

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE ESTRUTURAS  
ESPECIALIZAÇÃO EM ESTRUTURAS**

**LORENA CRISTINA SANTOS MALTA**

**DIMENSIONAMENTO ESTRUTURAL DE UM EDIFÍCIO DE CONCRETO ARMADO  
ATRAVÉS DO SOFTWARE TQS: APLICAÇÃO DA CARGA DE VENTO EM  
DIVERSOS ÂNGULOS DE INCIDÊNCIA EM EDIFÍCIO DE PEQUENO PORTE  
COM GEOMETRIA NÃO PREVISTA NA NBR 6123:2013**

**BELO HORIZONTE**

**2022**

**LORENA CRISTINA SANTOS MALTA**

**DIMENSIONAMENTO ESTRUTURAL DE UM EDIFÍCIO DE CONCRETO ARMADO  
ATRAVÉS DO SOFTWARE TQS: APLICAÇÃO DA CARGA DE VENTO EM  
DIVERSOS ÂNGULOS DE INCIDÊNCIA EM EDIFÍCIO DE PEQUENO PORTE  
COM GEOMETRIA NÃO PREVISTA NA NBR 6123:2013**

Monografia de especialização apresentada ao Departamento de Engenharia de Estruturas da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial à obtenção do título de Especialista em Engenharia de Estruturas.

Orientador: Prof. Dr. Gabriel de Oliveira Ribeiro

**BELO HORIZONTE**

**2022**



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
CURSO DE ESPECIALIZAÇÃO EM ESTRUTURAS

## ATA DE DEFESA DE MONOGRAFIA / TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO (TCC)

Aos vinte dias do mês de julho de 2022, às 10:00 h min, o/a estudante **LORENA CRISTINA SANTOS MALTA**, matrícula 2019703399, defendeu o Trabalho intitulado “ Dimensionamento estrutural de um edifício de concreto armado através do software TQS: aplicação da carga de vento em diversos ângulos de incidência em edifício de pequeno porte com geometria não prevista na NBR 6123:2013 ” tendo obtido a média (noventa ) .

Participaram da banca examinadora os abaixo indicados, que, por nada mais terem a declarar; assinam eletronicamente a presente ata.

**Nota:** 90 (noventa)

**Orientador(a):** Prof. Gabriel de Oliveira Ribeiro

**Nota:** 90 (noventa)

**Examinador(a):** Prof. Pedro Vianna Pessoa de Mendonça

**Nota:** digitar a nota em numeral (escrever a nota por extenso)

**Examinador(a):** nome completo do examinador

**Nota:** digitar a nota em numeral (escrever a nota por extenso)

**Examinador(a):** nome completo do examinador



Documento assinado eletronicamente por **Gabriel de Oliveira Ribeiro, Professor Magistério Superior - Voluntário**, em 20/07/2022, às 17:48, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Pedro Vianna Pessoa de Mendonca, Professor do Magistério Superior**, em 21/07/2022, às 14:16, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site [https://sei.ufmg.br/sei/controlador\\_externo.php?acao=documento\\_conferir&id\\_orgao\\_acesso\\_externo=0](https://sei.ufmg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **1614631** e o código CRC **060302F9**.

**Este documento deve ser editado apenas pelo Orientador e deve ser assinado eletronicamente por todos os membros da banca.**

## RESUMO

O estudo da ação do vento em construções é de fundamental importância para a engenharia civil diante da grande influência das forças por ele provocadas na estabilidade global da estrutura e no dimensionamento de pilares e fundações. Com a tendência à construção de edifícios com seções complexas, sejam eles altos e esbeltos ou de pequeno porte, o carregamento de vento se torna de difícil análise frente à norma. Visando melhor compreensão de uma arquitetura não contemplada na NBR 6123:2013 e um tema pouco explorado na graduação, o trabalho propõe estudar a resposta estrutural ao vento de uma edificação de pequeno porte com geometria triangular localizada em Itaguara, cidade do interior de Minas Gerais, apresentando os resultados obtidos em software comercial TQS considerando variações de ângulo para a incidência do vento além dos ângulos previstos na norma de vento. São apresentados conceitos atrelados ao cálculo do vento conforme a normalização vigente no Brasil, a NBR 6123:2013, bem como breves definições referentes à estabilidade global da estrutura. A norma brasileira recomenda a realização de ensaios em túnel de vento para melhor compreensão do comportamento de estruturas que apresentem características particulares não previstas em seu escopo, no entanto, diante da inviabilidade de ensaio em túnel de vento para o edifício em estudo, serão apresentadas as simplificações necessárias durante a produção desse modelo para emprego da norma brasileira e o reflexo de tais considerações nos resultados finais obtidos após o processamento global da estrutura.

**Palavras-chave:** Vento. Edifício. Túnel de Vento. NBR 6123:2013.

## ABSTRACT

The study of wind action in constructions is of fundamental importance for civil engineering in view of the great influence of the forces caused by it on the global stability of the structure and on the dimensioning of pillars and foundations. With the tendency to build buildings with complex sections, whether tall and slender or small, wind loading becomes difficult to analyze in view of the norm. Aiming to better understand an architecture not covered by NBR 6123:2013 and a topic little explored in graduation, the work proposes to study the structural response to wind of a small building with triangular geometry located in Itaguara, a city in the interior of Minas Gerais, presenting the results obtained in commercial software TQS considering variations of angle for the incidence of the wind in addition to the angles foreseen in the wind standard. Concepts linked to the wind calculation are presented according to the current standard in Brazil, NBR 6123:2013, as well as brief definitions regarding the global stability of the structure. The Brazilian standard recommends carrying out tests in a wind tunnel for a better understanding of the behavior of structures that present particular characteristics not foreseen in its scope, however, given the impossibility of testing in a wind tunnel for the building under study, the simplifications necessary during the production of this model for the use of the Brazilian standard and the reflection of such considerations in the final results obtained after the global processing of the structure.

**Keywords:** Wind. Building. Wind tunnel. NBR 6123:2013.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Isopletas da velocidade básica $V_0$ (m/s) .....	17
Figura 2: Fator topográfico $S_1$ .....	18
Figura 3: Coeficiente de arrasto, $C_a$ , para edificações paralelepípedicas em vento de baixa turbulência .....	25
Figura 4: Coeficiente de arrasto, $C_a$ , para edificações paralelepípedicas em vento de alta turbulência .....	26
Figura 5: Esquema em planta da análise de vento existente no sistema TQS .....	27
Figura 6: Esquema para análise de vento conforme o sistema TQS .....	28
Figura 7: Efeito de 1ª Ordem .....	29
Figura 8: Efeito de 2ª Ordem .....	30
Figura 9: Efeitos globais de 2ª Ordem .....	31
Figura 10: Efeitos locais de 2ª Ordem .....	31
Figura 11: Efeitos de 2ª ordem localizados .....	32
Figura 12: Efeitos de 2ª Ordem .....	32
Figura 13: Estabilidade Global .....	33
Figura 14: Relação entre os valores dos coeficientes $\gamma_z$ e $\alpha$ e os nós .....	36
Figura 15: Localização do terreno .....	37
Figura 16: Planta baixa subsolo .....	37
Figura 17: Planta baixa térreo .....	38
Figura 18: Planta baixa apartamento (02 pavimentos) .....	38
Figura 19: Modelo estrutural (vistas em 3D) .....	38
Figura 20: Inserção de ângulos de incidência de vento .....	40
Figura 21: Momento do pilar-parede P21 .....	41
Figura 22: Dimensionamento na 1ª opção .....	41
Figura 23: Dimensionamento na 2ª opção .....	42
Figura 24: Casos de carregamento na 1ª opção .....	43
Figura 25: Casos de carregamento na 2ª opção .....	44
Figura 26: Parâmetro $\gamma_z$ .....	44
Figura 27: Deslocamento horizontal absoluto .....	45
Figura 28: Deslocamento horizontal entre pisos .....	45

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Parâmetros meteorológicos.....	21
Tabela 2: Valores mínimos do fator estatístico $S_3$ .....	22
Tabela 3: Relação entre a parte decimal do número obtido com a magnitude dos efeitos globais de segunda ordem na estrutura.....	34



## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	9
<b>1.1 Considerações iniciais</b> .....	9
<b>1.2 Objetivo</b> .....	11
<b>1.3 Justificativa</b> .....	11
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	13
<b>2.1 Normativa brasileira</b> .....	13
<b>2.2 Estudos já realizados</b> .....	13
<b>3 CÁLCULO DO VENTO</b> .....	16
<b>3.1 Determinação de forças estáticas</b> .....	16
3.1.1 Velocidade Básica do Vento ( $V_o$ ) .....	16
3.1.2 Velocidade Característica do Vento ( $V_k$ ) .....	17
3.1.3 Fator Topográfico $S_1$ .....	18
3.1.4 Fator $S_2$ de Rugosidade do Terreno e Dimensões da Edificação .....	19
3.1.5 Fator Estatístico $S_3$ .....	21
3.1.6 Cálculo da Velocidade Característica $V_k$ .....	22
3.1.7 Pressão Dinâmica $q$ .....	22
3.1.8 Coeficientes de Pressão .....	22
3.1.9 Coeficientes de Forma .....	23
3.1.10 Coeficientes de Força .....	24
3.1.11 Força de Arrasto e Coeficiente de Arrasto .....	24
<b>3.2 Análise do vento no sistema TQS</b> .....	27
<b>4 ESTABILIDADE GLOBAL E EFEITOS DE 2ª ORDEM</b> .....	29
<b>4.1 Efeitos de 2ª ordem</b> .....	29
4.1.1 Análise em 1ª ordem .....	29
4.1.2 Análise em 2ª ordem .....	29
4.1.3 Definições e Classificações das Estruturas .....	30
4.1.3.1 Efeitos globais de 2ª ordem .....	30
4.1.3.2 Efeitos locais de 2ª ordem .....	31
4.1.3.3 Efeitos de 2ª ordem localizados .....	31
4.1.3.4 Contraventamento .....	32
<b>4.2 Estabilidade global</b> .....	33
4.2.1 Coeficiente $\gamma_z$ .....	34
4.2.2 Parâmetro de instabilidade $\alpha$ .....	35
4.2.3 Estruturas de nós fixos e nós móveis .....	35
<b>5 APRESENTAÇÃO DO EDIFÍCIO</b> .....	37
<b>6 APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS</b> .....	39
<b>7 CONSIDERAÇÕES FINAIS</b> .....	46
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	48

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Considerações iniciais

É comum, nos dias atuais, na concepção de uma edificação nova, planejar a arquitetura aproveitando ao máximo o lote em que a mesma será construída. Com isso, em casos em que o terreno possui formato irregular, ou seja, não apresenta uma geometria quadrada ou retangular, a arquitetura tende a ter essa mesma forma.

Um arranjo estrutural adequado consiste em atender, simultaneamente, os aspectos de segurança, economia (custo), durabilidade e os relativos ao projeto arquitetônico (estética e funcionalidade). Dentre as etapas de elaboração de um projeto estrutural, a correta definição das cargas e forças que atuam nas estruturas é de suma importância, ou seja, a modelagem de um edifício não será bem sucedida sem as corretas considerações dos esforços ao qual a estrutura estará solicitada em sua vida.

Os carregamentos permanentes e os carregamentos acidentais a serem considerados no projeto conforme as condições de uso são previstos pela norma brasileira NBR 6120:2019 e outras normas correlatas. Já para o carregamento de vento, há uma série de considerações que devem ser feitas e analisadas, caso a caso.

Cursi et al (2017) destacam que a consideração da ação do vento na engenharia estrutural é indispensável no dimensionamento da estrutura à ruptura (Estado Limite Último) e na capacidade desta em satisfazer ao conforto do usuário (Estado Limite de Serviço). Essa ação é, em muitos casos, o carregamento mais significativo do dimensionamento à ruptura de peças verticais de concreto à flexão, como pilares. Em serviço, a resposta dinâmica da estrutura submetida ao vento permite inferir o nível de conforto e satisfação do usuário em exposição a esse fenômeno.

A maior complexidade em relação ao conhecimento sobre carregamentos de vento se deve, inicialmente, a dois fatos. Segundo Holmes (2001) citado por Cursi et al (2017), o primeiro está na multidisciplinaridade desse campo, que envolve conhecimentos de probabilidade e estatística, meteorologia, mecânica dos fluidos e dinâmica estrutural, muitas vezes

exigindo do engenheiro projetista conhecimento de ciências pouco comuns ao seu cotidiano para serem aprofundadas em sua graduação e complementadas entre si ao longo do ciclo acadêmico. Um segundo aspecto a se considerar seria a difícil aplicação e comparação do escopo da norma de vento brasileira, a NBR 6123:2013, para os casos de edifícios altos, esbeltos e/ou com seção transversal variável e complexa. Para esses casos, inclusive, a norma recomenda as avaliações de carregamento de vento a partir de ensaios em túnel de vento, que permitem a obtenção de coeficientes de pressão discretos e interpolados, com melhor precisão e representatividade se comparados com o uso das aproximações da norma vigente para casos mais simples.

Aliado a isso, o projetista se depara com dificuldades na consideração da ação do vento em edifícios com geometria não prevista na norma. Casos em que a realização do estudo do túnel de vento é inviável por questões técnicas e financeiras, como exemplo, edifícios de pequeno porte.

Sendo a ação do vento a principal causa dos esforços horizontais nas edificações, provocando importantes deslocamentos horizontais da estrutura, a análise da estabilidade global é fundamental. De acordo com Wordell (2003), todo e qualquer edifício, independentemente do número pavimentos, pilares e dimensões, deve ser verificado em relação ao seu sistema de travamento. É necessário um sistema de travamento devidamente adequado e dimensionado.

Destaca-se que a NBR 6118:2014 considera esta verificação uma questão indispensável aos projetos estruturais e define dois parâmetros como forma de se verificar a instabilidade global das estruturas. O primeiro, representado pela letra grega alfa  $\alpha$ , que avalia apenas se o sistema de contraventamento está adequado ou não, classificando assim a estrutura em de nós fixos ou móveis e indicando se os efeitos de segunda ordem necessitam ou não serem considerados. O segundo parâmetro, chamado  $\gamma_z$  (gama z), que além de indicar o mesmo que o parâmetro  $\alpha$  serve como um majorador dos esforços de primeira ordem, propiciando assim a determinação dos esforços finais de cálculo (esforços de primeira e segunda ordem).

Ressalta-se, desse modo, a importância na consideração do esforço de vento e garantia da estabilidade estrutural sabendo-se que a ação do vento é um fator externo que influencia diretamente no desempenho da edificação. Com isso, o projeto estrutural deve garantir que todo edifício, ou qualquer parte

isolada dele, nunca atinja o estado limite último de instabilidade, isto é, a perda da capacidade resistente da estrutura causada pelo aumento das deformações excessivas.

## 1.2 Objetivo

Diante do exposto, este trabalho pretende demonstrar que a consideração dos esforços gerados pelo vento, da mesma forma que é essencial e fundamental para edifícios altos também é indispensável para edifícios de pequeno porte, além de avaliar as limitações da norma para o tipo de edificação em estudo. Apresenta-se o cálculo do vento para o edifício em questão através do software TQS.

Para a análise será utilizado o pilar-parede P21 que se localiza em um ponto crítico da estrutura. Além disso, foram comparados e analisados ainda os deslocamentos horizontais da estrutura, a fim de avaliar seu desempenho em serviço e o coeficiente  $\gamma_z$ , como um parâmetro indicativo de instabilidade.

## 1.3 Justificativa

Para justificar a temática em estudo neste trabalho, abordam-se alguns pontos importantes: variações geométricas influenciam na carga aerodinâmica do vento; métodos padronizados trabalham com geometrias regulares; a simplificação necessária para uso da norma pode gerar esforços menores (considerar a edificação como retangular); a consideração de mais ângulos de incidência do vento (o vento pode ser direcionado em cada uma das faces do triângulo na estrutura em análise) pode ser uma melhor opção devido à influência do vento na fachada ser diferente em cada uma das direções para geometrias complexas.

A ação do vento sobre a estrutura varia conforme sua altura, suas características - dimensão horizontal e funcionalidade da edificação, por exemplo - e sua localização no espaço urbano. A norma brasileira prevê ainda em seu objetivo (item 1.2) que essa não se aplica a edificações de formas, dimensões ou localização fora do comum, casos esses em que estudos especiais devem ser feitos para determinar as forças atuantes do vento e seus

efeitos. Assim, pode-se considerar o estudo em túnel de vento para quaisquer estruturas que não apresentem características compatíveis com aquelas preconizadas pela norma.

A NBR 6118 (ABNT, 2014) define que os esforços solicitantes relativos à ação do vento devem ser considerados e recomenda que sejam determinados de acordo com o prescrito pela ABNT NBR 6123:2013, permitindo-se o emprego de regras simplificadas previstas em normas brasileiras específicas.

Elsharawy et al (2012) citados por Ferreira (2016) ressaltam que mesmo edificações baixas podem sofrer influência significativa da ação do vento, uma vez que em função da sua geometria em planta e do posicionamento dos pilares, a ação do vento pode induzir esforços de torção no pórtico espacial.

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

## **2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **2.1 Normativa brasileira**

A NBR 6123:2013, Forças devidas ao vento em edificações, foi publicada em 1988, e desde então é utilizada como referência para os mais diversos projetos de construção no Brasil. Atualmente a norma encontra-se em revisão para inserir ao texto uma abordagem da análise dinâmica do vento de forma mais precisa do que a versão anterior da norma. Desde o seu lançamento, a norma sofreu apenas duas revisões, em 1990 e 2013.

A norma de vento dispõe sobre ações estáticas e dinâmicas devidas ao vento nas edificações, no entanto, não é aplicável a edificações com formas e dimensões fora do comum, recomendando a estes casos estudos utilizando túnel de vento para a obtenção dos coeficientes. Ou seja, a norma trata de muitos tipos de edificações, porém apenas com alguns formatos geométricos e direções de vento pré-definidos.

Tendo esses problemas em vista, deve-se ter especial cuidado na determinação dos esforços causados pelo vento em edifícios. Porém, atualmente há muitos casos que não são contemplados pela norma como, por exemplo, edifícios com formatos diferenciados dos convencionais (ou seja, curvos, irregulares, inclinados), sendo que esses formatos estão tornando-se cada vez mais usuais, o que leva a dimensionamentos errôneos caso ela seja aplicada, pois ela refere-se aos edifícios com base quadrilátera e com formato uniforme ao longo de sua altura. (ARRAIS, 2011)

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

### **2.2 Estudos já realizados**

Diversos autores apontam em seus estudos e pesquisas a ausência de informações na norma vigente sobre dados aerodinâmicos para edificações

com formato não retangular e consideração na aplicação do vento somente na direção perpendicular na fachada da edificação.

Segundo Li et al. (2017) citados por Mattias (2021), já é amplamente conhecido que o formato externo da estrutura desempenha um papel importante na geração dos carregamentos devidos ao vento em edifícios altos, podendo torná-los mais sensíveis às excitações dinâmicas.

Segundo Vogado (2018), os códigos normativos, em geral, fornecem apenas instruções para o cálculo de estruturas com formatos regulares e simétricos. Na prática dos projetos usuais, no entanto, tem se observado arquiteturas cada vez mais diferenciadas e não convencionais, seja pela otimização do espaço ou pela demanda de padrões estéticos mais atrativos.

Conforme Vieira (2016), caso a edificação apresente uma geometria mais complexa ou grande altura, torna-se necessário a procura por informações mais precisas a respeito de seu comportamento estrutural frente às ações do vento. Tais informações podem ser obtidas através de realização de ensaios em modelos reduzidos em túnel de vento ou por simulação computacional.

Os códigos normativos normalmente adotam geometrias regulares para a determinação da carga do vento, surgindo assim à necessidade de se buscar meios mais confiáveis, como o ensaio de modelo reduzido em túnel de vento. (MATTIAS, 2021).

Conforme Blessmann (1989), os esforços de torção em edifícios são praticamente esquecidos pelas normas. Grande parte das normas apenas determina coeficientes de força para ventos atuando perpendicularmente às fachadas do edifício com base retangular, condição esta que resulta em forças com a mesma direção e sentido do vento médio, salvo os prédios com assimetria geométrica.

Autores como Miguel (2003), Lavor (2017), Vogado (2018) e Liang et al. (1997) citados por Mattias (2021) demonstram a importância de se ter um estudo mais aprofundado no comportamento que as rajadas de vento têm ao atingir a edificação para as variadas formas geométricas, o consequente carregamento e os efeitos dinâmicos gerados e sua influência nos deslocamentos que a edificação sofre.

Dados aerodinâmicos para determinação das forças estáticas equivalentes estão disponíveis para estruturas usuais e há procedimentos de cálculo para estimar a resposta estrutural utilizando estas informações. Este é o caso de edificações que têm formato geométrico simples e não estão sujeitas a significativos efeitos de vizinhança. No entanto, a maioria das formas arquitetônicas projetadas atualmente não possui dados aerodinâmicos disponíveis. Nestes casos, as informações necessárias para a determinação das forças globais e locais oriundas da ação do vento devem ser obtidas em ensaios em túnel de vento (SIMIU; SCANLAN, 1986, p. 295-296 apud Bênia (2013).

Isso mostra que é imprescindível a realização de estudos e a adoção de processos de obtenção dos coeficientes devido à ação do vento abrangendo mais formatos das edificações, principalmente para os casos em que o túnel de vento é inviável e também inclusão de mais ângulos de incidência do vento nas fachadas de tais estruturas na normatização brasileira.



### 3 CÁLCULO DO VENTO

A ação do vento em edificações depende de dois aspectos: meteorológicos e aerodinâmicos. Os aspectos meteorológicos serão responsáveis pela velocidade do vento a considerar no projeto da estrutura de uma dada edificação. Ela é avaliada a partir de considerações como: local da edificação, tipo de terreno, altura da edificação, rugosidade do terreno e tipo de ocupação. (MONCAYO, 2011).

Os aspectos aerodinâmicos estão relacionados com a análise do vento levando em conta a forma da edificação, pois sabe-se que o vento, ao incidir sobre uma edificação, terá um comportamento diferente em função da sua forma (GONÇALVES, 2007).

#### 3.1 Determinação de forças estáticas

As forças estáticas são determinadas a partir da velocidade característica do vento  $V_k$ , que é obtida pela multiplicação dos fatores  $S_1$  (fator topográfico),  $S_2$  (fator relativo à rugosidade do terreno e às dimensões da edificação) e  $S_3$  (fator estatístico) pela velocidade básica do vento  $V_0$ . A pressão dinâmica  $q$  é obtida pela expressão  $q = 0,613 V_k^2$ .

A determinação de cada coeficiente será detalhada a seguir.

##### 3.1.1 Velocidade Básica do Vento ( $V_0$ )

Segundo a NBR 6123:2013, a velocidade básica de vento  $V_0$  é definida pela velocidade de uma rajada de 3 segundos, com período de retorno de 50 anos, a uma altura de 10m acima do terreno, em campo aberto, plano e sem obstruções. É admitido que o vento básico pode soprar de qualquer direção horizontal.

A Figura 1 a seguir representa as isopletras de velocidade básica no Brasil.

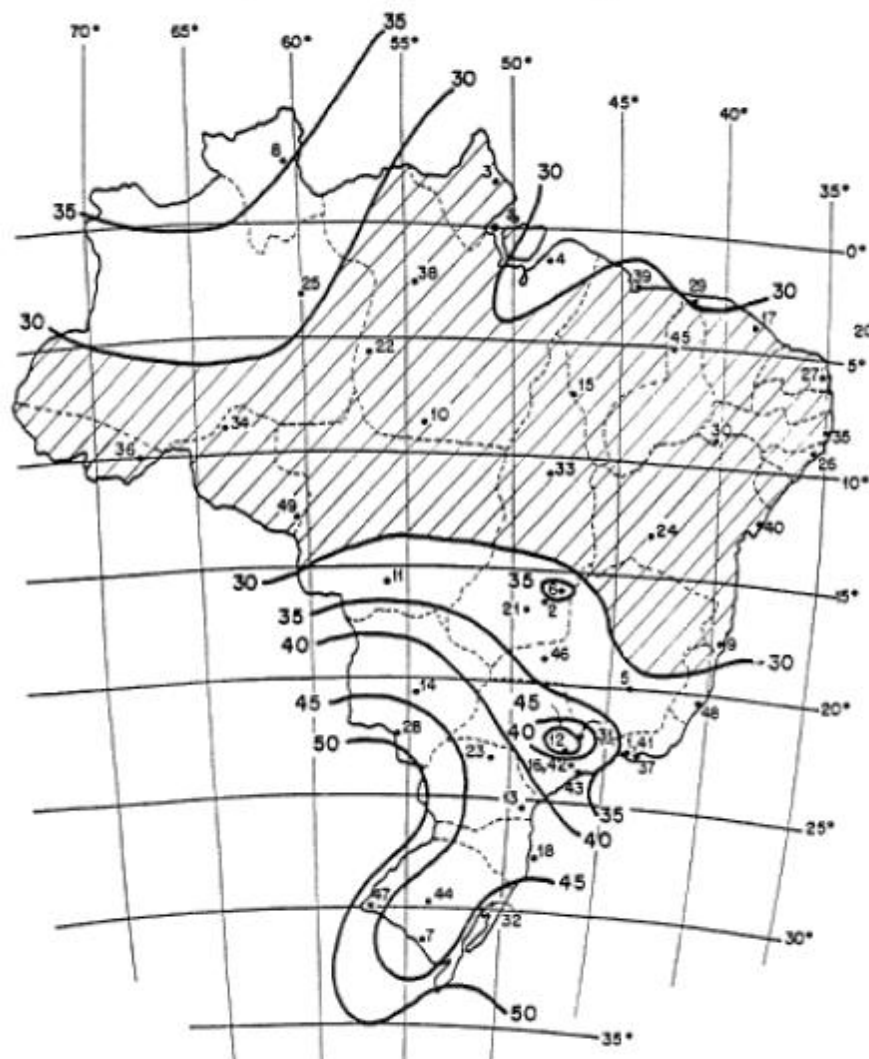


Figura 1: Isopletas da velocidade básica  $V_0$  (m/s)  
 Fonte: NBR 6123 (ANBT, 2013).

### 3.1.2 Velocidade Característica do Vento ( $V_k$ )

A velocidade básica  $V_0$ , de acordo com Gonçalves (2007), pode ser considerada como uma velocidade de referência em certa localização, uma vez que não contabiliza as interferências como as diferentes topografias locais, presença ou ausência de obstáculos, altura e dimensões da edificação em análise. Para tanto, é necessário obter a velocidade característica  $V_k$  atuante em certa edificação. Para o cálculo de  $V_k$ , tais efeitos serão ponderados na NBR 6123:2013 como coeficientes multiplicativos de  $V_0$ .

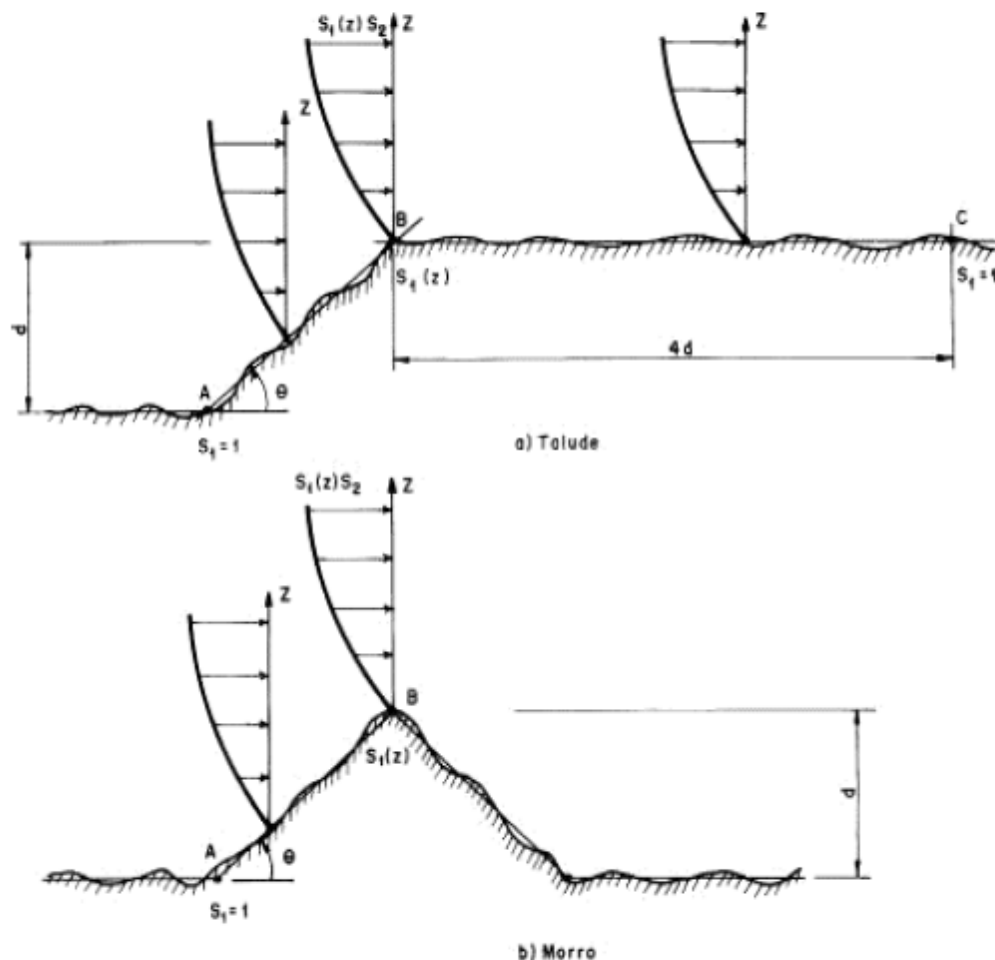
### 3.1.3 Fator Topográfico $S_1$

O fator topográfico considera a variação do relevo do terreno onde será construída a edificação.

a) Terrenos planos ou fracamente acidentados:  $S_1 = 1,0$ .

b) Taludes e morros.

Segundo a NBR 6123 (ABNT, 2013), a incidência de ventos de fluxo bidimensional é apresentada nas seguintes situações (Figura 2):



**Figura 2: Fator topográfico  $S_1$**   
**Fonte: NBR 6123 (ABNT, 2013).**

No ponto A e C, no caso do talude, e no ponto A, no caso de morro, a influência do terreno não é significativa e, portanto, adota-se  $S_1 = 1$ .

No ponto B, nos taludes e morros,  $S_1$  é uma função de  $S_1(z)$ :

$$\theta \leq 3^\circ S_1(z) = 1,00$$

$$6^\circ \leq \theta \leq 17^\circ S_1(z) = 1,00 + \left(2,5 - \frac{z}{d}\right) \operatorname{tg}(\theta - 3^\circ) \geq 1,0$$

$$\theta \leq 45^\circ S_1(z) = 1,00 + \left(2,5 - \frac{z}{d}\right) 0,31 \geq 1,0$$

Deve-se interpolar linearmente para  $3^\circ < \theta < 6^\circ$  e  $17^\circ < \theta < 45^\circ$

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;

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

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:  $S_1=0,9$ .

### 3.1.4 Fator $S_2$ de Rugosidade do Terreno e Dimensões da Edificação

A NBR 6123 (ABNT, 2013) apresenta a condição do valor de  $S_2$  considerando a combinação de efeitos que envolvem a rugosidade do terreno, as dimensões do edifício, ou a própria parte da edificação em consideração, e também, a variação da velocidade do vento com a altura relativa sobre o terreno. A norma estabelece cinco categorias de terreno, em função de sua rugosidade:

- Categoria I: Superfícies lisas de grandes dimensões, com mais de 5 km de extensão, medida na direção e sentido do vento incidente. Exemplos: mar calmo, lagos, rios e pântanos sem vegetação.
- Categoria II: Terrenos abertos em nível ou aproximadamente em nível, com poucos obstáculos isolados, tais como árvores e edificações baixas. A cota média do topo dos obstáculos é considerada igual ou inferior a um metro. Exemplos: zonas costeiras planas, pântanos com vegetação rala, campos de aviação, pradarias, charnecas e fazendas sem sebes ou muros.
- Categoria III: Terrenos planos ou ondulados com obstáculos, tais como sebes e muros, poucos quebra-ventos de árvores, edificações baixas e esparsas. A cota média do topo dos obstáculos é considerada igual a três metros. Exemplos: granjas e casas de campo, com exceção das partes com matos, fazenda com sebes e/ou muros, subúrbios a considerável distância do centro, com casas baixas e esparsas.
- Categoria IV: Terrenos cobertos por obstáculos numerosos, pouco espaçados e situados em zonas florestais, industriais ou urbanizadas. A cota

média do topo dos obstáculos é considerada igual a dez metros e também inclui zonas com obstáculos maiores e que ainda não possam ser considerados na categoria V. Exemplos: zonas de parques e bosques com muitas árvores, cidades pequenas e seus arredores, subúrbios densamente construídos de grandes cidades, áreas industriais plena ou parcialmente desenvolvidas.

- Categoria V: Terrenos cobertos por obstáculos numerosos, grandes, altos e pouco espaçados. A cota média do topo dos obstáculos é considerada igual ou superior a 25 metros. Exemplos: florestas com árvores altas, de copas isoladas, centros de grandes cidades, complexos industriais bem desenvolvidos.

#### **Dimensões da edificação:**

A NBR 6123:2013 define três classes de acordo com as dimensões das edificações:

- CLASSE A: Todas as unidades de vedação, seus elementos de fixação e peças individuais de estruturas sem vedação. Toda edificação ou parte da edificação na qual a maior dimensão horizontal ou vertical da superfície frontal (superfície de incidência do vento) não exceda 20 metros;
- CLASSE B: Toda edificação ou parte da edificação para a qual a maior dimensão horizontal ou vertical da superfície frontal (superfície de incidência do vento) esteja entre 20 e 50 metros;
- CLASSE C: Toda edificação ou parte da edificação para a qual a maior dimensão horizontal ou vertical da superfície frontal (superfície de incidência do vento) exceda 50 metros.

#### **Altura sobre terreno:**

Conforme a NBR 6123:2013, a partir da escolha da categoria de rugosidade e classe da dimensão da edificação, é possível obter o coeficiente  $S_2$  pela equação a seguir:

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

Sendo:

$b$  = parâmetro meteorológico encontrado na Tabela 1;

$p$  = correção da classe da edificação encontrada na Tabela 1;

$F_r$  = fator de rajada correspondente à categoria II;

$z$  = altura do ponto da edificação em estudo em metros, a partir da superfície do terreno.

**Tabela 1: Parâmetros meteorológicos**

Categoria	$z_e$ (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

Fonte: NBR 6123 (ABNT, 2013).

Uma forma alternativa de obter o coeficiente fator  $S_2$ , de acordo com a NBR 6123:2013, é em função da determinação da categoria, classe e altura da edificação em estudo.

### 3.1.5 Fator Estatístico $S_3$

O fator estatístico  $S_3$ , considera conceitos probabilísticos e o tipo de ocupação. Está relacionado com a segurança da edificação.

A norma brasileira estabelece como vida útil da edificação o período de 50 anos e uma probabilidade de 63% de a velocidade básica ser excedida pelo menos uma vez nesse período. Apresentam-se na tabela 2 os valores mínimos do fator  $S_3$ .

Tabela 2: Valores mínimos do fator estatístico  $S_3$ 

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

Fonte: NBR 6123 (ABNT, 2013).

### 3.1.6 Cálculo da Velocidade Característica $V_k$

A velocidade característica do vento  $V_k$  é obtida, posteriormente ao cálculo dos coeficientes de ponderação de  $V_0$ , pela seguinte equação:

$$V_k = V_0 S_1 S_2 S_3$$

### 3.1.7 Pressão Dinâmica $q$

A pressão dinâmica  $q$  pode ser obtida pela seguinte equação:

$$q = 0,613 V_k^2$$

Com  $q$  em  $N/m^2$  e  $V_k$  em  $m/s$ . Ela está associada à velocidade característica  $V_k$  em condições normais de temperatura e pressão, ou seja,  $15^\circ C$  e  $1 \text{ atm}$  ( $101325 \text{ Pa}$ ).

### 3.1.8 Coeficientes de Pressão

Os coeficientes de pressão são parâmetros adimensionais que descrevem a distribuição da pressão sobre a edificação. Eles podem ser externos ( $C_{pe}$ ) ou internos ( $C_{pi}$ ) em relação à superfície em estudo, sendo que a

diferença entre as pressões efetivas de cada face define a pressão efetiva da superfície:

$$\Delta p = \Delta p_e - \Delta p_i$$

Onde:

$$\Delta p_e = \text{pressão efetiva externa} = q C_{pe}$$

$$\Delta p_i = \text{pressão efetiva interna} = q C_{pi}$$

Portanto:

$$\Delta p = (C_{pe} - C_{pi}) q$$

O vento que incide sobre um edifício pode provocar sucção ou sobrepressão na superfície em estudo. Sucção ocorre quando a pressão efetiva está abaixo da pressão atmosférica de referência e a sobrepressão quando está acima. Assim, valores positivos dos coeficientes indicam sobrepressão, enquanto valores negativos indicam sucção.

Os valores de coeficiente de pressão externa podem ser determinados, de acordo com o tipo do edifício e as direções críticas do vento, através de tabelas presentes nos ANEXOS E e F da norma. Quanto ao coeficiente de pressão interna, os valores podem ser determinados através da permeabilidade das paredes ao ar, de acordo com os materiais e as aberturas existentes.

### 3.1.9 Coeficientes de Forma

Assim como os coeficientes de pressão, os coeficientes de forma podem ser externos ( $C_e$ ) ou internos ( $C_i$ ) e indicam sobrepressão quando positivos e sucção quando negativos. A força do vento, incidindo perpendicularmente sobre uma superfície de área  $A$ , é dado pela diferença entre as forças efetivas externa e interna:

$$F = F_e - F_i$$

Onde:

$$F_e = \text{força efetiva externa} = q A C_e$$

$$F_i = \text{força efetiva interna} = q A C_i$$

Portanto:

$$F = F_e - F_i$$



Uma força  $F$  que atua para o interior apresenta valores positivos, enquanto que, para o exterior,  $F$  é negativo.

### 3.1.10 Coeficientes de Força

As forças atuantes que compõem a força global (obtida através da soma vetorial) do vento que incide sobre um edifício ou parte dela podem ser obtidas pela seguinte equação:

$$F = C_f q A$$

Onde:

$C_f$  = coeficiente de força, especificado em cada caso:  $C_x, C_y, etc.$

$A$  = área de referência, especificada em cada caso.

### 3.1.11 Força de Arrasto e Coeficiente de Arrasto

A consideração de vento em edificações altas recebe um tratamento, dentro de uma análise global, em que a superposição de efeitos externos (forma) com efeitos internos (aberturas) é obtida por meio de um comportamento global da edificação, e representada por um único coeficiente,  $C_a$ , denominado coeficiente de arrasto (GONÇALVES, 2007).

A força de arrasto  $F_a$  é a componente da força global do vento sobre uma edificação, e tal força global pode ser obtida pela soma vetorial das forças de arrasto que atuam na edificação.

Essa força de arrasto pode ser obtida pela seguinte expressão:

$$F_a = C_a q A_e$$

$C_a$  é o coeficiente de arrasto;

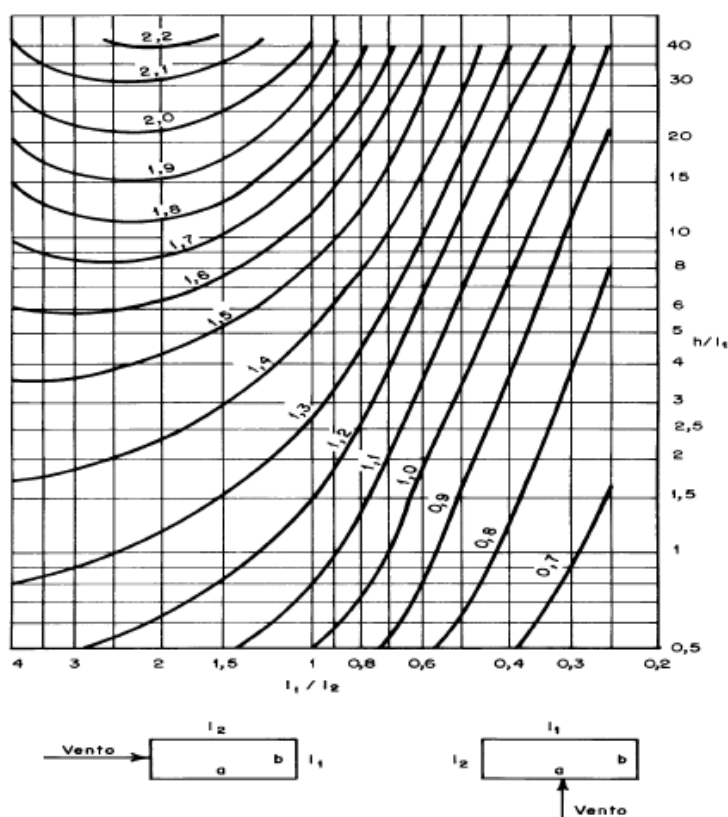
$q$  é a pressão dinâmica ou pressão de obstrução;

$A_e$  é a área efetiva, que é a área da projeção ortogonal da edificação, sobre um plano perpendicular à direção do vento (“área da sombra”).

- **Edificações de planta retangular**

Segundo a NBR 6123:2013, para se determinar o coeficiente de arrasto ( $C_a$ ) em edificações de múltiplos andares com planta retangular, devem-se considerar, principalmente, as condições de vento de baixa ou alta turbulência.

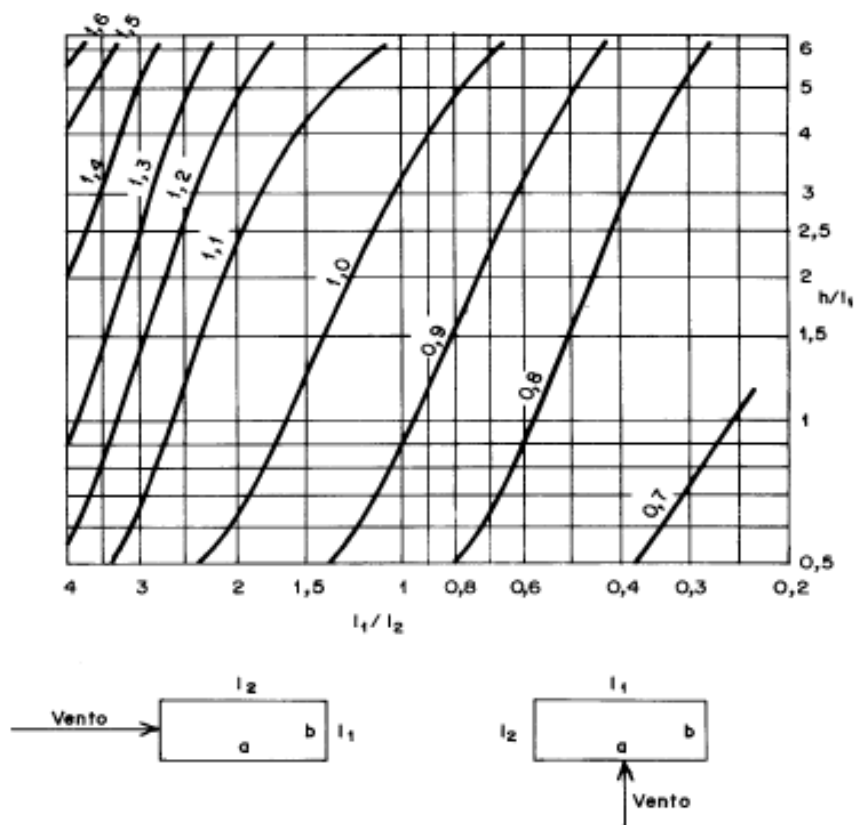
O vento de baixa turbulência é caracterizado pela ausência de obstruções como, por exemplo, em campo aberto e plano. Para se retirar o valor do  $C_a$  do gráfico a seguir dividem-se os comprimentos da edificação em planta L1 por L2, valores esses que dependem do ângulo de incidência do vento, ou seja, da direção em que se está realizando a análise, como indicado na figura 3.



**Figura 3: Coeficiente de arrasto,  $C_a$ , para edificações paralelepípedicas em vento de baixa turbulência**  
**Fonte: NBR 6123 (ABNT, 2013).**

A razão desses dois comprimentos está representada no eixo das abscissas (horizontal). O eixo das ordenadas (vertical) é representado pela divisão da altura da edificação  $H$  pelo comprimento  $L_1$ .

No caso de vento de alta turbulência, os valores de  $C_a$  devem levar em conta este efeito e variam de 0,7 a 1,6, como mostrado na figura 4. Para se obter o valor do  $C_a$ , o processo é análogo ao de vento de baixa turbulência, descrito anteriormente.



**Figura 4: Coeficiente de arrasto,  $C_a$ , para edificações paralelepípedicas em vento de alta turbulência**  
**Fonte: NBR 6123 (ABNT, 2013).**

Segundo a NBR 6123:2013, uma edificação é considerada em zona de alta turbulência quando a sua altura não excede o dobro da altura média das edificações vizinhas, ou seja, se a altura da edificação for maior que o dobro da altura média das edificações vizinhas, ela estará em zona de baixa turbulência, caso contrário, estará em zona de alta turbulência.

A altura média das edificações vizinhas deve ser obtida com a altura de todas as edificações até certa distância na direção do vento incidente.

Essa distância depende da altura da edificação em análise, como mostrado a seguir:

- 500 metros, para uma edificação de até 40 metros de altura;
- 1000 metros, para uma edificação de até 55 metros de altura;
- 2000 metros, para uma edificação de até 70 metros de altura;
- 3000 metros, para uma edificação de até 80 metros de altura.

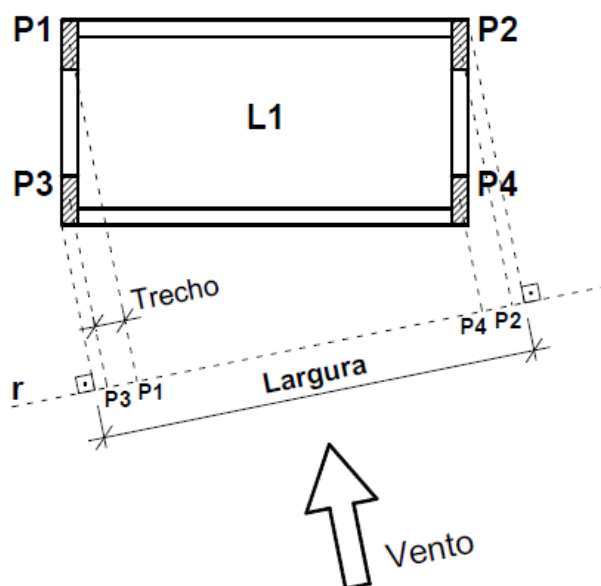
Vale ressaltar que a força global do vento que se obtém em zona de baixa turbulência é maior que a que se obtém em zona de alta turbulência, embora o nome baixa e alta possa induzir ao pensamento contrário. Para

entender bem isto, basta pensar que em zona de baixa turbulência, como o nome já diz, a turbulência é baixa, pois não há obstáculos, dessa maneira o vento segue livremente em direção à edificação, e no caso de alta turbulência, como o nome também já diz, a turbulência é alta, pois há diversos obstáculos no caminho, fazendo com que o vento não atinja a edificação com força máxima.

### 3.2 Análise do vento no sistema TQS

Neste trabalho a análise de vento será feita automaticamente pelo programa de cálculo estrutural TQS. Ela é realizada da seguinte maneira:

- Para cada piso da edificação acima do térreo, determina-se sua cota;
- Nessa cota, define-se a geometria e escolhe-se uma reta “r” arbitrária, ortogonal à direção do vento. Sobre essa reta, projetam-se os extremos do edifício e os centros de gravidade dos pilares, conforme a figura 5;
- A projeção dos extremos sobre a reta “r” define a largura do edifício em que atuará o vento. Tal largura também está indicada na figura 5;



**Figura 5: Esquema em planta da análise de vento existente no sistema TQS**

**Fonte: Moncayo (2011).**

- A projeção dos centros dos pilares sobre a reta “r” divide-a em trechos relativos a esses centros;
- Com a largura do edifício, definida no item c, e o pé-direito do piso, calcula-se a área que receberá o vento nessa direção;

f) Calcula-se a força total de vento no piso  $f_i$ , mostrada na figura 6-(a), de acordo com a NBR 6123:2013.

g) Essa força total é distribuída entre os nós dos pilares no piso, proporcionalmente à área de influência de cada pilar. Cada um deles terá influência da metade do trecho anterior (esquerda) até a metade do trecho posterior (direita), isto olhando para o edifício na vertical, de frente para face exposta ao vento;

h) Essa força calculada para cada pilar é distribuída metade para o nó superior e metade para o inferior do lance, exceto no primeiro piso acima do térreo, onde a força vai toda para o nó superior, como pode ser observado na figura 6-(b).

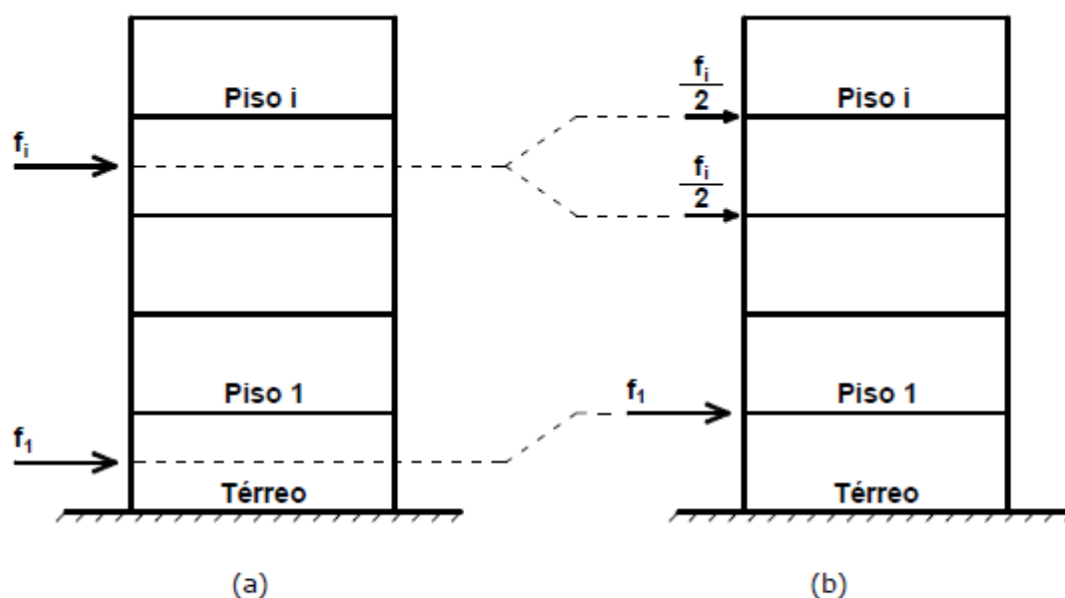


Figura 6: Esquema para análise de vento conforme o sistema TQS  
Fonte: Moncayo (2011).

## 4 ESTABILIDADE GLOBAL E EFEITOS DE 2ª ORDEM

A verificação da estabilidade global é um requisito importante na elaboração de projetos de edifícios de concreto armado e visa garantir a segurança da estrutura perante o estado limite último de instabilidade, situação que representa a perda da capacidade resistente da estrutura, causada pelo aumento das deformações.

O concreto armado possui um comportamento não-linear e devem ser considerados tais efeitos nos projetos estruturais. A não-linearidade física está relacionada com o comportamento do material e a não-linearidade geométrica é causada pela mudança da geometria da estrutura.

### 4.1 Efeitos de 2ª ordem

#### 4.1.1 Análise em 1ª ordem

É aquela em que o cálculo da estrutura é realizado na sua configuração geométrica inicial não deformada, gerando os chamados efeitos de primeira ordem. (KIMURA, 2007, p. 545). Esse tipo de efeito está ilustrado na figura 7.

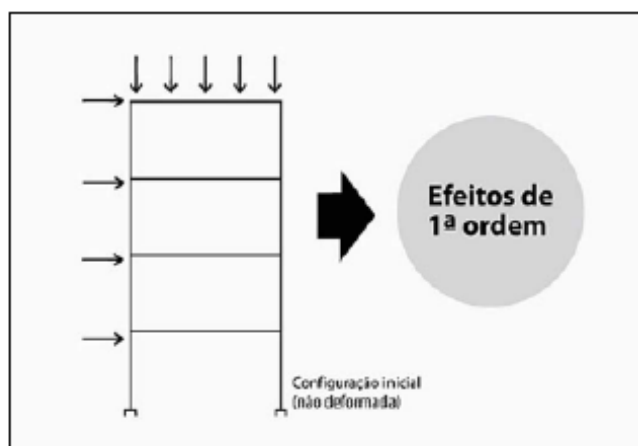
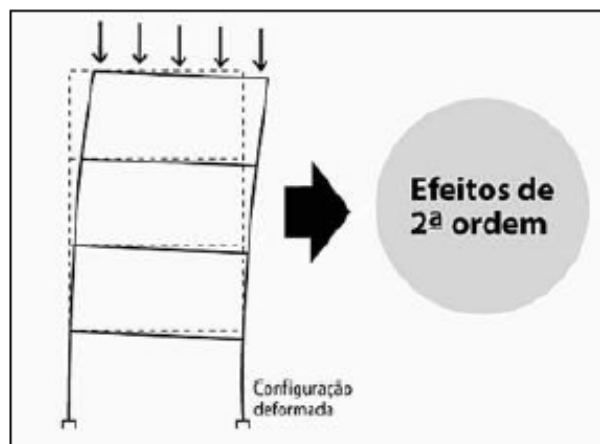


Figura 7: Efeito de 1ª Ordem  
Fonte: Kimura (2007).

#### 4.1.2 Análise em 2ª ordem

É aquela em que o cálculo da estrutura é realizado na sua posição deformada, ocasionando o aparecimento de efeitos adicionais chamados

"efeitos de segunda ordem", que tendem a desestabilizar a edificação. (KIMURA, 2007, p. 546). Esse tipo de efeito está ilustrado na figura 8.



**Figura 8: Efeito de 2ª Ordem**  
Fonte: Kimura (2007).

Efeitos de 2ª ordem são aqueles que se somam aos obtidos em uma análise de primeira ordem, quando a análise do equilíbrio passa a ser efetuada considerando a configuração deformada. Para sua determinação deve ser considerado o comportamento não linear dos materiais e podem ser desprezados sempre que não representarem acréscimo superior a 10 % nas reações e nas solicitações relevantes na estrutura. (ABNT NBR 6118:2014, item 15.2)

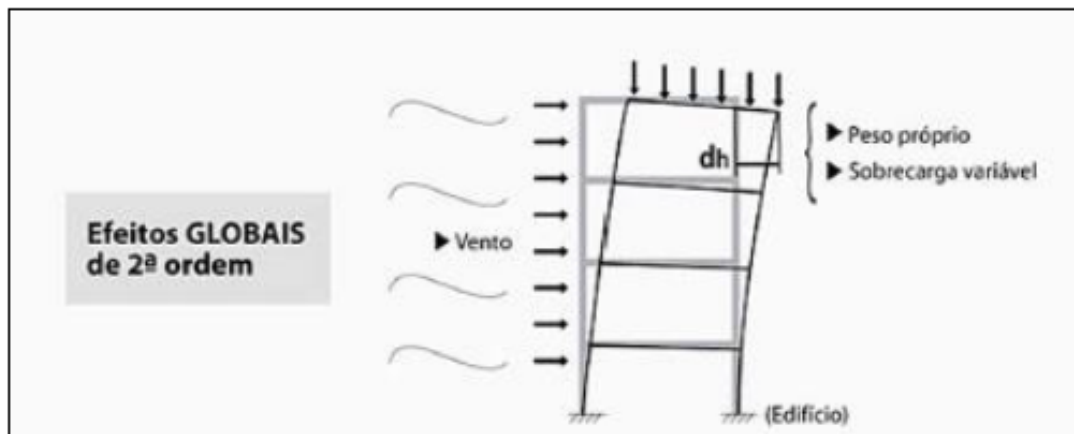
### **4.1.3 Definições e Classificações das Estruturas**

#### *4.1.3.1 Efeitos globais de 2ª ordem*

Sob a ação das cargas verticais e horizontais, os nós da estrutura deslocam-se horizontalmente. Os esforços de 2ª ordem decorrentes desses deslocamentos são chamados efeitos globais de 2ª ordem. (ABNT NBR 6118:2014, item 15.4.1)

Os efeitos globais estão relacionados ao edifício como um todo, isto é, ao conjunto completo formado pelos pilares, vigas e lajes. Por exemplo: um edifício submetido à ação do vento se desloca horizontalmente, e por essa razão, geram-se efeitos de segunda ordem devido à presença simultânea de

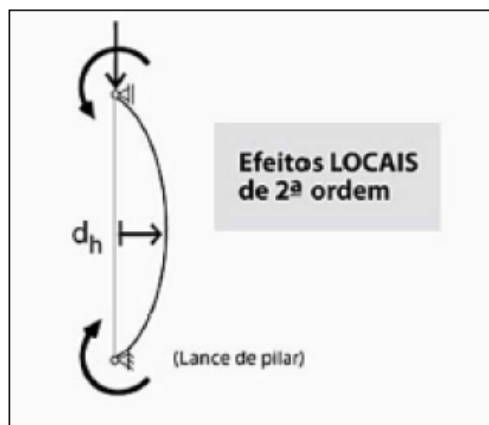
cargas verticais (peso próprio + sobrecarga). (KIMURA, 2007, p. 557). Esse tipo de efeito está ilustrado na figura 9.



**Figura 9: Efeitos globais de 2ª Ordem**  
Fonte: Kimura (2007).

#### 4.1.3.2 Efeitos locais de 2ª ordem

Nas barras da estrutura, como um lance de pilar, os respectivos eixos não se mantêm retilíneos, surgindo aí efeitos locais de 2ª ordem que, em princípio, afetam principalmente os esforços solicitantes ao longo delas. (ABNT NBR 6118:2014, item 15.4.1). Esse tipo de efeito está ilustrado na figura 10.



**Figura 10: Efeitos locais de 2ª Ordem**  
Fonte: Kimura (2007).

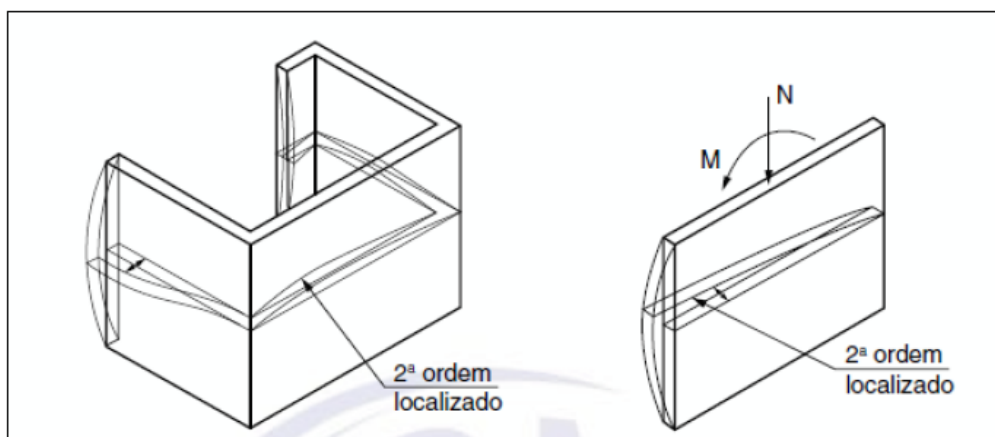
#### 4.1.3.3 Efeitos de 2ª ordem localizados

Em pilares-parede (simples ou compostos) pode-se ter uma região que apresenta não retilínea maior do que a do eixo do pilar como um todo. Nessas regiões surgem



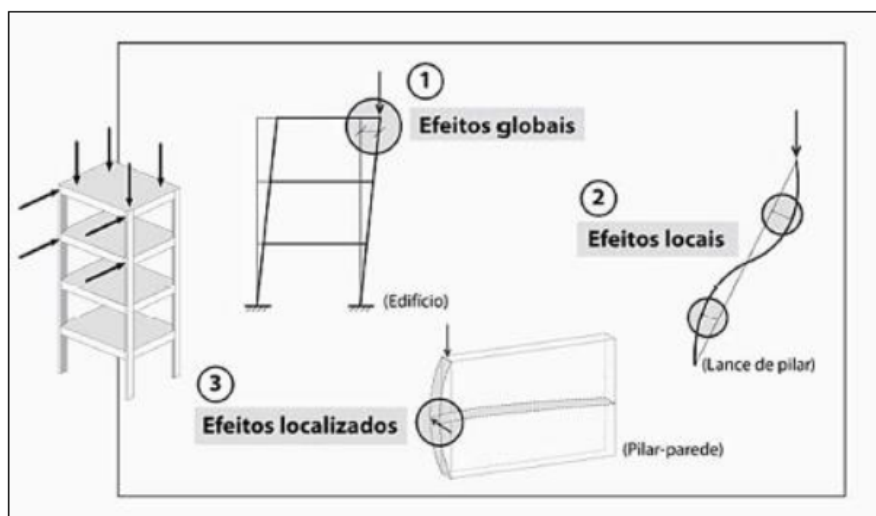
efeitos de 2ª ordem maiores, chamados de efeitos de 2ª ordem localizados. O efeito de 2ª ordem localizado, além de aumentar nessa região a flexão longitudinal, aumenta também a flexão transversal, havendo a necessidade de aumentar a armadura transversal nessas regiões. (ABNT NBR 6118:2014, item 15.4.1)

A figura 11 ilustra um exemplo de efeito de segunda ordem localizado.



**Figura 11: Efeitos de 2ª ordem localizados**  
Fonte: NBR 6118 (ABNT, 2014).

Na figura 12 tem-se uma visão geral dos tipos de efeito de 2ª ordem.



**Figura 12: Efeitos de 2ª Ordem**  
Fonte: Kimura (2007).

#### 4.1.3.4 Contraventamento

Por conveniência de análise, é possível identificar, dentro da estrutura, subestruturas que, devido à sua grande rigidez a ações horizontais, resistem à maior parte dos esforços decorrentes dessas ações. Essas subestruturas são chamadas subestruturas de contraventamento. Os elementos que não participam da subestrutura de

contraventamento são chamados elementos contraventados. (ABNT NBR 6118:2014, item 15.4.1)

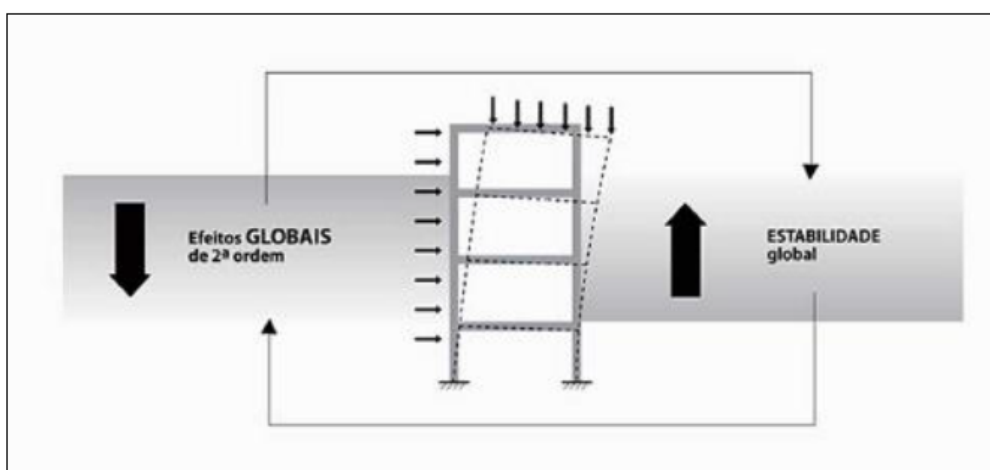
Em termos de cálculo, ao analisar as cargas de vento de uma estrutura, sua divisão acontece entre os pórticos de contraventamento, pois se considera que são esses que resistirão às solicitações no conjunto da estrutura. Por isso, o dimensionamento de seus elementos acontece de maneira diferente quando comparados com os pórticos contraventados.

## 4.2 Estabilidade global

A estabilidade global de um edifício está relacionada à estrutura como um todo, portanto esta se refere aos efeitos globais de segunda ordem apresentados anteriormente.

A estabilidade global de uma estrutura é inversamente proporcional à sua sensibilidade perante os efeitos de segunda ordem. Em outras palavras, quanto mais estável for à estrutura, menores serão os efeitos de segunda ordem. Ou ainda, quanto maiores forem os efeitos de segunda ordem, menos estável será a estrutura. (KIMURA, 2007, p. 558)

A relação entre a estabilidade global e os efeitos de segunda ordem está ilustrada na figura 13.



**Figura 13: Estabilidade Global**  
Fonte: Kimura (2007).

Dessa forma, é possível definir a estabilidade de um edifício através de uma estimativa dos efeitos globais de segunda ordem presentes na estrutura.

### 4.2.1 Coeficiente $\gamma_z$

É um parâmetro que avalia a estabilidade global de um edifício de concreto armado de forma simples e eficiente.

O coeficiente  $\gamma_z$  de avaliação da importância dos esforços de segunda ordem globais é válido para estruturas reticuladas de no mínimo quatro andares. Ele pode ser determinado a partir dos resultados de uma análise linear de primeira ordem, para cada caso de carregamento. (ABNT NBR 6118:2014, item 15.5.3)

Edifícios de concreto armado com valores de  $\gamma_z$  superiores a 1,3 possuem um grau de instabilidade elevado. O ideal é projetar estruturas com um  $\gamma_z$  inferior ou igual a 1,2. (KIMURA, 2007, p. 560)

De acordo com a tabela 3 pode-se dizer que quanto maior o valor de,  $\gamma_z$  maiores são os efeitos de segunda ordem e, portanto, mais instável é a estrutura.

**Tabela 3: Relação entre a parte decimal do número obtido com a magnitude dos efeitos globais de segunda ordem na estrutura**

$\gamma_z$	Significado
≈ 1.00	Efeitos de segunda ordem praticamente inexistentes
1.10	Efeitos de 2ª ordem em torno de 10% dos efeitos de 1ª ordem
1.15	Efeitos de 2ª ordem em torno de 15% dos efeitos de 1ª ordem
1.20	Efeitos de 2ª ordem em torno de 20% dos efeitos de 1ª ordem
...	Assim por diante

Fonte: Kimura (2007).

O valor de  $\gamma_z$  para cada combinação de carregamento é dado pela equação.

$$\gamma_z = \frac{1}{1 - \frac{\Delta M_{tot,d}}{M1_{tot,d}}}$$

Onde,

$\Delta M_{tot,d}$  é a soma dos produtos de todas as forças verticais atuantes na estrutura, com seus valores de cálculo, pelos deslocamentos horizontais de seus respectivos pontos de aplicação, obtidos em primeira ordem. (ABNT NBR 6118:2014, item 15.5.3)

$M1_{tot,d}$  é o momento de tombamento, ou seja, a soma dos momentos de todas as forças horizontais, com seus valores de cálculo, em relação à base da estrutura. (ABNT NBR 6118:2014, item 15.5.3)

#### 4.2.2 Parâmetro de instabilidade $\alpha$

Segundo a NBR 6118:2014, uma estrutura reticulada simétrica pode ser considerada como sendo de nós fixos se seu parâmetro de instabilidade  $\alpha$  for menor que o valor  $\alpha_1$ , conforme a expressão:

$$\alpha = H_{tot} \sqrt{\frac{N_k}{E_{cs} I_c}}$$

Onde,

$n$  é o número de níveis de barras horizontais (andares) acima da fundação ou de um nível pouco deslocável do subsolo;

$H_{tot}$  é a altura total da estrutura, medida a partir do topo da fundação ou de um nível pouco deslocável do subsolo;

$N_k$  é o somatório de todas as cargas verticais atuantes na estrutura (a partir do nível considerado para o cálculo de  $H_{tot}$ ), com seu valor característico;

$E_{cs} I_c$  representa o somatório dos valores de rigidez de todos os pilares na direção considerada.

No caso de estruturas de pórticos, de treliças ou mistas, ou com pilares de rigidez variável ao longo da altura, pode ser considerado o valor da expressão  $E_{cs} I_c$  de um pilar equivalente de seção constante.

#### 4.2.3 Estruturas de nós fixos e nós móveis

A NBR 6118:2014, item 15.4.2 - Estruturas de nós fixos e estruturas de nós móveis classifica dois tipos de estruturas segundo os efeitos globais de segunda ordem:

- Estrutura de nós fixos: é aquela em que os deslocamentos horizontais são pequenos e, por decorrência, os efeitos de segunda ordem são desprezíveis (inferiores a 10% dos respectivos esforços de primeira ordem).
- Estrutura de nós móveis: é aquela em que os deslocamentos horizontais não são pequenos e, portanto, os efeitos de segunda ordem são importantes (superiores a 10% dos respectivos esforços de primeira ordem).

A definição do tipo da estrutura, segundo essa classificação, pode ser facilmente efetuada com os valores dos coeficientes  $\gamma_z$  e  $\alpha$  calculados: (KIMURA, 2007, p. 573 apud ABNT NBR 6118:2014, item 15.4.2)

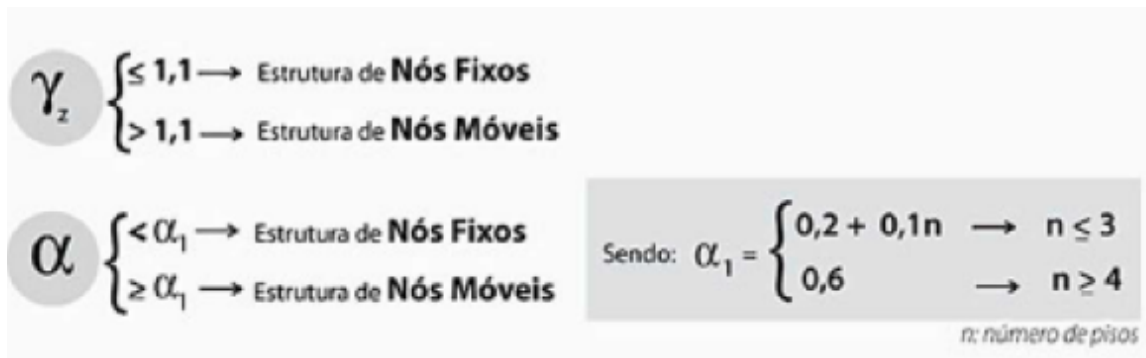


Figura 14: Relação entre os valores dos coeficientes  $\gamma_z$  e  $\alpha$  e os nós  
Fonte: Kimura (2007).

## 5 APRESENTAÇÃO DO EDIFÍCIO

A edificação em estudo será construída em Itaguara, cidade do interior de Minas Gerais. Terá uso misto, comercial e residencial. Possui 17,00 metros de altura e 04 pavimentos, conforme apresentado a seguir.



Figura 15: Localização do terreno  
Fonte: Google Earth (2022).

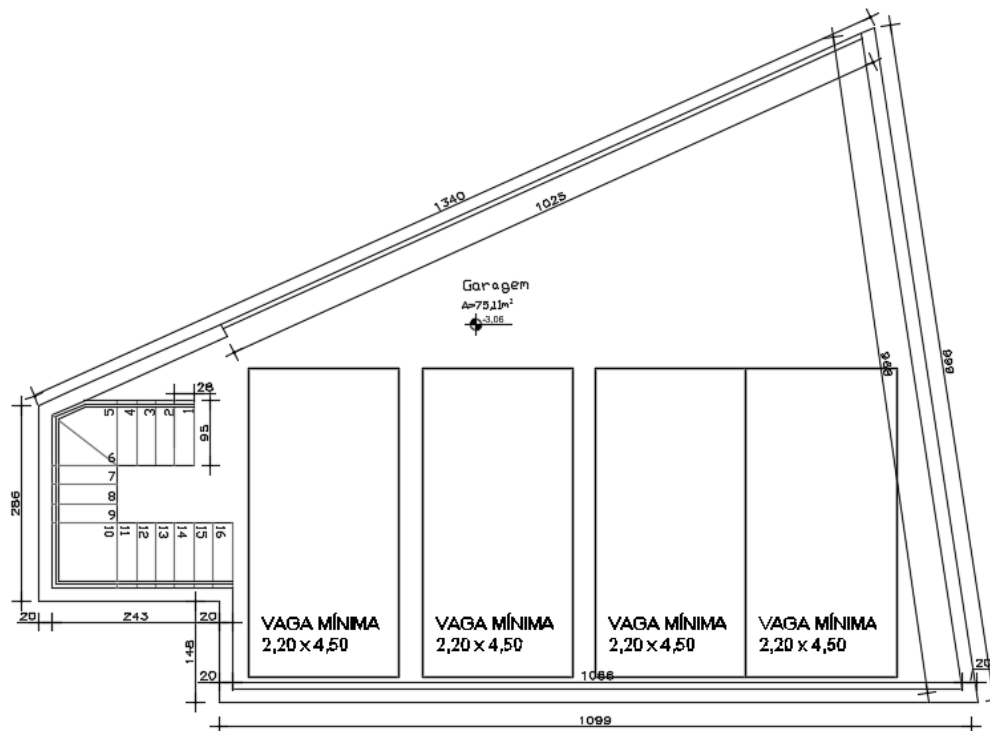


Figura 16: Planta baixa subsolo  
Fonte: O autor (2022).

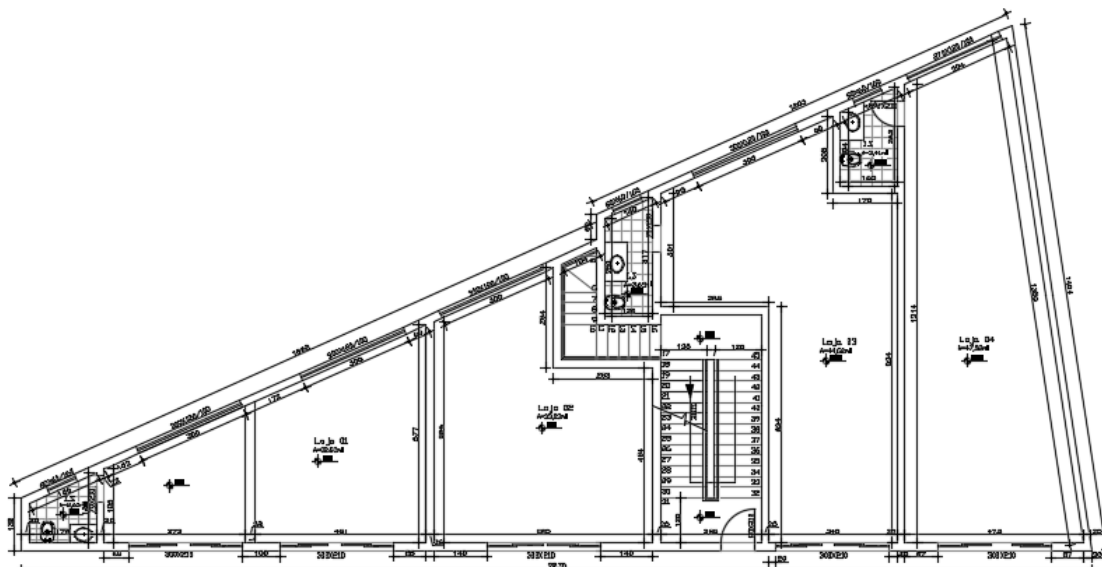


Figura 17: Planta baixa térreo  
Fonte: O autor (2022).

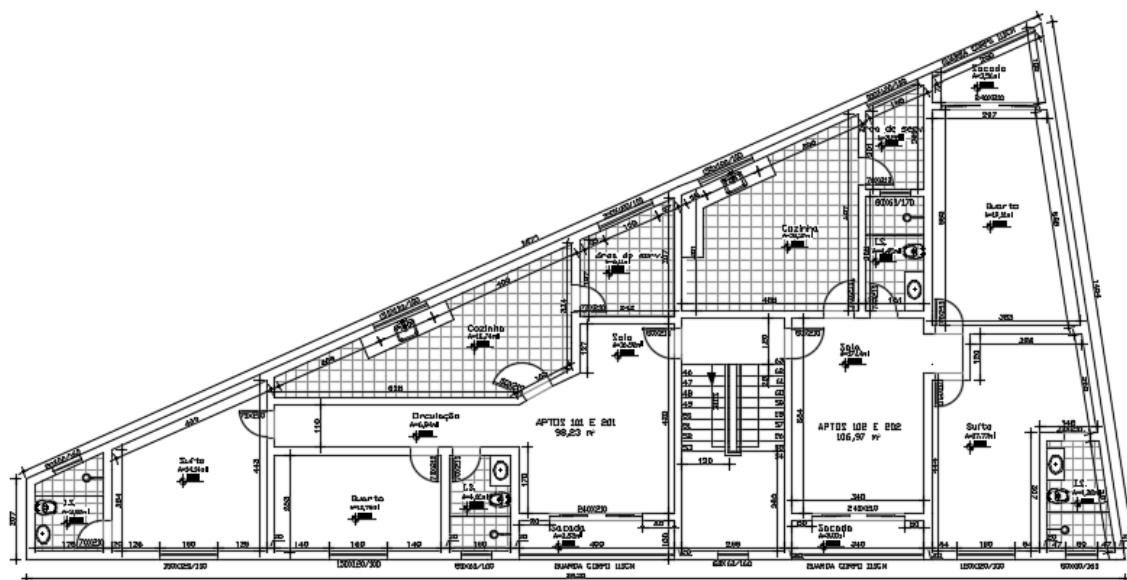


Figura 18: Planta baixa apartamento (02 pavimentos)  
Fonte: O autor (2022).

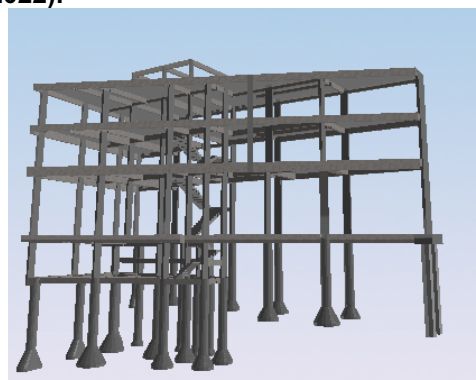


Figura 19: Modelo estrutural (vistas em 3D)  
Fonte: Extraído do TQS (2022).

## 6 APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

Nas fases de desenvolvimento de edifícios, é comum surgirem para o engenheiro projetista desafios em geral relacionados à concepção da solução estrutural, ao modelo a ser adotado e aos tipos de carregamentos aos quais esse edifício estará submetido, principalmente para engenheiros recém-formados já que a ação do vento nas edificações é um tema pouco abordado na graduação.

Na edificação em estudo, durante a consideração dos esforços gerados pela ação do vento surgiram dúvidas quanto à forma de aplicação desse carregamento devido as suas características diante das limitações da norma.

Sabe-se que a realização do estudo do túnel de vento nessa situação é inviável, cabendo o bom senso do engenheiro projetista ao estabelecer as forças de vento na edificação. Ademais, trata-se de uma estrutura de pequeno porte.

Após diversas pesquisas de estudos relacionados ao tema, conforme já exposto anteriormente, com o objetivo de melhorar o efeito provocado pelo vento, utilizando a ferramenta computacional, procedeu-se ao acréscimo de mais ângulos de incidência na fachada. Foram inseridos ângulos, variando de 15 em 15°, conforme imagens a seguir.

Na aba “Dados do Edifício”, seção “Cargas”, “Vento”, foram inseridas as variações de ângulos:

Dados do edifício: Projeto projeto TCC - 0001

Gerais | Modelo | Pavimentos | Materiais | Cobrimentos | Cargas | Critérios | Gerenciamento

Verticais | Vento | Adicionais | Adicionais-2 | Combinações

Ângulo	C.A.	Def Cot.	Cot ini
1	0	0,87	Não
2	15	0,87	Não
3	30	0,89	Não
4	45	0,99	Não
5	60	1,06	Não
6	75	1,13	Não
7	90	1,19	Não
8	105	1,19	Não

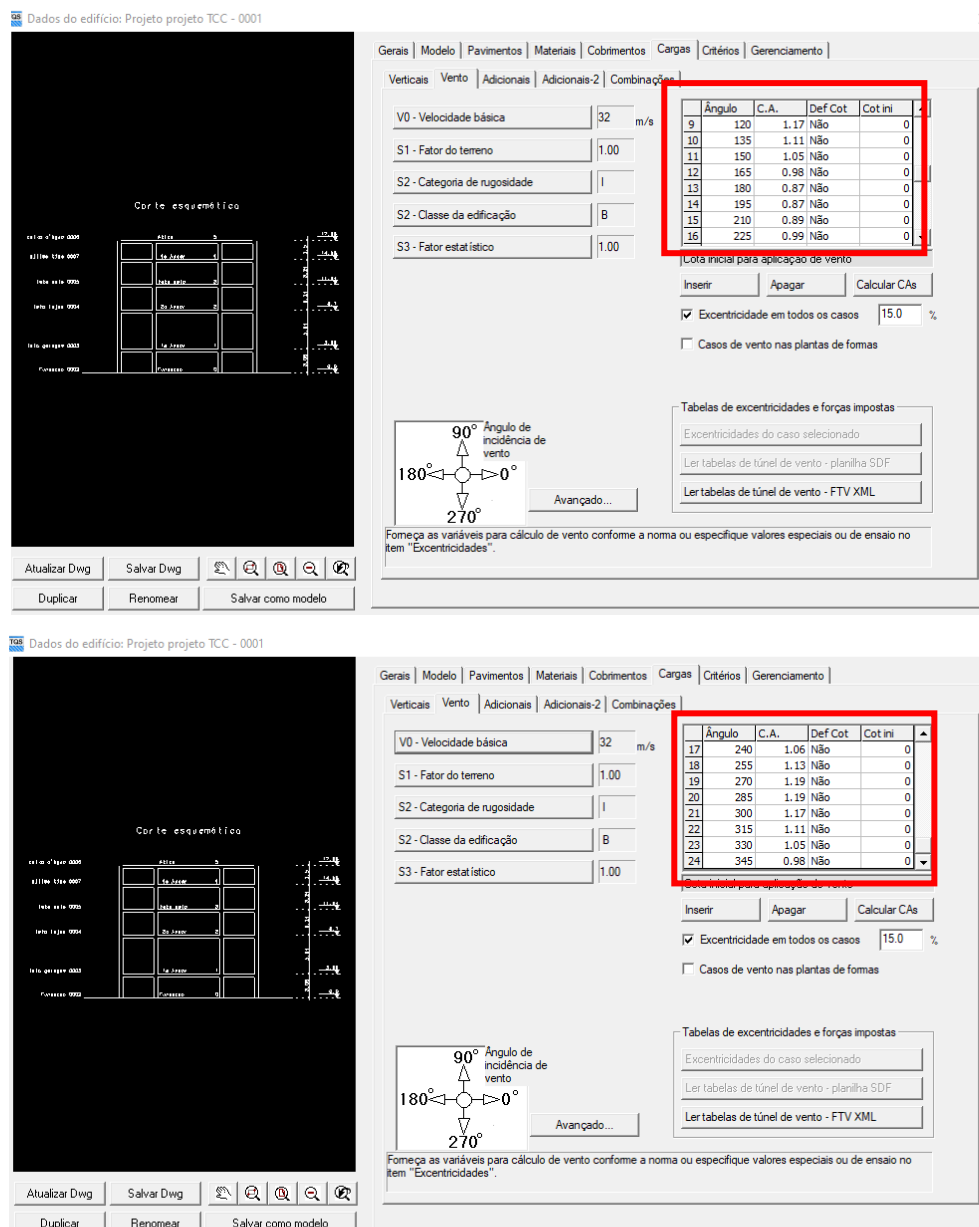
V0 - Velocidade básica: 32 m/s  
 S1 - Fator do terreno: 1.00  
 S2 - Categoria de rugosidade: I  
 S2 - Classe da edificação: B  
 S3 - Fator estatístico: 1.00

Excentricidade em todos os casos: 15.0 %  
 Casos de vento nas plantas de formas

Excentricidades do caso selecionado  
 Ler tabelas de túnel de vento - planilha SDF  
 Ler tabelas de túnel de vento - FTV XML

Formeça as variáveis para cálculo de vento conforme a norma ou especifique valores especiais ou de ensaio no item "Excentricidades".





**Figura 20: Inserção de ângulos de incidência de vento**  
 Fonte: Extraído do TQS (2022).

Foram criados 24 ângulos de incidência e após o processamento global da estrutura, compararam-se os esforços obtidos no pórtico espacial, especificamente no pilar-parede P21, objeto deste estudo, para os ângulos previstos na norma com os ângulos novos inseridos.

Com o intuito de melhor compreensão será considerado:

- **1ª opção:** ângulos de incidência do vento previsto na NBR, sendo eles 0°, 90°, 180° e 270°.
- **2ª opção:** ângulos de incidência do vento de 0° a 345° variando de 15 em 15°.

Primeiramente verifica-se que o Momento  $M_y$  no pilar-parede P21 se destaca entre os demais para as duas situações e por isso foi escolhido para comparação.

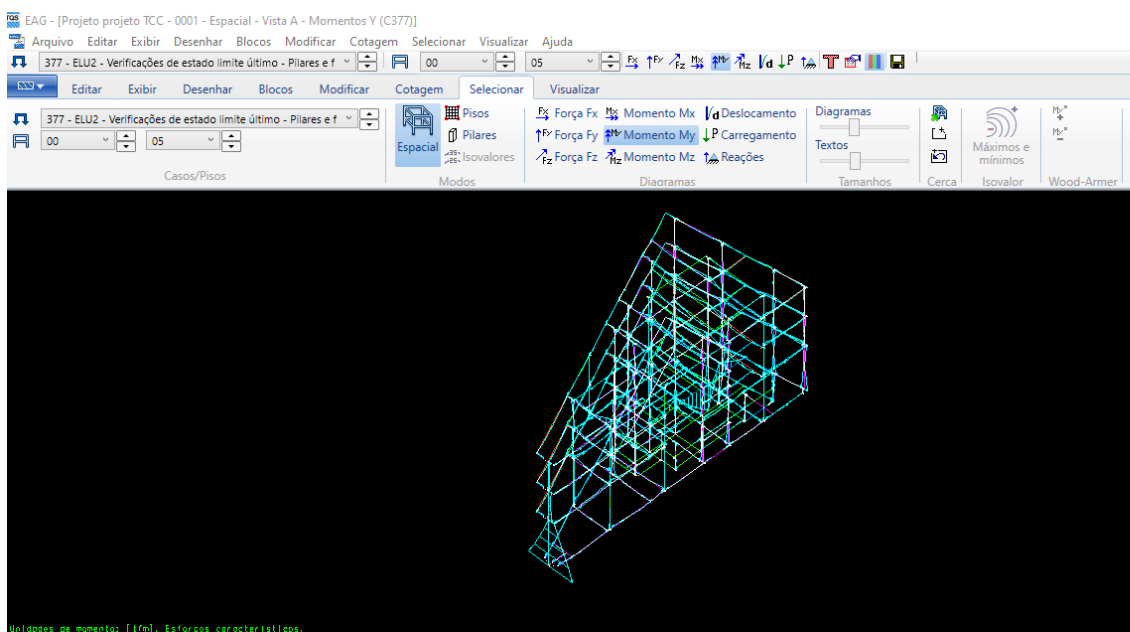


Figura 21: Momento do pilar-parede P21  
Fonte: Extraído do TQS (2022).

Segue-se então para o dimensionamento do P21.



Figura 22: Dimensionamento na 1ª opção  
Fonte: Extraído do TQS (2022).

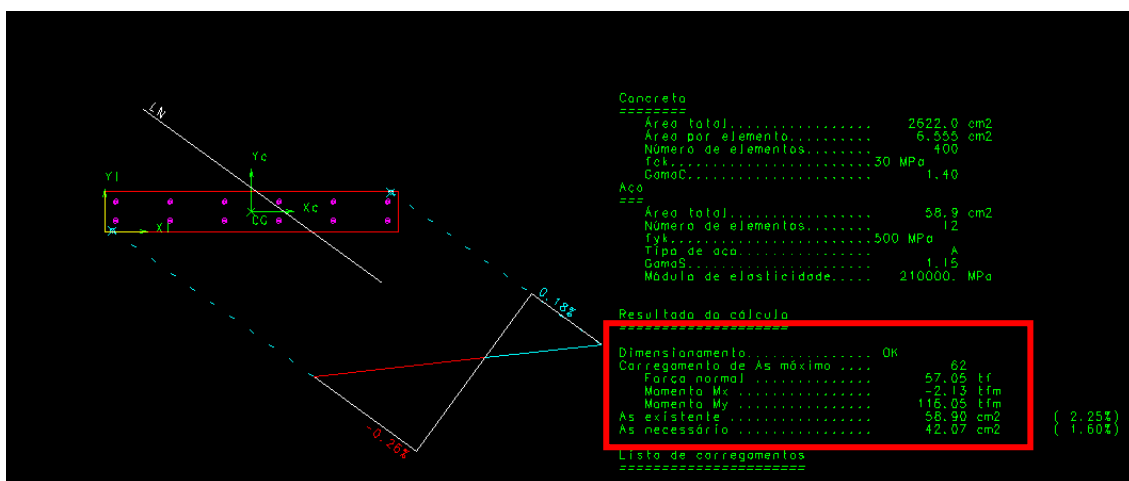


Figura 23: Dimensionamento na 2ª opção  
 Fonte: Extraído do TQS (2022).

O momento My considerado para o dimensionamento é:

- **1ª opção:** 76,41tf.m, com o carregamento obtido do caso 19.
- **2ª opção:** 116,05 tf.m, com o carregamento obtido do caso 62.

A seguir apresenta-se o extrato do programa com a listagem de casos e combinações, estando demarcados os casos utilizados no dimensionamento.

#### Casos de carregamento simples

Sufixo "\_R" Carga acidental reduzida  
 Sufixo "\_V" Vigas de transição c/inércia normal  
 Sufixo "\_E" Engastado, com caso correspondente articulado

Num	Prefixo	Título
1	TODAS	Todas permanentes e acidentais dos pavimentos
2	PP	Peso Próprio
3	PERM	Cargas permanentes
4	ACID	Cargas acidentais
5	EMPU	Empuxo
6	VENT1	Vento (1) 90°
7	VENT2	Vento (2) 270°
8	VENT3	Vento (3) 0°
9	VENT4	Vento (4) 180°
10	TODAS_V	Todas permanentes e acidentais dos pavimentos - VTN
11	PP_V	Peso Próprio - VTN
12	PERM_V	Cargas permanentes - VTN
13	ACID_V	Cargas acidentais - VTN

Num	AC	VT	Título
14			ELU1/PERMACID/PP+PERM+EMPU+ACID
15			ELU1/ACIDCOMB/PP+PERM+EMPU+ACID+0.6VENT1
16			ELU1/ACIDCOMB/PP+PERM+EMPU+ACID+0.6VENT2
17			ELU1/ACIDCOMB/PP+PERM+EMPU+ACID+0.6VENT3
18			ELU1/ACIDCOMB/PP+PERM+EMPU+ACID+0.6VENT4
19			ELU1/ACIDCOMB/PP+PERM+EMPU+0.5ACID+VENT1
20			ELU1/ACIDCOMB/PP+PERM+EMPU+0.5ACID+VENT2
21			ELU1/ACIDCOMB/PP+PERM+EMPU+0.5ACID+VENT3
22			ELU1/ACIDCOMB/PP+PERM+EMPU+0.5ACID+VENT4
23			FOGO/PERMVAR/PP+PERM+EMPU+0.3ACID
24			ELS/CFREQ/PP+PERM+EMPU+0.4ACID
25			ELS/CFREQ/PP+PERM+EMPU+0.3ACID+0.3VENT1
26			ELS/CFREQ/PP+PERM+EMPU+0.3ACID+0.3VENT2
27			ELS/CFREQ/PP+PERM+EMPU+0.3ACID+0.3VENT3
28			ELS/CFREQ/PP+PERM+EMPU+0.3ACID+0.3VENT4
29			ELS/CQPERM/PP+PERM+EMPU+0.3ACID
30			COMBFLU/COMBFLU/PP+PERM+EMPU+0.3ACID
31	X		ELU1/PERMACID/PP_V+PERM_V+EMPU+ACID_V

**Figura 24: Casos de carregamento na 1ª opção**  
**Fonte: Extraído do TQS (2022).**

Casos de carregamento simples

-----

Sufixo "\_R" Carga acidental reduzida  
 Sufixo "\_V" Vigas de transição c/inércia normal  
 Sufixo "\_E" Engastado, com caso correspondente articulado

Num	Prefixo	Título
1	TODAS	Todas permanentes e acidentais dos pavimentos
2	PP	Peso Próprio
3	PERM	Cargas permanentes
4	ACID	Cargas acidentais
5	EMPU	Empuxo
6	VENT1	Vento (1) 0°
7	VENT2-	Vento (2) 0° -15%
8	VENT3+	Vento (3) 0° +15%
9	VENT4	Vento (4) 15°
10	VENT5-	Vento (5) 15° -15%
11	VENT6+	Vento (6) 15° +15%
12	VENT7	Vento (7) 30°
13	VENT8-	Vento (8) 30° -15%
14	VENT9+	Vento (9) 30° +15%
15	VENT10	Vento (10) 45°
16	VENT11-	Vento (11) 45° -15%
17	VENT12+	Vento (12) 45° +15%
18	VENT13	Vento (13) 60°
19	VENT14-	Vento (14) 60° -15%
20	VENT15+	Vento (15) 60° +15%
21	VENT16	Vento (16) 75°

36	VENT31	Vento	(31)	150°
37	VENT32-	Vento	(32)	150° -15%
38	VENT33+	Vento	(33)	150° +15%
39	VENT34	Vento	(34)	165°
40	VENT35-	Vento	(35)	165° -15%
41	VENT36+	Vento	(36)	165° +15%
42	VENT37	Vento	(37)	180°
43	VENT38-	Vento	(38)	180° -15%
44	VENT39+	Vento	(39)	180° +15%
45	VENT40	Vento	(40)	195°
46	VENT41-	Vento	(41)	195° -15%
47	VENT42+	Vento	(42)	195° +15%
48	VENT43	Vento	(43)	210°
49	VENT44-	Vento	(44)	210° -15%
50	VENT45+	Vento	(45)	210° +15%
51	VENT46	Vento	(46)	225°
52	VENT47-	Vento	(47)	225° -15%
53	VENT48+	Vento	(48)	225° +15%
54	VENT49	Vento	(49)	240°
55	VENT50-	Vento	(50)	240° -15%
56	VENT51+	Vento	(51)	240° +15%
57	VENT52	Vento	(52)	255°
58	VENT53-	Vento	(53)	255° -15%
59	VENT54+	Vento	(54)	255° +15%
60	VENT55	Vento	(55)	270°
61	VENT56-	Vento	(56)	270° -15%
62	VENT57+	Vento	(57)	270° +15%
63	VENT58	Vento	(58)	285°
64	VENT59-	Vento	(59)	285° -15%
65	VENT60+	Vento	(60)	285° +15%

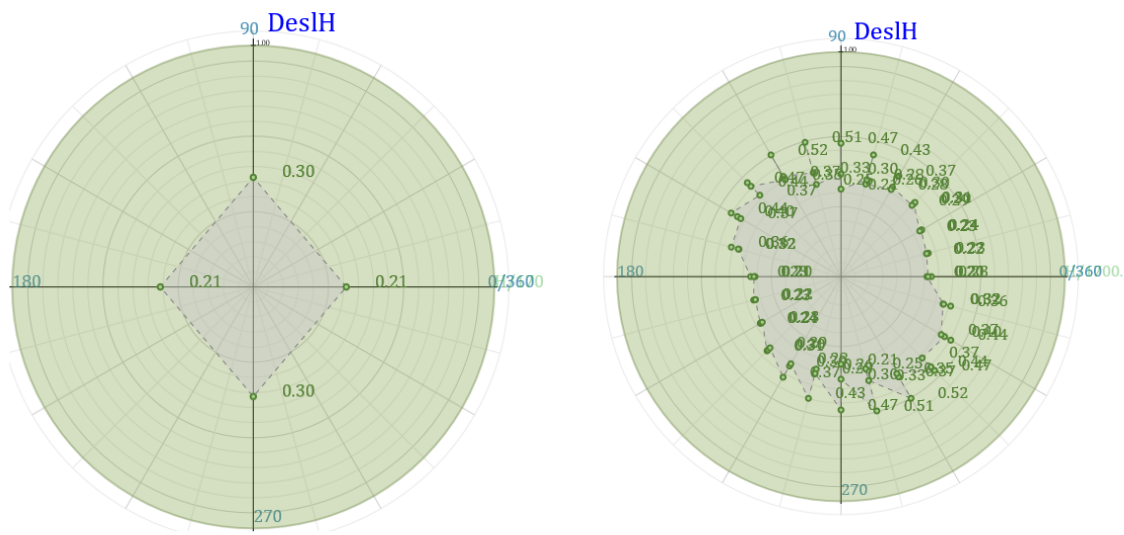
**Figura 25: Casos de carregamento na 2ª opção**  
**Fonte: Extraído do TQS (2022).**

Conclui-se, desse modo, que o valor de momento utilizado para o dimensionamento do pilar-parede para a 2ª opção foi obtido do caso de vento de uma das variações de ângulos inseridas no TQS e que possui um valor consideravelmente maior.

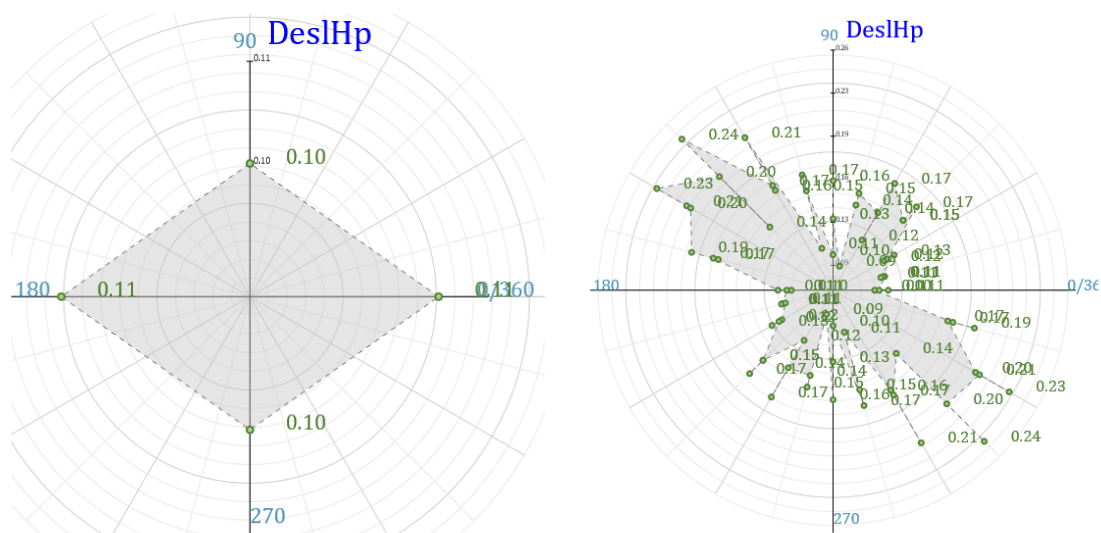
Com relação à estabilidade global, a seguir os parâmetros analisados em ambas as situações.



**Figura 26: Parâmetro  $\gamma_z$**   
**Fonte: Extraído do TQS (2022).**



**Figura 27: Deslocamento horizontal absoluto**  
 Fonte: Extraído do TQS (2022).



**Figura 28: Deslocamento horizontal entre pisos**  
 Fonte: Extraído do TQS (2022).

Portanto, é válida essa consideração para edifícios de pequeno porte. A utilização do software permite ao engenheiro projetista modelar e avaliar com mais precisão o modelo. Sem o uso do programa não seria possível avaliar a estrutura diante de diversos ângulos de incidência do vento.

## 7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Conseguiu-se, neste trabalho, abordar um tema que é pouco explorado na graduação, mas que é indispensável na concepção e consideração de esforços de qualquer edifício já que a ação do vento é um fator externo que influencia diretamente no desempenho da edificação.

Conforme exposto, de acordo com a norma são necessárias aproximações com relação ao formato da edificação, além da consideração de poucos ângulos de incidência do vento. Com o intuito de aproximar ao máximo da realidade, procedeu-se a criação de mais ângulos de incidência do vento para esse caso estudado sendo que foi indispensável à utilização do programa TQS para tal verificação.

Apesar de a norma recomendar o estudo em túnel de vento, sabe-se que a realização desse ensaio é inviável em algumas situações, como é o caso do edifício em estudo que apesar de possuir uma geometria triangular é de pequeno porte. Caso o edifício fosse muito alto, composto por muitos pavimentos, o estudo em túnel de vento seria fundamental.

O estudo realizado apresenta uma sugestão de simplificação para edifícios de pequeno porte com geometria não prevista na norma brasileira, com a utilização de software TQS para a ação do vento, entretanto é necessária uma análise mais criteriosa e aprofundada para validar os parâmetros das simulações efetuadas. Sugere-se também a utilização da referência estrangeira “Recommendations for Calculating the Effects of Wind on Constructions” para complementação das análises.

Em suma, a adoção dos modelos comparativos teve como objetivo simular a influência da ação do vento, para o caso estudado, nos dois modelos propostos, sendo o primeiro com os ângulos previstos na norma ( $0^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $180^\circ$  e  $270^\circ$ ) e o segundo com a inclusão de mais ângulos de incidência (variando de 15 em  $15^\circ$ ).

Os resultados obtidos mostram que do ponto de vista do Estado Limite Último, verificou-se para o pilar em estudo que a combinação última foi obtida através dos esforços provocados pela ação do vento para um ângulo de incidência não contemplado na norma. Ou seja, para o dimensionamento final

do pilar-parede P21 foi utilizada a combinação em que os esforços foram obtidos por meio do ângulo  $285^\circ$  de incidência do vento, inserido no programa.

Quanto ao Estado Limite de Serviço, na verificação de deslocamentos excessivos, foi possível concluir que em ambas as situações foram atendidas. Observou-se, porém, que com mais ângulos de incidência a análise é mais refinada e extrapolada.

Assim, os resultados obtidos com a aplicação dos critérios da norma se mostraram contra a segurança quando comparados aos resultados obtidos por meio da metodologia adotada neste trabalho.

Por fim, destaca-se a importância da realização das simplificações de forma correta para se obter segurança no projeto. Além disso, frisa-se a importância de complementação da norma brasileira tornando-a mais abrangente, visto que é preciso que a estimativa de carregamento do vento, feita a partir dos coeficientes aerodinâmicos fornecidos pela norma brasileira NBR 6123:2013 ou em ensaios de túnel de vento, representem uma situação o mais próxima possível da realidade, pois a ação do vento influencia diretamente na estabilidade global da estrutura.



## REFERÊNCIAS

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

ARRAIS, G.P. **Pressões exercidas pelo vento em fachadas de edifícios altos**: estudo comparativos dos valores obtidos através de ensaios em túnel de vento e especificações normativas. 2011. 81f. Dissertação. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (2013). NBR 6123: **Forças devido ao vento em edificações**. Rio de Janeiro: ABNT.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (2014). NBR 6118: **Projeto de estruturas de concreto – Procedimento**. Rio de Janeiro: ABNT.

BÊNIA, M.C.D. **Determinação dos efeitos de vizinhança na resposta dinâmica de edifícios altos sob a ação do vento**. 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre, 2013.

BLESSMANN, J. **Ação do Vento em Edifícios**. 2a ed. Porto Alegre: Ed. Universidade/UFRGS, 1989.

BLESSMANN, J. **Acidentes causados pelo vento**. 4. ed. Porto Alegre: UFRGS, 2001.

CURCI, H.C.F et al. **Estudo da ação do vento em um edifício de múltiplos pavimentos**. Avaliação da resposta estrutural a partir de ensaios de túnel de vento e programa convencional. 126p. Dissertação - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2017.

FERREIRA, J.A.T. et al. **Efeito do vento no dimensionamento de edifícios de concreto armado**. Revista Ibracon de Estruturas e Materiais. Volume 9, número 6. Dezembro, 2016.

GONÇALVES, R.M. (2007). **Ação do vento em edificações: teoria e exemplos**. São Carlos: Departamento de Engenharia de Estruturas, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2007.

KIMURA, A.E. **Informática aplicada em estruturas de concreto armado**: cálculos de edifício com uso de sistemas computacionais. Editora Pini. São Paulo, 2007.

MATTIAS, L.W.A. **Análise dinâmica de edifício de seção h sob ação do vento**. 2021. 129 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2021.

MONCAYO, Z.W.J. (2011). **Análise de segunda ordem global em edifícios com estrutura de concreto armado**. 221p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2011.

VIEIRA, G.S. **Estudo experimental dos esforços solicitantes em um edifício alto devidos à ação do vento considerando a influência de edificações vizinhas**. Universidade de Brasília, 2016.

VOGADO, M.W. **Caracterização aerodinâmica de edifícios altos com planta em formato de “v” através de análise espectral**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2018.

WORDELL, F. **Avaliação da Instabilidade Global de Edifícios Altos**. 2003. Trabalho (Mestrado-Profissional em Estruturas) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre, 2003.