) obtendo assim a velocidade característica da parte da edificação em consideração e por fim, é possível obter o valor da pressão ( $q$ ) que o vento exerce sobre a edificação, por meio da equação (2).

$$V_k = V_0 \cdot S_1 \cdot S_2 \cdot S_3 \text{ (m/s)} \quad (1)$$

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

A velocidade básica do vento ( $V_0$ ) é definida pela ABNT NBR 6123:1988 no item 5.1 como a velocidade de uma rajada com duração de três segundos, dez metros acima do terreno, em campo aberto e plano, tomada uma vez em cinquenta anos em média e admitindo-se que o vento básico pode soprar em qualquer direção horizontal. Dividindo o mapa do Brasil em regiões específicas (figura 5), as isopletas da velocidade básica do vento obtida em metros por segundo, mostram valores básicos de velocidade de acordo com a incidência em cada região onde a edificação será localizada (ABNT, 1988).

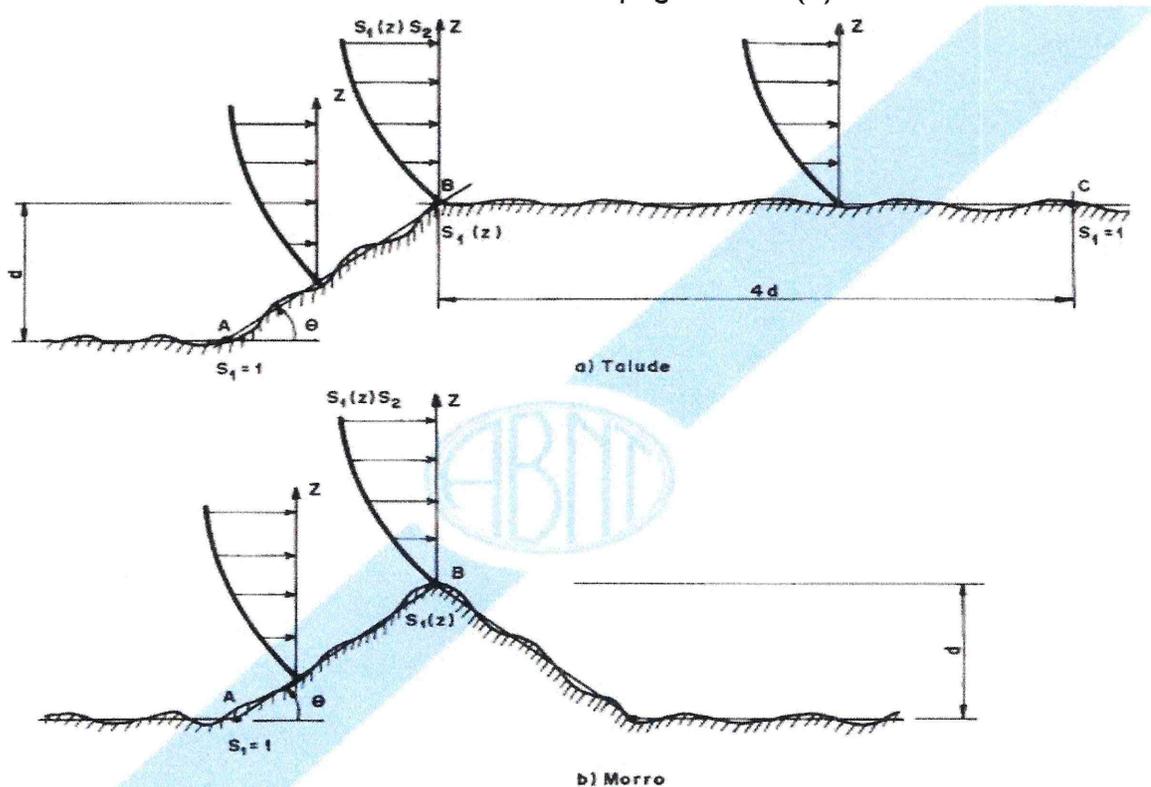
FIGURA 5- Isopletas da velocidade básica  $V_0$  (m/s)


Fonte: Digitalização da norma ABNT NBR 6123:1988.

Ainda para a determinação da velocidade característica do vento ( $V_k$ ) a norma estabelece três fatores: Fator topográfico ( $S_1$ ), fator de rugosidade do terreno, dimensões da edificação e altura sobre o terreno ( $S_2$ ) e o último, fator estatístico ( $S_3$ ).

#### 2.1.4.1. Fator topográfico ( $S_1$ )

O fator topográfico ( $S_1$ ) considera as variações de relevo do terreno, que pode ser definido de acordo com o que mostra a figura 6: Em terreno plano ou fracamente acidentado, considera-se o valor de ( $S_1$ ) igual a 1,0; Em taludes e morros o valor de ( $S_1$ ) irá depender da localização da edificação, além de uma cota  $z$  (Altura medida a partir da superfície do terreno no ponto considerado), de uma distância  $d$  (diferença de nível entre a base e o topo do talude ou morro) e um ângulo  $\theta$  (inclinação média do talude ou encosta do morro) descrito no item 5.2 da norma (ABNT, 1988).

FIGURA 6- Fator topográfico  $S_1(Z)$ 


Fonte: Digitalização da ABNT NBR 6123:1988.

#### 2.1.4.2. Rugosidade do terreno ( $S_2$ )

O fator  $S_2$  é obtido através dos valores que combinam a variação da velocidade do vento com a altura acima do terreno, a rugosidade e as dimensões da edificação ou a parte dela em consideração, como mostra a figura 7. A ABNT NBR 6123:1988 adverte que em edificações de pequeno porte é ideal que o intervalo de tempo em que essa velocidade do vento aumenta com o ganho de altura, seja calculado considerando um intervalo de tempo maior, isso porque esse intervalo está relacionado diretamente com as dimensões da edificação, sendo maiores os efeitos das rajadas em edificações de pequeno porte do que em grandes edificações. A rugosidade do terreno é classificada na norma no item 5.3.1 em cinco categorias, a qual deve se adequar ao projeto analisado (ABNT, 1988, P.8). São estas:

- a) Categoria 1: Superfícies lisas de grandes dimensões, com extensão maior que cinco quilômetros, medida na direção e sentido em que se dá a incidência do vento como por exemplo mar calmo, lagos e rios e pântanos sem vegetação.
- b) Categoria 2: Terrenos com poucos obstáculos isolados, abertos em níveis ou aproximadamente em nível, como em sebes ou muros ou campos de aviação por exemplo.
- c) Categoria 3: Terrenos planos ou ondulados com obstáculos, por exemplo granjas e casas de campo.

d) Categoria 4: Terrenos abertos por obstáculos numerosos e pouco espaçados. Cidades pequenas e seus arredores, áreas industriais plenas, entre outras, com média do topo dos obstáculos igual a dez metros.

e) Terrenos cobertos por obstáculos numerosos, grandes, altos e pouco espaçados. São exemplos as florestas com árvores altas e os centros de grandes cidades, com cota média do topo dos obstáculos de vinte e cinco metros ou mais.

A norma explica que a velocidade do vento muda constantemente e em qualquer período de tempo é possível obter seu valor médio. Assim quanto maior esse período de tempo, maior a distância englobada pela rajada. Para isso, a ABNT NBR 6123:1988 classifica partes de edificações ou seus elementos em intervalos de tempo de três, cinco e dez segundos.

a) Classe A: Toda edificação cuja maior direção horizontal ou vertical não ultrapasse a vinte metros.

b) Classe B: Toda edificação ou parte dela cuja maior dimensão horizontal ou vertical da superfície frontal esteja entre vinte e cinquenta metros.

c) Classe c: Toda edificação ou parte dela cuja maior dimensão horizontal ou vertical da superfície frontal não ultrapasse a cinquenta metros.

FIGURA 7- Fator 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: Digitalização da ABNT NBR 6123:1988.

Para os casos onde as dimensões ultrapassem o valor de oitenta metros o intervalo será obtido de acordo com as condições estabelecidas no anexo A da norma.

### 2.1.4.3. O fator estatístico (S3)

O fator estatístico S3 representa valores estatísticos (figura 8) considerando o grau de segurança necessário e a vida útil da edificação, baseado na probabilidade da velocidade básica do vento  $V_0$  ser igual ou maior que 63% em um período médio de cinquenta anos (ABNT, 1988).

FIGURA 8- Valores mínimos do fator estatístico S3

Grupo	Descrição	S <sub>3</sub>
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: Digitalização da ABNT NBR 6123:1988.

### 2.1.4.4. Coeficiente de pressão interna e externa

Uma edificação impermeável ao ar é aquela em que a passagem dos ventos é impedida pelo seu modelo físico, ou seja, sem aberturas para a entrada das correntes de ar. Isso significa que sua pressão interna não se modifica com o tempo, mesmo com as variações de velocidade do vento soprando externamente à sua estrutura. Portanto, a permeabilidade de uma parte da edificação está ligada diretamente a relação entre as áreas de abertura e a área total desta parte e é um índice que deve ser utilizado com cautela e não deve exceder a 30% de nenhuma parede ou água de cobertura da edificação, exceto em caso de abertura dominante (abertura cuja área é igual ou maior à área total das demais aberturas). Desse modo, a norma fornece valores para a determinação do coeficiente de pressão interna ( $C_{pi}$ ) de acordo com cada modelo de edificação (ABNT, 1988, p.12):

Para edificações com paredes internas permeáveis onde a pressão interna pode ser considerada uniforme:

Duas faces opostas igualmente permeáveis; as outras impermeáveis.

- Vento perpendicular a uma face permeável:  $C_{pi} = +0,2$
- Vento perpendicular a uma face impermeável:  $C_{pi} = -0,3$
- Quatro faces igualmente permeáveis:  $C_{pi} = -0,3$
- Abertura dominante em uma face; as outras faces de igual permeabilidade: (Valores específicos especificados no item 6.2.4 da norma).

Para edificações efetivamente estanques e com janelas fixas que não apresentem possibilidade de serem rompidas por acidente:

- e)  $C_{pi} = -0,2$  ou 0;

Em casos especiais os coeficientes de pressão interna devem ser analisados nos demais itens da ABNT NBR 6123:1988. Já a pressão externa à edificação é obtida através do coeficiente de pressão externa ( $C_{pe}$ ) especificados de acordo com a forma (Planta retangular ou com seção circular) e o modelo de telhado (uma, duas ou múltiplas águas) das edificações. Para o presente estudo as seguintes tabelas tem maior relevância.

## 2.2. Metodologia

O presente artigo tem como objeto de estudo os efeitos causados as edificações de concreto pela ação do vento e as consequências de não considera-lo na concepção do cálculo estrutural. Para isso, foram utilizados importantes estudos realizados sobre o tema proposto, como os realizados por Blessmann (1995) e Gonçalves *et al.* (2004), disponibilizados na Biblioteca Digital Brasileira de Teses e Dissertações (BDTD) e no Portal de Periódicos da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES). Algumas das normas brasileiras da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) também foram utilizadas como suporte, principalmente a ABNT NBR 6118:2014 (Projeto de estruturas de concreto – Procedimento) e a ABNT NBR 6123:1988 (Forças devidas ao vento em edificações).

Para maior fiabilidade do estudo, foi realizada uma análise computacional de um edifício fictício com estrutura em concreto armado na qual com os resultados obtidos do cálculo estrutural, foi possível verificar as modificações sofridas pela estrutura do edifício pela ação do vento à medida que este se torna mais alto. O edifício fictício (figura 9) possui dez pavimentos, sendo estes o piso térreo com 1,5 metros de pé direito, oito pavimentos de mesma arquitetura e uma cobertura, ambos com pé direito de 2,98 metros, totalizando assim 28.32 metros de altura total da edificação. Para lançar o projeto no software foram levados alguns critérios importantes: A estrutura foi analisada através de pórticos formados por vigas e pilares orientados com continuidade, com ligação rígida entre eles e para fins de análise do presente artigo a estrutura calculada não possui um sistema de contraventamento em sua constituição, considerando o comportamento não linear geométrico da estrutura. Desta forma, ao alterar o número de pavimentos, a estrutura foi recalculada e foram obtidos novos resultados de deslocamentos horizontais e os esforços nos pilares mais solicitados pela ação do vento, respectivos da nova configuração da estrutura.

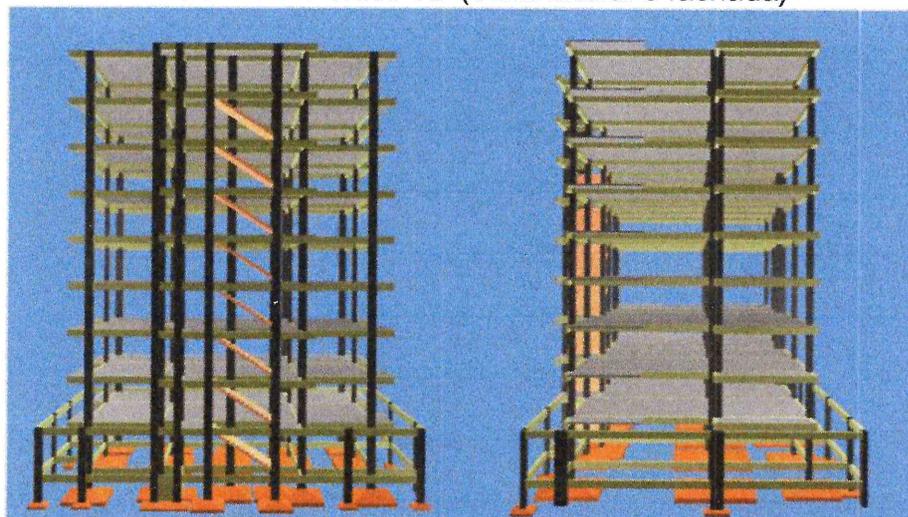
Para o cálculo da velocidade e pressão do vento, as características adotadas para a análise pelo software Eberick V10 foram as seguintes:

- a) Velocidade básica do vento:  $V_0 = 30\text{m/s}$  (Região adotada próxima à cidade de Lúna ES);
- b) Rugosidade do terreno: Categoria 4 (Terrenos abertos por obstáculos numerosos e pouco espaçados. Cidades pequenas e seus arredores, áreas industriais plenas, entre outras, com média do topo dos obstáculos igual a dez metros);
- c) Fator estatístico: Grupo 2, edificações para hotéis e residências. Edificações para comércio e indústria com alto fator de ocupação.

Com o auxílio das normas citadas e do software Eberick V10, sendo este especializado em projeto estrutural que engloba etapas de lançamentos, análise de

estruturas, dimensionamento e o detalhamento final dos elementos calculados, foi possível realizar uma análise a partir de gráficos e valores gerados em relatórios pelo próprio software, contemplando o que foi apresentado na revisão bibliográfica, com resultados descritos na discussão de resultados.

FIGURA 9- Pórtico 3D (Vista lateral e fachada)



Fonte: O autor, 2017.

### 2.3. Discussão de resultados

Os resultados começaram a ser analisados considerando a edificação com três pavimentos, sendo estes o térreo, um pavimento e cobertura. A partir daí os principais fatores para efeito de análise estrutural ligados a ação do vento, Análise da não linearidade Geométrica pelo processo de P-Delta, Deslocamentos horizontais e Estabilidade Global, foram analisados em uma escala crescente dos pavimentos como demonstra a tabela 1.

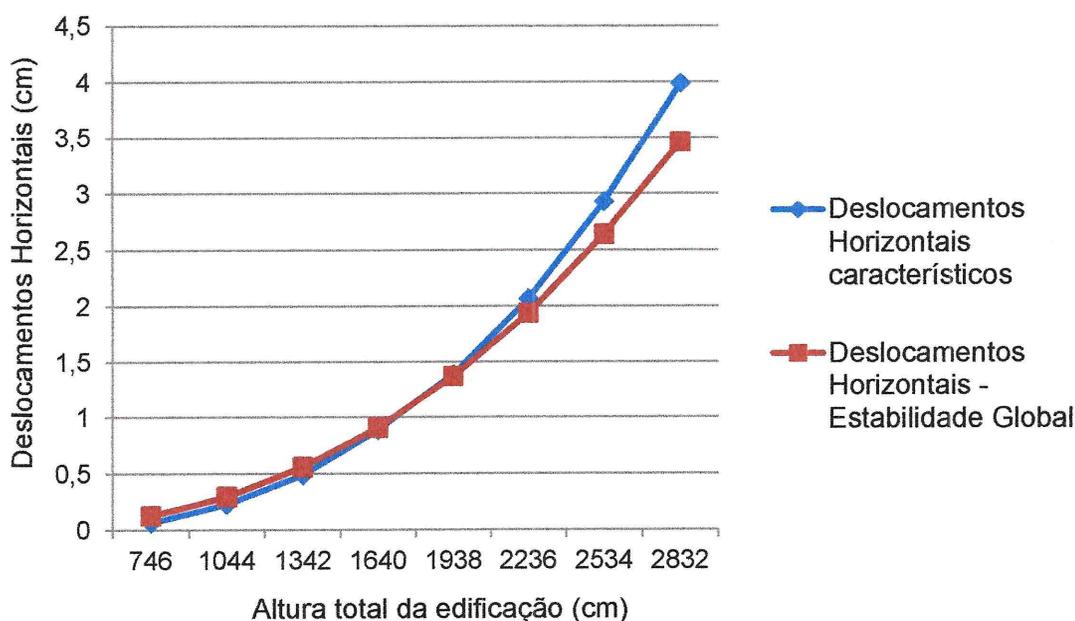
TABELA 1 - Deslocamentos horizontais e esforços aplicados

Nº DE PAVIMENTOS	DESLOCAMENTOS HORIZONTAIS CARACTERÍSTICOS DEVIDO À AÇÃO DO VENTO (CM)		DESLOCAMENTOS HORIZONTAIS MÁXIMOS - ESTABILIDADE GLOBAL (CM)		ESFORÇO APLICADO (TF)	
	Em x+	Em y+	Eixo x	Eixo y	Em X+	Em Y+
3	0.07	0.02	0.13	0.02	1.64	0.85
4	0.23	0.06	0.30	0.05	1.94	0.99
5	0.49	0.12	0.56	0.07	2.20	1.12
6	0.87	0.21	0.91	0.11	2.39	1.21
7	1.39	0.34	1.37	0.14	2.56	1.29
8	2.07	0.50	1.94	0.19	2.37	1.31
9	2.93	0.71	2.64	0.78	2.97	1.42
10	3.99	0.96	3.46	1.02	3.21	1.48

Fonte: O autor, 2017.

A partir dos resultados representados na tabela é possível perceber que à medida que a edificação se tornou mais alta os valores correspondentes aos deslocamentos horizontais provocados pela ação do vento na estrutura obtidos pelos cálculos de estabilidade global e deslocamentos horizontais cresceram continuamente, chegando em alguns casos, a sofrer um aumento de aproximadamente 40%. O gráfico 1 demonstra os resultados referentes aos deslocamentos na direção X, onde tiveram maior significância, comparando com o aumento de altura da edificação.

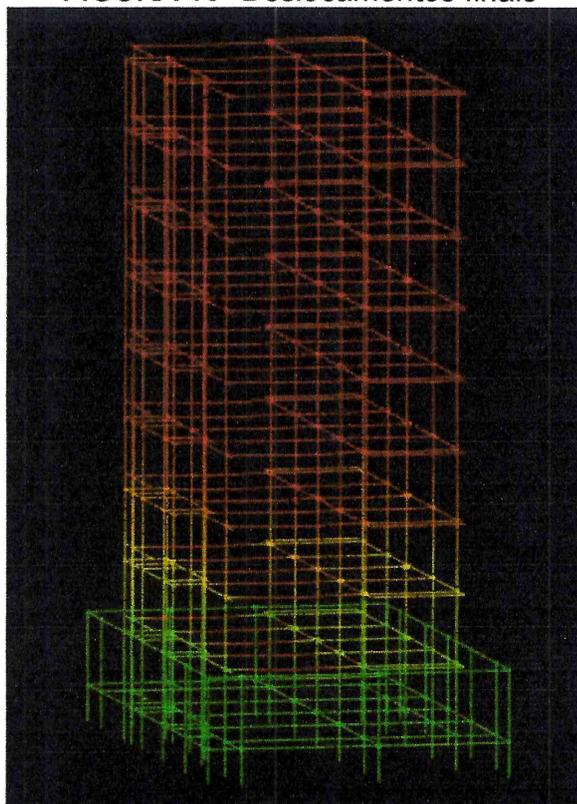
GRÁFICO 1- Deslocamentos horizontais finais



Fonte: O autor, 2017.

A figura 10 mostra através do pórtico os valores referentes aos deslocamentos finais sofridos pela estrutura com o ganho de altura, obtidos pelas combinações dos carregamentos aplicados no cálculo estrutural, onde a cor vermelha representa os deslocamentos mais significativos e à medida que as cores se aproximam dos tons de amarelo e verde, os deslocamentos mínimos.

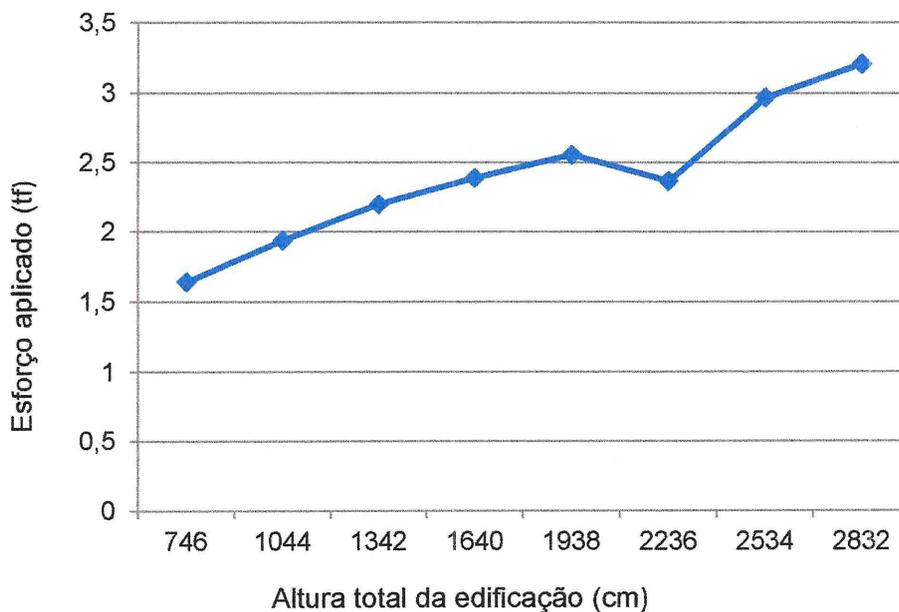
FIGURA 10- Deslocamentos finais



Fonte: O autor, 2017.

Em relação aos esforços aplicados a estrutura devido à ação do vento, também foi possível perceber que se tornou crescente à medida que a estrutura ganha mais um pavimento, o que mostra o gráfico 2.

GRÁFICO 2- Esforço aplicado (tf)



Fonte: O autor, 2017.

Assim, tanto os valores de deslocamento quanto os dos esforços gerados pela ação do vento aumentaram à medida que a estrutura se tornou mais alta. Considerando a estrutura sem um sistema de contraventamento adequado pode-se perceber que esses fatores, em determinado ponto, como no oitavo pavimento, por exemplo, se torna relevante, o que poderia significar maior cautela em relação aos esforços excessivos nos elementos estruturais, a posição dos mesmos e até mesmo ao modelo estrutural escolhido para um maior desempenho da estrutura quando esta está sujeita a ação do vento.

### 3. CONCLUSÃO

Objetivou-se com o presente artigo mostrar os efeitos da ação do vento sobre as edificações de concreto e a importância de considerá-la no cálculo estrutural, diante das consequências que esta ação pode trazer à estabilidade e segurança de uma estrutura. Foi possível observar que a ação do vento pode causar impactos sobre uma estrutura, quando não é considerada com a devida importância. O modelo estrutural, a presença de edificações vizinhas, a forma e a altura da edificação, são fatores que influenciam diretamente no bom desempenho de uma estrutura sujeita aos carregamentos horizontais. Identificou-se que existem soluções eficientes para manter a estabilidade da estrutura sujeita a ação do vento, como uma análise estrutural de qualidade, a escolha da forma ideal e a adoção de sistemas como os de contraventamentos de estrutura, que as estabilizam e as tornam rígidas contra esse tipo de ação.

Assim, partir da análise feita na discussão de resultados pôde-se concluir que a ação do vento e seus efeitos de estabilidade Global e deslocamentos horizontais cresceram aproximadamente 40% a medida que a edificação tornou-se mais alta, mostrando que a ação do vento é uma das principais ações ligadas a estabilidade de uma edificação e tornando perceptível ao profissional em qual momento esta ação apresenta reais riscos a funcionalidade e durabilidade da estrutura. A partir daí o profissional pode se munir de diversas ferramentas para solucionar um possível problema com esses resultados, como adotar um sistema de contraventamento eficiente, reposicionar determinados pilares, alterar a ligação entre os elementos vigas e pilares, passando de rígida para semi-rígida, entre outros, que garantiriam a estabilidade e durabilidade de uma edificação econômica e segura, mesmo na presença das ações horizontais.

### 4. REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6123**: Forças Devidas ao Vento em Edificações. Rio de Janeiro, 1988. 110 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118**: Projeto e Execução de Obras de Concreto Armado. Rio de Janeiro, 1980. 76 p.

BARROS, Cristiane Barbosa Costa. **Considerações sobre alguns modelos clássicos para análise estrutural de edifícios de andares múltiplos sujeitos à ação de forças laterais**. 2003. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2003.

BÊNIA, Maria Cristina Dolz. **Determinação dos efeitos de vizinhança na resposta dinâmica de edifícios altos sob a ação do vento**. 2013. Dissertação (Mestrado em

Engenharia) – Programa de Pós-Graduação, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013.

BLESSMANN, Joaquim. **O vento na engenharia estrutural**. Porto Alegre: Ed. Da Universidade/ UFRGS, 1995.

BLESSMANN, Joaquim. **Acidentes causados pelo vento**. Porto Alegre: Ed. Da Universidade/ UFRGS, 2001.

CARNEIRO, Francisco; MARTINS, João Guerra. **Análise de Estruturas: Contraventamento de edifícios**. Porto: Universidade Fernando Pessoa, 2008. Disponível em: <<https://pt.slideshare.net/fit18/contraventamento-de-estruturas>>. Acesso em 6 Set. 2017.

GILBERT, Anne M. *et al.* **Fundamentos da análise estrutural**. 3. ed. São Paulo: McGraw-Hill, 2009. P. 43.

GONÇALVES, Roberto M. *et at.* **Ação do vento nas edificações: Teoria e exemplos**. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 2004.

KUSTER, Viviane Kelle Jacundino Porto. **Estudo do comportamento estrutural de prédios de concreto armado contraventados por núcleo rígido tendo em vista o esforço de torção originado pela ação do vento**. 2014. Dissertação (Mestrado em Estruturas e Construção Civil) – Programa de Pós-Graduação, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2014.

MONCAYO, Winston Junior Zumaeta. **Análise de segunda ordem global em edifícios com estrutura de concreto armado**. 2011. Dissertação (Mestrado em ciências, Programa de Engenharia Civil, estruturas) – Escola de Engenharia, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

PERGHER, Arthur. **Análise de estabilidade global e dimensionamento dos pilares de edifício de concreto armado**. Florianópolis: Centro Tecnológico, 2015. Disponível em: <<https://repositorio.ufsc.br/xmlui/handle/123456789/133804>>. Acesso em 10 Set. 2017.