TEREZINHA AMANNA SPÍNDOLA SAULNIER DE PIERRELEVÉE

PRESSÕES EXERCIDAS PELO VENTO EM UM PAVILHÃO INDUSTRIAL DE DUAS ÁGUAS: ESTUDO COMPARATIVO ENTRE OS VALORES OBTIDOS ATRAVÉS DE ENSAIO EM TÚNEL DE VENTO E AS ESPECIFICAÇÕES DA NBR 6123/1988

Porto Alegre
2018

TEREZINHA AMANNA SPÍNDOLA SAULNIER DE PIERRELEVÉE

PRESSÕES EXERCIDAS PELO VENTO EM UM PAVILHÃO INDUSTRIAL DE DUAS ÁGUAS: ESTUDO COMPARATIVO ENTRE OS VALORES OBTIDOS ATRAVÉS DE ENSAIO EM TÚNEL DE VENTO E AS ESPECIFICAÇÕES DA NBR 6123/1988

Trabalho de Diplomação a ser apresentado ao Departamento de Engenharia Civil do Centro Universitário Ritter dos Reis, como parte dos requisitos para obtenção do título de Engenheiro Civil.

Orientador: Prof. Gladimir de Campos Grigoletti

Porto Alegre

2018

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, a toda a minha família, em especial, ao meu pai Bernardo Moreira Rodrigues, e a minha mãe Maria da Piedade Bastos Spíndola Rodrigues, que sempre lutaram e abdicaram até mesmo dos seus sonhos, para proporcionar-me o melhor, e por estarem sempre ao meu lado nos momentos de dificuldade.

Agradeço aos meus irmãos Larissa Spindola Rodrigues e Jonathan Spindola Rodrigues, que por mais difícil que fossem as circunstâncias, sempre tiveram paciência e confiança.

Ao meu esposo, Pedro André Rodrigues Saulnier de Pierrelevée, que me auxiliou e foi meu porto seguro em várias etapas da minha graduação; sem ele nada disso seria possível.

A minha filha, Alice Spíndola Rodrigues Saulnier de Pierrelevée, que me encoraja e me dá forças para lutar pelos meus ideais.

A minha sogra, Mariléa Moreira Rodrigues, por cuidar exclusivamente da minha filha, para que eu pudesse me dedicar à faculdade.

Aos meus tios e tias que durante toda minha trajetória me deram todo suporte que precisei para estudar e sempre acreditaram em meu potencial.

Ao meu Professor e orientador Gladimir Grigoletti, pelo auxílio, paciência e dedicação durante o período de elaboração deste trabalho.

Enfim, agradeço a todos os envolvidos que de alguma maneira estiveram presente para que a realização deste trabalho de conclusão de curso se tornasse possível.

“O que é escrito sem esforço em geral é lido sem prazer”

(Samuel Johnson)

RESUMO

Este trabalho é resultado de uma análise comparativa entre as orientações da NBR 6123/1988, na obtenção de coeficientes aerodinâmicos, de pressão externa e interna, com os resultados obtidos experimentalmente. Tem como objetivo fazer uma verificação de aplicação desta norma. Neste estudo, é analisado um pavilhão industrial com duas águas, considerando-se 4 combinações entre os tipos de aberturas e a sua localização. Primeiramente são determinadas as pressões externas e internas conforme as orientações da NBR 6123/1988. Para o cálculo da pressão interna é utilizado o método proposto no Anexo D da Norma, com exceção, do caso 1, que além de usar o método do anexo, também se utilizou as especificações contidas no item 6.2.5 da Norma. Outro ponto importante considerado neste trabalho é o fato desta normativa, não orientar quanto ao tipo e a localização das aberturas existentes em uma edificação e considerar apenas as suas áreas de aberturas, porém, através do resultado obtido experimentalmente, comprova-se que o tipo de abertura influencia nos valores de pressão interna e deve ser levada em consideração no seu cálculo.Com bases nesses resultados, concluiu-se que, pelo menos para os casos analisados, os valores obtidos para os coeficientes de pressão externa, seguindo o que especifica a Norma, se sobressai sobre os valores experimentais, demostrando o quão é conservadora.

Palavras chave: Ação do vento. Pressão interna e externa. Pavilhões industrias. Coeficientes de pressão.

ABSTRACT

This work is the result of a comparative analysis between the guidelines of NBR 6123/1988, in order to obtain aerodynamic coefficients, external and internal pressure, with the results obtained experimentally. It aims to make a verification of the application of this standard. In this study, an industrial building with two waters is analyzed, considering 4 combinations between the types of openings and their location. First, the external and internal pressures are determined according to the guidelines of NBR 6123/1988. For the calculation of the internal pressure, the method proposed in Annex D of the Standard is used, except for case 1, which in addition to using the method of the annex, also used the specifications contained in item 6.2.5 of the Standard. Another important point considered in this work is the fact that this regulation does not guide the type and the location of existing openings in a building and consider only its areas of openings, however, through the result obtained experimentally, it is proven that the type of In this study, it was concluded that, at least for the analyzed cases, the values obtained for the external pressure coefficients, following the Norma, stands out on the experimental values, demonstrating how conservative it is.

Key words: Wind action. Internal and external pressure. Industrial building. Pressure coefficients.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Esquema de formação do vento 17

Figura 2: Perfil de velocidade do vento 18

Figura 3: Relação entre a rugosidade e o perfil de velocidade.....19

Figura 4: Pressão interna em função da localização das grandes aberturas 22

Figura 5: Escoamento do vento em função da inclinação do telhado (30°, 45° e 60°) 23

Figura 6: Mapa de isopletas 25

Figura 7: Fator topográfico S_1 (z).....26

Figura 8: Ação do vento nas paredes de edificações em planta retangular a 0° e 90° 37

Figura 9: Ângulo de incidência do vento em telhados com duas águas.....38

Figura 10: Vento perpendicular a uma face permeável e vento perpendicular a uma face impermeável 39

Figura 11: Vento perpendicular à abertura dominante 40

Figura 12: Abertura dominante na face sotavento.....40

Figura 13: Desenho esquemático em perspectiva do pavilhão analisado.....46

Figura 14: Perspectiva do modelo do pavilhão com suas dimensões adaptadas.....48

Figura 15: Localização e a proporção, em relação à área do oitão das aberturas para cada caso analisado 49

Figura 16: Tipos de aberturas e suas respectivas áreas para os casos 1, 2, 3 e 4 analisados 50

Figura 17: Representação da menor e da maior dimensão em planta em corte do pavilhão e a sua impermeabilidade nas paredes laterais para área de abertura equivalente a 1/2 da abertura do oitão.....52

Figura 18: Coeficientes de pressão e de forma, externos, para as paredes frontais e laterais 53

Figura 19: Coeficientes de pressão e de forma externos para cobertura, para um vento a 0° 54

Figura 20: Perspectiva do pavilhão do caso 1a, localização do portão no oitão frontal.....55

Figura 21: Fachada principal (caso 1), com dimensões da abertura localizada no oitão frontal do pavilhão 56

Figura 22: Pressão interna, provocada pela presença de abertura dominante na face de barlavento a 0°, para o caso 1 57

Figura 23: Perspectiva do pavilhão para caso 2, com abertura no oitão frontal e aberturas nas laterais nos módulos A3 e B3 57

Figura 24: Perspectiva do pavilhão para caso 3, com abertura no oitão frontal e aberturas nas nos módulos A3 e B3.....58

Figura 25: Perspectiva do pavilhão para caso 4, com abertura no oitão frontal, do tipo furos circulares, e aberturas nas laterais (direita e esquerda) 59

Figura 26: Distribuição das pressões externas no pavilhão para um vento turbulento e deslizante 60

Figura 27: Sobreposição dos valores obtidos experimentalmente e analiticamente para pressão externa nos fechamentos laterais, para vento a 0° 62

Figura 28: Sobreposição dos valores obtidos experimentalmente e analiticamente para pressão externa, no oitão frontal, a barlavento para vento a 0º 63

Figura 29: Sobreposição dos valores obtidos experimentalmente e analiticamente para pressão externa, no oitão dos fundos, sotavento para vento a 0º 64

Figura 30: Cargas em kgf/m² nas faces laterais, barlavento e sotavento, para vento a 0°, obtido conforme NBR 6123/1988 para h=7,5m e θ=12° 66

LISTAS DE TABELAS E QUADROS

Quadro 1: Valores de S_1 de acordo com inclinação média do talude 27

Quadro 2: Classificação das categorias de acordo com rugosidade do terreno 28

Quadro 3: Classificação das classes das edificações em função das suas dimensões 29

Tabela 1: Valores de p e b 30

Tabela 2: Fator S_2 31

Tabela 3: Fator S_3 32

Tabela 4: Coeficientes de pressão e de forma, externos 35

Tabela 5: Coeficientes de pressão e de forma, externos, para telhados com duas águas 36

Quadro 4: Relação entre A_d/A_S na determinação de c_{pi} 39

Quadro 5: Relação entre A_d/A_S na determinação de c_{pi} 41

Quadro 6: Dimensões do modelo do pavilhão original 47

Quadro 7: Características do modelo do pavilhão original 47

Quadro 8: Tipo e localização das aberturas para cada caso analisado 47

Quadro 9: Características dos casos analisados 49

Quadro 10: Proporção em relação à abertura do oitão, localização e a quantidade de abertura para os casos analisados 50

Quadro 11: Novas dimensões do pavilhão analisado 52

Quadro 12: Características das aberturas analisadas 52

Quadro 13: Coeficientes de pressão interna, obtidos conforme equação 13, para o caso 1 57

Quadro 14: Coeficientes de pressão interna, obtidos conforme equação 13, para o caso 2 58

Quadro 15: Coeficientes de pressão interna, obtidos conforme equação 13, para o caso 3.....59

Quadro 16: Coeficientes de pressão interna, obtidos conforme equação 13, para o caso 4.....60

Quadro 17: Coeficientes de pressão interna obtidos experimentalmente para cada caso analisado 61

Quadro 18: Análise comparativa de c_{pi} para os casos estudados.....65

LISTA DE SIMBOLOS

V_0 -	Velocidade básica do vento
V_k -	Velocidade característica
S_1 -	Fator topográfico
S_2 -	Fator de rugosidade
S_3 -	Fator estatístico
b -	Parâmetro meteorológico
p -	Parâmetro meteorológico
F_r -	Fator de rajada
Z -	Cota acima do terreno analisado em (m)
Δp -	Diferença de pressão
Δpe -	Pressão efetiva externa
Δpi -	Pressão efetiva interna
C_{pe} -	Coeficiente de pressão externa
C_{pe} -	Coeficiente de pressão interna
K -	Coeficiente de vazão
V -	Velocidade do ar na abertura
P -	Massa específica do ar
F_e -	Força externa a edificação
F_i -	Força interna a edificação

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO 13
1.1 PROBLEMA DE PESQUISA 14
1.2 OBJETIVOS DA PESQUISA 15
1.2.1 Objetivo geral 15
1.2.2 Objetivos específicos 15
1.3 JUSTIFICATIVA 15
2. AERODINÂMICA DAS CONSTRUÇÕES 17
2.1 DEFINIÇÃO DO VENTO 17
2.1.1 Perfil de velocidade do vento 17
2.2 FORÇAS DEVIDO AO VENTO EM EDIFICAÇÕES 19
2.2.1 Pressões devida ação do vento em estruturas leves 21
3. A NBR 6123/1988 24
3.1 DETERMINAÇÕES DAS FORÇAS DO VENTO 24
3.1.1 Velocidade básica do vento 25
3.1.2 Fator topográfico (S_1) 26
3.1.3 Fator de rugosidade do terreno (S_2) 27
3.1.3.1 Rugosidade do terreno 28
3.1.3.2 Dimensões da edificação 28
3.1.3.3 Altura sobre o terreno 29
3.1.4 Fator estatístico (S_3) 31
3.2 DETERMINAÇÕES DAS VELOCIDADES 32
3.2.1 Velocidade característica V_k e velocidade de projeto V_p 32
3.2.2 Pressão dinâmica q 33
3.3 COEFICIENTES DE PRESSÃO 33
3.3.1 Coeficiente de pressão e de forma, externos 34
3.3.2 Coeficiente de pressão interna 38
3.4 Coeficientes de força (F) 42
4 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS 44
4.1 CARACTERIZAÇÃO DA PESQUISA 44
4.2 DELIMITAÇÕES DA PESQUISA 44
4.3 TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DA COLETA DE DADOS 44

5 PAVILHÃO ANALISADO 46
5.1 MODELO 46
5.2 MODELO ADAPTADO 47
5.2.1 Localização 48
5.2.2 Características das situações analisadas 48
6 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS 51
6.1 RESULTADOS CONFORME NBR 6123/1988 51
6.1.1 Coeficientes de pressão e de forma externos 51
6.1.2 Coeficientes de pressão interna 54
6.2 RESULTADOS EXPERIMENTAIS 60
6.2.1 Coeficiente de pressão externa 60
6.2.2 Coeficiente de pressão interna 61
6.3 ANÁLISE E DISCUSSÕES 61
6.3.1 Pressão externa 61
6.3.2 Pressão interna 65
6.3.3 Cargas agindo nos fechamentos 66
7 CONSIDERAÇÕES FINAIS 67
REFERÊNCIAS 69

1 INTRODUÇÃO

O vento é um fenômeno climático natural, logo, toda e qualquer edificação está exposta a essas ações climáticas. Sendo assim, o estudo dessas forças, é de suma importância, determinando, se esta edificação é mais propícia ou menos propícia a estes tipos de ações. (GASPAR, 2003).

Uma das maiores contribuições para o estudo destas ações geradas pelas cargas de vento ocorreu em 1961, quando Davenport conseguiu desvendar através de muitos estudos e ensaios, os efeitos dessas forças nas estruturas. E através da criação de definições e de formulações de conceitos desenvolvidos por ele, tornou-se possível o cálculo desses carregamentos e dos deslocamentos da estrutura devido a essas cargas.

Esses carregamentos provêm da ação dessas forças na estrutura ou em parte dela e é obtida através da soma vetorial das cargas que atuam na estrutura da edificação. (PITTA, 1987).

Os comportamentos dessas cargas variam conforme é o fechamento da edificação, já que, eles exercem grande influência no comportamento aerodinâmico desta. Esses fechamentos, também caracterizam a permeabilidade da edificação, sendo determinado, ainda na fase de projeto. (LOREDO-SOUZA, 1992).

A permeabilidade é caracterizada pela presença de várias aberturas na edificação, tais como: juntas entre painéis de vedação e entre telhas, frestas em portas e janelas, ventilações em telhados, lanternins, chaminés, vão abertos de portas, janelas, etc. (ABNT-NBR 6123, 1988).

Edificações baixas, com coberturas leves e de grandes vãos, como no caso de pavilhões, estão mais suscetíveis a sofrerem acidentes, por serem estruturas amplas, e, em sua maior parte, altamente permeáveis, tendo mais facilidade de se desestabilizar por este tipo de ação. (BLESMANN 2009).

Segundo, Blesmann (2009), construções que não consideram os efeitos do vento agindo sobre elas, tem uma grande chance de ocorrerem acidentes ainda na fase de construção, além, de terem também uma diminuição da vida útil das coberturas e das paredes, devido ao mau dimensionamento e à ausência de contraventamentos quando necessário.

Sendo assim, para que essas cargas possam ser consideradas e analisadas, a NBR 6123/1988 apresenta procedimentos dessas forças (vento) nas edificações com geometria mais comuns. Nos casos em que a geometria não é contemplada pela norma, é necessário a realização de ensaios de túnel de vento.

A norma também orienta na determinação dos coeficientes aerodinâmicos de pressão interna, com paredes permeáveis, além de nortear sobre as regras gerais para sua determinação. E é dentro deste contexto o foco do trabalho: a análise dos resultados obtidos via orientações da NBR 6123/1988 e aqueles obtidos nos ensaios em túnel de vento

1.1 PROBLEMA DE PESQUISA

As forças devido à ação do vento são determinadas através de coeficientes aerodinâmicos. Esses coeficientes são números adimensionais que auxiliam nos estudos das forças que um corpo qualquer sofre ao entrar em contato com o ar.

Essas forças, de acordo com Blesmann (2001), não eram consideradas importantes e nem utilizadas para elaboração de projetos estruturais nos tempos passados. Antigamente as construções eram baixas, pesadas e possuíam paredes espessas, porém com o passar dos tempos, e com o uso de novas tecnologias no método de construção, houve uma mudança nesse cenário da construção civil, dando vez a estruturas mais esbeltas e leves, necessitando, que as cargas de vento passassem a ser uma das ações mais importantes a se determinar em um projeto de estruturas.

Neste contexto apresenta-se como problema de pesquisa responder a seguinte questão: os coeficientes de pressão externos e internos, apresentados pela NBR 6123/1988, e por sua vez as pressões exercidas pelo vento em pavilhões de planta retangular com cobertura em duas águas são ou não conservadoras?

1.2 OBJETIVOS DA PESQUISA

Nesta seção são apresentados o objetivo geral e objetivos específicos para este trabalho.

1.2.1 Objetivo geral

Este trabalho tem como objetivo geral o estudo comparativo entre valores das pressões exercidas pelo vento obtidos através de ensaio em túnel de vento e aqueles obtidos via especificações da NBR 6123/1988.

1.2.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos deste trabalho são:

i. Realizar uma revisão bibliográfica;
ii. Estudar os princípios básicos da aerodinâmica aplicada às estruturas civis;
iii. Apresentar o método de cálculo das forças do vento em edificações leves, do tipo pavilhão, conforme a norma técnica brasileira NBR 6123/1988;
iv. Comparar os resultados analíticos, calculados conforme NBR 6123/1988 com dados de ensaios obtidos em ensaios de túneis de vento;
v. Apresentar o método de cálculo da norma NBR 6123/1988 para obtenção das cargas nos fechamentos do pavilhão analisado.

1.3 JUSTIFICATIVA

Os pavilhões industriais que não consideram as ações do vento ainda na sua fase de projeto oferecem grandes riscos à estabilidade da estrutura, podendo levar ao

desmoronamento total ou parcial desta, pela ação dessas cargas na edificação. A ocorrência de acidentes, causados nestes tipos de estruturas, devido as ações do vento, ocorrem principalmente na região do Estado do Rio Grande do Sul, onde a velocidade do vento é uma das mais altas do Brasil. (BLESSMANN, 2001).

Como exemplo da atuação do vento dentro do Estado do Rio Grande do Sul, pode-se citar o acidente da FENAC em Novo Hamburgo ocorrido em 1963, em que houve o destelhamento da cobertura (curva com arcos triarticulados) do pavilhão, causado pelas rajadas de vento. A cobertura desta edificação, feita de telhas de fibrocimento e sustentada por uma estrutura de arcos metálicos treliçados e triarticulados, foi quase que completamente destruída. O pavilhão na época do acidente encontrava-se em fase de construção, logo, o oitão e os portões localizados a sotavento estavam fechados, porém a barlavento ainda não haviam sido colocados os vidros e os portões. A soma desses fatores gerou uma sobrepressão interna grande na estrutura, junto à sucção externa gerada pela ação do vento, ocasionando o levantando da cumeeira do pavilhão e como consequência, o colapso da cobertura no interior desta edificação. (LOREDO-SOUZA, 1992).

Para Blesmann, se cada acidente for analisado de forma isolada, não representaria muito na economia nacional. Porém, se todos esses danos causados pelos inúmeros acidentes fossem registrados, teria-se um valor considerável. (BLESSMANN, 2001).

Assim, observa-se que a análise e o estudo adequado das forças do vento em edificações é de fundamental importância, tanto para a segurança da população, quanto para economia de um país. Dessa forma, é justificada a produção deste trabalho.

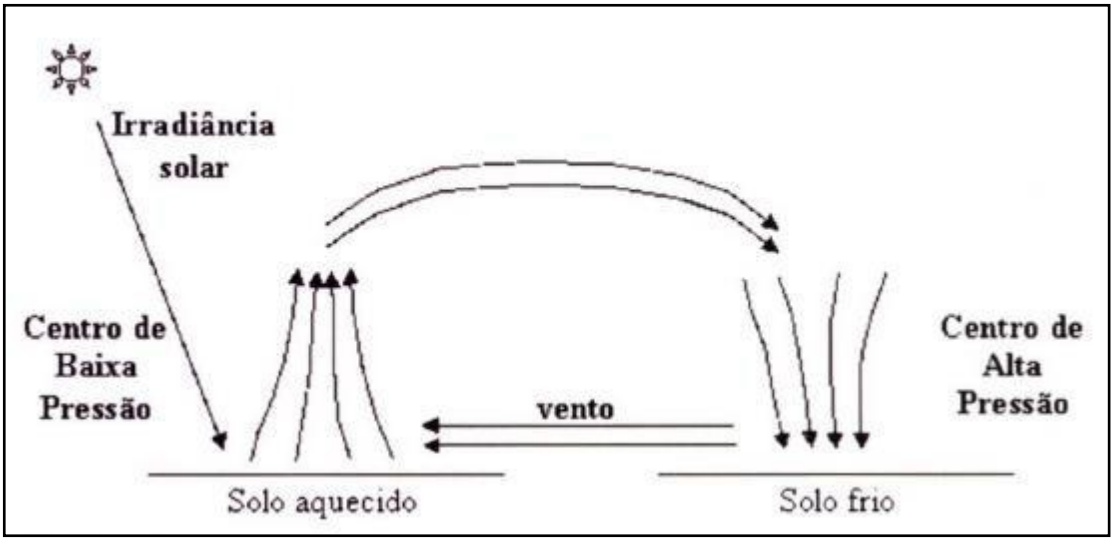
2 AERODINÂMICA DAS CONTRUÇÕES

Neste capítulo são apresentados os conceitos básicos de vento, além disto, são argumentados de forma teórica os princípios necessários para definição do perfil de velocidade do vento. Apresenta também tópicos sobre a ação do vento na edificação.

2.1. DEFINIÇÃO DO VENTO

Pode-se definir vento, como um movimento que o ar realiza em relação à superfície da terra. As passagens dessas massas de ar ocorrem horizontalmente e a uma determinada altura do terreno. A Figura 1 apresenta um esquema ilustrativo desse processo de formação do vento. (L.S, TAPAJÓS et al., 2016).

Figura 1: Esquema de formação do vento



Fonte: Marin, Assad e Pilau (2008)

2.1.1 Perfil de velocidade do vento

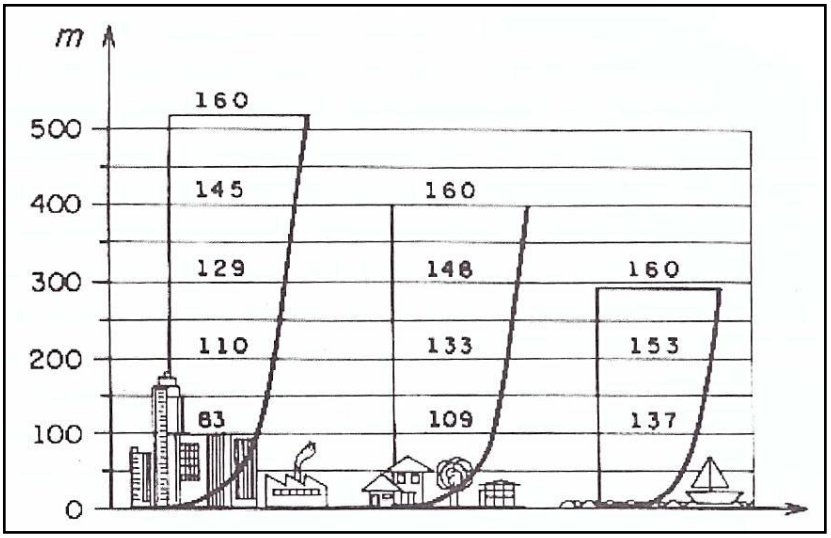
Para Blessmann, a camada limite atmosférica é definida como uma camada que se situa abaixo da altura gradiente (altura de 1 km) situada na região da baixa troposfera. É nesta região que o vento atinge seu limite e ocorrem alterações

relevantes na sua velocidade. Esta altura, medida a partir da superfície terrestre, pode variar de 250 a 600 metros. (BLESSMANN, 1988).

Embora essa velocidade possa ligeiramente mudar de um lugar para outro, devido à sua dependência na circulação geral dos sistemas de pressão existentes, a superfície atingida pelas cargas de vento também está sujeita a grandes variações locais. Essas variações (modo geral) tem uma tendência a ser maior quando localizadas em grandes centros urbanos, do que em um local situado em campo aberto ou sobre o mar, como mostra a Figura 2.

Conforme, Blessmann (1988), essas forças devem estar em equilíbrio e a uma altura que seja suficiente, para que não haja intervenção das forças de atrito correspondente à rugosidade do terreno.

Figura 2: Perfil de velocidade do vento



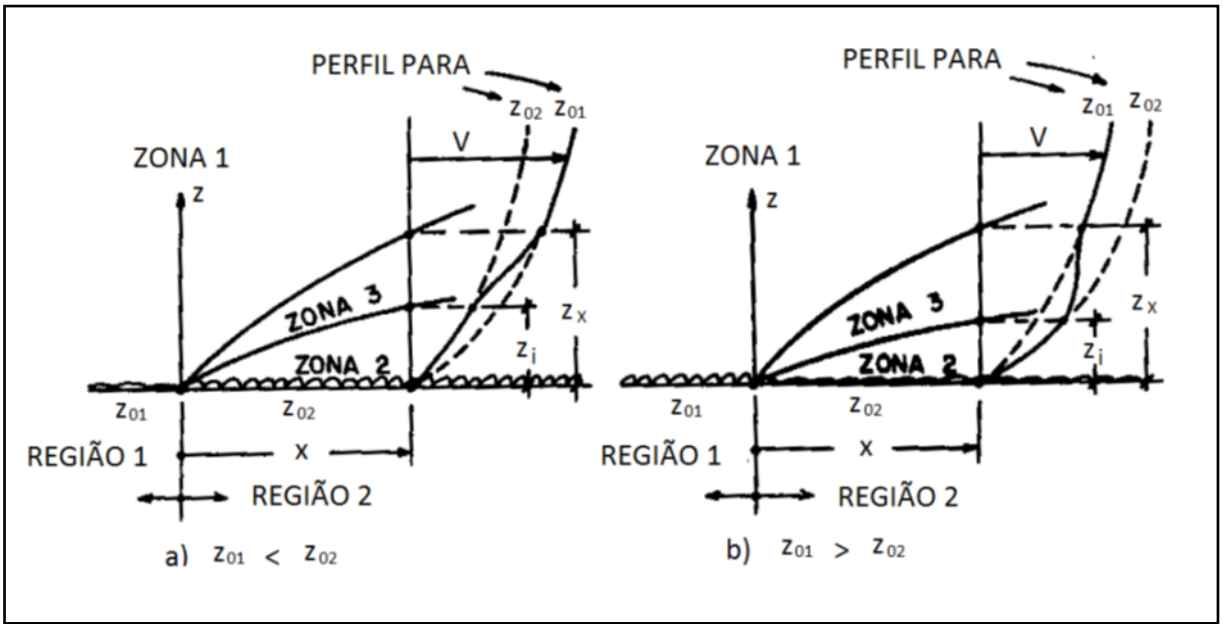
Fonte: Gonçalves et al. (2013)

Modificações na rugosidade superficial do terreno provocam mudanças de intensidade e direção dos ventos. Logo, é de grande importância o conhecimento dos padrões aerodinâmico locais para que se possa calcular o comportamento dos ventos sobre a superfície em diferentes escalas. (OKE, 1987).

Quando essas modificações ocorrem, mesmo que de forma sensível, o vento na camada limite atmosférico, passa por alterações e os perfis de velocidade que estiverem localizados a sotavento da linha de mudança da rugosidade, passam a se adequar de forma gradual, dando origem a uma nova camada limite em equilíbrio com a rugosidade dessa linha. (BLESSMANN, 1995).

Estas regiões de adequação são diferenciadas em três regiões com padrões específicos, indicadas na Figura 3 abaixo, por zonas *1,2 e 3*. A *zona 1* abrange o perfil de velocidades compatível a rugosidade a barlavento da linha de mudança; o perfil da *zona 2*, em equilíbrio com a rugosidade a sotavento dessa linha; e o perfil da *zona 3*, de transição, é demostrado por uma curva que une os perfis das duas curvas extremas. (BLESSMANN, 1995).

Figura 3: Relação entre a rugosidade e o perfil de velocidade



Fonte: Blessmann, 1995

2.2 FORÇAS DEVIDO AO VENTO EM EDIFICAÇÕES

Com a evolução urbana, a sociedade se apropria de espaços cada vez menores e essa realidade motiva a construção de edifícios verticalizados, objetivando um melhor aproveitamento das áreas. Esses edifícios se encontram agrupados em conjunto e essa proximidade influencia no campo de fluxo de ar e nas forças de vento

que agem sobre elas. Acabam sofrendo um aumento significativo dessas cargas e ressaltando o problema de percepção ocupacional dos movimentos devido às vibrações dinâmicas. (Y.TAKAMURA; A.KAREEM, 2013).

A vizinhança de uma edificação alta, por exemplo, segundo Rosa et al., (2012) terá uma grande influência desses efeitos em sua estrutura. Já Blessmann (2001), ressalta que as edificações baixas também sofrem com essas atuações, mesmo que seja de forma significativa, logo é de suma importância que o projeto estrutural de uma edificação considere as pressões geradas por essas cargas, principalmente edificações leves ou esbeltas.

Estruturas com formas geométricas complexas, arredondadas ou curvas, por exemplo, oferecem uma menor resistência às cargas de vento do que uma estrutura composta por barras retas. (Blessmann, 2009).

Formas especiais da construção ou estrutura determinam se o elemento estrutural será mais ou menos sensível a essas ações, o que facilita o surgimento de sobrepressões externas, causando instabilidade global na estrutura (Y.TAKAMURA; A.KAREEM, 2013).

Estruturas sensíveis ao vento, segundo Mendis et al., (2007) devem ser analisadas levando as seguintes considerações: o impacto causado pela vizinhança, as cargas aplicadas nas fachadas e as forças aplicadas em toda sua estrutura.

Entretanto, as edificações não possuem as mesmas sensibilidades às rajadas. Cada estrutura possui a sua própria frequência natural, logo, o carregamento que o vento gera está diretamente ligada às suas dimensões. Quanto mais flexibilidade tiver a estrutura, menor será a sua frequência natural, portanto, mais sensível às cargas dinâmicas. (RIOS, 2016).

Para, Holmes et al., (2012) esse carregamento é um fenômeno complexo, pois o vento em si já é turbulento, sendo composto de uma multiplicidade de redemoinhos

de diferentes tamanhos e características de rotação, que são transportadas em um fluxo geral de movimentação de ar em relação à superfície da Terra.

As pressões flutuantes que essas forças geram, mudam temporariamente, e suas características dinâmicas não são uniformes em toda a superfície da estrutura, devendo ser avaliada com base no comportamento geral do edifício e de seus componentes, levando em consideração, também, o comportamento das peças individuais da edificação. (Y.TAKAMURA; A.KAREEM, 2013).

Segundo Elsharawy (2012), as pressões que esses carregamentos exercem sobre determinada estrutura não são estáticos. Eles vêm em formas de rajadas e variam conforme for à sua incidência na estrutura. Estas rajadas, também conhecidas como flutuações, irão depender do tempo de duração da mesma, quanto do regime de escoamento em que ela se encontra. Esses dois fatores (flutuações e regime de escoamento) juntos podem fazer com que a estrutura sofra variações, ocasionando a diminuição da sua resistência.

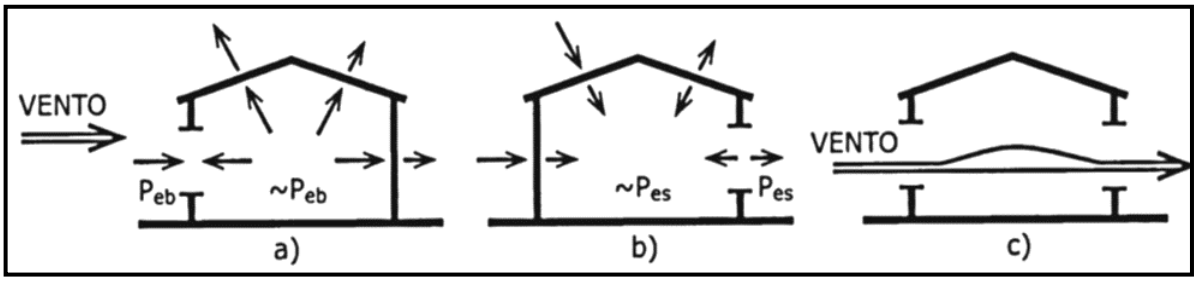
2.2.1 Pressões devida ação do vento em estruturas leves

As pressões geradas em uma edificação devido às cargas de vento vão depender de vários fatores, dentre eles pode-se citar: formato do edifício, componentes e partes sobre-excedente da sua estrutura. Os edifícios leves ou esbeltos e altos necessitam de grande atenção no seu projeto estrutural, por possuir pouca rigidez global. Logo, não basta somente levar em consideração os esforços globais atuando na estrutura (BLESSMANN, 2009).

Blessmann (2009) ressalta que em pavilhões (construções leves), por exemplo, é importante saber também, como ocorre a distribuição dessas forças externas, na cobertura e nos fechamentos laterais. É necessário que essas cargas sejam previstas e dimensionadas de forma adequada, a fim de evitar arrancamento de telhado e das vedações neste tipo de estrutura. É necessário também avaliar as aberturas contidas na edificação, pois elas influenciam diretamente nos valores pressão internas.

A pressão interna em uma edificação está diretamente relacionada às disposições das aberturas, de seu tamanho, forma e da permeabilidade dos seus componentes de fechamento. As edificações com grandes aberturas localizadas em áreas de sobrepressão externa ocasionam um aumento das pressões efetivas internas nas coberturas, que somadas a sucções externas, acabam aumentando a força de sustentação no telhado, e se essas distribuições de pressões não foram previstas em projeto, podem ocasionar o seu desprendimento. A Figura 4, abaixo, representa de forma simplificada como ocorre a influência dessas ações no valor da pressão interna devido à localização das grandes aberturas. (BLESSMANN, 2013).

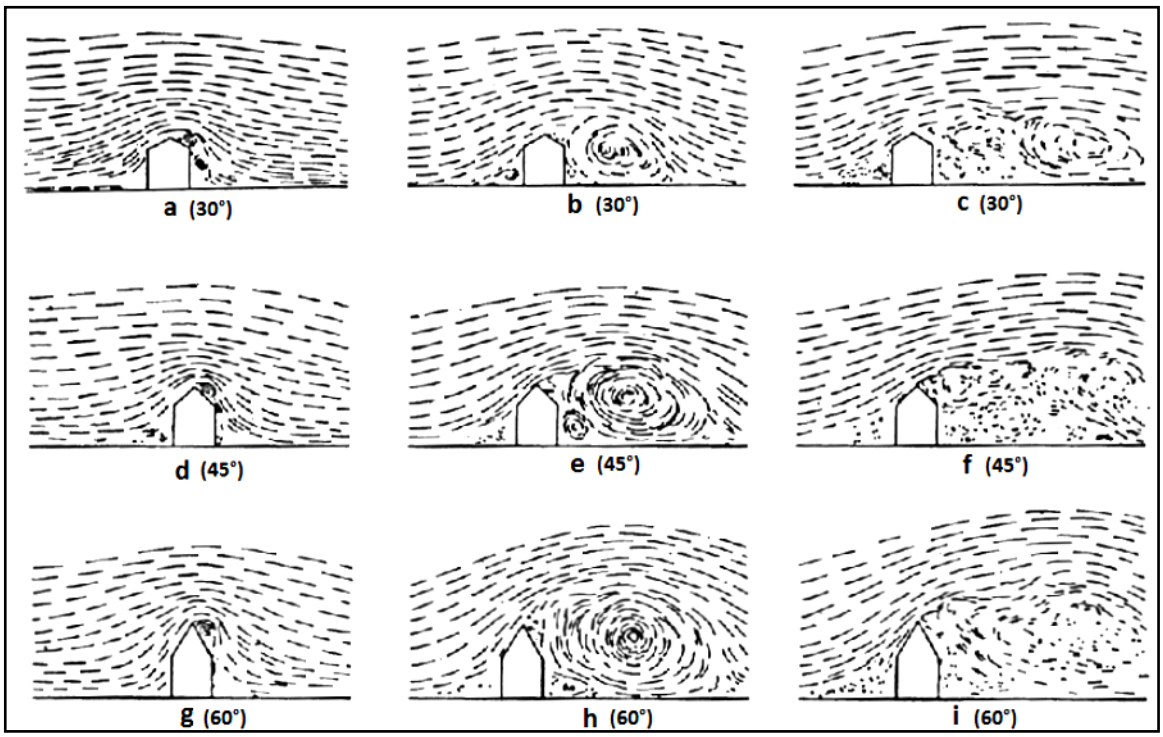
Figura 4: Pressão interna em função da localização das grandes aberturas



Fonte: Blessmann, 2009

A Figura 5 representa as linhas que esses fluxos de ar formam de acordo com a inclinação da cobertura e a velocidade de escoamento. Escoamentos de baixa velocidade, normalmente agem mais próximos da estrutura; em compensação, escoamentos com maior velocidade, tendem a ter sua formação em regiões que tem baixa pressão. (BLESSMANN, 2009).

Figura 5: Escoamento do vento em função da inclinação do telhado (30° 45° e 60°)



Fonte: Blessmann,2009

No Brasil, o cálculo dessas pressões, é realizado de acordo com as orientações da NBR 6123/1988, que fornece diretrizes para a determinação desses coeficientes, conforme a proporção da altura e largura da edificação analisada, o seu tipo de cobertura e inclinação do telhado, etc.

3 A NBR 6123/1988

A norma brasileira ABNT NBR 6123/1998 determina as condições fundamentais para o cálculo das forças devidas ações do vento em edificações para realização de projeto.

E para que essas forças possam ser calculadas, esta Norma adota um método simplificado em que a ação dinâmica do vento é substituída por um carregamento estático equivalente. (L.S, TAPAJÓS et al., 2016).

Estabelece, também, condições para que essas cargas possam ser analisadas como: a localização da edificação, o tipo de terreno (morro, plano, etc), a altura, a rugosidade do terreno e ao tipo de emprego que a estrutura será destinada. (GOLÇALVES et al., 2013).

Para situações de projeto, ela recomenda que sejam adotadas as velocidades das rajadas, visto que as estruturas de um modo geral já têm uma frequência de vibração, que é bem maior do que a frequência natural do vento, descartando-se para efeito de projeto as turbulências, condição válida somente para plantas com formatos retangulares. (ELSHARAWY et al., 2012).

3.1 DETERMINAÇÕES DAS FORÇAS DO VENTO

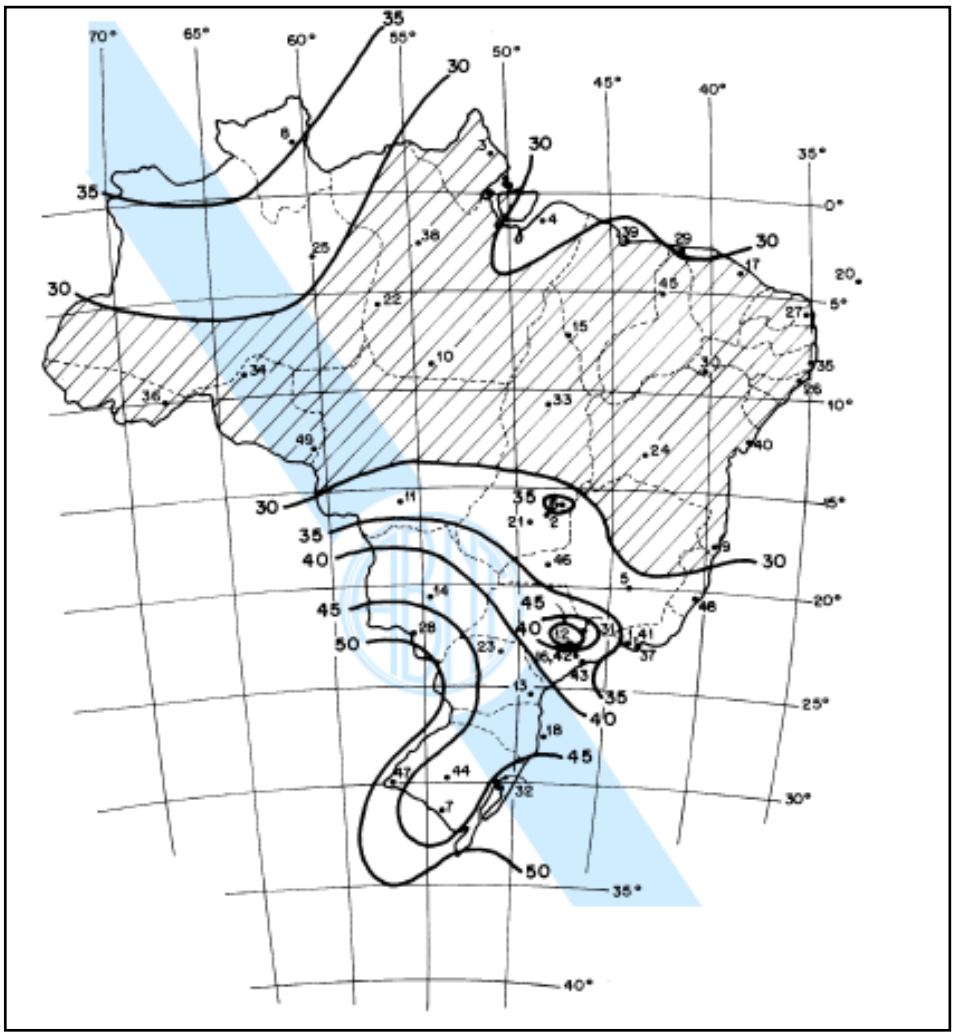
Para as determinações das forças dos ventos são levadas as seguintes considerações: (ABNT- NBR 6123, 1988).

I. A velocidade básica do vento, V_0;
II. A velocidade característica, V_k, obtida através da velocidade básica, multiplicada pelos fatores S_1, S_2 e S_3;
III. A pressão dinâmica, q, determinada pela velocidade característica V_k.

3.1.1 Velocidade básica do vento

Depende do local onde o elemento estrutural ou edificação se encontra e é determinada através do mapa de isopletas, conforme Figura 6 abaixo. Estas velocidades são definidas como a velocidade de uma rajada com uma duração de 3 segundos, e que são exercidas em média a cada 50 anos, medidas a 10 metros acima do solo, em um lugar aberto e plano. A norma, como regra geral, admite que o vento possa ser considerado em qualquer direção horizontal. (ABNT- NBR 6123, 1988).

Figura 6: Mapa de isopletas



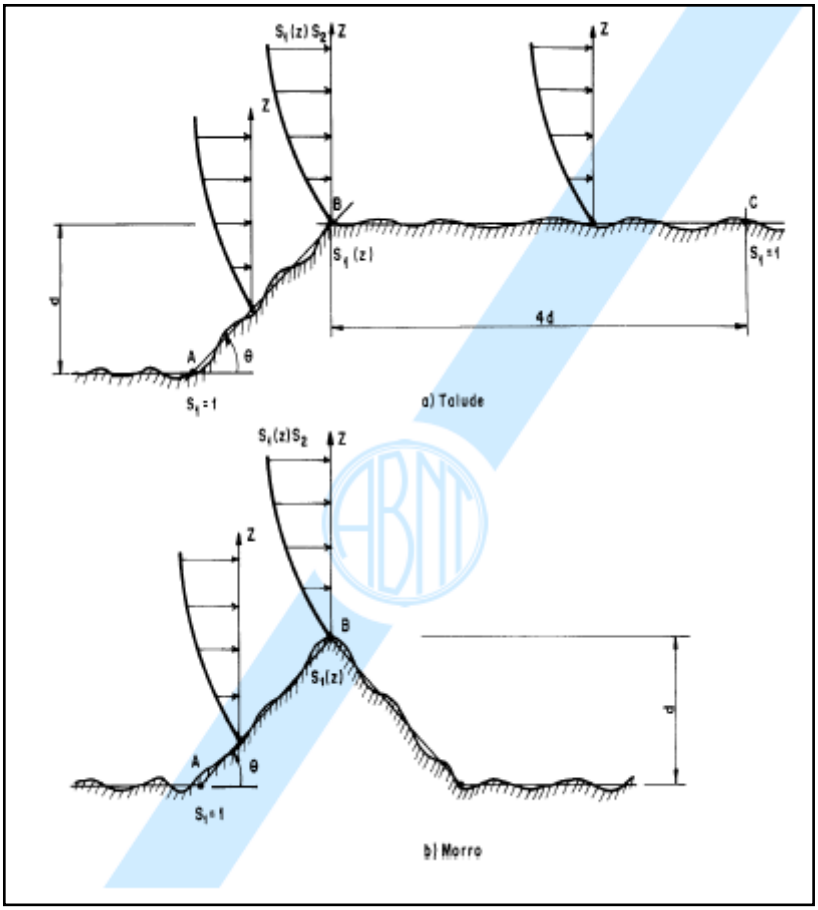
Fonte: NBR 6123 - ABNT, 1988

3.1.2 Fator topográfico (S_1)

Segundo a NBR 6123/1988 o fator topográfico (S_1), considera as alterações do relevo do terreno e é determinado conforme os seguintes métodos abaixo:

a) Terreno plano ou levemente acidentado, S_1 igual a 1.
b) Taludes e morros, o fator S_1 irá depender da localização que se encontra o elemento estrutural. Esta norma só considera como taludes ou morros alongados, superfícies que admitam um fluxo de ar em duas dimensões soprando no sentido indicado na Figura 7.

Figura 7: Fator topográfico S_1 (z)



Fonte: NBR 6123 - ABNT, 1988

Segundo esta Norma, edificação localizada nos pontos A, B e C tem os seguintes valores de S_1. Ponto A (morros) e nos pontos A e C (taludes), terão o fator

topográfico S_1 igual a 1. Já para edificações localizadas no ponto B, o valor de S_1 será em função da inclinação média do talude ou encosta do morro (*θ*), da altura média a partir da superfície do terreno no ponto considerado (*z*) e da diferença de nível entre a base e o topo do talude (*d*). (ABNT- NBR 6123, 1988).

Para obtenção de S_1, o valor da inclinação média do talude ou encosta do morro θ, deve obedecer as seguintes condições, expostas no Quadro 1. (ABNT- NBR 6123, 1988).

Quadro 1 : Valores de S_1 de acordo com inclinação média do talude

VALORES DE θ	
θ ≤ 3°	$S_1 = 1$
6°≤ θ≤ 17	$S_{1=}\ 1 + \left(2{,}5 - \frac{Z}{d}\right).tg\ (\theta - 3°) \geq 1{,}0$
3°< θ< 6° e 17°< θ< 45°	Interpolar linearmente
θ ≥ 45	$S_{1=}\ 1 + \left(2{,}5 - \frac{Z}{d}\right).0{,}31 \geq 1{,}0$

Fonte: elaborado pelo autor, 2018, adaptado da ABNT- NBR 6123,1988

Interpola-se o valor de S_1, para áreas localizadas entre os pontos: A e B ou B e C. E para vales profundos S_1, igual a 0,9 (ventos em qualquer direção). (ABNT- NBR 6123, 1988).

3.1.3 Fator de rugosidade do terreno (S_2)

Segundo a NBR 6123/1988, para determinação do fator S_2, deve-se considerar o efeito da rugosidade do terreno, da variação da velocidade do vento acima do terreno e das dimensões da edificação ou parte da edificação analisada.

3.1.3.1 Rugosidade do terreno

A rugosidade do terreno é dividida em 5 categorias, as quais são descritas no Quadro 2 abaixo: (ABNT- NBR 6123, 1988).

Quadro 2: Classificação das categorias de acordo com rugosidade do terreno

CLASSIFICAÇÃO DAS CATEGORIAS	
CATEGORIA I	Superfícies com grandes extensões (mais de 5 km), como: zonas costeiras (planas), pântanos de vegetação rala, padrarias e etc.
CATEGORIA II	Terrenos abertos planos com poucos obstáculos (árvores e edificações baixas) Exemplos: pântanos de vegetação rala, pradarias e etc.
CATEGORIA III	Terrenos com superfícies planas com obstáculos, como: granjas e casas de campo, subúrbios distantes do centro com casas baixas e esparsas e etc.
CATEGORIA IV	Terrenos com obstáculos numerosos e pouco espaçados, como, zonas de parque e bosques com muitas árvores, obstáculos maiores, mas que ainda não podem ser considerados na categoria V.
CATEGORIA V	Encobertos por obstáculos grandes e altos e poucos espaçados, como: florestas densas com árvores altas, centros de grandes cidades, etc.

Fonte: elaborado pelo autor, 2018, adaptado da ABNT- NBR 6123,1988

3.1.3.2 Dimensões da edificação

As edificações são analisadas conforme as suas dimensões. Para a indicação das partes a serem consideradas na determinação das cargas de vento da estrutura analisada, é necessário levar em conta as suas características construtivas. (ABNT-NBR 6123, 1988).

A velocidade do vento varia bastante, sendo assim, as dimensões dessas rajadas vão depender do intervalo de tempo em que são calculadas. Segundo a NBR 6123/1988, essas rajadas são medidas com intervalo de 3 segundos que envolvem obstáculo de até 20m na direção do vento médio. Logo, quanto maior o intervalo de tempo usado no cálculo da velocidade média, maior é a distância abrangida pela rajada.

A norma classifica as edificações em três classes em função desse intervalo de tempo. O Quadro 3 apresenta características para cada classe abaixo. (ABNT- NBR 6123, 1988).

Quadro 3: Classificação das classes das edificações em função das suas dimensões

CLASSES DA EDIFICAÇÃO	
CLASSE A	Toda a vedação da edificação, suas peças individuais e componentes de fixação, na qual a maior dimensão horizontal ou vertical não exceda 20 metros.
CLASSE B	Toda edificação ou parte da edificação para qual a maior dimensão da superfície frontal estejam entre 20 e 50 metros.
CLASSE C	Toda edificação ou parte da edificação para qual a maior dimensão da superfície frontal exceda 50 metros.

Fonte: elaborado pelo autor,2018, adaptado da ABNT - NBR 6123,1988

3.1.3.3 Altura sobre o terreno

Conforme orientação da norma é possível obter, o fator S_2, esse fator é obtido duas maneiras distintas, (levando em consideração a classe e categoria escolhida em função da altura (z) em metros, acima do nível do terreno). A primeira forma de se determinar esse fator é dada na equação1 abaixo: (ABNT- NBR 6123,1988).

$$S_2 = b.F_r.\left(\frac{Z}{10}\right)^P \qquad \text{Equação (1)}$$

Onde:

S_2= fator de rugosidade;

$b\ e\ p$ = parâmetros meteorológicos;

F_r = fator de rajada em função da categoria II;

Z = cota acima do terreno analisado em (m).

A Tabela 1 indica os valores de *p* e *b*, conforme sua categoria e classe a serem utilizados na equação acima.

Tabela 1: Valores de p e b

Categoria	Z_g (m)	Parâmetro	Classes A	Classes B	Classes 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: ABNT – NBR 6123,1988

A outra maneira de se obter o fator S_2, indicada pela Norma, é utilizando a Tabela 2 abaixo, que leva em consideração à categoria, classe e altura da edificação em estudo.

Tabela 2: Fator S_2

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

Fonte: ABNT – NBR 6123,1988

3.1.4 Fator estatístico (S_3)

O fator estatístico S_3, conforme a NBR 6123/1988, leva em conta a vida útil da edificação em estudo, e o grau de segurança por ela solicitado. De acordo com essa norma, a probabilidade de um vento ultrapassar a velocidade básica V_0 no período de recorrência médio de 50 anos, é de 63%. Esses valores são apresentados na Tabela 3 abaixo. (ABNT- NBR 6123, 1988).

Tabela 3: Fator S_3

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

Fonte: ABNT – NBR 6123,1988

3.2 DETERMINAÇÕES DAS VELOCIDADES

Nesta seção é a apresentada às formas de obtenção da velocidade característica (V_k), velocidade de projeto (V_p) e da pressão dinâmica (q).

3.2.1 Velocidade característica V_k e velocidade de projeto V_p

A velocidade caraterística V_k que é obtida através da velocidade básica corrigida por fatores de ajustes. Esses fatores são utilizados como finalidade adequar a velocidade básica as características especificas do local da edificação, tais como: dimensões e grau de segurança. A velocidade característica V_k é calculada conforme NBR 6123/1988 na seguinte equação abaixo:

$$V_k = V_0 . S_1 . S_2 . S_3 \qquad \text{Equação (2)}$$

Onde:

V_0 = velocidade básica do vento;

S_1 = fator topográfico;

S_2 = rugosidade, dimensão da edificação e altura sobre terreno;

S_3 = fator estatístico.

A velocidade de projeto V_p é relativa à velocidade média de 10 min e é medida a 10 m de altura do solo, em um local aberto e nivelado ou aproximadamente nivelado, com poucos obstáculos isolados, tais como arvores e edificações baixas. A norma estabelece que essa velocidade seja determinada de acordo com a equação 3 abaixo.

$$V_p = 0{,}69.V_0.S_1.S_3 \qquad \text{Equação (3)}$$

Onde:

V_0= velocidade básica do vento;

S_1 = fator topográfico;

S_3 = fator estatístico;

Fator multiplicador de adequação do tempo = 0,69.

3.2.2 Pressão dinâmica q

É a pressão exercida pelo vento. É obtida, conforme a Equação 4. (ABNT- NBR 6123, 1988).

$$q = 0{,}613.{V_k}^2 \qquad \text{Equação (4)}$$

Sendo:

q = pressão dinâmica em N/m²;

V_k = velocidade característica em m/s**.**

3.3 COEFICIENTES DE PRESSÃO

As forças do vento nas partes opostas da edificação a ser considerada, dependem da diferença de pressão em suas faces. A ação do vento em um ponto qualquer da estrutura, forma pressões nas superfícies interna e externa. Este efeito é demostrado pela NBR 6123/1988, através da equação 5:

$$\Delta p = \Delta pe - \Delta pi \qquad \text{Equação (5)}$$

Onde:

Δpe = pressão efetiva externa;

Δpi = pressão efetiva interna.

Portanto:

$$\Delta p = (C_{pe} - C_{pi}).q \qquad \text{Equação (6)}$$

Sendo:

C_{pe} = coeficiente de pressão externa:

$$c_{pe} = \frac{\Delta p_e}{q} \qquad \text{Equação (7)}$$

C_{pi} = coeficiente de pressão interna:

$$c_{pi} = \frac{\Delta p_i}{q} \qquad \text{Equação (8)}$$

3.3.1 Coeficiente de pressão e de forma, externos

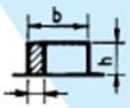
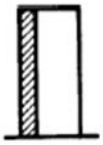
A NBR 6123/1988 expõe (para vários tipos de edificações) o que deve ser considerado na obtenção dos coeficientes de pressão (c_{pe}) e de forma (C_e) externos para as direções críticas do vento. Esses coeficientes são determinados conforme a sua região (estrutura principal e elemento de vedação) de aplicação e onde ocorrem variações consideráveis de pressão.

Em cálculo de estrutura principal, a norma recomenda que se utilize o valor de S_2 equivalente à classe da edificação analisada (A, B ou C); e o valor do coeficiente de forma externo C_e (aplicável à região estudada). Já para o cálculo dos elementos de vedação ou de estrutura secundária (fixações das peças estruturais), usa-se o fator S_2 que seja correspondente à classe A e com valor de C_e ou c_{pe} aplicável à área em que a construção analisada se encontra. (ABNT- NBR 6123, 1988).

Entretanto, esta norma apresenta, além dos coeficientes de forma externos, os coeficientes de pressão externos adicionais, devido à ocorrência de altas sucções junto a arestas de paredes e telhados. As sucções dependem do ângulo de incidência do vento e elas não aparecem simultaneamente em todas as áreas da edificação e, nesses casos, é necessário o uso de coeficientes médios de pressão externa (c_{pe} *médio*) que podem ser obtidos conforme Tabela 5, abaixo. (ABNT- NBR 6123, 1988).

A seguir, são apresentados valores para determinação desses coeficientes utilizados nas edificações e suas partes (cobertura e parede), para plantas retangulares. Coeficientes de pressão e de forma, externos, para paredes e telhados com duas águas simétricas de edificações de planta regular, são indicados nas Tabelas 4 e 5, respectivamente. (ABNT- NBR 6123, 1988).

Tabela 4: Coeficientes de pressão e de forma, externos

Altura relativa		Valores de C_e para								c_{pe} médio
		$\alpha = 0°$				$\alpha = 90°$				
		A_1 e B_1	A_2 e B_2	C	D	A	B	C_1 e D_1	C_2 e D_2	
 0,2 b ou h (o menor dos dois) $\frac{h}{b} \leq \frac{1}{2}$	$1 \leq \frac{a}{b} \leq \frac{3}{2}$	- 0,8	- 0,5	+ 0,7	- 0,4	+ 0,7	- 0,4	- 0,8	- 0,4	- 0,9
	$2 \leq \frac{a}{b} \leq 4$	- 0,8	- 0,4	+ 0,7	- 0,3	+ 0,7	- 0,5	- 0,9	- 0,5	- 1,0
$\frac{1}{2} < \frac{h}{b} \leq \frac{3}{2}$	$1 \leq \frac{a}{b} \leq \frac{3}{2}$	- 0,9	- 0,5	+ 0,7	- 0,5	+ 0,7	- 0,5	- 0,9	- 0,5	- 1,1
	$2 \leq \frac{a}{b} \leq 4$	- 0,9	- 0,4	+ 0,7	- 0,3	+ 0,7	- 0,6	- 0,9	- 0,5	- 1,1
 $\frac{3}{2} < \frac{h}{b} \leq 6$	$1 \leq \frac{a}{b} \leq \frac{3}{2}$	- 1,0	- 0,6	+ 0,8	- 0,6	+ 0,8	- 0,6	- 1,0	- 0,6	- 1,2
	$2 \leq \frac{a}{b} \leq 4$	- 1,0	- 0,5	+ 0,8	- 0,3	+ 0,8	- 0,6	- 1,0	- 0,6	- 1,2

Fonte: ABNT- NBR 6123,1988

Tabela 5: Coeficientes de pressão e de forma, externos, para telhados com duas águas

Altura relativa	θ	Valores de C_e para α = 90° (A) EF	α = 90° (A) GH	α = 0° EG	α = 0° FH	c_{pe} médio			
$\frac{h}{b} \leq \frac{1}{2}$	0°	-0,8	-0,4	-0,8	-0,4	-2,0	-2,0	-2,0	--
	5°	-0,9	-0,4	-0,8	-0,4	-1,4	-1,2	-1,2	-1,0
	10°	-1,2	-0,4	-0,8	-0,6	-1,4	-1,4		-1,2
	15°	-1,0	-0,4	-0,8	-0,6	-1,4	-1,2		-1,2
	20°	-0,4	-0,4	-0,7	-0,6	-1,0			-1,2
	30°	0	-0,4	-0,7	-0,6	-0,8			-1,1
	45°	+0,3	-0,5	-0,7	-0,6				-1,1
	60°	+0,7	-0,6	-0,7	-0,6				-1,1
$\frac{1}{2} < \frac{h}{b} \leq \frac{3}{2}$	0°	-0,8	-0,6	-1,0	-0,6	-2,0	-2,0	-2,0	--
	5°	-0,9	-0,6	-0,9	-0,6	-2,0	-2,0	-1,5	-1,0
	10°	-1,1	-0,6	-0,8	-0,6	-2,0	-2,0	-1,5	-1,2
	15°	-1,0	-0,6	-0,8	-0,6	-1,8	-1,5	-1,5	-1,2
	20°	-0,7	-0,6	-0,8	-0,6	-1,5	-1,5	-1,5	-1,0
	30°	-0,2	-0,5	-0,8	-0,8	-1,0			-1,0
	45°	+0,2	-0,5	-0,8	-0,8				
	60°	+0,6	-0,5	-0,8	-0,8				
$\frac{3}{2} < \frac{h}{b} < 6$	0°	-0,8	-0,6	-0,9	-0,7	-2,0	-2,0	-2,0	--
	5°	-0,8	-0,6	-0,8	-0,8	-2,0	-2,0	-1,5	-1,0
	10°	-0,8	-0,6	-0,8	-0,8	-2,0	-2,0	-1,5	-1,2
	15°	-0,8	-0,6	-0,8	-0,8	-1,8	-1,8	-1,5	-1,2
	20°	-0,8	-0,6	-0,8	-0,8	-1,5	-1,5	-1,5	-1,2
	30°	-1,0	-0,5	-0,8	-0,7	-1,5			
	40°	-0,2	-0,5	-0,8	-0,7	-1,0			
	50°	+0,2	-0,5	-0,8	-0,7				
	60°	+0,5	-0,5	-0,8	-0,7				

Fonte: ABNT – NBR 6123,1988

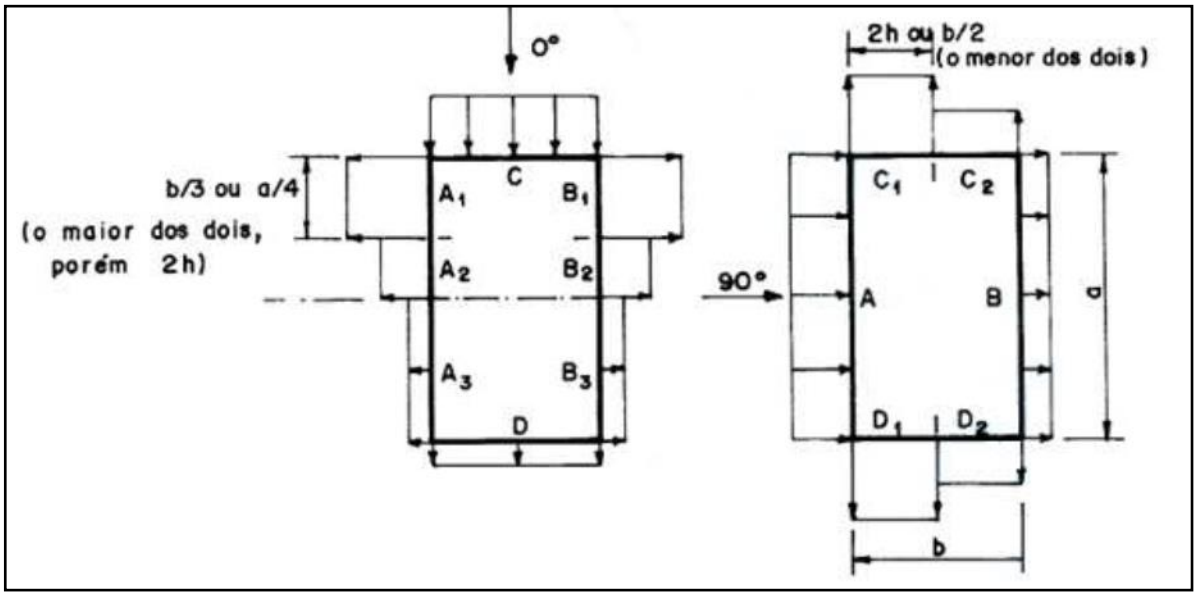
Para determinação do coeficiente de pressão (c_{pe}) e de forma externo (C_e), Tabela 4, a NBR 6123/1988, também leva em consideração o ângulo de incidência do vento a 0º e 90°, localizados nas zonas com altas sucções, nas arestas de paredes e de telhados da edificação.

Para vento a 0°, localizados nos módulos A3 e B3 da edificação, conforme mostra Figura 9, C_e apresenta os seguintes valores:

- para a/b = 1: mesmo valor das partes A2 e B2;
- para a/b ≥ 2: C_e = - 0,2;
- para 1 < a/b < 2 (interpolar linearmente).

Para casos em que necessitem do uso do coeficiente de pressão médio externo (c_{pe} médio), esse coeficiente é aplicado apenas nas paredes que se encontram a barlavento e paralelas ao vento, distantes a 0,2 b ou h, para ventos a 0° e 90°, como mostrado na Figura 8. (ABNT- NBR 6123, 1988).

Figura 8: Ação do vento nas paredes de edificações em planta retangular a 0° e 90°



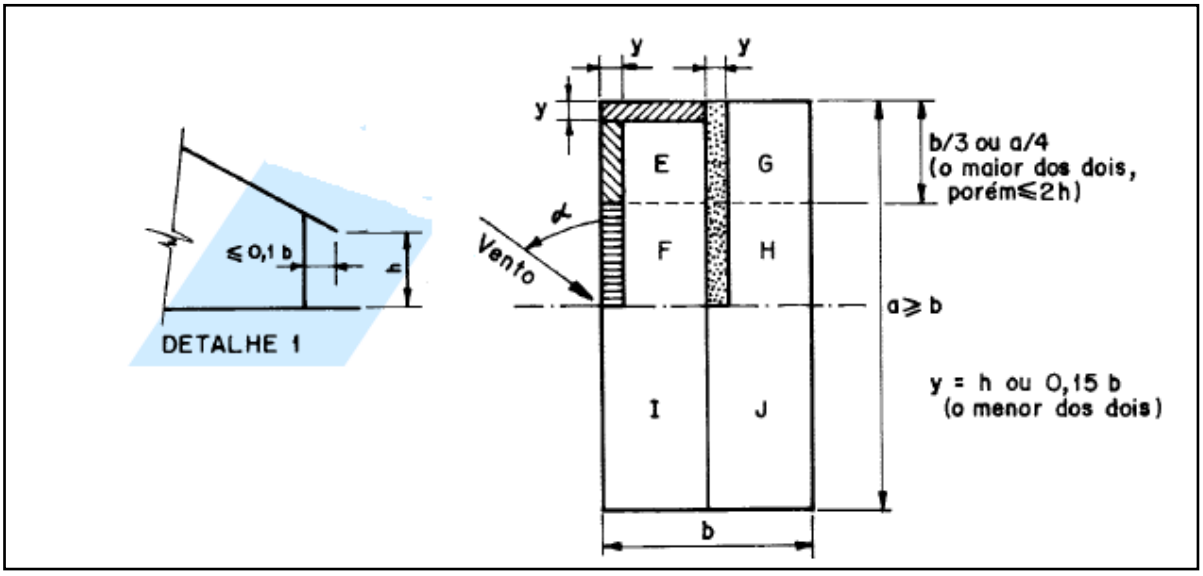
Fonte: ABNT – NBR 6123,1988

Já para casos em que o vento age nas zonas telhado como: chaminés, reservatórios, torres, etc., deve ser considerado um coeficiente de forma C_e = 1,2 e na cobertura de lanternins, c_{pe} médio = - 2,0. Já na face interior do beiral, C_e é igual ao da parede correspondente. (ABNT- NBR 6123, 1988).

Para vento a 0° agindo em telhados com duas águas, nas partes I e J, observados na Figura 9, tem coeficiente de forma C_e de acordo com seguintes valores: (ABNT- NBR 6123, 1988).

- a/b = 1: mesmo valor das partes F e H; a/b ≥ 2: C_e = - 0,2.
- Interpolar linearmente para valores intermediários de a/b.

Figura 9: Ângulo de incidência do vento em telhados com duas águas



Fonte: ABNT – NBR 6123,1988

3.3.2 Coeficiente de pressão interna

Segundo NBR 6123/1988, os coeficientes de pressão interna são determinados de duas formas distintas: levando em consideração a quantidade e a localização das aberturas em uma edificação e, a segunda, através de indicações contidas no anexo D desta norma.

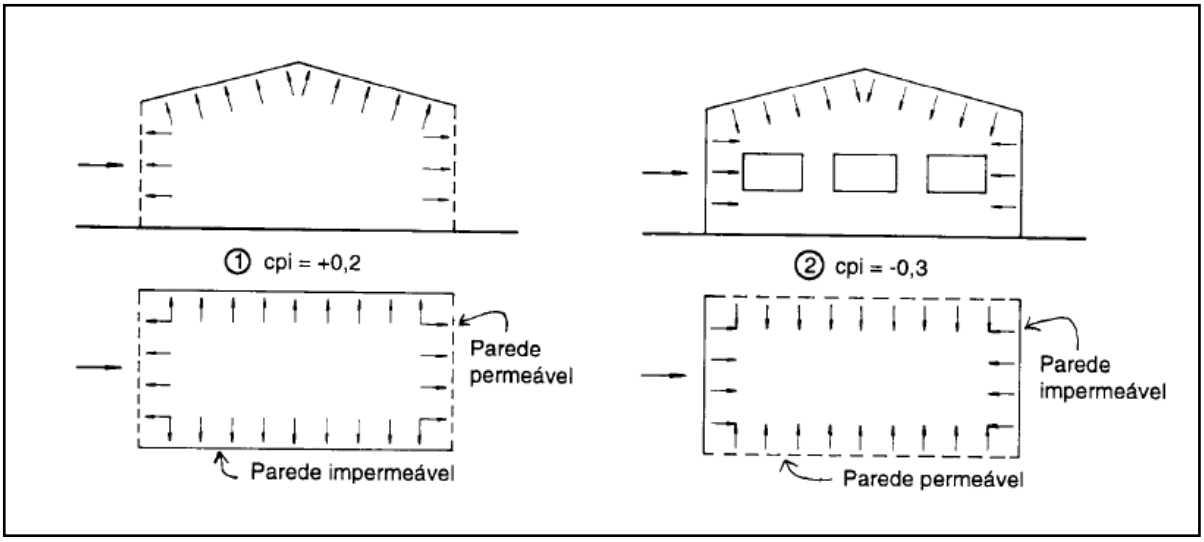
As edificações que possuem paredes internas permeáveis (aberturas) à pressão interna, podem ser consideradas como uniformes e, para este caso, a norma apresenta no item 6.2.5, valores preestabelecidos para os coeficientes de pressão c_{pi} , conforme a seguir: (ABNT- NBR 6123, 1988).

a) Construções com duas faces opostas igualmente permeáveis e as outras faces impermeáveis. Representados esquematicamente na Figura 10.

   a.1) Para vento perpendicular a uma face permeável: c_{pi} = + 0,2;

   a.2) Para vento perpendicular a uma face impermeável: c_{pi} = - 0,3;

Figura 10: Vento perpendicular a uma face permeável e vento perpendicular a uma face impermeável



Fonte: Bellei (1994)

b) Quatro faces igualmente permeáveis: c_{pi} = - 0,3 ou 0. (Considera valor mais nocivo). Se as quatros faces forem impermeáveis não há pressão interna;

c) Construções com permeabilidade igual em todas as faces, exceto, por uma abertura dominante:

c.1) Abertura dominante na face barlavento;

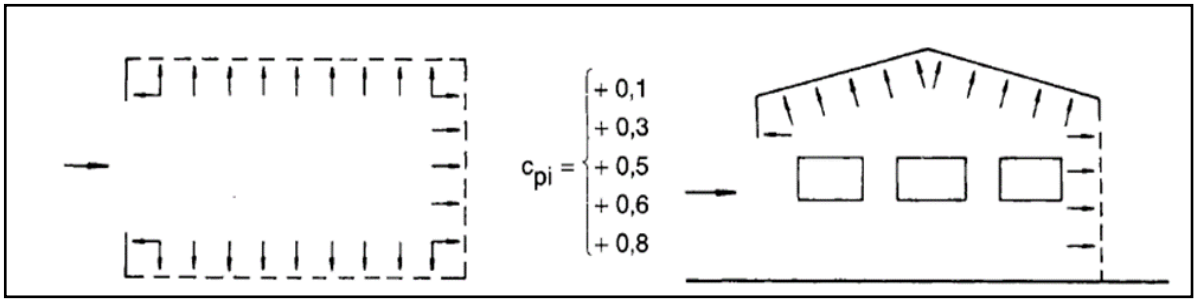
Proporção entre a área de todas as aberturas na face de barlavento e a área total das aberturas (A_d) em todas as faces (parede e cobertura, nas condições do item 6.2.4 desta norma) submetidas a sucções externas (A_s), conforme o Quadro 4 e esquematicamente representado pela Figura 11.

Quadro 4: Relação entre A_d/A_s na determinação de c_{pi}

A_d/A_s	c_{pi}
1	+ 0,1
1,5	+ 0,3
2	+ 0,5
3	+ 0,6
6 ou mais	+ 0,8

Fonte: elaborado pelo autor, 2018, adaptado da ABNT - NBR 6123,1988

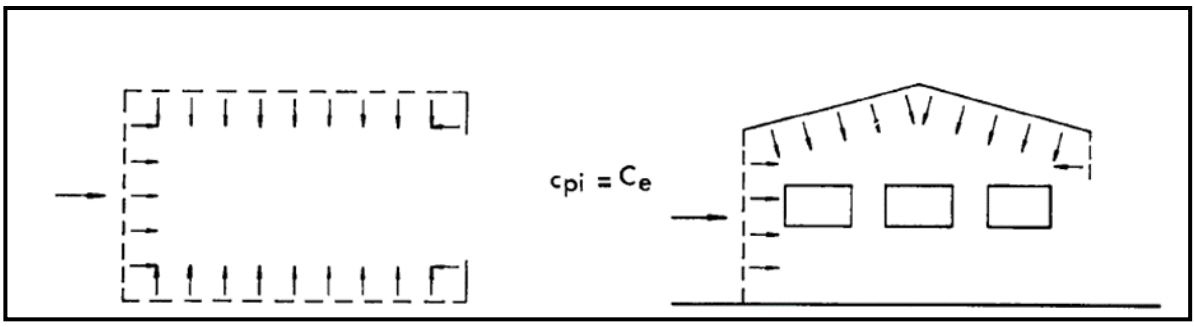
Figura 11: Vento perpendicular à abertura dominante



Fonte: Bellei (1994)

c.2) Aberturas localizadas a sotavento, adotar o valor do coeficiente de forma externo, C_e, correspondente a esta face, conforme Tabela 4. Esquematicamente representado pela Figura 12;

Figura 12: Abertura dominante na face sotavento



Fonte: Bellei (1994)

c.3) Aberturas dominantes em uma face paralela a direção do vento;

Adotar o valor de C_e, correspondente ao local de abertura nesta face, segundo a Tabela 4.

c.4) Abertura dominante não situada em zona de alta sucção;

As Zonas de alta sucção externa são as zonas hachuradas $(c_{pe}\, médio)$, nas Tabelas 4 e 5. Os valores de c_{pi} dependem da relação entre a área da abertura dominante (A_d) e a área total das outras aberturas situadas nas faces de sucção externa (A_s), conforme Quadro 5, a seguir.

Quadro 5: Relação entre A_d/A_s na determinação de c_{pi}

A_d/A_s	Cp_i
0,25	- 0,4
0,50	- 0,5
0,75	- 0,6
1,0	- 0,7
1,5	- 0,8
4 ou mais	- 0,9

Fonte: elaborado pelo autor, 2018, adaptado da ABNT - NBR 6123,1988

Ainda segundo este documento normativo, é impermeável os seguintes componentes estruturais: lajes e cortinas de concreto armado ou protendido; paredes de alvenaria, blocos de concreto e afim, que não possuem aberturas (portas e janelas). (ABNT- NBR 6123, 1988).

O método para determinação do coeficiente de pressão interna (c_{pi}), para os demais casos (paredes impermeáveis) é apresentado no anexo D, como uma vazão de ar que passa por uma pequena abertura de área A, e dada pela seguinte equação 9 a seguir: (ABNT- NBR 6123, 1988):

$$Q = K.A.\rho.V \qquad \text{Equação (9)}$$

Onde:

K = coeficiente de vazão;

V = velocidade do ar na abertura.

Sendo:

$$V = \sqrt{\frac{2.[\Delta p_e - \Delta p_i]}{\rho}} \qquad \text{Equação (10)}$$

Onde:

ρ = massa específica do ar, considerada constante (isto é, o ar é considerado incompressível).

Após equilíbrio, considerando Q = 0, para o número n de aberturas, em que a massa de ar que entra em uma edificação é igual à que sai, e isto é demonstrado conforme somatório da equação (11):

$$\sum_1^n \pm k.A.\rho\,.\sqrt{\frac{2.|\Delta p_e - \Delta p_i|}{\rho}} = 0 \qquad \text{Equação (11)}$$

Considerando que a permeabilidade seja constante, obtêm se a equação (12):

$$\sum_1^n \pm\ A.\sqrt{= \left|C_{pe} - C_{pi}\right|} = 0 \qquad \text{Equação (12)}$$

Segundo NBR 6123/1988, resultados experimentais comprovam que equação (12), pode ser utilizada para aberturas maiores, isto é, desde que sejam considerados os coeficientes de pressão médios no perímetro das aberturas. Estes coeficientes médios, designados de ${C_e}^*$e ${C_i}^*$, podem ser tanto coeficientes de pressão, como também de forma, encontrados na norma ou em literatura. Sendo assim, tem-se a seguinte equação:

$$\sum_1^n \pm\ A.\sqrt{= |{C_e}^* - {C_i}^*|} = 0 \qquad \text{Equação (13)}$$

A equação 13, segundo Loredo-Souza (1992), é o método de cálculo mais usado da NBR 6123/1988, para obtenção dos coeficientes de pressão interna em edificações. Esta equação considera raiz positiva quando tem se $Ce^* < Ci^*$ e negativa situações em $Ce^* > Ci^*$·, ou seja, a raiz terá o mesmo sinal de $Ce^* - Ci^*$. O cálculo pode ser realizado através de várias aproximações, em que se arbitram valores para Ci^*.

3.4 COEFICIENTES DE FORÇA (F)

A força do vento atuando sobre uma edificação de área A em uma direção perpendicular a estrutura analisada, é dada pela por: (ABNT- NBR 6123, 1988).

$$F = F_e - F_i$$ Equação (14)

Onde:

$F_e =$ Força externa a edificação, agindo na superfície plana de área A;

$F_i =$ Força interna a edificação, agindo na superfície plana de área A.

Portanto:

$$F = (C_e - C_i).q\ .A$$ Equação (15)

Sendo:

C_e = coeficiente de forma externa:

$$C_e = \frac{F_e}{q.A}$$ Equação (11)

C_i = coeficiente de forma interna:

$$C_e = \frac{F_i}{q.A}$$ Equação (12)

4 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Neste trabalho serão realizados os seguintes procedimentos metodológicos:

i. Apresentação da edificação (pavilhão) a ser analisada;
ii. Determinação das ações do vento conforme NBR 6123/1988 no pavilhão escolhido;
iii. Comparação dos resultados analíticos com resultados experimentais em ensaios de túnel de vento encontrados em literaturas;
iv. Validação dos dados.

4.1 CARACTERIZAÇÃO DA PESQUISA

Este trabalho é baseado nos métodos de cálculo e informações apresentados na norma NBR 6123/1988 (Forças devidas ao Vento em Edificações), adequadas para o tipo de análise proposta, e se constitui numa pesquisa do tipo exploratória e bibliográfica.

4.2 DELIMITAÇÕES DA PESQUISA

O trabalho será concentrado no estudo da ação do vento em edificações de plantas retangulares do tipo galpão (coberturas com duas águas). A seção correspondente aos cálculos a serem realizados seguirá os métodos preconizados pela norma NBR 6123/1988, levando em consideração às direções do vento a 0º neste tipo de estrutura.

4.3 TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DA COLETA DE DADOS

As técnicas e parâmetros utilizados neste trabalho serão dados coletados e fornecidos pela NBR 6123/1988 e resultados experimentais de túnel de vento realizado por Loredo-Souza (1992).

A partir dos resultados de ensaios experimentais dos modelos escolhidos, mais especificadamente, no caso de pavilhão com cobertura em duas águas, foram realizadas pequenas adaptações nas dimensões do mesmo, visto que o modelo ensaiado era um protótipo, mas, mantendo-se os casos e combinações usados no ensaio experimental. No pavilhão de duas águas analisado, só foi considerado o vento a 0°; e valores de Ce obtidos nas faces a barlavento, a sotavento e nas laterais, mantendo a mesma situação a qual o protótipo foi submetido no ensaio de túnel de vento.

Ainda neste modelo analisado, a fim de complementar o trabalho realizado anteriormente por Loredo-Souza (1992), foram calculados os coeficientes de pressão e de forma externo, na cobertura. Todavia, como o autor não realizou ensaio para determinação desses coeficientes na cobertura, não foi possível fazer uma comparação dos métodos (analítico e experimental) para esta situação específica.

Para concluir este trabalho, foram realizadas análises comparativas entre os métodos analíticos e experimentais, visando evidenciar as diferenças entre os dois.

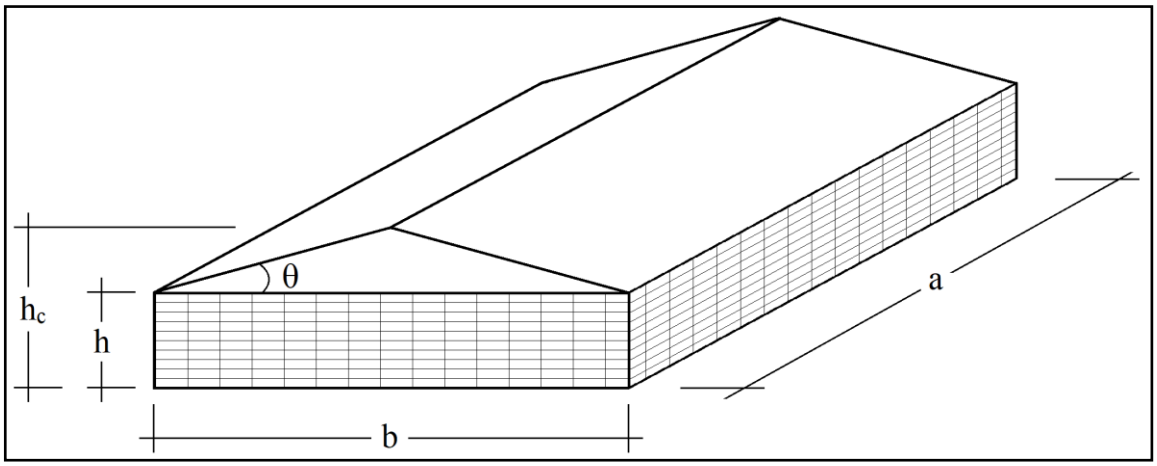
5 PAVILHÃO ANALISADO

Neste capítulo, é considerado um modelo de pavilhão industrial com uma cobertura de duas águas e sem divisórias internas. Este capítulo retrata também, de forma sucinta, dados do modelo original usado no ensaio de túnel de vento. Além de apresentar características do modelo do pavilhão estudado (adaptado), a sua localização, as suas dimensões e as aberturas consideradas nos casos estudados e suas combinações.

5.1 MODELO

O modelo ensaiado é um modelo reduzido de um pavilhão com duas águas, construído em madeira (fechamentos laterais e oitões) e cobertura feita em alumínio, com ângulo de inclinação do telhado (θ = 12 °). O mesmo foi construído sobre uma base retangular de madeira de 13 mm de espessura e dimensões em planta de 500 mm x 700 mm. É representado esquematicamente na Figura 13 e suas dimensões e proporções podem ser observadas no Quadro 6 e 7, respectivamente. Já o Quadro 8, indica os tipos de aberturas. O ensaio considerou o tamanho das aberturas (área de abertura) padrão, independentemente de ser portão ou furo.

Figura 13: Desenho esquemático em perspectiva do pavilhão analisado



Fonte: elaborado pelo autor, 2018 adaptado de Loredo-Souza, 1992.

Quadro 6: Dimensões do modelo do pavilhão original

DIMENSÕES (mm)
a = 400
b = 200
h = 50
hc = 71,3

Fonte: elaborado pelo autor, 2018, adaptado de Loredo-Souza, 1992

Quadro 7: Características do modelo do pavilhão original

Tipos de aberturas	Proporção em relação abertura	Área de abertura (mm²)
Oitão	1	1200
Paredes laterais	1/2	600
Paredes laterais	1/4	300

Fonte: elaborado pelo autor, 2018 adaptado, de Loredo-Souza, 1992

Quadro 8: Tipo e localização das aberturas para cada caso analisado

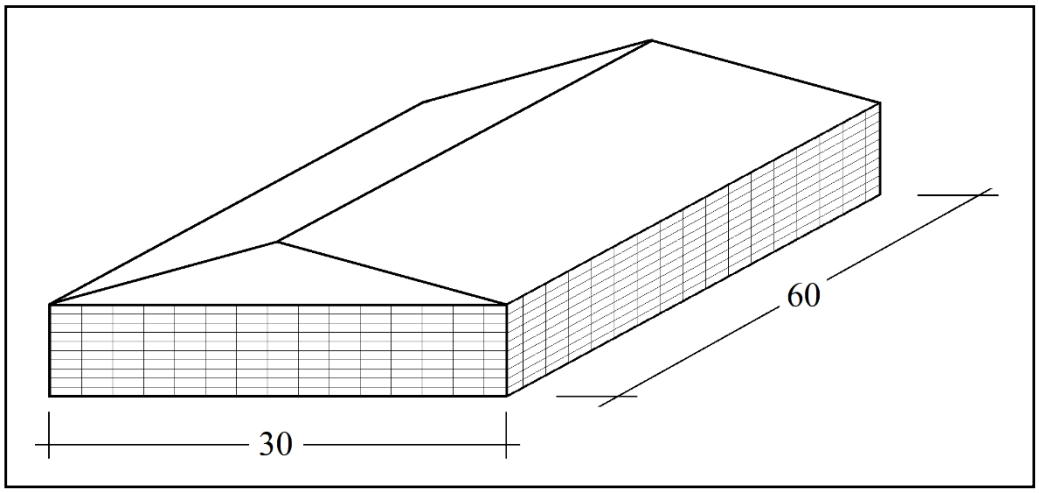
Caso	Tipo de Abertura	Oitão Frontal	Oitão Fundos	Lateral Direita	Lateral Esquerda
1	Portão	1	0	0	0
2	Portão	1	0	1/2	1/2
3	Portão	1	0	1/4	1/4
4	Furos	1	0	1/2	1/2

Fonte: elaborado pelo autor, 2018 adaptado, de Loredo-Souza, 1992

5.2 MODELO ADAPTADO

Para análise do pavilhão, foram realizadas algumas adaptações, no modelo do pavilhão original. Nesse processo de adaptação, é mantida a proporção entre altura e a largura do modelo original. Também são preservadas as combinações e os tipos de aberturas realizadas para cada caso ensaiado. A Figura 14, apresenta de forma ilustrada, essas novas dimensões em metros, no modelo adaptado.

Figura 14: Perspectiva do modelo do pavilhão com suas dimensões adaptadas



Fonte: elaborado pelo autor, 2018 adaptado de Loredo-Souza, 1992

5.2.1 Localização

Para fins de cálculo da pressão dinâmica, para determinação das cargas atuantes nesta edificação, é considerado que o modelo analisado se encontra na zona industrial da cidade de Porto Alegre - RS, usado como depósito e localizado em um terreno coberto por obstáculos, com uma cota média de aproximadamente 10,00m.

5.2.2 Características das situações analisadas

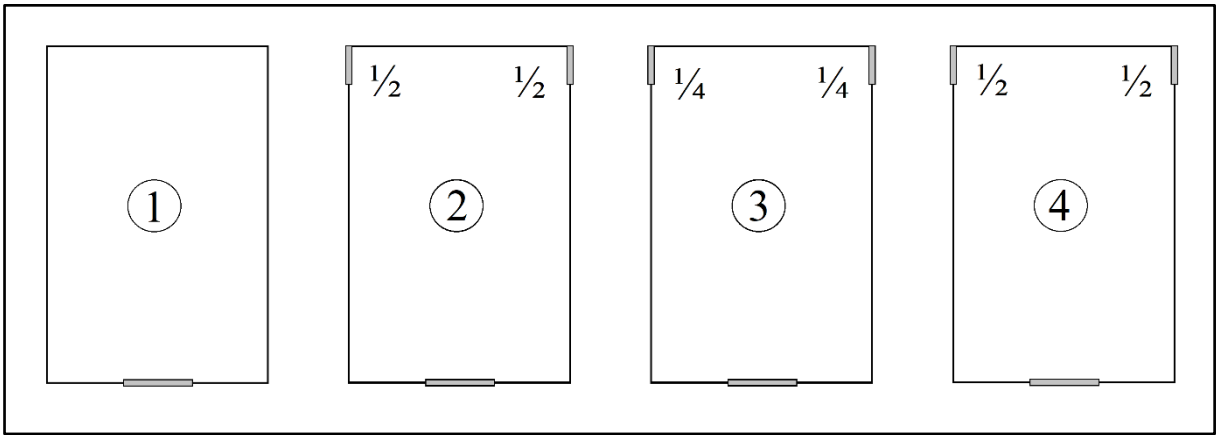
Todos os casos analisados neste exemplo são para um mesmo ângulo de incidência do vento, α = 0º e podem ser observados no Quadro 9. A Figura 15 exemplifica as características de cada caso analisado.

Quadro 9: Características dos casos analisados

CARACTERÍSTICAS DOS CASOS	
CASO 1	Há apenas uma abertura no oitão frontal, as demais faces e a cobertura encontram-se impermeáveis.
CASO 2	O portão permanece no oitão frontal, e além dessa abertura, são inseridas aberturas nas laterais do pavilhão com área de abertura equivalente à metade da área de abertura do oitão.
CASO 3	O portão permanece no oitão frontal, e além dessa abertura, são inseridas aberturas nas laterais do pavilhão com área de abertura equivalente a ¼ de abertura do oitão.
CASO 4	Para este caso, o modelo possui uma abertura no oitão, do tipo furos e aberturas laterais equivalentes a ½ da abertura do oitão.

Fonte: elaborado pelo autor, 2018, adaptado de Loredo-Souza, 1992

Figura 15: Localização e a proporção, em relação à área do oitão das aberturas para cada caso analisado



Fonte: Elaborado pelo autor, 2018 adaptado de Loredo-Souza, 1992

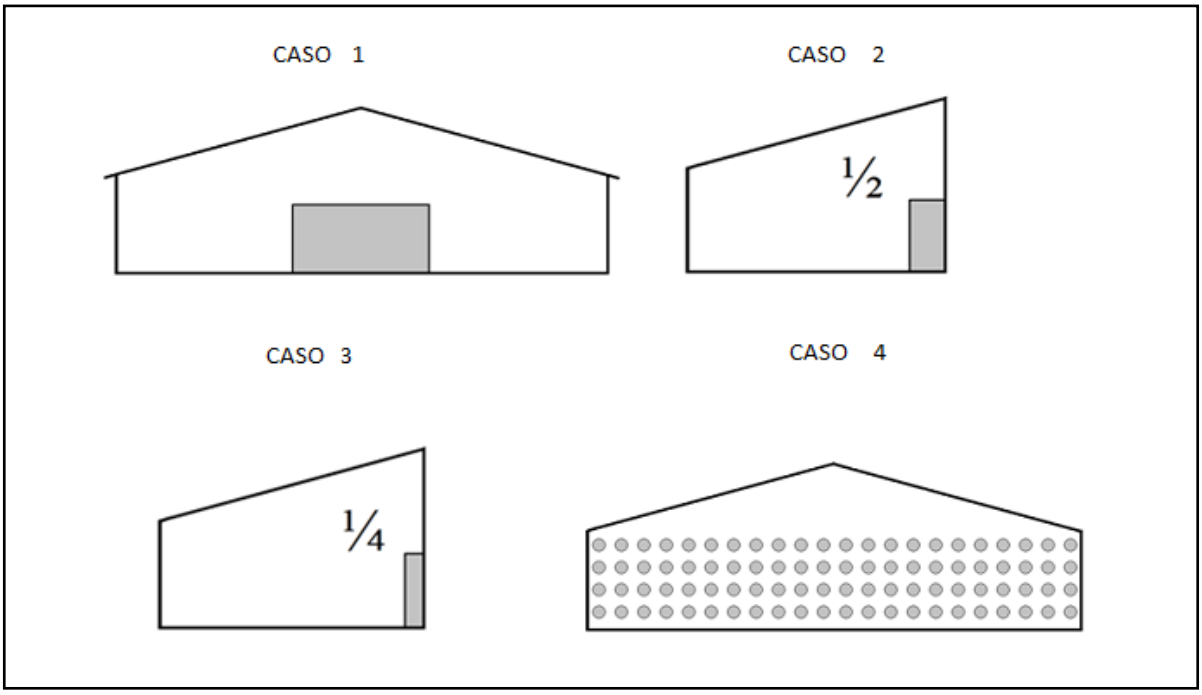
Para um melhor entendimento das informações expostas acima, o Quadro 10 apresenta a localização das aberturas, a quantidade de aberturas e a sua proporção para cada caso estudado (caso 1, 2, 3 e 4). Em contrapartida, a Figura 16 representa ilustrativamente os tipos de abertura e suas respectivas localizações para cada caso analisado.

Quadro 10: Proporção em relação à abertura do oitão, localização e a quantidade de abertura para os casos analisados

Caso	Proporção em área de abertura na lateral em relação à abertura localizada no oitão			
	Oitão Frontal	Oitão Fundos	Lateral Direita	Lateral Esquerda
1	1	0	0	0
2	1	0	1/2	1/2
3	1	0	1/4	1/4
4	1	0	0	0

Fonte: elaborado pelo autor, 2018 adaptado de Loredo-Souza, 1992

Figura 16: Tipos de aberturas e suas respectivas áreas para os casos 1, 2, 3 e 4 analisados



Fonte: elaborado pelo autor, 2018 adaptado de Loredo-Souza, 1992

6 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Neste capítulo são demostrados os valores de pressão externa e interna, tanto calculada conforme NBR 6123/1988, como os obtidos experimentalmente.

Além de apresentar uma análise e discussão desses valores, de forma a comparar esses resultados.

6.1 RESULTADOS CONFORME NBR 6123/1988

Nesta seção são analisados os resultados obtidos para coeficientes de pressão externa e coeficientes de pressão interna conforme os métodos preconizados pela NBR 6123/1988.

6.1.1 Coeficientes de pressão e de forma externos

Antes da determinação dos coeficientes de pressão externo, primeiramente, são feitas alterações na largura e comprimento, do modelo original (protótipo), com intuito de deixá-lo com dimensões mais parecidas com a de um pavilhão real.

Procurou-se manter também as características originais (localização das aberturas, proporção, o tipo de abertura e a permeabilidade das paredes laterais) de cada situação analisada.

No Quadro 11, abaixo, podem ser observadas essas novas dimensões. Já no Quadro 12, apresenta-se a quantidade de abertura, a proporção entre elas (oitão e laterais), além de exibir o tamanho dessas áreas, para cada caso analisado.

A Figura 17 mostra, em planta, de forma ilustrativa, o modelo atual de estudo (adaptado), além de identificar, os valores de permeabilidade localizados nas paredes laterais. Representa também, em corte, a fachada lateral e sua respectiva dimensão.

Quadro 11: Novas dimensões do pavilhão analisado

DIMENSÕES (m)
a = 60
b = 30
h = 7,5
hc = 10,69

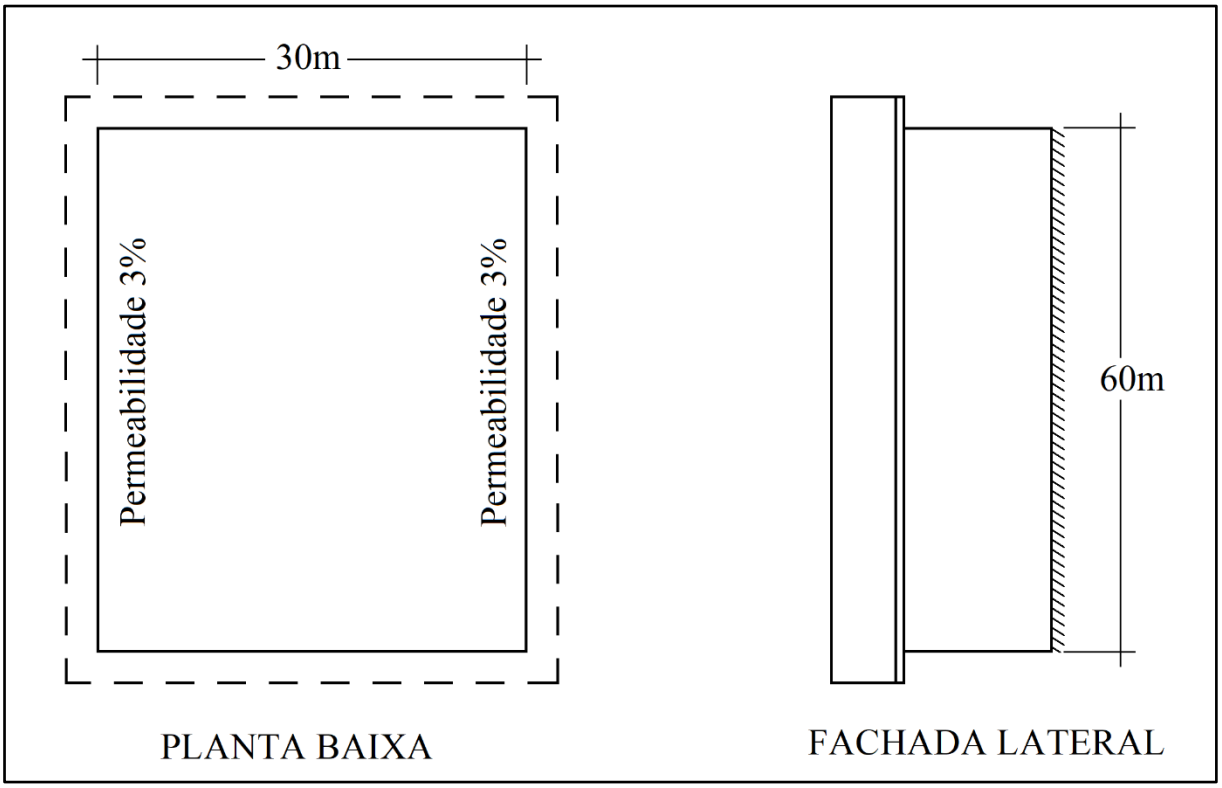
Fonte: elaborado pelo autor

Quadro 12: Características das aberturas analisadas

Tipos de aberturas	Proporção em relação a abertura do oitão	Área de abertura (m²) e permeabilidade
Oitão	1	27,30
Paredes laterais	1/2	13,65 (3%)
Paredes laterais	1/4	6,83 (1,5%)

Fonte: elaborado pelo autor, 2018, adaptado de Loredo-Souza, 1992.

Figura 17: Representação da menor e da maior dimensão em planta em corte do pavilhão e a sua impermeabilidade nas paredes laterais para área de abertura equivalente a 1/2 da abertura do oitão



Fonte: elaborado pelo autor

Os coeficientes de forma utilizados para as paredes e para a cobertura do galpão analisado são apresentados nas Tabelas 4 e 5. Para as paredes, a edificação enquadra-se na Tabela 4.

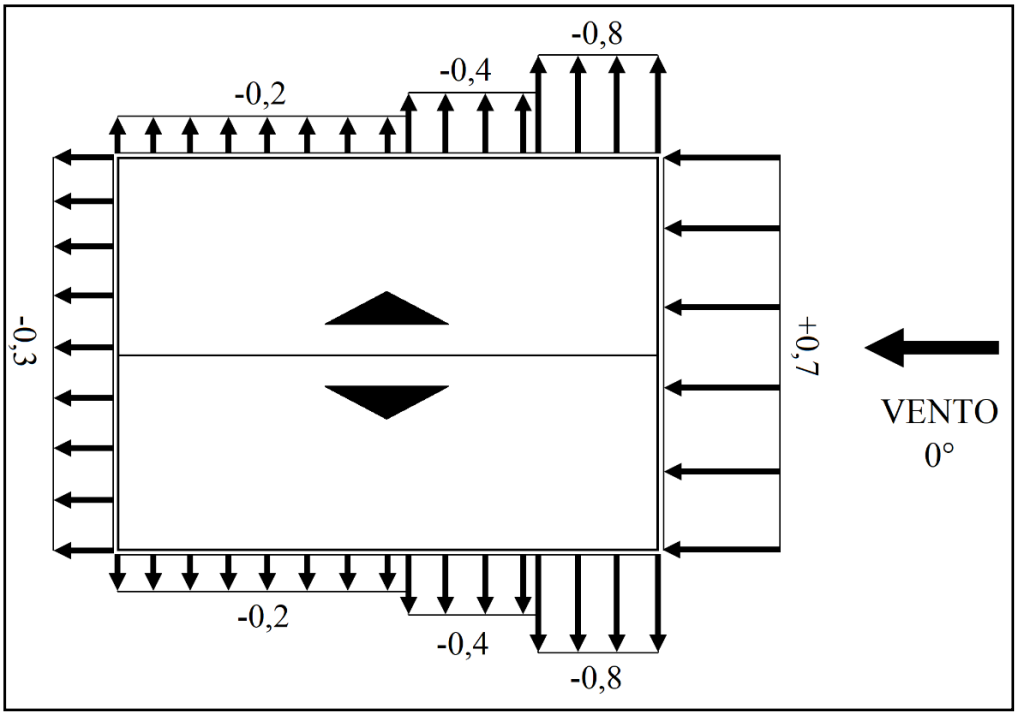
Conforme Tabela 4, são obtidos os coeficientes de pressão externa. Para o pavilhão estudado, tem-se a seguinte situação tanto **para caso 1** quanto para **caso 2, 3** e **4:**

$$\frac{a}{b} = \frac{60}{30} = 2$$

$$\frac{h}{b} = \frac{7{,}5}{30} = 0{,}25$$

A partir dos resultados da proporção das dimensões do pavilhão analisado, obtêm-se os valores dos coeficientes de pressão externa nas paredes (laterais e frontais) desta edificação, retirados da Tabela 4 e, em seguida, é montado um diagrama, representando esquematicamente esses coeficientes agindo sobre os fechamentos laterais, como se observa na Figura 18.

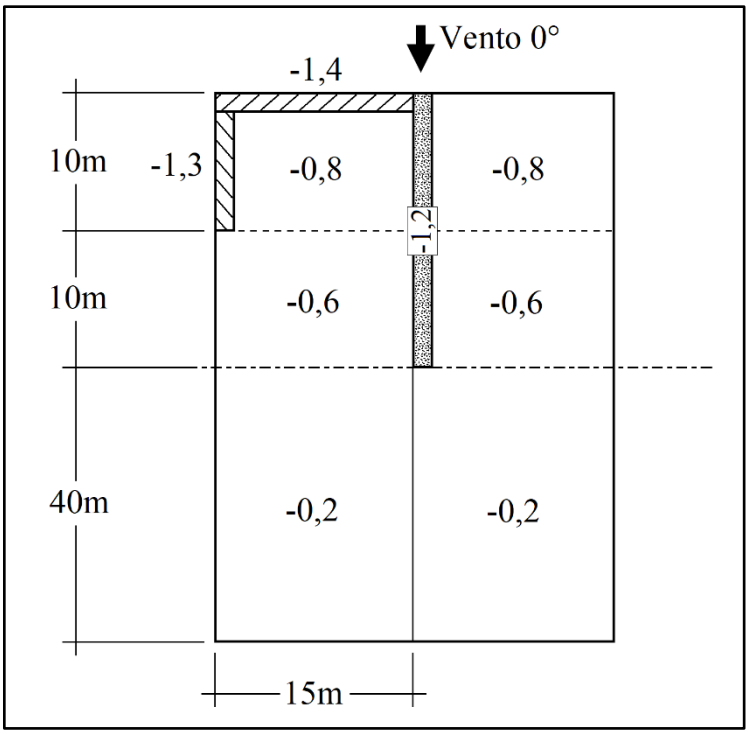
Figura 18: Coeficientes de pressão e de forma, externos, para as paredes frontais e laterais



Fonte: elaborado pelo autor

Tratando-se do telhado, levando em consideração suas características como, a sua inclinação e o ângulo de incidência (para esta situação especifica é a 0°) do vento agindo sobre a ela, é utilizada a Tabela 5. Esses valores podem ser identificados na Figura 19 abaixo.

Figura 19: Coeficientes de pressão e de forma externos para cobertura, para um vento a 0°



Fonte: elaborado pelo autor

6.1.2 Coeficientes de pressão interna

Em seguida, depois de realizado o procedimento de determinação dos coeficientes de pressão externos, é feito o cálculo da pressão interna.

Sabendo-se que a Norma apresenta maneiras diferentes para que essas pressões sejam determinadas. Apenas no **caso 1**, é realizado duas formas distintas de se obter esse valor, tentando demostrar de forma rápida, as opções que a NBR 6123/1988 orienta para a determinação desses coeficientes.

Primeiramente as pressões internas são determinadas conforme o que prescreve o item 6.2.5 da Norma e a segunda forma é utilizando a equação 13 (contida

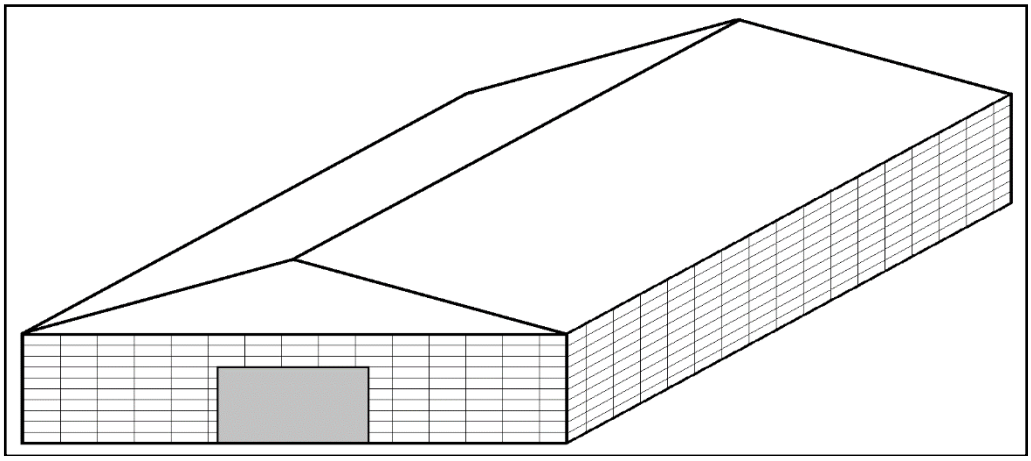
no ANEXO D da NBR 6123/1988). Para a segunda forma de obtenção desse coeficiente, são realizadas várias tentativas, arbitrando, de valores de Cpi, até que o mesmo satisfaça a equação 13.

Também são realizadas médias ponderadas dos valores dos coeficientes de pressão externa correspondente a região de abertura analisada. Utilizando os resultados obtidos através dessa média como uma forma de arbitrar o coeficiente de pressão interna.

Para o caso **2, 3** e **4**, é utilizada, apenas, o Anexo D, como forma de se obter os coeficientes de pressão interna, já que ela pode ser usada tanto para grandes aberturas, quanto para pequenas aberturas. Abaixo, encontra-se de forma detalhada, cada situação analisada e a forma de obtenção dos coeficientes de pressão interna para cada caso:

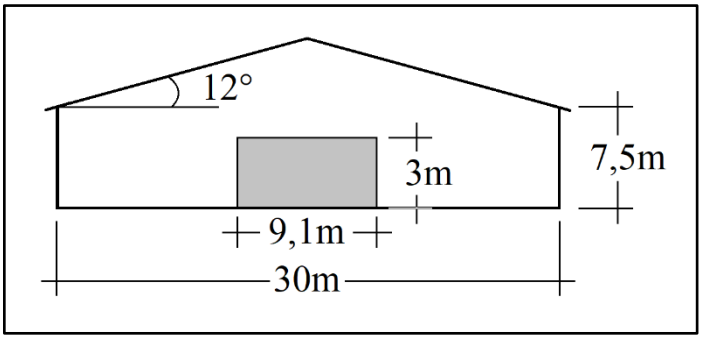
a) **Caso 1**: Mostrado pela Figura 20 e 21 respectivamente, onde a Figura 19 representa, em corte, detalhes da abertura.

Figura 20: Perspectiva do pavilhão do caso 1a, localização do portão no oitão frontal



Fonte: elaborado pelo autor, 2018, adaptado de Loredo-Souza, 1992

Figura 21: Fachada principal (caso 1), com dimensões da abertura localizada no oitão frontal do pavilhão



Fonte: elaborado pelo autor

Determinando-se Cpi, conforme o item 6.2.5 da Norma, considerando uma abertura dominante em face de barlavento, para um vento a 0°.

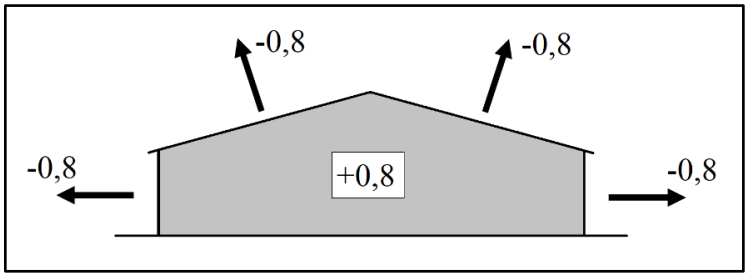
Primeiramente para uma abertura ser considerada dominante, a mesma tem que ter sua área maior ou igual à área de sucção. Portanto, a verificação dessa condição (abertura dominante ou não) é realizada da seguinte maneira:

$$A_d = 9{,}1 \times 3$$
$$A_d = 27{,}3\ m^2$$
$$A_s = zero$$

Para este caso, A_d é maior que A_s, logo, caracteriza-se como uma abertura dominante. Com base nessa informação, são aplicados os valores achados para A_d e A_s, fazendo essa relação $(A_d / A_s) = \infty$. Retiram-se os dados do Quadro 04 e obtêm-se o valor de Cpi, igual a +0,8, como indicado na Figura 22.

A Figura 22, também representa ilustrativamente, de forma resumida, uma análise de como esses coeficientes estão localizados na edificação, onde valores positivos indicam sobrepressão e valores negativos, sucção.

Figura 22: Pressão interna, provocada pela presença de abertura dominante na face de barlavento a 0°, para o caso 1



Fonte: elaborado pelo autor

Já o segundo método para determinação do coeficiente de pressão interna, é apresentado no Quadro 13.

Quadro 13: Coeficientes de pressão interna, obtidos conforme equação 13, para o caso 1

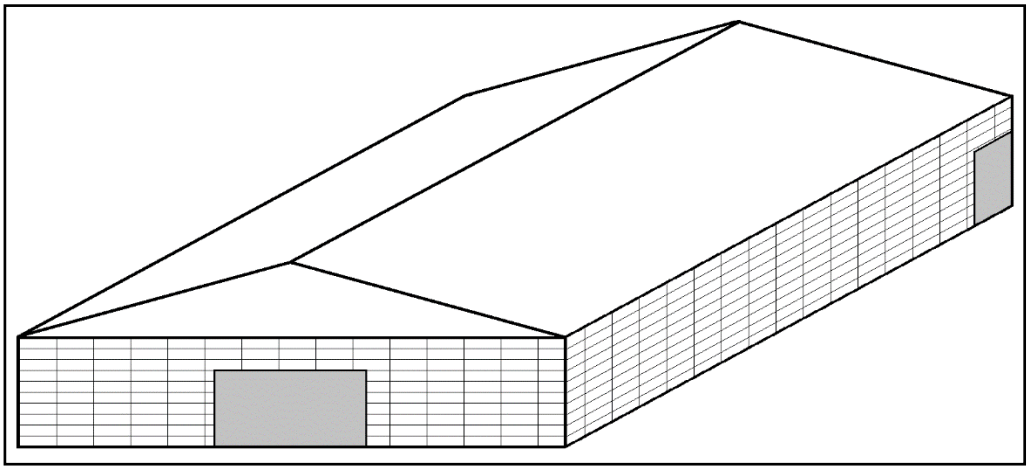
Local	Área de abertura (m²)	Ce	Ci					
			+0,10		+0,50		+0,70	
C	27,30	0,70	Ce - Ci	±A√(|Ce -Ci|)	Ce - Ci	±A√(|Ce -Ci|)	Ce - Ci	±A√(|Ce -Ci|)
			0,60	21,15	0,20	12,21	0,00	0,00
SOMATÓRIO			**Σ**	21,15	**Σ**	12,21	**Σ**	0,00

Fonte: elaborado pelo autor

Portando para o Caso 01, Cpi = +0,70.

b) **Caso 2**: Representado pela Figura 23 e com suas aberturas localizadas nos módulos A3 e B3, conforme Figura 8.

Figura 23: Perspectiva do pavilhão para caso 2, com abertura no oitão frontal e aberturas nas laterais nos módulos A3 e B3



Fonte: elaborado pelo autor,2018, adaptado de Loredo-Souza, 1992.

O cálculo da pressão interna, para este caso analisado, é demonstrado no Quadro 14.

Quadro 14: Coeficientes de pressão interna, obtidos conforme equação 13, para o caso 2

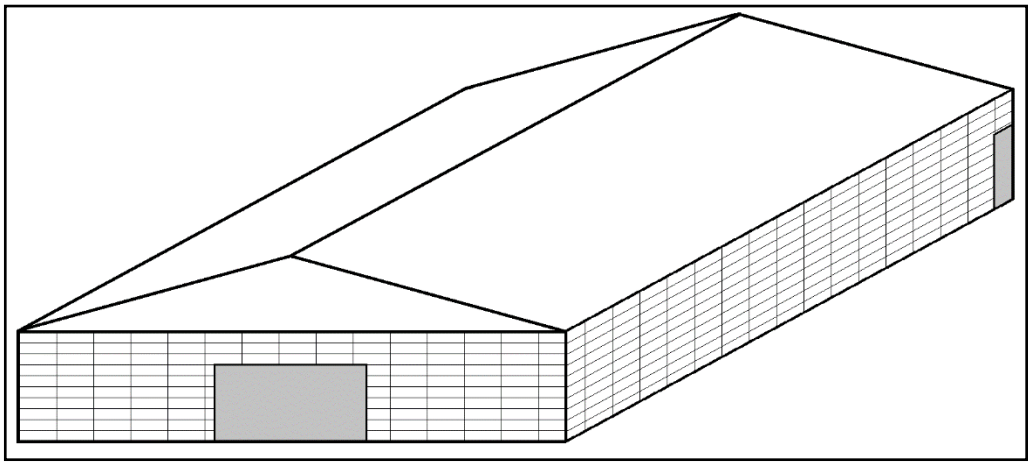
Local	Área de abertura (m²)	Ce	Ci					
			+0,10		+0,30		+0,25	
C	27,30	0,70	Ce - Ci	±A√(|Ce -Ci|)	Ce - Ci	±A√(|Ce -Ci|)	Ce - Ci	±A√(|Ce -Ci|)
			0,60	21,15	0,40	17,27	0,45	18,32
A3	13,65	-0,20	-0,30	-7,48	-0,50	-9,65	-0,45	-9,16
B3	13,65	-0,20	-0,30	-7,48	-0,50	-9,65	-0,45	-9,16
SOMATÓRIO			**Σ**	6,15	**Σ**	-2,03	**Σ**	0,00

Fonte: elaborado pelo autor

Portando para o Caso 02, Cpi = +0,25.

c) **Caso 3**: Apresentado na Figura 24 e com suas aberturas localizadas nos módulos A3 e B3, conforme Figura 8.

Figura 24: Perspectiva do pavilhão para caso 3, com abertura no oitão frontal e aberturas nas nos módulos A3 e B3



Fonte: elaborado pelo autor, 2018, adaptado de Loredo-Souza, 1992.

O cálculo da pressão interna, para este caso analisado, é indicado no Quadro 15, abaixo.

Quadro 15: Coeficientes de pressão interna, obtidos conforme equação 13, para o caso 3

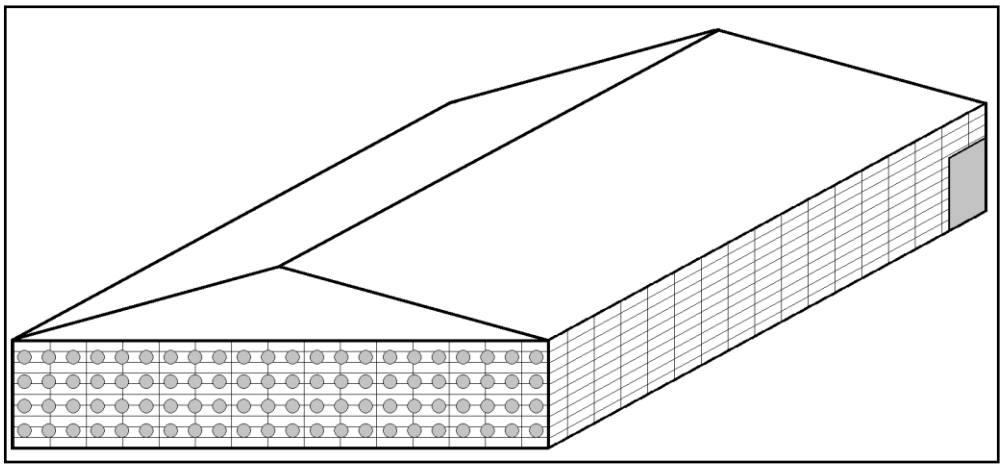
Local	Área de abertura (m²)	Ce	Ci					
			+0,30		+0,50		+0,52	
C	27,30	0,70	Ce - Ci	±A√ (|Ce -Ci|)	Ce - Ci	±A√ (|Ce -Ci|)	Ce - Ci	±A√ (|Ce -Ci|)
			0,40	17,27	0,20	12,21	0,18	11,58
A3	6,83	-0,20	-0,50	-4,83	-0,70	-5,71	0,72	-5,79
B3	6,83	-0,20	-0,50	-4,83	-0,70	-5,71	0,72	-5,79
SOMATÓRIO			**Σ**	7,61	**Σ**	0,78	**Σ**	0,00

Fonte: elaborado pelo autor

Portando para o Caso 03, Cpi = +0,52.

d) **Caso 4**: Representado pela Figura 25 e com suas aberturas localizadas nos módulos A3 e B3, conforme Figura 8.

Figura 25: Perspectiva do pavilhão para caso 4, com abertura no oitão frontal, do tipo furos circulares, e aberturas nas laterais (direita e esquerda)



Fonte: elaborado pelo autor, 2018, adaptado de Loredo-Souza, 1992.

O cálculo da pressão interna, para este caso analisado, é indicado no Quadro 16, abaixo.

Quadro 16: Coeficientes de pressão interna, obtidos conforme equação 13, para o caso 4

Local	Área de abertura (m²)	Ce	Ci					
			+0,10		+0,30		+0,25	
C	27,30	0,70	Ce - Ci	±A√(|Ce -Ci|)	Ce - Ci	±A√(|Ce -Ci|)	Ce - Ci	±A√(|Ce -Ci|)
			0,60	21,15	0,40	17,27	0,45	18,32
A3	13,65	-0,20	-0,30	-7,48	-0,50	-9,65	-0,45	-9,16
B3	13,65	-0,20	-0,30	-7,48	-0,50	-9,65	-0,45	-9,16
SOMATÓRIO			**Σ**	6,15	**Σ**	-2,03	**Σ**	0,00

Fonte: elaborado pelo autor

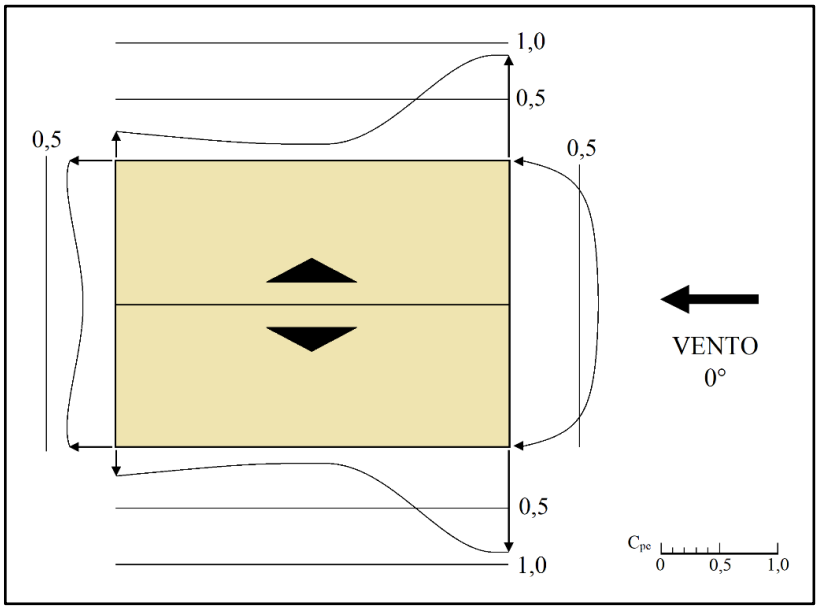
Portando para o Caso 04, Cpi = +0,25.

6.2 RESULTADOS EXPERIMENTAIS

6.2.1 Coeficiente de pressão externa

As distribuições das pressões externas sobre o pavilhão são obtidas para um vento turbulento e deslizante, incidindo sobre o mesmo a 0°. Esse tipo de vento, é o que é realmente interessante para ser considerado, do ponto de vista da aplicação prática, pois simula o vento natural. A Figura 26 mostra uma envoltória com valores correspondentes desses coeficientes obtidos experimentalmente.

Figura 26: Distribuição das pressões externas no pavilhão para um vento turbulento e deslizante



Fonte: elaborado pelo autor, 2018, adaptado de Loredo-Souza, 1992.

6.2.2 Coeficiente de pressão interna

Os coeficientes de pressão interna obtidos experimentalmente são indicados no Quadro 17. Esse quadro apresenta os valores máximos (pico), os valores mínimos e os valores médios dos coeficientes para os casos analisados.

Quadro 17: Coeficientes de pressão interna obtidos experimentalmente para cada caso analisado

Caso	**C_i (ensaiado)**		
	Extremo		**Média**
01	0,52	0,52	0,52
02	0,20	0,32	0,26
03	0,37	0, 37	0,37
04	0,19	0,20	0,20

Fonte: elaborado pelo autor, 2018, adaptado de Loredo-Souza, 1992.

Neste trabalho são considerados para fins de comparação dos resultados de pressão interna, apenas os valores médios.

6.3 ANÁLISE E DISCUSSÕES

6.3.1 Pressão externa

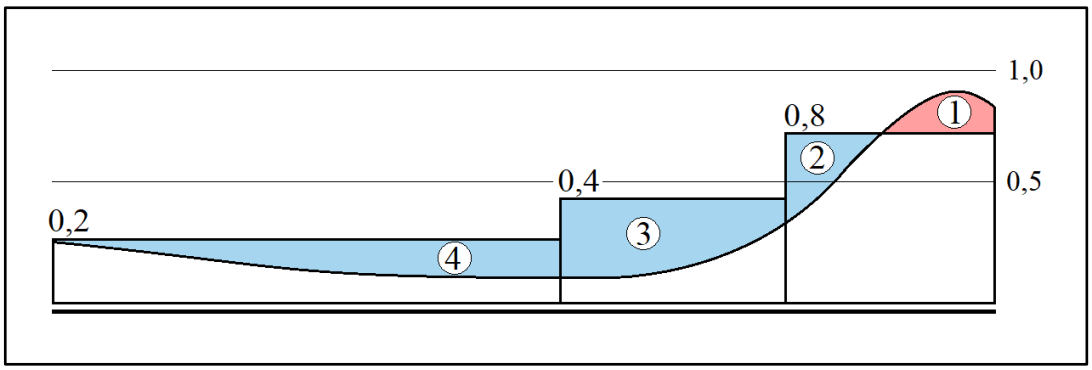
Os resultados encontrados, conforme as considerações da NBR 6123/1988, para pressão externa em paredes de uma edificação retangular, considera a ação do vento agindo de forma linear em toda a estrutura (laterais e oitões) do pavilhão, como é observado na Figura 18. Porém, analisando-se a Figura 25, com dados provenientes de resultados experimentais, observa-se que esses coeficientes não agem dessa mesma forma (linear) em nenhuma face da edificação.

Ainda analisando as Figuras 18 e 26, respectivamente. Percebe-se que para o oitão localizado a barlavento, por exemplo, o valor da sobrepressão é constante, devida a linearidade adotada pela NBR 6123/1988, enquanto que no ensaio para esta mesma face, tem-se uma parábola, onde começa de zero na primeira extremidade do oitão frontal, atingindo um pico e se torna zero na outra extremidade do oitão.

Para um melhor entendimento da análise dos resultados e a fim de compará-los, fez-se uma sobreposição dos valores dos diagramas ensaiados e os calculados.

A Figura 27 representa ilustrativamente essa sobreposição, atuando nos fechamentos laterais do pavilhão analisado. Com isso, adotou-se uma convenção, de cores, sempre que a Norma estiver a favor da segurança, adota-se a cor azul. E a cor vermelha, quando não estiver a favor da segurança. Ainda como forma de facilitar e enxergar melhor esses resultados enumerou-se regiões para tentar, de forma aproximada, estimar a porcentagem que essas áreas têm a favor ou não da Norma.

Figura 27: Sobreposição dos valores obtidos experimentalmente e analiticamente para pressão externa nos fechamentos laterais, para vento a 0°



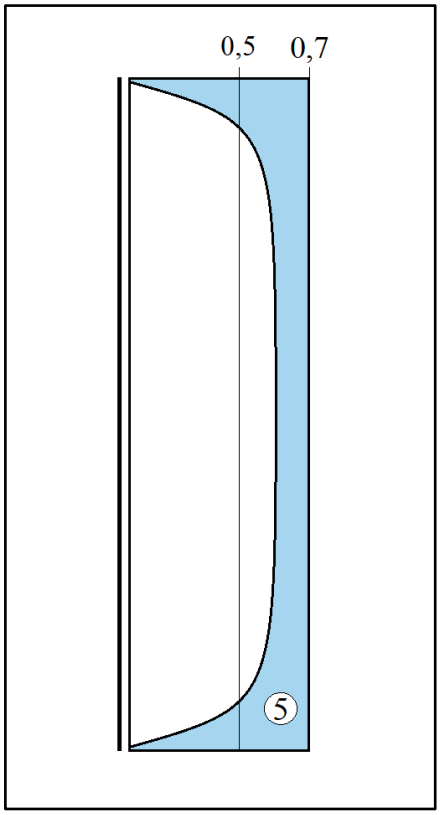
Fonte: elaborado pelo autor, 2018, adaptado de Loredo-Souza, 1992.

Analisando-se os resultados, da Figura 27, percebe-se que a área 1, em (vermelho), pertencente ao resultado experimental, se sobressai cerca de 5% dos valores obtidos pela Norma. Porém a própria normativa orienta o uso de coeficientes para revestimentos nessa região, suprindo a favor da segurança, essa área.

A área 2 da Figura 27, mostra que a Norma está cerca de 20% acima do valor ensaiado nessa mesma região. Para a área 3 tem-se também de maneira aproximada um resultado de 48 % a favor desta. E na área 4 a mesma se mostra cerca de 20 % conservadora.

Na Figura 28, é analisando os resultados desses coeficientes na face de barlavento (oitão frontal). A área 5 desta figura, demonstra um valor de cerca de 30 % superior ao valor do resultado ensaiado nessa mesma região.

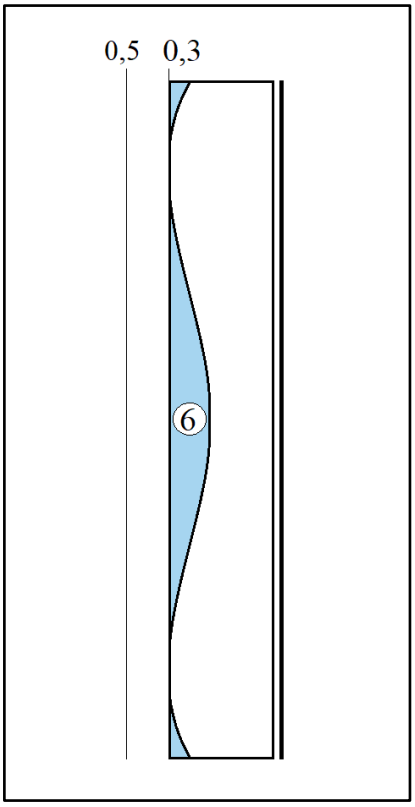
Figura 28: Sobreposição dos valores obtidos experimentalmente e analiticamente para pressão externa, no oitão frontal, a barlavento para vento a 0º



Fonte: elaborado pelo autor, 2018, adaptado de Loredo-Souza, 1992.

Para a Figura 29, analisando-se o oitão a sotavento, nota-se que a área 6, referente a Norma também age com bastante conservadorismo, sobressaindo-se em torno de 15% do ensaiado.

Figura 29: Sobreposição dos valores obtidos experimentalmente e analiticamente para pressão externa, no oitão dos fundos, sotavento para vento a 0º



Fonte: elaborado pelo autor, 2018, adaptado de Loredo-Souza, 1992.

Com base nessas análises, percebe-se de modo geral, o quão a Norma é conservadora e trabalha sempre com valores superdimensionados, a favor da segurança.

A Norma obteve resultados de coeficientes de pressão externa superiores aos ensaiados em todos os fechamentos (laterais, frontal e fundo) da edificação, garantindo a segurança da mesma.

6.3.2 Pressão interna

O Quadro 18 apresenta a diferença entre os valores calculados e ensaiados para cada caso analisado. Ainda neste quadro também é possível notar o percentual dessas diferenças de c_{pi}. Sabendo-se que na realidade essas diferenças nem deveriam existir. Então, convencionou-se que, diferenças menores que 5% são

aceitas e diferenças acima desse valor são consideradas exageradas e superdimensionadas, mesmo estando a favor da segurança.

Quadro 18: Análise comparativa de c_{pi} para os casos estudados

Casos	Cp_i (calculado)	Cp_i (ensaiado)	Diferença	Porcentagem (%)
01	0,7	0,52	0,18	18
02	0,25	0,23	0,03	2
03	0,52	0,37	0,15	15
04	0,25	0,20	0,05	5

Fonte: elaborado pelo autor, 2018, adaptado de Loredo-Souza, 1992.

Outro ponto observado é relacionado às aberturas, nos casos 2 e 4, tecnicamente, de acordo com as orientações normativas, esses valores deveriam ser iguais quando ensaiados, já que ambos consideram a mesma área de abertura.

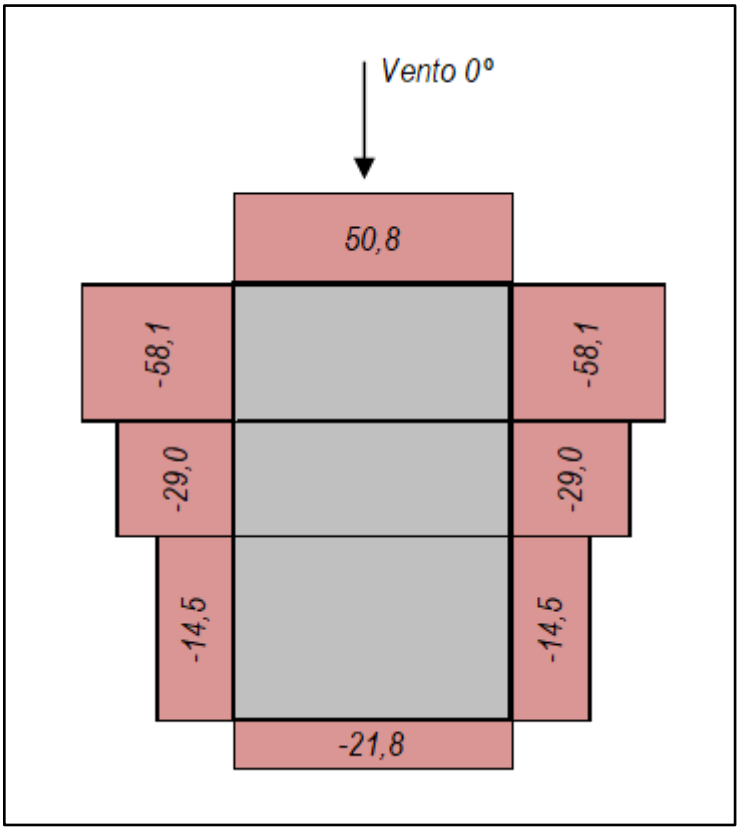
Porém, esse resultado se mostra contrário quando se muda o tipo de abertura no pavilhão e isso é evidenciado no Quadro 18. Nota-se também que apesar dela não considerar as características das aberturas, obteve resultado cerca de 5% superior ao ensaiado, garantindo a segurança da estrutura, demostrando mais uma vez o quão conservador ela é.

Analisando de forma geral os resultados, observa-se que a Norma é extremamente conservadora para os valores de c_{pi} , e teve valores superiores aos do ensaio para todos os casos analisados, chegando-se a ter diferenças expressivas com valores de até 18%.

6.3.3 Cargas agindo nos fechamentos

Como forma de enriquecer este trabalho, é calculado conforme a NBR 6123/1988 as pressões dinâmicas e com os resultados desses valores dos coeficientes de pressão obtidos, é demostrado na Figura 30, uma representação dessas cargas agindo sobre os fechamentos do modelo analisado. Ainda conforme esta figura, para valores positivos tem-se sobrepressão e para valores negativos sucção.

Figura 30: Cargas em kgf/m² nas faces laterais, barlavento e sotavento, para vento a 0°, obtido conforme NBR 6123/1988 para h=7,5m e θ=12°



Fonte: elaborado pelo autor

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A ação do vento é um dos fatores mais importantes a ser considerado no projeto estrutural de uma edificação, não podendo ser negligenciada em hipótese alguma, pois pode colocar em risco a estrutura e a segurança dos indivíduos que nela habitam. Para isso, é necessário durante a fase de projeto, levar em conta as suas dimensões, localização, inclinação do telhado, etc.

Além disso, é de suma importância à consideração das características relacionadas à permeabilidade dessa edificação, como: os tipos de aberturas e a localização das mesmas. Responsáveis por influenciar nos valores dos coeficientes de pressão interna.

É interessante também ressaltar que talvez na época de criação da Norma, as características dessas aberturas não fosse um ponto particular a ser considerado (tipo e a localização das aberturas) em uma edificação. Porém, no ensaio experimental analisado neste trabalho, comprova-se a importância de se levar em conta essas características, para cálculo da pressão interna, apresentando resultados divergentes desta.

Apesar dos resultados experimentais levarem em consideração a localização e o tipo de abertura, o mesmo obtém valores menores do que os indicados pela Norma. Os resultados analíticos se sobressaem 5% dos valores ensaiados, para este mesmo caso. Mas, o que é interessante para este caso específico (caso 4), é que a própria normativa, orienta que esses cálculos sejam realizados levando em conta somente a sua área de abertura. Porém, se essa orientação fosse uma afirmação verdadeira, os resultados do ensaio teriam que ser iguais para os dois tipos de situação (furo e portão), já que ambos os casos (caso 2 e caso 4), consideram a mesma área de abertura.

Conclui-se também que provavelmente esses valores de coeficientes externo e interno com valores maiores, obtidos através do cálculo, se deva pelo uso de medidores não tão modernos na época, até porque a cada ano que se passa são desenvolvidas novas tecnologias, tornando-os cada vez mais precisos.

Outro ponto a se considerar em relação aos valores conservadores obtidos da norma NBR 6123/1988, é o fato dela considerar as distribuições de pressões na edificação de forma linear.

O próprio ensaio utilizado neste trabalho, realizado por Loredo-Sousa, feito apenas 4 anos depois da publicação da norma NBR 6123/1988, já apontava que a mesma estava com valores sobressaídos aos valores obtidos por Loredo em seu ensaio, chegando a ter uma diferença superior a 45% para os coeficientes de pressão externa e uma diferença de 18% para os coeficientes de pressão interna.

De uma forma geral, pode-se concluir que este trabalho atingiu seu objetivo principal: provar como a Norma é conservadora e utiliza valores superdimensionados, mesmo que a favor da segurança. Do ponto de vista da engenharia, uma estrutura deve ser projetada e construída, além de prezar pela segurança, também a favor da economia, o que não justifica, deste modo, o superdimensionamento desta Norma.

Portanto, com base nesses levantamentos realizados neste trabalho, reforça-se a ideia de que a norma NBR 6123/1988, deve ser atualizada, sugerindo-se que a mesma utilize de resultados de ensaios experimentais, que constantemente vem sendo realizados pelas universidades públicas do Brasil para contribuir para essa atualização.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR6123**: Forças devidas ao vento em edificações. Rio de Janeiro, 1988.

BELLEI, I.H. **Edifícios Industriais em Aço - Projeto e Cálculo**. Projeto e Divulgação Tecnológica FEM. 2ª ed.rev. São Paulo, 1998.

BLESSMANN, J. **Aerodinâmica das construções**. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul; CNPq, 1983. v. 8.

_____. Intervalo de tempo para cálculo da velocidade básica do vento. 3ª. ed. Porto Alegre: Editora da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1988.

_____. **O vento na engenharia estrutural**. Porto Alegre: Editora UFRGS, 1995.

_____. **Introdução ao estudo das ações dinâmicas do vento**. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1998.

_____. **Acidentes causados pelo vento**. Porto Alegre: Editora Universidade / UFRGS, 2001.

_____. **Ação do vento em telhados.** 2 ed. rev. ampl. Porto Alegre: Ed. Universidade/UFRGS, 2009.

_____. **Pressão interna**. 3. ed. fac-similar. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 2013.

DAVENPORT, A.G; et al. **The application concepts to the wind loading of structure**. Faculty of Engineering Science, University of Western Ontario, v.19, 1961.

ELSHARAWY et al .**Wind-induced torsional loads on low buildings.** Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. V. 104-106, pp. 40-48, 2012.

FORNEL, Guilherme. **AÇÃO DE VENTO EM PAVILHÕES PARA USOS GERAIS.** Trabalho de conclusão de curso. Universidade Federal de Santa Maria-UFSM. Santa Maria, 2016.

GONÇALVES, Roberto M. et al. **Ação do vento nas edificações:** teoria e exemplos. 2. ed. São Carlos: Universidade de São Paulo, 2013.

GASPAR, Pedro; BRITO Jorge. **O Ciclo de Vida das Construções II - Vida Útil Funcional**. Jornal Arquitetura & Vida. Lisboa, 2003.

J.D, Holmes et al. **Wind loading handbook for Australia & New Zealand**. Australasian Wind Engineering society, 2012.

LOREDO-SOUZA, A. M. **Influência do tipo de abertura e das características do vento simulado na pressão interna em um pavilhão industrial.** Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio grande do Sul-URFGS. Porto Alegre, 1992.

MARIN, Fábio R.; ASSAD, Eduardo D.; PILAU, Felipe G. **Clima e ambiente:** introdução à climatologia para ciências ambientais. Campinas: Embrapa, 2008.

MARTINS, F. R.; GUARNIERI, R. A; PEREIRA; E. B. **O aproveitamento da energia eólica**. Rev. Bras. Ensino Fís. v. 30 n. 1 São Paulo, 2008.

MENDIS, P et al. **Wind loading on tall building**. Eletronic Journal of Structural Engineering (EJSE), 2007. Special Issue: Loading on Structures. Disponível em: http://www.ejse.org/. Acesso em: 19 março, 2018.

OKE, T.R. **Boundary layer climates**. London, Routledge Press. 1987.

PITTA, J. A. A. **Ações devidas ao vento em edifícios de andares múltiplos, edifícios com coberturas do tipo shed e do tipo duas águas com lanternim**. Escola de Engenharia de São Paulo. USP, São Carlos, 1987.

ROSA et al. **Wind-induced dynamics and loads in a prismatic slender building: A modal approach based on unsteady pressure measurements**. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, V. 107-108, pp. 118-130, 2012.

RIOS, M.P. **Efeito de amortecedores no comportamento dinâmico de edifícios altos sob cargas de vento**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas). Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2016.

TAPAJÓS, L.S et al .**Efeito do vento no dimensionamento de edifícios de concreto armado**.Rev. IBRACON Estrut. Mater. vol.9 no.6 São Paulo Nov./Dec. 2016.

VAREJÃO SILVA, M. A. **Meteorologia e Climatologia**. Versão Digital 2. Recife, 2006.

Y.TAKAMURA, A.KAREEM. **Advanced structural wind engineering**. EBook Springer Tokyo Heidelberg, Japan, 2013.