

ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

CAROLINA CHOI

DANIEL SHIGUEO MORIKAWA

LUISA HIROMI SETO

RENATO MIZUTA

**Esforços Devidos ao Vento em Edificações: Estudo de Caso de um Ginásio
Poliesportivo sob Abordagem Normativa, Experimental e Numérica**

São Paulo

2015

**CAROLINA CHOI
DANIEL SHIGUEO MORIKAWA
LUIZA HIROMI SETO
RENATO MIZUTA**

**Esforços Devidos ao Vento em Edificações: Estudo de Caso de um Ginásio
Poliesportivo sob Abordagem Normativa, Experimental e Numérica**

Trabalho de Formatura apresentado à
Escola Politécnica da Universidade de São
Paulo para obtenção da Graduação em
Engenharia Civil.

Área de Concentração : Engenharia Civil

Orientador: Prof. Dr. Henrique Campelo
Gomes

São Paulo
2015

Catalogação-na-publicação

Morikawa, Daniel

Esforços Devidos ao Vento em Edificações: Estudo de Caso de um
Ginásio Poliesportivo sob Abordagem Normativa, Experimental e Numérica /
D. Morikawa, C. Choi, L. Seto, R. Mizuta -- São Paulo, 2015.
109 p.

Trabalho de Formatura - Escola Politécnica da Universidade de São
Paulo. Departamento de Engenharia de Estruturas e Geotécnica.

1.Túneis de vento 2.Normas técnicas 3.Vento 4.Aerodinâmica 5.Mecânica
dos fluidos computacional I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica.
Departamento de Engenharia de Estruturas e Geotécnica II.t. III.Choi,
Carolina IV.Seto, Luisa V.Mizuta, Renato

AGRADECIMENTOS

Agradecemos ao nosso orientador, o Profº Dr. Henrique Campelo Gomes por ter nos acolhido e fornecido todo suporte e auxílio necessário à viabilização deste projeto bem como disposição para sanar nossas dúvidas ao longo deste ano.

Ao Profº Dr. Guilherme Rosa Franzini e ao Eng.º Luiz Felipe Marchetti do Couto por terem aceitado fazer parte da banca avaliadora e fornecido sugestões para melhoria na continuidade do trabalho.

À GMR Projetos Estruturais, em especial ao Engº Gustavo de Moraes Rêgo pela gentileza de ter disponibilizado dados e desenhos do projeto estrutural do Ginásio Geraldo Magalhães.

Ao Instituto Mauá de Tecnologia, pela infraestrutura cedida, sem a qual não seria possível a realização do ensaio em túnel de vento, ao Profº José Carlos Martins Coelho e ao Sr. Carlos Augusto, técnico do laboratório, pelas informações fornecidas e ajuda prestada durante o ensaio e ao Profº Januário Pellegrino Neto, que viabilizou e incentivou nossa comunicação com o Instituto Mauá.

Ao InovaLab@Poli, por nos permitir o uso da impressora 3D e ao técnico do laboratório Marcos Vinícius Petri pela colaboração e paciência quanto às várias tentativas de impressão do modelo 3D até que se chegasse ao resultado final.

Por fim, o grupo agradece aos familiares e amigos, pelo apoio, auxílio, compreensão e pela torcida durante esses anos da graduação.

RESUMO

Tendo em vista os acidentes causados pelo vento, este trabalho tem como objetivo a análise dos esforços devidos ao vento em uma estrutura com geometria próxima à disponibilizada na norma brasileira de vento, a NBR 6123/1988, através da comparação dos coeficientes de pressão externa sob três perspectivas: normativa, experimental e numérica. A estrutura analisada, o Ginásio Geraldo Magalhães, trata-se de uma cúpula sobre base cilíndrica de grandes dimensões e com a presença de certas particularidades geométricas. É apresentado um estudo da teoria envolvida na Engenharia do vento e sobre túneis de vento para dar suporte aos estudos realizados da norma brasileira e dos resultados tanto experimentais quanto computacionais. Para a obtenção dos resultados experimentais, o túnel de vento utilizado encontra-se no Instituto Mauá de Tecnologia, enquanto que os resultados da simulação computacional foram obtidos através do software comercial ANSYS Fluent. Comparativamente, os resultados obtidos das três maneiras mostram um comportamento similar com relação aos coeficientes de pressão. Neste estudo pôde-se concluir que a norma trabalha de forma conservadora para geometrias efetivamente presentes, devido ao seu caráter abrangente. Porém, a norma mostrou não incluir a cúpula sobre base cilíndrica de baixa altura em relação ao diâmetro da base em seu escopo. Os estudos computacionais mostram que localizações pontuais em singularidades geométricas possam ter seus resultados não contemplados pela norma. Outra conclusão é que ensaios em túneis de vento requerem que certos parâmetros sejam ajustados às condições do local, que, se não bem calibrados, podem levar a erros. Deriva disto que uma boa ferramenta, em alternativa ao uso do túnel de vento e complementar à norma, sejam softwares baseados em CFD.

Palavras-chave: Vento. Coeficientes de pressão. ABNT NBR6123/1988. CFD. Túnel de vento. ANSYS Fluent.

ABSTRACT

Considering the accidents caused by the wind, the project goal is to analyze wind loads on a structure in which its geometry is similar to one covered in the Brazilian Design Code, NBR6123/1988, by comparing the external pressure coefficient under three perspectives: Brazilian wind design code, experimental and numerical. The analyzed structure, Ginásio Geraldo Magalhães (Geraldo Magalhães Gimnasium), is a dome over cylindrical walls of great dimensions and with certain geometrical peculiarities. A study about Wind Engineering theory and wind tunnels is stated in this work to give support for the studies of the NBR6123/1988 and for the computational and experimental results. The wind tunnel used in this project is located at Instituto Mauá de Tecnologia, while the computational results were obtained from a commercial software called ANSYS Fluent. As a comparison, all three results show a similar behavior relatively to the wind pressure coefficients. In this study, it was concluded that the pressure results obtained by the Brazilian Design Code are, in general, conservative. However, NBR 6123 revealed not to cover the dome over cylindrical walls geometry with short walls in relation to the dome diameter. Computational simulations showed local peaks of pressure on geometrical singularities not covered by the Brazilian wind design code. Furthermore, it was concluded that wind tunnel experiments require adjusting certain parameters to the local conditions, and, if not, it could lead to errors. In addition, it was considered that an alternative to wind tunneling and complementary to the standards is the use of CFD softwares.

Key words: Wind. Pressure coefficient. ABNT NBR6123/1988. CFD. Wind tunnel, ANSYS Fluent.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 -Pavilhão da FENAC em Novo Hamburgo – RS (1963)	13
Figura 2 - Tacoma Dome (Estados Unidos)	17
Figura 3 - Ticketpro Dome (África do Sul).....	17
Figura 4 - Pittsburgh Civic Arena (Estados Unidos)	17
Figura 5 - Kyocera Dome (Japão)	17
Figura 6 - Movimento oscilatório da ponte de Tacoma Narrows devido ao vento, 1940.	19
Figura 7 - Massa tropical e equatorial atlântica	21
Figura 8 - Classificação dos escoamentos e fluidos.....	24
Figura 9 - Definição esquemática dos coeficientes de pressão, força de arrasto (FD) e força de sustentação (FL).	31
Figura 10 - Gráficos esquemáticos da variação da velocidade com o tempo para o escoamento laminar e turbulento	32
Figura 11 - Reprodução esquematicamente da camada limite sobre uma chapa plana	34
Figura 12 - Mapa de Isopletas da Velocidade Básica	35
Figura 13 - Fator S1 em terreno com taludes.....	36
Figura 14 - Fator S1 em terreno com morros	36
Figura 15 - Categoria I: mar calmo, lagos e rios.....	38
Figura 16 - Categoria II: pradarias, fazendas sem muros	38
Figura 17 - Categoria III : subúrbios com casas baixas e esparsas, casas de campo	38
Figura 18 - Categoria IV: subúrbios densamente construídos, cidades pequenas....	38
Figura 19 - Categoria V: centros de grandes cidades	38
Figura 20 - Definições do vento.....	41
Figura 21 - Túnel de vento da Universidade do Estado do Colorado	42
Figura 22- Alan Davenport (esq.) e Jack Cermak (dir.)com o modelo reduzido das Torres Gêmeas.	43
Figura 23 - Túnel de Vento de Circuito Fechado.....	44
Figura 24 - Túnel de vento circuito aberto de sucção.....	44
Figura 25 - Túnel de vento circuito aberto tipo soprador	45
Figura 26 - Nagoya Dome	49
Figura 27 - Vista espacial do Ginásio.....	51

Figura 28 - Vista Aérea do Ginásio	51
Figura 29 - Vista interna do ginásio.....	51
Figura 30 - Corte do projeto estrutural do ginásio esportivo.....	52
Figura 31 - Cúpula sobre base cilíndrica - corte.....	53
Figura 32 – Vista Superior: linhas isobáricas dos coeficientes de pressão externa para $f/d=1/2$ e $h/d=1/2$	53
Figura 33 – Vista Superior: linhas isobáricas dos coeficientes de pressão externa para $f/d=1/10$ e $h/d=1$	53
Figura 34 – Vista Superior: linhas isobáricas dos coeficientes de pressão externa para $f/d=1/4$	55
Figura 35 - Parâmetros geométricos considerados.....	55
Figura 36 - Caracterização de uma cúpula sobre base cilíndrica conforme a NBR6123.....	57
Figura 37 - Modelo 1	58
Figura 38 - Modelo 2	58
Figura 39- Modelo 3	58
Figura 40 - Modelo 4	58
Figura 41 - Simplificação dos pilares no modelo 4	59
Figura 42 - Simplificação da placa inclinada no modelo 4.....	59
Figura 43 - Definição dos limites do domínio de forma genérica.....	60
Figura 44 - Condições de contorno de forma esquemática	61
Figura 45 - Vista externa da malha do domínio (modelos de 1 a 4 apresentam o mesmo aspecto).....	64
Figura 46 - Vista inferior da malha do modelo 1	64
Figura 47 - Vista inferior da malha do modelo 1 (aproximada).....	65
Figura 48 - Corte transversal do modelo 1	65
Figura 49 - Corte longitudinal do modelo 1	65
Figura 50 - Detalhe da malha no entorno da estrutura do modelo 1	66
Figura 51 - Vista inferior da malha do modelo 2	66
Figura 52 - Vista inferior da malha do modelo 2 (aproximada).....	66
Figura 53 - Corte transversal do modelo 2	67
Figura 54 - Corte longitudinal do modelo 2	67
Figura 55 - Detalhe da malha no entorno da estrutura do modelo 2	67
Figura 56 - Vista inferior da malha do modelo 3.....	68

Figura 57 - Vista inferior da malha do modelo 3 (aproximada).....	68
Figura 58 - Corte transversal do modelo 3	68
Figura 59 - Corte longitudinal do modelo 3	69
Figura 60 - Detalhe da malha no entorno da estrutura do modelo 3	69
Figura 61 - Vista inferior da malha do modelo 4.....	69
Figura 62 - Vista inferior da malha do modelo 4 (aproximada).....	70
Figura 63 - Corte transversal do modelo 4	70
Figura 64 - Corte longitudinal do modelo 4	70
Figura 65 - Detalhe do entorno da estrutura do modelo 4	70
Figura 66 – Vista isométrica do modelo 1 mostrando as pressões resultantes.....	71
Figura 67 – Regiões de sucção (azul) e sobrepressão (amarelo) no modelo 1	72
Figura 68 – Coeficientes de pressão na cúpula do modelo 1.....	72
Figura 69 – Vista da região a barlavento do modelo 1 mostrando as pressões resultantes.....	73
Figura 70 – Vista da região a sotavento do modelo 1 mostrando as pressões resultantes.....	73
Figura 71– Vista lateral do modelo 1 mostrando as pressões resultantes (vento com direção da esquerda para a direita).....	74
Figura 72 – Vista isométrica do modelo 2 mostrando as pressões resultantes.....	74
Figura 73 – Regiões de sucção (azul) e sobrepressão (amarelo) no modelo 2	75
Figura 74 – Coeficientes de pressão na cúpula do modelo 2.....	75
Figura 75 – Vista da região a barlavento do modelo 2 mostrando as pressões resultantes.....	76
Figura 76 – Vista da região a sotavento do modelo 2 mostrando as pressões resultantes.....	76
Figura 77 – Vista lateral do modelo 2 mostrando as pressões resultantes (vento com direção da esquerda para a direita).....	77
Figura 78 - Túnel de Vento TV-1 da E.E.M.	78
Figura 79 - Seção do túnel de vento	79
Figura 80 - Hélice no final do túnel de vento	79
Figura 81 - Ensaio teste realizado em visita técnica	79
Figura 82 - Impressora 3D	80
Figura 83 - Detalhe da impressora 3D	80
Figura 84 - Modelo impresso.....	81

Figura 85 - Modelo após inserção dos furos	81
Figura 86 - Modelo fixado na base circular de madeira e fixado na base metálica do túnel	81
Figura 87 - Preparação do modelo: inserção das tomadas de pressão	82
Figura 88 - Tubo de Pitot com escala de transformação para m/s	82
Figura 89. Manômetro de medição de pressões	83
Figura 90 - Ensaio do modelo no túnel de vento	84
Figura 91 - Linhas de corrente ao longo do modelo	84
Figura 92 - Linhas isóbaras para os valores interpolados.	86
Figura 93 – Contorno de pressões do modelo 3	87
Figura 94 – Vista tridimensional das regiões de sobrepressão (amarelo) e sucção (azul) do modelo 3.....	87
Figura 95 – Vista em planta dos coeficientes de pressão na cúpula do modelo 3	88
Figura 96 – Vista frontal da região a barlavento com contornos de pressão no modelo 3.....	88
Figura 97 – Vista lateral (vento com direção da esquerda para a direita) com contornos de pressão no modelo 3	88
Figura 98 – Vista da região a sotavento com contornos de pressão no modelo 3	89
Figura 99 – Contorno de pressões do modelo computacional do Geraldão.....	89
Figura 100 – Contorno de pressões discretizadas entre -40 e 40Pa do modelo computacional do Geraldão.....	90
Figura 101 – Vista tridimensional das regiões de sobrepressão (amarelo) e sucção (azul) do modelo computacional do Geraldão	90
Figura 102 – Coeficientes de pressão na cúpula, vista em planta do modelo computacional do Geraldão.....	91
Figura 103 – Vista em planta dos coeficientes de pressão na saliência do topo da cúpula do modelo computacional do Geraldão	91
Figura 104 – Vista tridimensional dos coeficientes de pressão na região de sobrepressão da saliência do topo da cúpula do modelo computacional do Geraldão	92
Figura 105 – Vista frontal da região a barlavento com contornos de pressão do modelo computacional do Geraldão.....	92
Figura 106 – Vista lateral (vento com direção da esquerda para a direita) com contornos de pressão do modelo computacional do Geraldão	93

Figura 107 – Vista da região a barlavento com contornos de pressão do modelo computacional do Geraldão.....	93
Figura 108 – Ponto de máxima pressão na base cilíndrica	94
Figura 109 – Ponto de mínima pressão na base cilíndrica.....	95
Figura 110 - Linhas de corrente com os valores de velocidade em um plano que corta o modelo 4.....	95
Figura 111 - Vetores de velocidade em um plano que corta o modelo 4	95
Figura 112 - Numeração utilizada para as tomadas de pressões	96
Figura 113 – Foto dos elementos de rugosidade do terreno do túnel de vento	97
Figura 114 - Coeficientes de pressão em cada ponto.	100
Figura 115 - Modelo durante o ensaio a 5m/s, com linhas de corrente mostradas através de um gás.....	101
Figura 116 – Comparaçāo entre resultados do modelo 3 e a norma	102

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Cálculo do fator topográfico S1	37
Tabela 2 - Categorias de terreno.....	38
Tabela 3 - Classes de edificações.	39
Tabela 4 - Parâmetros meteorológicos.	40
Tabela 5 - Fator S_3	40
Tabela 6 - Tipos de ensaio em túnel de vento e dados medidos	46
Tabela 7 - Tabela 31 da NBR6123-1988 - Valores limites dos coeficientes de pressão externa, c_{pe} - Cúpulas sobre bases cilíndricas.....	54
Tabela 8 – Valores limites dos coeficientes de pressão externa de cúpulas sobre o terreno	55
Tabela 9 – Resultados parciais dos coeficientes de pressão externa dos modelos 1 e 2 de calibração da análise computacional.....	77
Tabela 10 - Coeficientes de pressão interpolados para $h/d = 1/4$	85
Tabela 11 - Coeficientes de pressão interpolados para $h/d = 0$	85
Tabela 12 - Coeficientes de pressão interpolados para a estrutura do ginásio.....	85
Tabela 13 - Coeficientes de pressão na parede cilíndrica.....	86
Tabela 14 – Resultados comparativos do modelo 3 com o modelo do Geraldão.....	94
Tabela 15 – Desvio padrão dos coeficientes de pressão para os intervalos de velocidade especificados	100
Tabela 16 - Média e desvio padrão dos valores para velocidades entre 11e 15m/s	100

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
2	OBJETIVOS	15
3	JUSTIFICATIVA	16
4	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	18
4.1	Histórico	18
4.2	Vento.....	20
4.2.1	Velocidade do Vento.....	21
4.3	Noções de Aerodinâmica	23
4.3.1	Conceitos básicos.....	23
4.3.2	Parâmetros adimensionais e leis de escala.....	27
4.3.3	Estruturas sob o efeito do vento	29
4.4	Norma	34
4.4.1	Velocidade do Vento segundo a NBR 6123/1988	35
4.4.2	Cálculo dos esforços devidos ao vento segundo a NBR6123/1988	41
4.5	Método Experimental - Túnel de Vento	42
4.6	Estado da arte/revisão da literatura	46
5	MATERIAIS E MÉTODOS	51
5.1	Estrutura Analisada.....	51
5.2	Coeficientes de Pressão segundo a NBR6123/1988	52
5.2.1	Cúpula	53
5.2.2	Paredes Cilíndricas.....	55
5.3	Modelagem Computacional.....	56
5.3.1	Aspectos gerais	56
5.3.2	Aspectos computacionais	62
5.3.3	Malhas	63
5.3.4	Resultados parciais para os modelos de calibração.....	71

5.4	Túnel de Vento	78
5.4.1	Túnel de Vento TV-1 da E.E.M.....	78
5.4.2	Metodologia de Ensaio	79
6	RESULTADOS.....	85
6.1	Coeficientes obtidos pela norma	85
6.2	Coeficientes obtidos pelo MODELO COMPUTACIONAL.....	86
6.2.1	Modelo 3.....	86
6.2.2	Modelo 4: Geraldão	89
6.3	Coeficientes obtidos No túnel de vento	96
6.4	COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS	101
7	CONCLUSÕES	105
8	REFERÊNCIAS.....	107
	APÊNDICE A - Resultados das medições de pressão do ensaio em túnel de vento	111
	APÊNDICE B –Análise dos dados coletados no ensaio em túnel de vento	113

1 INTRODUÇÃO

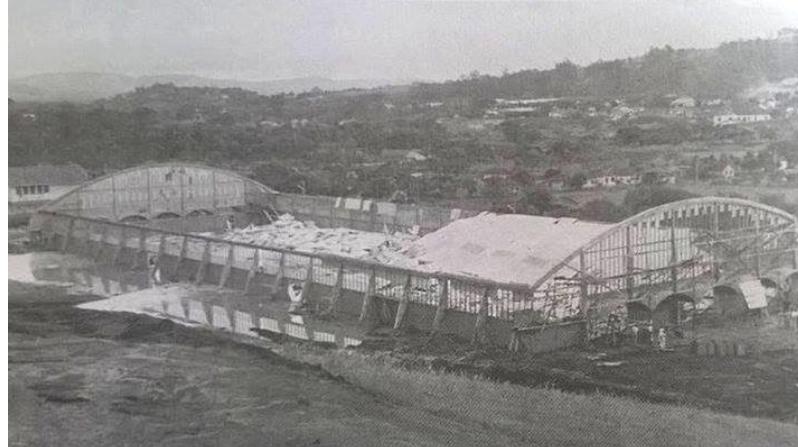
É notável o que o constante desenvolvimento tecnológico aliado aos conhecimentos científicos da Engenharia Civil tem proporcionado à paisagem urbana; a incessante busca pela superação de limites: de prédios cada vez mais altos a pontes com vãos cada vez maiores a estruturas com formas que fogem do convencional.

Os projetos estruturais devem, inclusive, atender aos requisitos de funcionalidade e segurança aos seus usuários e é neste ponto em que devem ser ponderados os esforços atuantes na estrutura, dentre os quais, a pressão exercida pelo vento, pois como bem descreve Oliveira Júnior (2014), o vento em contato com a superfície de um objeto tende a movimentá-lo junto com ele, como se pode notar na trajetória descrita por uma folha ao se desprender da árvore. Isto ocorre devido ao surgimento de tensões, originárias do campo de velocidades ao longo de sua superfície.

Há no Brasil vários registros de acidentes causados pelos esforços devidos ao vento, em sua maioria causando o destelhamento das edificações, seja de pequenos imóveis como casas a grandes construções como galpões e ginásios. Estes acidentes podem gerar desagradáveis consequências, tais quais danos a estruturas adjacentes, gastos com o reparo das construções e até mesmo a morte de pessoas. Por isso é importante a correta definição de como se dará o carregamento devido ao vento sobre a estrutura.

Blessmann (2001) aponta que uma das causas de acidentes é a incorreta ponderação dos coeficientes de pressão, a julgar pelo exemplo citado em seu livro "Acidentes Causados Pelo Vento", em que para o Pavilhão da FENAC (cujo acidente está ilustrado na Figura 1 se considerou coeficiente de pressão de valor 1,00 (0,5 do coeficiente de pressão interno e -0,5 do coeficiente de pressão externo), porém para as condições da obra obteve-se o coeficiente 1,9 (0,8 de coeficiente de pressão interna e -1,1 de coeficiente de pressão externa) em resultados experimentais medidos em laboratório.

Figura 1 -Pavilhão da FENAC em Novo Hamburgo – RS (1963)



Fonte: Blessmann, J. (2001)

É possível recorrer à norma NBR6123/1988 - Forças devidas ao vento em edificações, que orienta o projeto de estruturas na consideração dos efeitos das pressões do vento. Basicamente, esta norma considera a velocidade do vento conforme a região em que será feito o projeto e fatores em relação à altura das edificações do entorno, condições do terreno e geometria da edificação a ser projetada. Ressalta-se que esta norma restringe-se a formas convencionais, ou seja, para obras civis de geometria mais sofisticada esta norma torna-se deficiente, tendo-se que recorrer a outras maneiras de se considerar os efeitos do vento nestas construções. Abaixo, o item 1.2 da NBR6123/1988:

Esta Norma não se aplica a edificações de formas, dimensões ou localização fora do comum, casos estes em que estudos especiais devem ser feitos para determinar as forças atuantes do vento e seus efeitos. Resultados experimentais obtidos em túnel de vento, com simulação das principais características do vento natural, podem ser usados em substituição do recurso aos coeficientes constantes nesta Norma. (NBR6123,1988, p.1)

No entanto, não há indícios de como quantificar ou qualificar uma dada estrutura como "fora do comum", pois existem casos em que podem ser feitas aproximações para as geometrias fornecidas, entretanto, para esses mesmos casos, o comportamento real pode ser diferente do previsto pela norma devido a interferências ou particularidades do projeto.

O ensaio em túnel de vento é uma ferramenta capaz de fornecer dados mais fiéis em relação ao comportamento da estrutura, podendo levar a dimensionamentos mais econômicos, todavia, a realização de um ensaio demanda tempo e custo, de maneira que nem todas as edificações são projetadas desta forma, recorrendo, portanto, à norma com as simplificações tal como citado anteriormente.

Em função disto, o presente trabalho busca analisar o Ginásio Geraldo Magalhães (mais conhecido como Geraldão), uma estrutura cuja geometria é próxima à fornecida pela norma, porém com particularidades, comparando os resultados previstos pela NBR6123/1988 com dados experimentais realizados no Túnel de Vento do Instituto Mauá de Tecnologia e dados numéricos extraídos do ANSYS Fluent, um software comercial amplamente utilizado para simulação de fluidos, e porventura analisar o quanto os valores se aproximam.

2 OBJETIVOS

Pretende-se comparar os coeficientes de pressão para a estrutura do Ginásio Geraldo Magalhães de três formas: segundo a NBR6123/1988, através da análise computacional pelo software de CFD ANSYS Fluent e por ensaio em túnel de vento.

Além disso, pretende-se, durante este processo, aprofundar os conhecimentos em relação a um tema pouco abordado durante o curso de graduação em Engenharia Civil, o efeito do vento em edificações e fazer uma análise crítica com relação à norma.

3 JUSTIFICATIVA

O aquecimento sobre a superfície terrestre tem tornado a incidência de ventos fortes mais frequentes globalmente. Estes ventos fortes não estão presentes apenas nos países de clima frio, o Brasil também está nas estatísticas quando o tema é acidentes causados pelo vento. Segundo Cândido (2012), nos últimos 20 anos, ocorreram mais de 205 tornados, o que posiciona o país no ranking mundial de países mais atingidos pelo evento.

Mas ao contrário do que se imagina, o estado mais atingido por tornados é São Paulo, seguido pelos estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina, isto porque as inúmeras construções e a intensa poluição favorecem o surgimento de ilhas de calor, além do fato de a alta umidade do ar gerada pelas represas garantirem um ambiente propício à formação de tornados.

Um caso recente de tornado foi o ocorrido em Santa Catarina em abril de 2015, o qual atingiu velocidades de 250 km/h. Mais de 20 municípios foram atingidos. O maior estrago ocorreu em Xanxerê, região no oeste do estado. Os estragos foram tanto sociais como econômicos, com ventos que atingiram 2188 casas e causaram 2 mortes.

A norma atual, a NBR6123 (1988, p.1) cita no item 1.2 que “estudos específicos devem ser feitos para estruturas especiais”, porém não é especificado qual deve ser a geometria da estrutura para esta ser considerada “especial”.

Uma geometria simplificada disponibilizada na norma é a cúpula sobre base cilíndrica, uma forma geralmente encontrada em obras como ginásios e estádios, que pode ser associada a alguns exemplos a seguir, ilustrados da Figura 2 à Figura 5:

Figura 2 - Tacoma Dome (Estados Unidos)

Fonte: www.mynorthwest.com

Figura 3 - Ticketpro Dome (África do Sul)

Fonte: www.conferences.co.za

Figura 4 - Pittsburgh Civic Arena (Estados Unidos)

Fonte: www.hudsonvalleyruins.org

Figura 5 - Kyocera Dome (Japão)

Fonte: www.osaka.bwhotels.jp

Nota-se que as estruturas não são exatamente como a forma prevista na norma, pois todas possuem regiões com interferências ou saliências.

Assim, o grupo escolheu uma estrutura com uma geometria próxima à existente na norma (cúpula sobre base cilíndrica), porém com algumas particularidades, que nesse estudo de caso são os formatos dos pilares, a inclinação das paredes laterais e o formato da estrutura do topo. Foi realizado um estudo comparativo dessa estrutura utilizando-se como base a norma, ensaios em túnel de vento e simulação em software para melhor entender a classificação subjetiva do termo “especial” descrita na norma.

4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

4.1 HISTÓRICO

A Engenharia do Vento foi estabelecida com a colaboração de diversos estudiosos provenientes de diversas áreas do conhecimento. Trata-se de uma área relativamente nova e os fundamentos básicos do estudo da aerodinâmica moderna foram originados em meados do século 17. Entretanto, o entendimento qualitativo do efeito dos ventos em estruturas é datado de muito antes, a exemplo da cidade de Kahan, localizada no Egito Antigo, que possui evidências de ter sido projetada utilizando conhecimentos de aerodinâmica, aproximadamente 2000 AC. A revisão histórica apresentada pode ser lida em mais detalhes em Cook (1985, p.6).

O estudo teórico da aerodinâmica teve início com os estudos de Newton, no século 17, onde se explica pela primeira vez o efeito da viscosidade. Nos séculos seguintes, podemos citar Bernoulli e Euler como grandes expoentes no estudo da teoria da mecânica dos fluidos, assim como Navier e Stokes, que formularam a equação de Navier-Stokes do movimento dos fluidos.

Assim como diversas outras áreas de estudo, o estudo do vento começou a ser tratada com interesse prático para a Engenharia após a ocorrência de diversos acidentes. Um dos mais importantes deles, o colapso da Tay Bridge, em 1879, marcou o início das pesquisas dos carregamentos do vento em estruturas no Reino Unido, liderado por Benjamin Baker. Outro acidente importante para o desenvolvimento da Engenharia do Vento foi o colapso da ponte de Tacoma Narrows, em 1940 (Figura 6). Esse famoso acidente marca o início do estudo das oscilações provocadas pelo vento em estruturas.

Figura 6 - Movimento oscilatório da ponte de Tacoma Narrows devido ao vento, 1940.



Fonte: www.magnusmundi.com

Tal estudo só pôde ser desenvolvido graças ao uso do túnel de vento como ferramenta de caracterização dos efeitos do vento. Embora tenha sido inventado em meados de 1870 para fins aeronáuticos, o primeiro ensaio em túnel de vento aplicado a edificações foi realizado em 1893 por Irminger. Inicialmente, técnicas da Engenharia Aeronáutica foram utilizadas indiscriminadamente até que na década de 1930 foram feitas diversas medições comparativas entre o modelo físico e a estrutura real do *Empire States Building* que mostraram enorme disparidade.

A grande dificuldade da transferência de tecnologia entre a Engenharia Aeronáutica e a Engenharia Estrutural no uso do túnel de vento foi constatada pela presença de perturbações devidas à superfície em que a estrutura está apoiada. Sabendo disso, Bailey e Vincent desenvolveram técnicas que puderam superar tais dificuldades. Paralelo a isso, em 1963, Jensen formulou as leis de escala necessárias para comparar os efeitos em escala real e reduzida nos ensaios em túneis de vento.

Técnicas mais modernas podem ser citadas como a utilização de métodos estatísticos na obtenção de carregamentos do vento em estruturas, desenvolvida por Davenport, na década de 1960 e o uso de métodos computacionais que continuam a ser desenvolvidos até os dias de hoje.

4.2 VENTO

Com o advento de projetos cada vez mais singulares tem surgido a necessidade de um refinamento quanto à consideração dos esforços devidos ao vento a que essas estruturas estarão submetidas. Surge deste problema a disciplina conhecida como Engenharia do Vento, disciplina esta responsável por desenvolver ferramentas que possibilitem a previsão dos efeitos dos ventos. Para tanto, são necessárias informações quanto ao vento local, a relação dos ventos locais com as forças induzidas na estrutura e o comportamento da estrutura em relação a esses esforços.

Informações quanto ao vento local são obtidas com o auxílio da meteorologia, que busca explicar as características dos fluxos dos ventos, da micrometeorologia, responsável por descrever o fluxo dos ventos próximos ao chão, e climatologia, prevendo as condições dos ventos conforme a localidade. (SIMIU, SCANLAN, 1978,p.1).

Ainda segundo Simiu e Scanlan (1978, p.7):

Wind or the motion of air with respect to the surface of the earth, is fundamentally caused by variable solar heating of the earth's atmosphere. It is initiated, in a more immediate sense, by differences of pressure between points of equal elevation.

Para entender melhor o vento é importante explicar a formação da circulação global que influencia a movimentação das massas de ar. O aquecimento desigual da Terra entre a região equatorial e os pólos resulta em um movimento das massas de ar frias, mais densas, em direção ao Equador e o ar quente dessa região tende a subir, pois é menos denso. Essa circulação associada ao movimento de rotação da Terra provoca o redirecionamento para a direita das massas de ar no hemisfério norte e para esquerda no hemisfério sul (força de Coriolis).

As três principais circulações globais de ventos são os alísios que sopram de sudeste no hemisfério sul, os ventos do oeste e os ventos polares de leste, bem

ilustrados na Figura 7. Todavia, essa circulação global dos ventos é alterada quando surgem frentes, ciclones, anticiclones entre outros fenômenos. (GONÇALVES, 2007,p.1)

Figura 7 - Massa tropical e equatorial atlântica



Fonte: www.geocities.ws

Para Blessman (1995), o parâmetro de interesse na engenharia estrutural para obtenção dos esforços sobre a estrutura é a velocidade média do vento e suas flutuações.

4.2.1 Velocidade do Vento

A maioria dos estudiosos acreditam que o aquecimento global está intensificando os tufões e furacões, os quais tendem a ter picos de velocidades de ventos mais altos. A probabilidade, segundo eles, é que este fato seja mais de 66% verdadeiro (PARKETA,2013).

Ainda segundo estes estudiosos, o oceano absorve mais de 80% do calor e este aquecimento gera ondas de calor e frio que interferem no sistema de circulação global do vento. Existem, entretanto, alguns cientistas que afirmam não haver forma de garantir que a ocorrência do aquecimento global é causada pelo homem e a sua relação com a intensificação dos ventos.

Quantificar a velocidade do vento é uma dificuldade existente na engenharia dos ventos. Uma forma encontrada foi quantificar a velocidade relacionando-a às características causadas pelo efeito do vento e classificando em uma escala crescente de 0 a 12. A utilização dessa escala, conhecida como escala Beaufort é prática pois apenas avaliando os efeitos causados pelo vento pode-se estimar um intervalo da velocidade do vento incidente no local.

Vale ressaltar que este é um método muito simplista, geralmente utilizado em artigos jornalísticos por apresentar um aspecto mais qualitativo. Na engenharia civil é de maior interesse identificar a força exercida pelo vento e não o efeito causado por ele.

Para os cálculos da NBR6123 foram utilizadas 49 estações meteorológicas espalhadas pelo território brasileiro em altitudes que variam de 3 a 1097m. Dos conceitos físicos, sabe-se que a velocidade média temporal é calculada como sendo a razão entre a distância total percorrida pelo tempo total decorrido, porém para o vento é impossível acompanhar uma partícula, por isso recorre-se a equipamentos como anemômetros ou anemógrafos. Para os aparelhos atualmente utilizados nas estações meteorológicas, o tempo mínimo a se considerar é três segundos. (FERREIRA, 2005, p.27)

O período base é o intervalo de tempo considerado para medir a velocidade média do vento e é um fator essencial para a análise do vento. Caso os efeitos dinâmicos sejam relevantes, um período base entre 10 minutos e 1 hora deve ser considerado nos estudos, pois um período de análise curto não leva em consideração as possíveis rajadas. Porém, em geral, as construções civis apresentam uma frequência natural alta em comparação com a frequência de excitação do vento o que torna o efeito dinâmico nos cálculos, na maioria dos casos, desprezível. Deve-se entretanto ressaltar que existem exceções em que o vento pode entrar em ressonância com a estrutura, e nesse caso o efeito dinâmico é importante. Logo um valor da velocidade média do vento sobre poucos segundos é suficiente para as análises na estrutura. (PADARATZ, 1977, p.18)

As velocidades máximas anuais coletadas em estações metereológicas sofrem um ajuste através de uma distribuição de probabilidades. As técnicas mais utilizadas são a distribuição de Frechet ou de Gumbel, ambos utilizam parâmetros calculados pelos métodos da máxima verossimilhança e dos mínimos quadrados. No Brasil é utilizada a distribuição de FRECHET porque esta apresenta melhores resultados para séries extensas de ventos máximos anuais.

4.3 NOÇÕES DE AERODINÂMICA

4.3.1 Conceitos básicos

Primeiramente, temos que definir o que é um fluido para o entendimento do mesmo. A principal diferença entre um fluido e um sólido é sua resposta a forças aplicadas. Sólidos deformam de maneira finita quando solicitados por uma força de cisalhamento finita enquanto o fluido deforma indefinidamente nessa mesma situação. A seguir serão listados alguns dos principais tópicos de interesse para o presente estudo.

4.3.1.1 Classificações

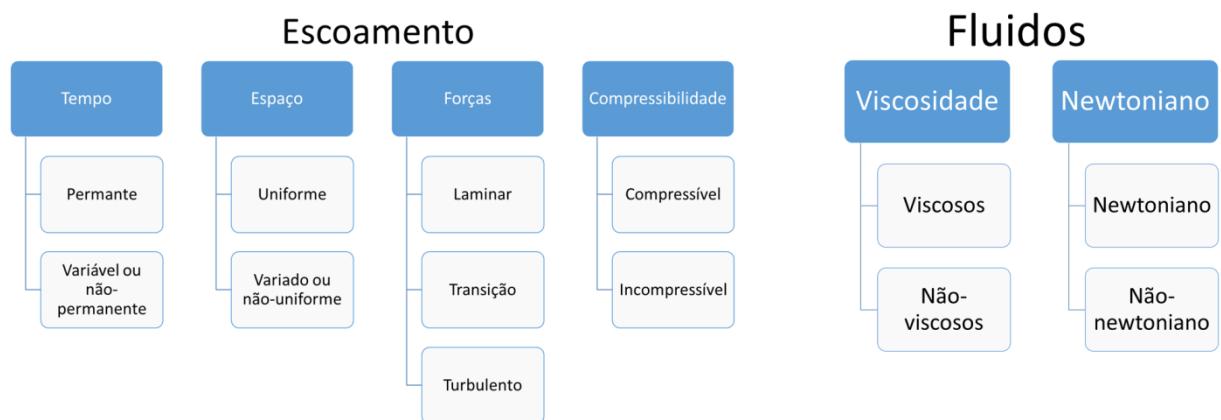
Os escoamentos podem ser classificados quanto a suas condições perante o tempo e o espaço e ainda quanto a sua compressibilidade. Escoamentos permanentes são aqueles cujas propriedades não variam com relação ao tempo. O oposto do escoamento permanente é o escoamento variável (também conhecido como escoamento não permanente). Escoamento uniforme é aquele que mantém suas características com relação ao espaço, ou seja, que possui propriedades iguais (pressão, campo de velocidades, etc.) em todos os pontos do escoamento e seu oposto chama-se escoamento variado ou não-uniforme.

Outra classificação importante dos escoamentos está na relação entre as forças de inércia e forças viscosas. Quando há predominância das forças de viscosidade, chamamos o escoamento de laminar, onde o fluxo mostra-se bem comportado, ou seja, com campos de velocidade com variação suave. Caso contrário, chamamos o escoamento de turbulento, onde se pode perceber uma

variação caótica na velocidade do escoamento em torno da média. Na condição intermediária entre o escoamento laminar e o turbulento, encontra-se o escoamento de transição que possui características de ambas as classificações. Como será visto mais adiante, essa classificação depende de um importante adimensional chamado número de Reynolds.

Além disso, podemos classificar os fluidos em newtoniano ou não-newtoniano e viscosos e não-viscosos. Um resumo das classificações de fluidos e escoamentos pode ser visto na Figura 8.

Figura 8 - Classificação dos escoamentos e fluidos



Fonte: Autoria própria.

4.3.1.2 Lei da Viscosidade de Newton

A resposta ao cisalhamento de um fluido Newtoniano segue a seguinte expressão:

$$\tau = \mu \frac{dU}{dy} \quad (1)$$

onde:

τ : tensão de cisalhamento no fluido

$\frac{dU}{dy}$: gradiente resultante de velocidades

μ : viscosidade dinâmica (constante)

A equação acima é chamada de Lei da Viscosidade de Newton. No caso do vento em edificações, podemos considerar o vento como um fluido Newtoniano,

pois, segundo Cook (1985, p.10), velocidades de vento abaixo de 50m/s produzem variações nos resultados da tensão de cisalhamento abaixo de 0,5%, em geral.

4.3.1.3 Equação de Bernoulli

Em termos qualitativos, a equação de Bernoulli estabelece uma relação entre a energia total de um fluido em dois pontos diferentes de uma linha de corrente do escoamento. Essa relação pode ser expressa como:

$$p + \frac{1}{2} \rho U^2 + \rho g z = cte \quad (2)$$

onde:

p: pressão do fluido

ρ : massa específica do fluido

U: resultante da velocidade do escoamento

g: aceleração da gravidade

z: cota do ponto em questão

Tal equação depende de quatro hipóteses:

- Escoamento permanente;
- Fluido incompressível;
- Fluido não-viscoso; e
- Escoamento irrotacional (não formação de vórtices no escoamento).

Para aplicações da Engenharia do Vento, tais hipóteses não são válidas na grande maioria dos casos, com exceção da hipótese de incompressibilidade. Entretanto, a equação de Bernoulli pode ser interpretada em diversos casos de forma qualitativa para o entendimento do comportamento teoricamente ideal de um fluido em um determinado escoamento (Cook, 1985).

Além disso, um caso especial em que tal expressão é válida está no Tubo de Pitot, uma ferramenta que permite calcular a diferença de pressão de um fluido em um ponto específico da estrutura (Cook, 1985). Ou seja, essa é exatamente a

situação em que se encontram os cálculos de pressão e coeficientes de pressão presentes no projeto, tornando tal expressão válida para nosso trabalho.

4.3.1.4 Equações do movimento de um fluido

O movimento dos fluidos Newtonianos pode ser descrito analiticamente por meio de quatro equações diferenciais do movimento. São elas: a equação da continuidade e as equações de Navier-Stokes (uma para cada eixo de referência). Das quatro equações são derivadas quatro variáveis de interesse: pressão e as velocidades nos três eixos de referência.

O princípio da conservação de massa constata que a massa de um fluido se mantém constante em um determinado sistema fechado. Aplicando-se esse princípio em um volume de controle, chegamos à formulação da equação da continuidade que, para fluidos incompressíveis, é expressa por:

$$\operatorname{div} \mathbf{u} = 0 \quad (3)$$

onde \mathbf{u} é o campo de velocidades do fluido.

Na forma vetorial, as equações de Navier-Stokes para a conservação do momento linear do fluido podem ser expressas da seguinte forma geral:

$$\rho \frac{D\mathbf{u}}{Dt} = \operatorname{div} \mathbf{T} + \rho \mathbf{b} \quad (4)$$

em que:

T: tensor das tensões de Cauchy

b: vetor das forças de volume por unidade de massa

Uma revisão mais detalhada dessas equações pode ser vistas em Munson (2004).

Tais equações são muito complexas, com alto grau de não linearidade e, portanto, não é possível encontrar soluções analíticas para a maioria dos problemas práticos. Entretanto, diversos métodos computacionais foram propostos para solucioná-las numericamente, como por exemplo, Gomes (2013), que utilizou o

método dos elementos finitos com fronteiras imersas para o estudo da interação fluido-estrutura e obteve resultados bastante coerentes. As equações do movimento constituem a base dos programas de CFD (*Computational Fluid Dynamics*), incluindo o software utilizado no presente estudo (ANSYS).

4.3.2 Parâmetros adimensionais e leis de escala

4.3.2.1 Adimensionais

Uma das formas mais simples e eficazes de se descrever as características dos escoamentos é através dos parâmetros adimensionais. Embora haja diversos deles, focaremos no número de Reynolds, que é considerado o mais importante para a aplicação do presente trabalho.

O número de Reynolds (Re) expressa a razão entre as forças de inércias atuantes em um fluido pelas forças viscosas no mesmo. Em acordo com o item 4.3.1.1, o número de Reynolds caracteriza o escoamento como laminar (Re muito baixo, forças viscosas preponderantes) ou turbulento (Re muito alto, forças de inércia preponderantes) e pode ser calculado da seguinte forma:

$$Re = \frac{\rho V D}{\mu} \quad (5)$$

onde:

ρ : massa específica do fluido

μ : viscosidade dinâmica do fluido

V: velocidade média do fluido

D: dimensão característica

ρ e μ podem ser considerados constantes em análises do vento, ou seja, podemos concluir que tal parâmetro depende fundamentalmente da velocidade do vento, dada uma estrutura a ser analisada sob a ação do vento.

Outro parâmetro adimensional de importância é o número de Jensen que estabelece o fator de escala entre a geometria da estrutura a ser analisada e a

escala geométrica da rugosidade da região. Numericamente, temos $Je = H/z_0$, onde H é uma dimensão característica e z_0 é um parâmetro teórico da representação do perfil de velocidades do vento sobre um terreno conhecida como *log-law* (lei logarítmica). Tal parâmetro representa a altura mínima que a equação logarítmica tem validade, a qual, abaixo dela a velocidade do vento é considerada nula (para mais detalhes, ver em Cook, 1990)

Além do número de Reynolds, podemos citar o número de Strouhal (frequência reduzida para um parâmetro oscilatório qualquer), número de Froude (descreve a importância relativa entre as forças de inércia e as forças gravitacionais), entre outros.

4.3.2.2 Leis de escala

Na ocasião de uma análise em escala reduzida, é importante que se estabeleça similaridade entre certos parâmetros adimensionais do modelo com os valores observados em escala real. De acordo com Cook (1990, p.72), para estruturas estáticas (ou seja, com características dinâmicas desprezíveis), é necessário estabelecer similaridade no:

- Número de Jensen, quando o efeito da camada limite no escoamento é relevante;
- Número de Strouhal, caso o tempo ou a frequência de qualquer parâmetro do modelo seja relevante na análise;
- Número de Reynolds, caso ocorra diferenças entre o tipo de escoamento (laminar ou turbulento) em qualquer local da estrutura em análise.

Dada a primeira afirmação acima, temos que estabelecer similaridade no número de Jensen em todos os casos de aplicação da Engenharia do Vento. Mais detalhes sobre a camada limite no item 4.3.3.3.

Como não precisaremos fazer análises dependentes do tempo, podemos descartar a similaridade do número de Strouhal.

Para o número de Reynolds, observam-se valores muito altos para as situações de dimensionamento em estruturas em escala real (Cook, 1985). Portanto, vale ressaltar que é necessário apenas que se garanta que o escoamento seja turbulento no entorno do modelo físico utilizado, sendo desnecessária a exata correlação entre o número de Reynolds de modelos em escala reduzida com a escala real.

O fato de ser desnecessário que haja similaridade no número de Reynolds é bastante conveniente, pois, dado que o fluido usado em modelo seja o mesmo que o visto em escala real (caso do ar), a escala geométrica e a escala de velocidade deveriam ser inversamente proporcionais. Por exemplo, caso o modelo físico seja um décimo da estrutura real, a velocidade do vento no túnel de vento teria de ser dez vezes maior que a velocidade vista em campo; ou seja, caso a velocidade de projeto seja 40m/s, a velocidade do vento no modelo teria de ser 400m/s. O que é totalmente inviável.

4.3.3 Estruturas sob o efeito do vento

4.3.3.1 Pressão dinâmica e coeficientes aerodinâmicos

Os coeficientes aerodinâmicos (mais especificamente os de pressão) são os principais resultados a serem analisados no presente projeto. Entretanto, antes de defini-los, precisamos definir a pressão dinâmica.

A pressão dinâmica (q) representa a energia cinética total do vento não perturbado (distante da estrutura a ser analisada). Sua definição é proveniente da equação de Bernoulli, resultando em:

$$q = \frac{1}{2} \rho V^2 \quad (6)$$

No caso do ar considerado incompressível, $\rho \cong 1,225 \text{ kg/m}^3$, o que justifica o procedimento da norma em adotar $q = 0,613V^2$. Esse parâmetro é importante na medida em que a partir dele que temos a definição do coeficiente de pressão (c_p) em um ponto qualquer a ser analisado, conforme:

$$c_p = \frac{\Delta p}{q} = \frac{p}{q} \quad (7)$$

onde Δp é a diferença entre a pressão externa e interna da estrutura a ser analisada. Definimos tanto p quanto c_p como positivos quando há sobrepressão no local (maiores que a pressão atmosférica), e negativos quanto há succção (menores que a pressão atmosférica).

Como iremos considerar a pressão interna como constante e igual à pressão atmosférica – isto é, iremos considerar que o vento não tem influência sobre o interior do objeto de estudo – apenas consideraremos a pressão externa como relevante (vide segunda igualdade).

Trabalhar com o coeficiente de pressão pode ser vantajoso, visto que não é necessário que seja feita uma análise com a velocidade de vento específica que a estrutura esteja exposta. Isso ocorre, pois o coeficiente de pressão é independente da velocidade de incidência desde que se estabeleça o mesmo tipo de escoamento (laminar ou turbulento). Ou seja, é necessária apenas uma análise para uma velocidade de referência para se obter o coeficiente de pressão que, em seguida, o projetista terá a pressão resultante para qualquer velocidade especificada.

Como na grande maioria dos casos de análise de efeitos do vento em estruturas o escoamento é totalmente turbulento, basta que em escala reduzida seja feita com uma velocidade do vento que o escoamento seja turbulento ao redor do objeto de estudo. Para exemplificar essa consideração, o número de Reynolds no entorno do Geraldão para velocidade do vento de 1m/s já é o suficiente para que o escoamento seja turbulento.

Simplificadamente, o coeficiente de pressão pode ser obtido por ensaios em túneis de vento ou outros métodos (como o computacional) e, por consequência, o valor da pressão no local requerido pode ser obtido com:

$$p = c_p q = c_p * 0,613V_d^2 \quad (8)$$

onde V_d é a velocidade de projeto.

Além disso, o coeficiente de pressão depende significativamente de outros fatores como o ângulo de incidência do vento na estrutura (tanto vertical, conhecido como ângulo de ataque, quanto na horizontal) e das características da camada limite atmosférica. Ambos não serão focos do presente trabalho.

Note que o coeficiente de pressão foi escrito com a letra minúscula propositalmente. Coeficientes escritos dessa forma representam características locais, em oposição aos coeficientes de força que são representados por:

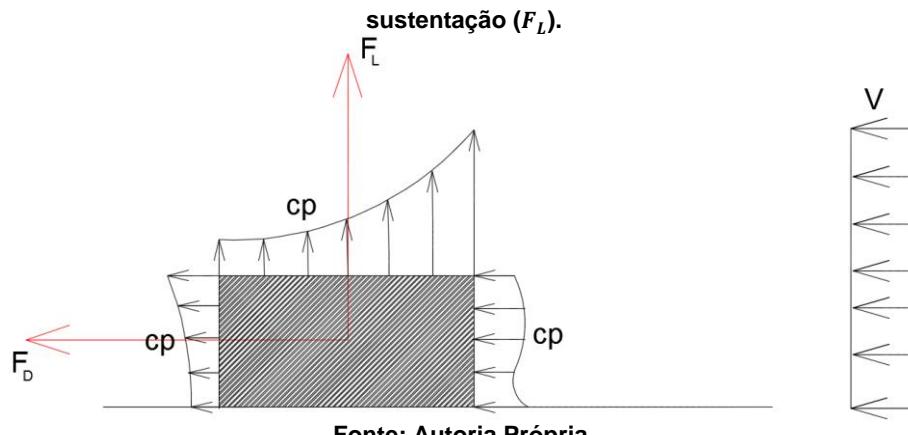
$$C = \frac{F}{qA} \quad (9)$$

onde F representa uma força em análise (por exemplo, força de arrasto e força de sustentação), C representa o coeficiente de uma força em análise (respectivo ao exemplo anterior, coeficiente de arrasto, de sustentação e de cisalhamento) e A , uma área representativa do corpo a qual a respectiva força F é resultante da ação do vento. Assim sendo, a força F é a força resultante do vento sobre o corpo em análise, tanto por efeito de pressão quanto por efeito de atrito.

Em resumo, a Figura 9 representa esquematicamente os coeficientes definidos acima. Como no presente trabalho estamos interessados em verificar os efeitos do vento em todo o entorno da estrutura, consideraremos apenas os coeficientes de pressão na análise, interpretando-os como uma força distribuída ao redor da estrutura.

Figura 9 - Definição esquemática dos coeficientes de pressão, força de arrasto (F_D) e força de

sustentação (F_L).

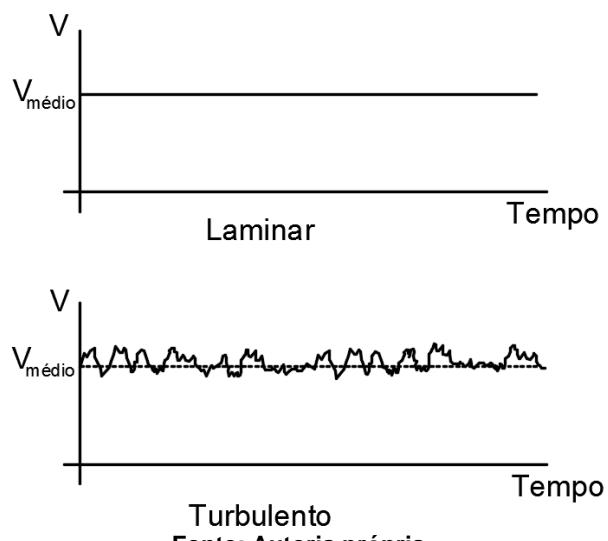


Fonte: Autoria Própria.

4.3.3.2 Turbulência

Além das considerações acima, também se faz necessário analisar os efeitos da turbulência no escoamento de um fluido. De maneira genérica, a turbulência pode ser definida como a flutuação em torno da velocidade média em um escoamento de maneira tridimensional (Cook, 1985). A Figura 10 mostra como varia a velocidade em uma direção em função do tempo de um escoamento laminar e um escoamento turbulento, considerando um caso genérico.

Figura 10 - Gráficos esquemáticos da variação da velocidade com o tempo para o escoamento laminar e turbulento



Fonte: Autoria própria.

De maneira geral, assim como explicado anteriormente, a turbulência do fluido depende do número de Reynolds. Entretanto, este depende de um comprimento característico para seu cálculo, ou seja, para cada objeto de estudo, teremos um número de Reynolds mínimo que levaria o escoamento a ser considerado turbulento (Cook, 1985). Para o nosso caso, utilizaremos a recomendação da NBR 6123 que, para cilindros, utiliza o diâmetro como comprimento característico e o número de Reynolds de 420000, que é o valor mínimo onde se apresenta escoamento totalmente turbulento. Esse valor é válido, pois, de acordo com Munson et.al. (2004), o valor do número de Reynolds crítico está entre $2 \cdot 10^5$ e $3 \cdot 10^6$, dependendo das características da análise, sendo $5 \cdot 10^5$ um valor médio.

Embora o número de Reynolds seja o fator predominante para a transição de escoamento laminar para turbulento, tal transição depende de outros fatores ligados ao escoamento como perturbações impostas (causadas por vibrações, rugosidade, etc.) (Munson et. al., 2004). Tais perturbações podem gerar um número de Reynolds local suficiente para tornar o escoamento turbulento, mesmo que ele seja inferior ao longe.

Os programas de Mecânica dos Fluidos computacional simulam a turbulência do escoamento conforme diferentes métodos como o *Spalart-Allmaras Model*, *Standard k- ϵ model*, entre outros (ANSYS, Inc., 2015). Esses métodos consideram a velocidade de um escoamento para certa direção (u_i) sendo representada por uma parcela correspondente à velocidade média (\bar{u}_i) e por uma parcela correspondente à turbulência (u'_i), conforme a equação a seguir:

$$u_i = \bar{u}_i + u'_i \quad (10)$$

Demais variáveis como a pressão, por exemplo, também podem ser representadas da mesma forma. Tal representação da velocidade aplicada às equações do escoamento citadas anteriormente (tal como as Equações de Navier-Stokes) podem complicar demasiadamente a resolução teórica dos problemas. Nesse contexto que os métodos se mostram úteis para a resolução do problema, fazendo eventuais simplificações do problema.

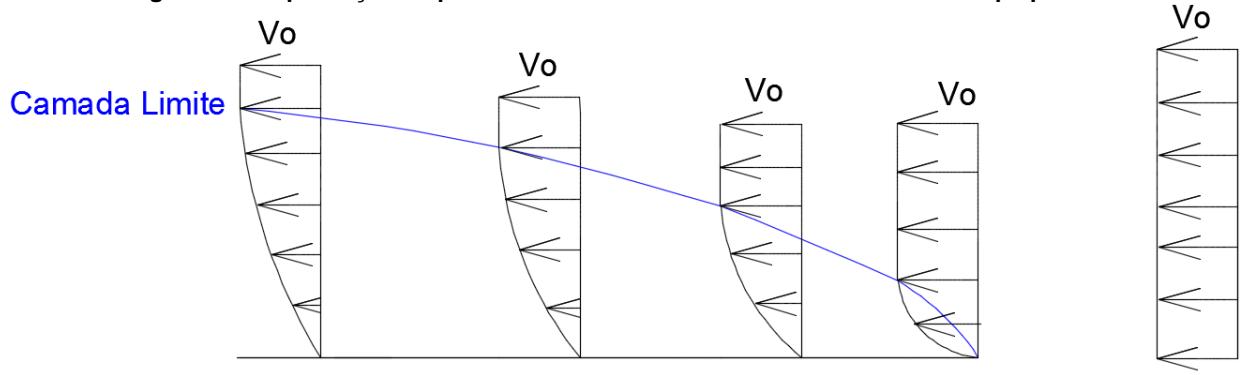
Não faz parte do escopo do projeto fazer uma análise desses métodos. Será apenas apresentado o método utilizado e suas características gerais no item em que explicaremos os detalhes da modelagem computacional.

4.3.3.3 Camada Limite

Quando o vento incide sobre uma superfície, pode-se observar que seu perfil de velocidades é alterado significativamente. Como hipótese inicial, considera-se que o fluido adere à superfície, isto é, sua velocidade é nula na interface fluido-superfície. Entretanto, a uma distância suficientemente grande da superfície, o fluido volta a possuir uma velocidade praticamente igual à velocidade inicial. Tal resultado

sob uma chapa plana foi obtido experimentalmente e é reproduzido esquematicamente na Figura 11.

Figura 11 - Reprodução esquematicamente da camada limite sobre uma chapa plana



Fonte: Autoria própria.

Esse conceito pode ser aplicado na própria camada atmosférica, definindo-se assim a camada limite atmosférica. Em oposição aos resultados em uma chapa plana, sabe-se que rugosidades da superfície, mudanças de declividade ou qualquer outra obstrução sobre a superfície podem alterar significativamente a forma da camada limite.

Jensen (citado em Cook, 1990) em seus experimentos mostra que a correta consideração da Camada Limite Atmosférica no perfil de velocidades e consecutivos efeitos na análise de estruturas sob a ação do vento é essencial para se obter bons resultados. Tal consideração pode ser obtida através da similaridade entre o número de Jensen da estrutura real comparado com o modelo físico, no caso de uma análise em túnel de vento, conforme item 4.3.2.2.

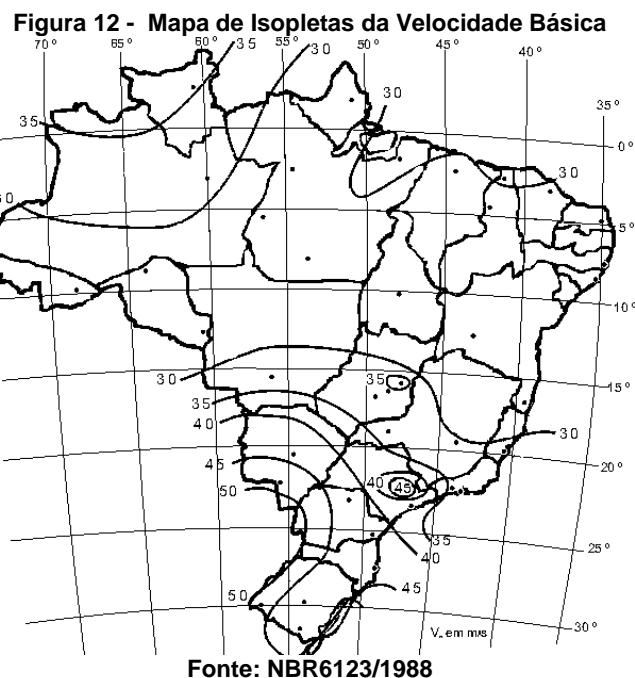
4.4 NORMA

A NBR 6123 – “Forças devidas ao vento em edificações” – teve origem no projeto NB599 de 1987 e passou a valer a partir de 1988, tendo em sua última versão uma errata, incorporada em 2013. Atualmente ela encontra-se em fase de transição. Nas seções a seguir apresentam-se alguns conceitos presentes na norma, bem como o modo como são calculados parâmetros de importância.

4.4.1 Velocidade do Vento segundo a NBR 6123/1988

A NBR6123/1988 considera, para obtenção dos esforços, uma velocidade básica, V_0 , uma rajada de três segundos, excedida em média uma vez em 50 anos, a 10 metros acima do terreno, em campo aberto e plano.

Por isso é importante conhecer aspectos da localidade em que será projetada a edificação. Para tanto, a norma permite o uso de um mapa de isopletas do Brasil, que pode ser visualizada na Figura 12 abaixo:

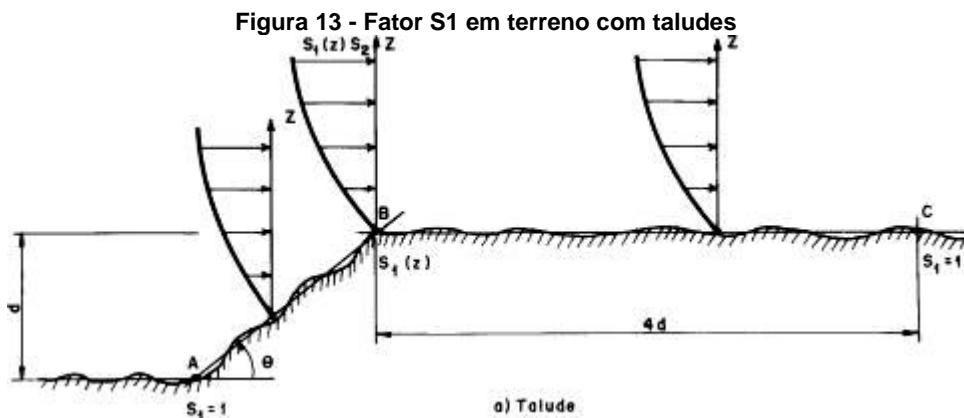


No entanto, não basta apenas conhecer o local, é importante saber as possíveis interferências, ponderadas na norma como fatores multiplicativos da velocidade básica, para se obter a velocidade característica do vento (V_k), que é a que deve ser efetivamente utilizada:

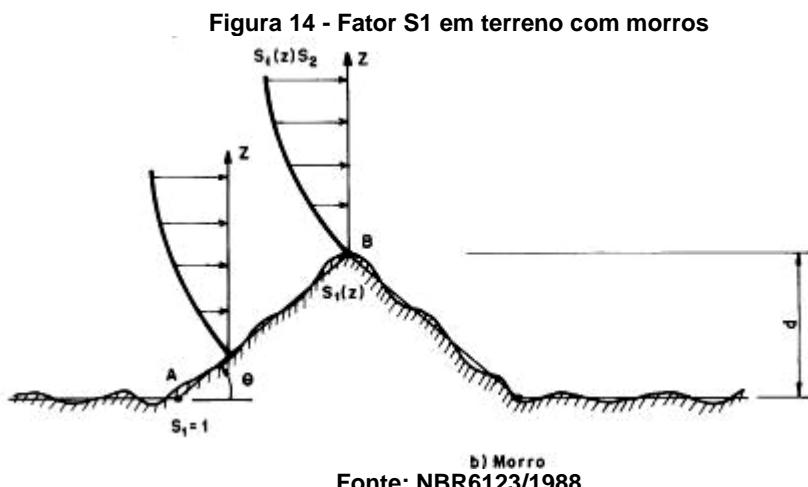
$$V_k = V_0 S_1 S_2 S_3 \quad (11)$$

4.4.1.1 Fator Topográfico S_1

Este fator leva em consideração o relevo do terreno, caracterizado como plano, de taludes ou de morros ou vales. A Figura 13 e a Figura 14 da norma são auto-explicativas:



Fonte: NBR6123/1988



Fonte: NBR6123/1988

Sendo :

- z: Altura medida a partir da superfície do terreno no ponto considerado
- d: Desnível entre a base e o topo do talude (ou morro)
- θ: Inclinação média do talude (ou encosta do morro).

Em resumo, para o cálculo deste fator, as fórmulas podem ser encontradas na Tabela 1:

Tabela 1 - Cálculo do fator topográfico S1.

Tipo de terreno	Fator Topográfico (S1)	
(a) Plano ou fracamente acidentado	1,0	
(b) Taludes ou morros (Figura 13 e Figura 14)	Pontos A e C e $\theta < 3^\circ$	1,0
	Ponto B ($6^\circ < \theta < 17^\circ$)	$1 + \left(2,5 - \frac{Z}{d}\right) \tan(\theta - 3^\circ) \geq 1$
	Ponto B ($\theta > 45^\circ$)	$1 + \left(2,5 - \frac{Z}{d}\right) 0,31 \geq 1$
(c) Vales Profundos protegidos de ventos	0,9	

Fonte: NBR6123/1988

Observando-se que para o caso (b) pode-se interpolar linearmente o fator para os pontos entre A, B e C e para o ponto B, interpolar linearmente para os ângulos nos intervalos não especificados.

Recomenda-se ainda que, caso estas indicações não sejam bem aplicáveis, utilizem-se ensaios como o túnel de vento ou medições no local com anemômetros.

4.4.1.2 Fator de rugosidade do terreno, dimensões da edificação e altura sobre o terreno S₂

Este fator considera todos estes parâmetros em conjunto, pois cada um deles influencia no comportamento do vento, ou seja, a velocidade do vento aumenta com a altura acima do terreno e com a rugosidade. As dimensões da edificação são importantes e dependem do tempo de medição da velocidade do vento, pois edificações de menores dimensões são mais afetadas por rajadas de curta duração.

Com relação à rugosidade do terreno, a norma fornece cinco categorias em função das dimensões dos obstáculos, as quais se encontram descritas na Tabela 2 a seguir e ilustradas da Figura 15 à Figura 19:

Tabela 2 - Categorias de terreno.

Categoria	Características	Cota média dos obstáculos
I	Superfícies lisas com mais de 5km de extensão	-
II	Terrenos abertos, com poucos obstáculos	<1,0m
III	Terrenos planos ou ondulados	3,0m
IV	Terrenos cobertos por obstáculos pouco espaçados	10,0m
V	Terrenos cobertos por obstáculos altos e pouco espaçados	> 25,0m

Fonte: NBR6123/1988

Figura 15 - Categoria I: mar calmo, lagos e rios

Fonte: guaiesoterico.wordpress.com

Figura 16 - Categoria II: pradarias, fazendas sem muros

Fonte: pixabay.com

Figura 17 - Categoria III : subúrbios com casas baixas e esparsas, casas de campo

Fonte: skyscanner.com.br

Figura 18 - Categoria IV: subúrbios densamente construídos, cidades pequenas

Fonte: tatui.sp.gov.br

Figura 19 - Categoria V: centros de grandes cidades

Fonte: Léo Ramos

O fator S_2 ainda considera o tempo para que toda a edificação seja envolvida pelo vento, considerando características construtivas ou estruturais, dividindo as edificações em três classes, para rajadas de 3s, 5s e 10s respectivamente, como mostra a Tabela 3:

Tabela 3 - Classes de edificações.

Classe A:	Todas as unidades de vedação, seus elementos de fixação e peças individuais de estruturas sem vedação. Toda edificação na qual a maior dimensão horizontal ou vertical não exceda 20m
Classe B:	Toda edificação ou parte da edificação para a qual a maior dimensão horizontal ou vertical da superfície frontal esteja entre 20m e 50m.
Classe C:	Toda edificação ou parte de edificação para a qual a maior dimensão horizontal ou vertical da superfície frontal exceda 50m.

Fonte: NBR6123/1988

A altura do ponto considerado também é importante e impacta no valor do fator S_2 , podendo-se calculá-lo pela seguinte expressão:

$$S_2 = bF_r \left(\frac{z}{10} \right)^p \quad (12)$$

sendo:

- z: Altura em metros, medida a partir da superfície do terreno no ponto considerado;
- b: Parâmetro meteorológico referente à categoria de rugosidade do terreno e à classe da edificação;
- p: Exponente da lei potencial de variação;
- Fr: Fator de rajada.
- z_g : Altura até onde a equação é aplicável, que define o contorno superior da camada atmosférica.

O fator de rajada é aplicável apenas à categoria II, esse parâmetro e os parâmetros b, p e z_g são dados em função das categorias e classes, fornecidos em tabela pela NBR6123/1988, tal qual descreve a Tabela 4

Tabela 4 - Parâmetros meteorológicos.

Categoria	$z_g(m)$	Parâmetro	Classes		
			A	B	C
I	250	b	1,10	1,11	1,12
		p	0,06	0,065	0,07
II	300	b	1,00	1,00	1,00
		F_r	1,00	0,98	0,95
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: NBR6123/1988

4.4.1.3 Fator Estatístico S_3

Como o próprio nome sugere, este fator se baseia em conceitos estatísticos, considerando a vida útil e grau de segurança requerido para cada tipo de uso da edificação; são tabelados conforme segue:

Tabela 5 - 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, 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

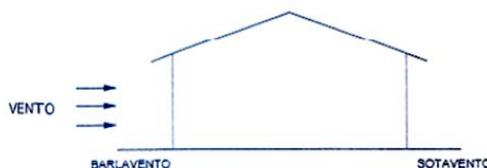
Fonte: NBR6123/1988

4.4.2 Cálculo dos esforços devidos ao vento segundo a NBR6123/1988

No item 4.2.1. (Velocidade do Vento) foi explicado o processo para se encontrar a velocidade a ser utilizada. Com esta velocidade é possível encontrar os esforços atuantes na estrutura. Mas antes, é necessário definir alguns conceitos e nomenclaturas comumente utilizadas em aerodinâmica:

Define-se como barlavento a região onde sopra o vento em relação à edificação e sotavento, a região oposta (Figura 20).

Figura 20 - Definições do vento



Fonte: Leria e Montefusco

Há ainda as convenções de sinais para a pressão. Denomina-se sobrepressão a pressão efetiva acima da pressão atmosférica de referência, recebendo sinal positivo. Em contraposição há a succão, que recebe sinal negativo. Lembrando que na região de barlavento pode ocorrer tanto sobrepressão quanto succão, dependendo da edificação. (LERIA, MONTEFUSCO).

Para o cálculo das forças atuantes, segundo a norma, as forças devidas ao vento assumem a forma geral:

$$F = C_f q A \quad (13)$$

Em que se definem:

F: Força

C_f : Coeficiente de força (especificado em cada caso, por exemplo, coeficiente de arrasto para se obter a força de arrasto)

q: Pressão dinâmica : $q = 0,613 V_k^2$

A: Área de referência (projeção ortogonal à direção do vento)

Neste trabalho pretende-se obter o coeficiente de pressão externa; e segundo a norma ele é obtido da seguinte maneira:

$$c_{pe} = \Delta p_e / q \quad (14)$$

Sendo:

c_{pe} : Coeficiente de pressão externa

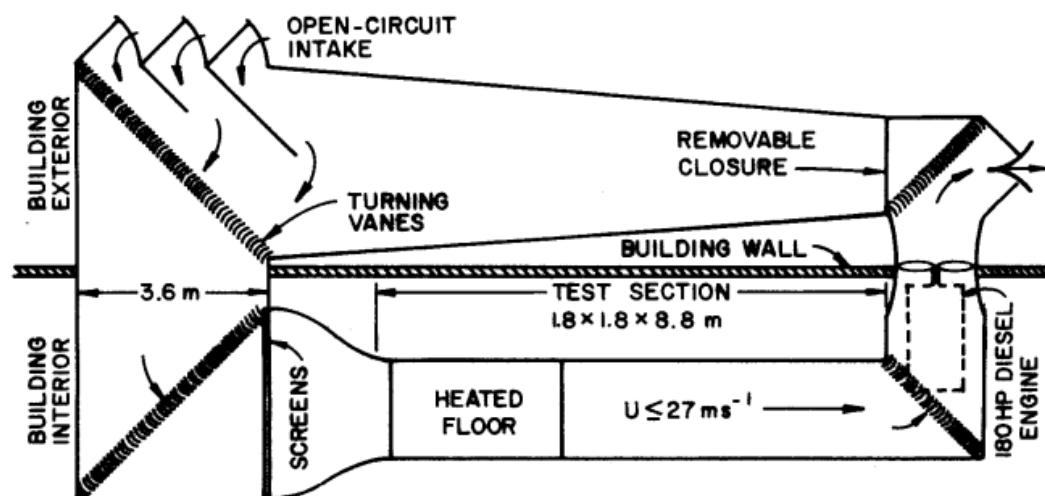
Δp_e : Pressão efetiva externa

4.5 MÉTODO EXPERIMENTAL - TÚNEL DE VENTO

Os túneis de vento são recursos laboratoriais capazes de produzir correntes de ar em condições controladas, sendo o interesse determinar as características do escoamento de um fluido quando em contato com um modelo. É um recurso utilizado no ensino e em diversas áreas de pesquisa para auxiliar o processo de projeto.

Historicamente, os primeiros ensaios para determinação dos esforços devidos ao vento em edificações datam de 1891, pelos australianos William Charles Kernt e James Mann. Já os ensaios de edificações como conhecemos hoje foram revolucionados em 1949 por Jack E. Cermak, quando montou um túnel de vento de camada limite atmosférica, na Universidade do Estado do Colorado, cujo esquema pode ser visto na Figura 21.

Figura 21 - Túnel de vento da Universidade do Estado do Colorado

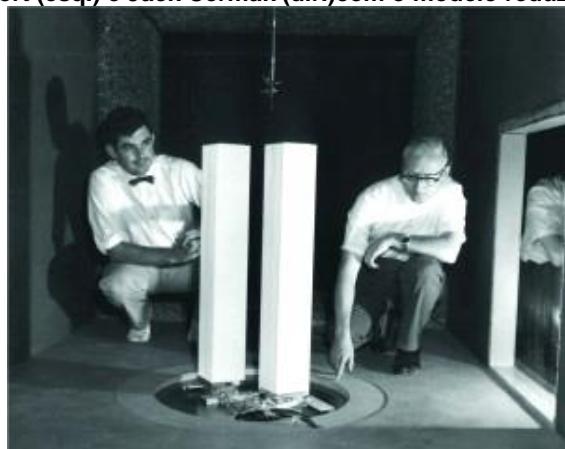


Fonte: www.engr.colostate.edu

A partir dessa data, passou-se a estudar a interação vento-estrutura em edificações submetidas a um escoamento turbulento, reproduzindo as características do vento natural do local da construção. No entanto, foi a partir da década de 1970 que os testes cresceram em importância.

A título de curiosidade, na Figura 22 pode-se ver o registro de um dos primeiros ensaios feitos em túnel de vento voltado a edificações, no caso, o modelo reduzido das Torres Gêmeas.

Figura 22- Alan Davenport (esq.) e Jack Cermak (dir.) com o modelo reduzido das Torres Gêmeas.



Fonte: www.cppwind.com

No Brasil, a demanda aumentou muito nos últimos dez anos em virtude dos projetos com estruturas mais arrojadas como arenas esportivas e torres esbeltas. Existem duas configurações básicas de túnel de vento: circuito fechado e circuito aberto.

a) Túnel de vento de circuito fechado

No túnel de vento de circuito fechado, o fluido circula por uma passagem de retorno, que pode ser horizontal ou vertical, mas devido ao fácil acesso aos componentes, é utilizado, normalmente a horizontal.

Uma grande vantagem dos túneis de vento fechado em relação aos túneis de vento aberto são que eles necessitam de uma energia menor para movimentar o

fluido no circuito. Normalmente o tipo de ventilador utilizado para essa configuração é o ventilador axial. A Figura 23 ilustra o túnel de vento de circuito fechado.

Figura 23 - Túnel de Vento de Circuito Fechado



Fonte: Red Bull - F1

b) Túnel de vento circuito aberto de succão

No túnel de circuito aberto, o fluido não circula, ou seja, não possui passagem de retorno. Ele é bastante utilizado para fins de instrução e para investigações de fenômenos de fluxo fundamentais.

O custo de construção dos túneis de vento de circuito aberto do tipo sugador é relativamente mais baixo. Para esses tipos de túneis, usa-se o ventilador do tipo axial na saída do difusor. Na Figura 24 pode ser visto um exemplo de túnel de vento do tipo sucção.

Figura 24 - Túnel de vento circuito aberto de sucção



Fonte: Armfield

O túnel de vento utilizado neste trabalho (TV1 da Escola de Engenharia Mauá) é deste tipo e suas características serão descritas em seções posteriores.

c) Túnel de vento de circuito aberto do tipo soprado

Por utilizar um ventilador centrífugo, a vantagem desse túnel de vento em relação ao aberto de succção é de ter a capacidade de trabalhar com maior demanda de carga do sistema. A Figura 25 ilustra o túnel de vento do tipo soprador.

Figura 25 - Túnel de vento circuito aberto tipo soprador



Fonte: ITA

Em relação ao modelo reduzido a ser ensaiado, o que determina o tipo de ensaio é a configuração estrutural e arquitetônica real. Quando é necessário reproduzir somente a forma, o modelo é rígido. Nos casos em que é preciso incorporar características de rigidez, massa e amortecimento, como no caso de uma ponte estaiada, o modelo é flexível.

Para tanto, existem ensaios estáticos e dinâmicos. O primeiro, mais simples, é suficiente quando não são constatadas amplificações das respostas da estrutura devido às propriedades dinâmicas - frequências naturais, modos de vibração e níveis de amortecimento. Para esse ensaio basta que o modelo seja rígido e tenha a mesma geometria da estrutura em escala, além de cuidados em relação aos adimensionais.

Já no caso dos ensaios dinâmicos, são fornecidos também os deslocamentos da estrutura e velocidade crítica do vento. Também chamado de aeroelástico, esse tipo de ensaio exige a reprodução, no modelo flexível reduzido, da distribuição de massa e rigidez, incluindo características de amortecimento da estrutura a ser modelada.

Segundo Cermak (citado em Montefusco), existem quatro tipos básicos de ensaios em túneis de vento que fornecem dados aos engenheiros civis para projeto de estruturas. A Tabela 6 lista os diferentes tipos de ensaios e as medidas efetuadas.

Tabela 6 - Tipos de ensaio em túnel de vento e dados medidos

TIPOS DE ENSAIO	DADOS MEDIDOS
1. Modelo rígido de pressão estática (RPM)	a. Pressão média, máxima e mínima. b. Velocidade média do vento e efetiva. c. Pressões instantâneas.
2. Modelo rígido com balança de baixa frequência (RF-FBM)	a. Forças e momentos médios.
3. Modelo rígido com balança de alta frequência (RH-FBM)	a. Forças e momentos médios de natureza dinâmica.
4. Modelo Aeroelástico (AM)	a. Momentos e deslocamentos. b. Aceleração

Fonte: CERMAK, 1989 (citado em Montefusco)

Os modelos devem ter escala compatível com o tamanho do túnel disponível para o ensaio, ao longo do qual são instalados sensores, como tomadas de pressão, principalmente nos pontos críticos apontados pelo projetista.

4.6 ESTADO DA ARTE/REVISÃO DA LITERATURA

O desenvolvimento das técnicas e materiais da construção impulsionou o desenvolvimento de edificações mais modernas, ou mais esbeltas ou de arquitetura não-convencional. Isto associado à busca de racionalização dos materiais em conjunto com o dimensionamento de estruturas funcionais e seguras propiciou um campo de pesquisas bastante abrangente. Muitas delas voltadas à comparação tanto de resultados experimentais quanto de softwares aos da norma vigente no Brasil para o cálculo dos esforços devidos ao vento sobre essas estruturas.

Blessmann (s.d.) proporcionou uma boa base teórica em sua obra "Aerodinâmica aplicada à Engenharia Civil", livro que fornece um embasamento

quanto a noções de aerodinâmica, conceitos quanto aos esforços atuantes em estruturas devidos ao vento.

Além da obra citada, Blessmann (2001) em seu livro "Acidentes causados pelo vento" levou a uma das motivações para realização deste trabalho, elucidando casos de acidentes ocorridos tanto no Brasil quanto em outros locais do mundo. Sua obra aborda ainda as condições da edificação no momento do acidente, bem como suas possíveis causas.

Para melhor entendimento do assunto, foi consultado o trabalho de Ferreira (2005), em que foram comparados dados de vento segundo a norma e dados realísticos obtidos em estações meteorológicas da Paraíba. Com isto foi possível obter mais conhecimentos acerca do tema "vento", além de aprofundamentos de como ele é considerado na norma. A importância deste trabalho foi centrada na necessidade de rever os parâmetros adotados na norma, seja para maior refinamento de dados, seja para um dimensionamento mais racional e consciente da estrutura.

Arrais (2011) em seu trabalho de conclusão de curso realizou um estudo das pressões atuantes em fachadas de edifícios, comparando resultados obtidos em túnel de vento com o dimensionamento segundo formas simplificadas da NBR6123/1988. Uma das justificativas eram os acidentes ocorridos por deslocamentos de revestimentos ou quebra de vidros. Arrais, nesta pesquisa, concluiu que para alguns resultados os coeficientes de pressão calculados segundo a norma ficaram abaixo dos obtidos em túnel de vento, tendo atribuído estas diferenças às formas diferenciadas dos edifícios, com chanfros e curvas.

A conclusão de Arrais foi de que se os valores da norma fossem efetivamente utilizados para dimensionamento muitos problemas poderiam ocorrer durante o uso da edificação. Para tanto, foram propostas sugestões, como a maior abrangência da norma para geometrias mais diferenciadas ou mesmo que a norma propusesse coeficientes de segurança no caso de edificações com regiões de chanfros ou particularidades.

Outra referência utilizada como apoio à elaboração deste trabalho foi a dissertação de mestrado de Pasqual (2011). Ainda que sua pesquisa fosse voltada à ação do vento sobre tensoestruturas, foi possível obter informações quanto à norma NBR6123/1988, bem como do *software* que será utilizado, o ANSYS. Um ponto importante a ser destacado acerca das conclusões obtidas por Pasqual é que ferramentas como o ANSYS são uma solução viável à simulação de estruturas, sendo uma alternativa vantajosa em relação aos ensaios em túnel de vento.

Oliveira Júnior (2014) em seu trabalho de conclusão de curso analisou a influência do vento em galpões industriais com geometrias idênticas às da norma, comparando resultados da norma com resultados obtidos em software de simulação numérica. De sua pesquisa, foi possível concluir que o dimensionamento pela norma leva a coeficientes mais conservadores para geometrias completamente contempladas na norma, resultado este atribuído ao fato de a norma trabalhar a favor da segurança.

Assim como Pasqual (2011), Oliveira Júnior pôde concluir que as ferramentas computacionais são uma ótima forma de simular estruturas, podendo, inclusive analisar estruturas não contempladas pela norma, como por exemplo, a presença de uma caixa d'água acima da estrutura de um galpão.

Anjing Bi (2006) em sua tese para obtenção do título de PhD abordou os carregamentos devidos ao vento em edificações baixas; porém considerando parâmetros a serem analisados probabilisticamente (Método PDF - *Probability Density Functions*), tendo abordado ainda a norma americana, a qual, segundo o autor, quando elaborada ainda contava com problemas, os quais têm sido pesquisados até hoje. Neste estudo foi calculada, inclusive, a probabilidade de que os coeficientes de pressão calculados pela norma sejam excedidos. Ainda segundo o autor, uma forma de eliminar essas inconsistências na norma ASCE7-05 (*Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures*) é entender o caráter estatístico dos parâmetros de carregamento do vento, que para tanto, requer uma grande quantidade de dados confiáveis.

Outro estudo elaborado, bastante semelhante ao proposto neste trabalho foi o tema abordado na dissertação de mestrado de Lopes (2008), cuja proposta era analisar os escoamentos do tipo camada limite atmosférica sobre edifícios de três maneiras: segundo a norma do país (Eurocódigo 1.4), por uma abordagem experimental (túnel de vento) e numérica, utilizando princípios do CFD. Exceto à aplicação da norma, esta tese fornece um bom embasamento quanto à experimentação bem como quanto ao software utilizado (ANSYS Fluent).

Além desses estudos, houve a busca por algum trabalho publicado que também analisasse uma estrutura semelhante à geometria do ginásio em estudo, ou ao menos uma que se assemelhasse à forma descrita na norma. Um trabalho de interesse é o de Uematsu (2011), o qual trata do projeto de revestimentos de coberturas sob ação do vento. Neste trabalho é proposto um método de análise dos coeficientes de pressão considerando métodos probabilísticos, ao invés de considerar regiões da cobertura e o respectivo pico de pressão.

Figura 26 - Nagoya Dome



Fonte: Uematsu, Y. (2011)

Uma estrutura analisada foi o *Nagoya Dome*, representado na Figura 26. São apresentados resultados experimentais de túnel de vento e resultados obtidos pelo autor através do método ANN (*Artificial Neural Network*), um método de análise de vários dados e parâmetros cuja relação pode ser linear ou não linear, apresentando resultados satisfatórios e aplicáveis, comparando os valores com os obtidos em túnel de vento.

Apesar deste trabalho apresentar uma metodologia diferente, utilizando um método que não será abordado no presente trabalho, Uematsu (2011) propôs uma forma de análise das pressões em toda a estrutura analisada, visto que em certos

casos é mais interessante analisar as várias pressões que podem ocorrer na cobertura da edificação, ao invés de simplesmente adotar coeficientes para cada região da estrutura (no caso, a NBR 6123 fornece coeficientes a barlavento, no topo e a sotavento).

5 MATERIAIS E MÉTODOS

5.1 ESTRUTURA ANALISADA

A estrutura a ser analisada, como citado anteriormente é o Ginásio de Esportes Geraldo Magalhães, mais conhecido como Geraldão localizado na Avenida Mascarenhas de Moraes, Imbiribeira, em Recife, Pernambuco, melhor detalhado na Figura 27, Figura 28 e Figura 29 a seguir.



Figura 27 - Vista espacial do Ginásio



Figura 28 - Vista Aérea do Ginásio

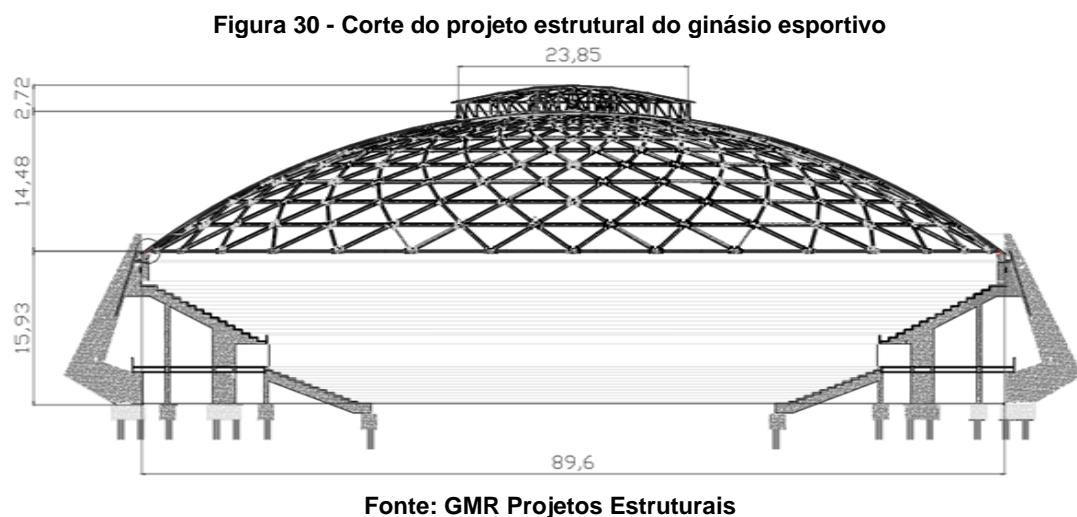


Figura 29 - Vista interna do ginásio.

Fonte: GMR Projetos Estruturais

Foi projetado pelo arquiteto Ícaro de Castro Melo, inaugurado em 1970 e atualmente passa por um processo de reforma, devido tanto à idade da estrutura quanto à oxidação dos aparelhos de apoio móveis da cobertura, fato que implicou na transmissão de esforços horizontais aos pilares, não previstos no projeto original, causando fissuras nos pilares e blocos de fundação. (GMR Projetos Estruturais, 2012)

A estrutura consiste de uma cobertura em forma de cúpula feita de treliças metálicas apoiadas em uma estrutura de concreto armado. Abaixo, na Figura 30, um corte do projeto da estrutura:



As características arquitetônicas de interesse à análise da estrutura em relação aos esforços devidos ao vento que possam alterar o comportamento previsto em norma são os pilares, de geometria diferenciada e que rodeiam a estrutura, o fechamento lateral (em placas de concreto armado), que não é exatamente cilíndrico e a estrutura no topo da cúpula.

5.2 COEFICIENTES DE PRESSÃO SEGUNDO A NBR6123/1988

A geometria prevista pela norma NBR6123-1988 que mais se assemelha à estrutura em estudo é a cúpula sobre paredes cilíndricas (item E.2.2. pág. 53), cujos coeficientes serão tirados separadamente para a cúpula e para a parede, conforme recomenda a norma.

5.2.1 Cúpula

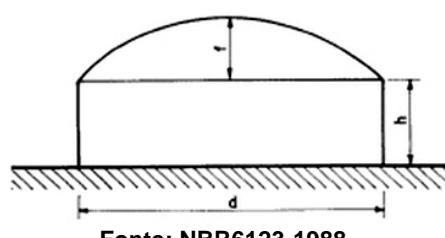
Para obtenção dos coeficientes de pressão limites ao longo da superfície da cúpula, são fornecidas isóbaras e tabelas, e os valores, dados em função dos seguintes parâmetros (detalhados na Figura 31):

Flecha (f): altura da base da cúpula a seu topo = 14,5m;

Altura (h): altura da parede cilíndrica = 15,93m;

Diâmetro (d): diâmetro da cúpula = 89,6m.

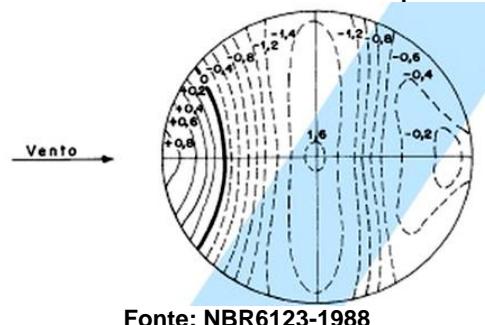
Figura 31 - Cúpula sobre base cilíndrica - corte



Fonte: NBR6123-1988

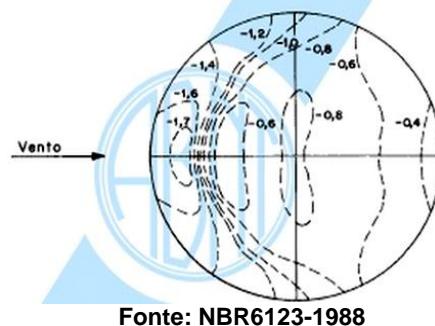
São apresentados, ainda, duas configurações de linhas isobáricas para duas combinações de parâmetros, como apresentado na Figura 32 e na Figura 33.

Figura 32 – Vista Superior: linhas isobáricas dos coeficientes de pressão externa para $f/d=1/2$ e $h/d=1/2$



Fonte: NBR6123-1988

Figura 33 – Vista Superior: linhas isobáricas dos coeficientes de pressão externa para $f/d=1/10$ e $h/d=1$



Fonte: NBR6123-1988

Para a estrutura do ginásio, tem-se $f/d=0,162$ e $h/d=0,178$, valores estes não compreendidos nas linhas isobáricas acima; porém, o item E-2.2.1 da norma permite que para valores intermediários de f/d e h/d , os valores dos coeficientes sejam obtidos por interpolação dos valores da tabela 31 da norma, que pode ser vista abaixo na Tabela 7:

Tabela 7 - Tabela 31 da NBR6123-1988 - Valores limites dos coeficientes de pressão externa, c_{pe} - Cúpulas sobre bases cilíndricas.

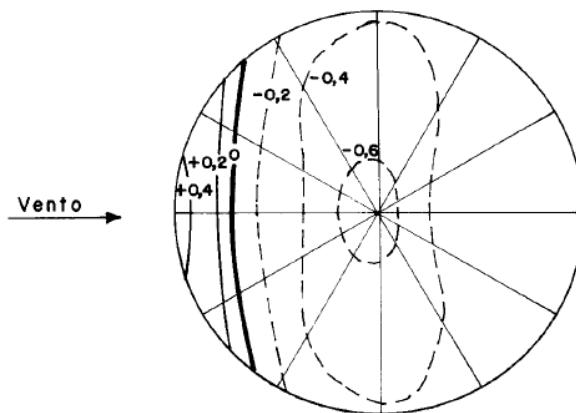
f/d	h/d	c_{pe}		
		A barlavento	No topo	Lateralmente
1/2	1/4	+0,9	-1,5	-0,4
	1/2	+0,8	-1,7	-0,4
	1	+0,8	-1,7	-0,5
1/6	1/4	-0,1	-0,9	-0,4
1/10		-1,2	-0,6	-0,3
1/15		-1,4	-0,5	-0,3
1/20		-1,4	-0,4	-0,2
1/6	1	-1,4	-1,1	-0,4
1/10		-1,7	-0,8	-0,4
1/15		-1,5	-0,5	-0,4
1/20		-1,4	-0,5	-0,4

Fonte: NBR6123-1988

A NBR 6123 deixa explícito que não há sobrepressão em cúpulas com f/d menor que 1/5 e parede de altura a partir de $d/4$, o que não é o caso do ginásio analisado, pois a parede possui altura de $d/5,6$.

Como não há valores para a altura da parede abaixo de $d/4$, utilizaremos os valores para a cúpula sobre o terreno para interpolação dos dados, que são apresentados na norma conforme a Figura 34 e a Tabela 8.

Figura 34 – Vista Superior: linhas isobáricas dos coeficientes de pressão externa para $f/d=1/4$



Fonte: NBR6123-1988

Tabela 8 – Valores limites dos coeficientes de pressão externa de cúpulas sobre o terreno

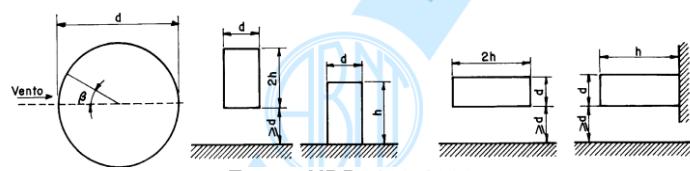
f/d	C_{pe}	
	Sobrepressão	Succção
1/15	+0,1	-0,3
1/10	+0,2	-0,3
1/8	+0,2	-0,4
1/6	+0,3	-0,5
1/4	+0,4	-0,6
1/2	+0,6	-1,0

Fonte: NBR6123-1988

5.2.2 Paredes Cilíndricas

Neste caso, a norma fornece um resultado imediato para os coeficientes, levando em consideração à relação h/d , à rugosidade da parede, à posição da estrutura em relação ao terreno (se o eixo do cilindro é vertical ou horizontal, se em contato com a base ou não) e à incidência do vento na direção perpendicular ao eixo do cilindro. Os parâmetros utilizados e a posição do cilindro em relação ao terreno se dão conforme a Figura 35.

Figura 35 - Parâmetros geométricos considerados.



Fonte: NBR6123-1988

Para esta estrutura, considerou-se o caso de superfície rugosa ou com saliências, escolha esta justificada pelos pilares no entorno da estrutura. Além de se enquadrar na categoria $h/d < 2,5$, da tabela 9 da NBR6123-1988.

Vale ressaltar que os coeficientes da parede, como prescreve a norma, são obtidos através desta tabela, destinada a geometrias cilíndricas, ou seja, havendo ou não cúpula sobre uma edificação cilíndrica, entende-se, que os coeficientes a serem utilizados na parede são os mesmos, não se considerando a possível perturbação causada pela presença da cúpula.

5.3 MODELAGEM COMPUTACIONAL

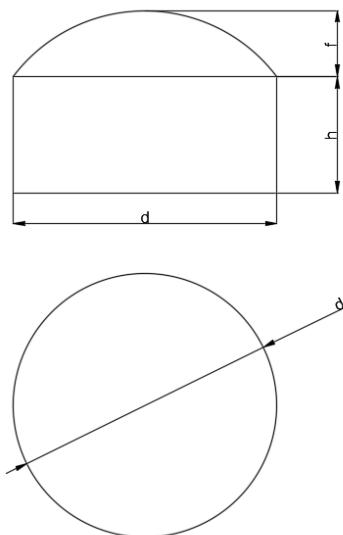
O ginásio foi modelado no software comercial ANSYS em sua plataforma Fluent. Entretanto, antes de iniciar a modelagem do ginásio em si, foram feitas etapas iniciais de verificação do modelo, comparando-se os resultados encontrados no programa com aqueles obtidos na norma para geometrias simples (presentes na norma). Posteriormente, o ginásio foi modelado e seus resultados comparados tanto com uma aproximação da norma, quanto pelos resultados do túnel de vento.

5.3.1 Aspectos gerais

5.3.1.1 Definições dos modelos

Conforme a norma NBR 6123, uma cúpula sobre base cilíndrica pode ser caracterizada conforme dois parâmetros: f/d e h/d , conforme a Figura 36

Figura 36 - Caracterização de uma cúpula sobre base cilíndrica conforme a NBR6123



Fonte: Autoria própria

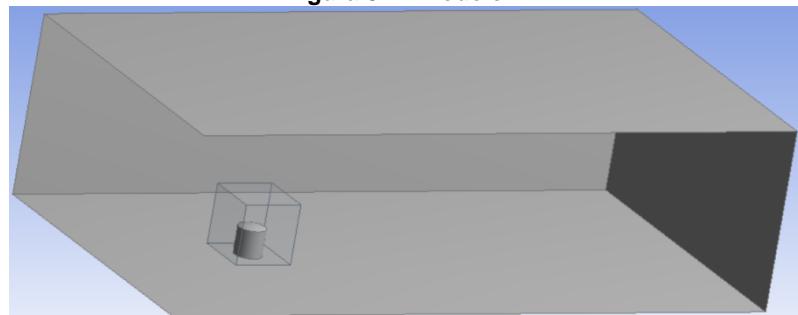
Serão simulados quatro modelos no programa:

- Modelo 1: $f/d = 1/10$ e $h/d = 1$ (Figura 37);
- Modelo 2: $f/d = 1/2$ e $h/d = 1/2$ (Figura 38);
- Modelo 3: $f/d = 1/6,2$ e $h/d = 1/5,6$ (Figura 39);
- Modelo 4: Ginásio Geraldão completo ($f/d = 1/6,2$ e $h/d = 1/5,6$) (Figura 40).

Foram escolhidos os dois primeiros modelos, pois há o perfil completo de coeficientes de pressão em suas respectivas cúpulas. O terceiro modelo refere-se a uma geometria simplificada, porém com os parâmetros mais próximos daqueles encontrados no ginásio. O objetivo desse terceiro modelo é a comparação com os resultados obtidos pela norma, visto que esta é a geometria que se usaria caso esta fosse utilizada exclusivamente para o cálculo dos coeficientes de pressão.

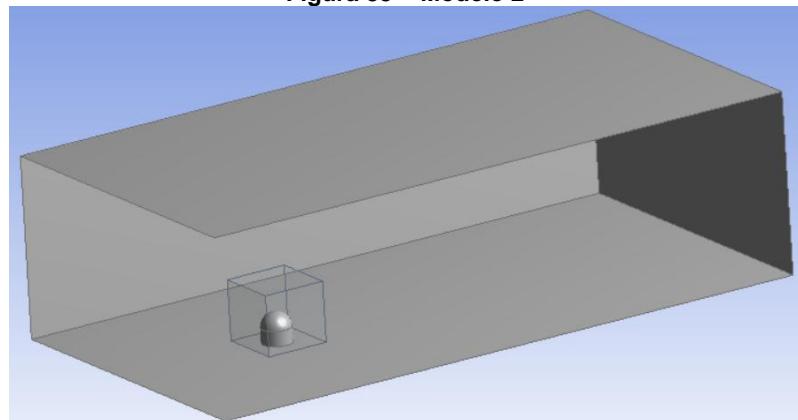
Devido a restrições computacionais, o modelo simulado foi reduzido (Geraldão possui 90m de diâmetro), foi utilizada a escala de 1:100 entre a escala real e o modelo computacional (ou seja, o Geraldão modelado terá 90cm de diâmetro). Para manter uma escala igual entre os modelos, todos eles terão 90 cm de diâmetro e seus demais parâmetros geométricos (f e h) definidos a partir do diâmetro.

Figura 37 - Modelo 1



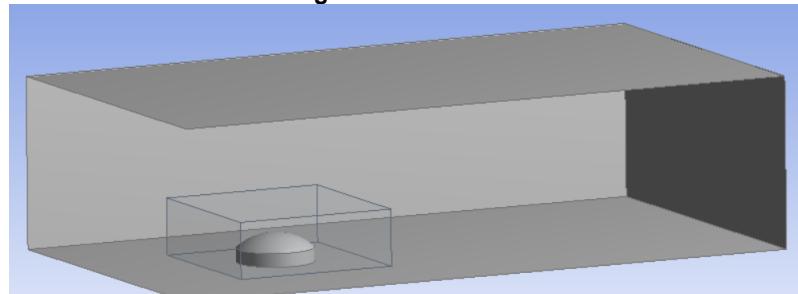
Fonte: Autoria própria

Figura 38 - Modelo 2



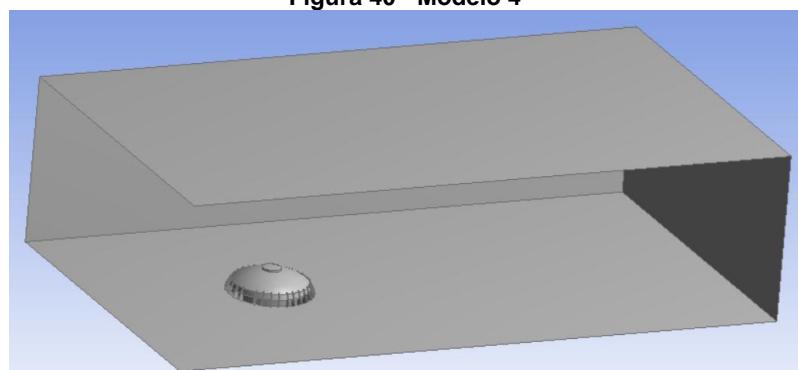
Fonte: Autoria própria

Figura 39- Modelo 3



Fonte: Autoria própria

Figura 40 - Modelo 4

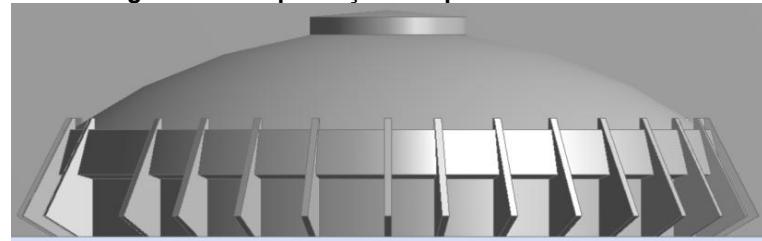


Fonte: Autoria própria

Com relação à geometria do modelo 4, esta precisou ser simplificada, pois com o modelo completo não conseguimos atingir a convergência nas iterações do programa. Por tentativa e erro, definiu-se uma geometria suficientemente simples para evitar problemas computacionais, mas mantendo as principais peculiaridades do ginásio. Portanto, as seguintes simplificações foram realizadas:

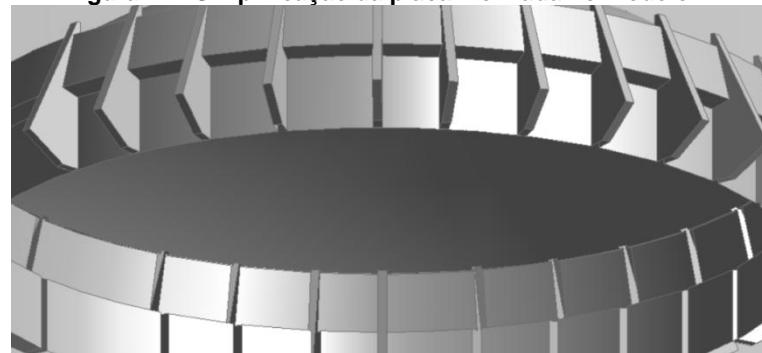
- Estrutura totalmente maciça (ou seja, serão considerada apenas pressões externas, assim como no modelo físico);
- Pilares sem abertura central (Figura 41);
- Placas inclinadas apoiadas na parede (Figura 42).

Figura 41 - Simplificação dos pilares no modelo 4



Fonte: Autoria própria

Figura 42 - Simplificação da placa inclinada no modelo 4



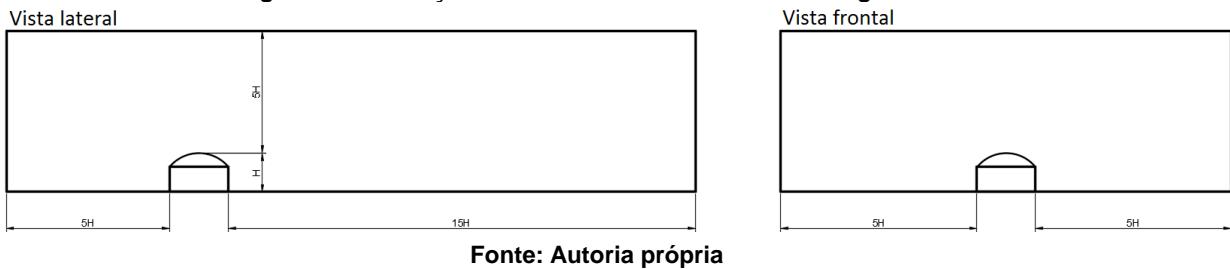
Fonte: Autoria própria

5.3.1.2 Domínio

Primeiramente, vamos definir o domínio utilizado para cada modelo. O domínio é a região em que o modelo é definido, sendo que todos seus limites (verticais e horizontais) devem estar suficientemente afastados do objeto de estudo para que não haja influência em sua análise.

Conforme sugerido por Osokoya (2013), os limites do domínio podem ser definidos conforme a altura da edificação (H): afastamento vertical de $5H$, afastamentos horizontais nos limites laterais e do plano de entrada (*inlet*) de $5H$ e afastamento do plano de saída (*outlet*) de $15H$. Um resumo de tais especificações pode ser visto na Figura 43. Diferentes limites foram testados, mas foi verificado que afastamentos menores geram interferências e, consequentemente, resultados majorados; afastamentos maiores não geraram diferenças significativas.

Figura 43 - Definição dos limites do domínio de forma genérica



5.3.1.3 Condições de contorno

As condições de contorno padrão para o problema proposto estão definidas na Figura 44. Como se trata de um software de língua inglesa, as condições de contorno foram definidas no mesmo idioma. Tais condições são então descritas a seguir:

- *Inlet*: representa o plano de entrada do escoamento. Nele, define-se a velocidade do vento a ser considerado que, nos modelos utilizados, foi considerado a velocidade de 8 m/s.
- *Outlet*: representa o plano de saída do escoamento. Nesse caso, o especificaremos como *pressure outlet*, ou seja, o parâmetro a ser definido no plano é a pressão, que nesse caso será nula;
- *Far field*: representa um plano suficientemente distante do objeto de estudo para evitar interferências com o mesmo. Este será definido como *Free slip wall*, ou seja, uma parede em que não há atrito com o escoamento. No programa, essa condição é definida como uma parede com cisalhamento nulo em todas as direções;

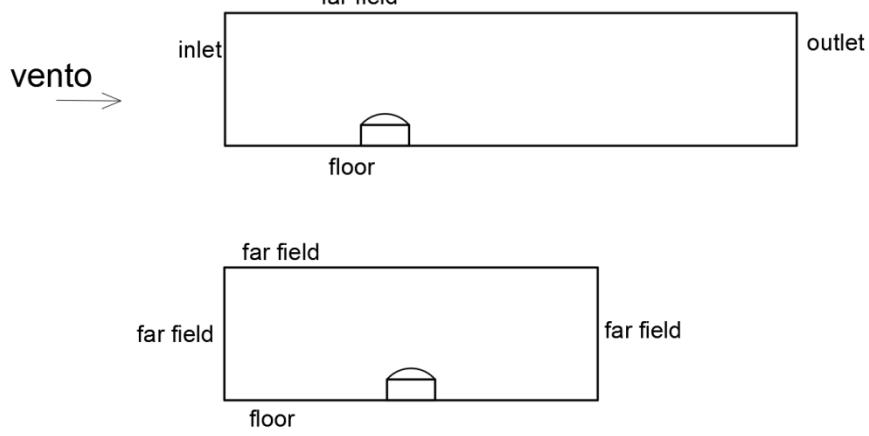
- *Floor*: representa o terreno em que o objeto de estudo está apoiado. É possível ajustar a rugosidade desse terreno a fim de ajustar a camada limite atmosférica da região de estudo.

Como no túnel de vento não é possível ajustar a camada limite atmosférica e como não temos dados de campo suficientes para estimar suas condições reais, não foi feito uma análise aprofundada dos parâmetros de rugosidade do terreno. Entretanto, diversos testes com diferentes rugosidades do terreno no modelo do ANSYS foram feitos para adequar os modelos 1 e 2 com os coeficientes da norma (calibração do modelo). Assim sendo, foi utilizado a seguinte rugosidade para o terreno e para as paredes do objeto de estudo em todos as situações:

- *Floor: roughness height* igual a 0,3m e *roughness constant* igual a 0,7;
- Paredes: *roughness height* igual a 0,05m e *roughness constant* igual a 0,5.

Onde o parâmetro *roughness height* refere-se à zona de influência da rugosidade e o *roughness constant* refere-se ao grau dessa rugosidade (em ambos, quanto maior a variável, mais rugosa é a superfície).

Figura 44 - Condições de contorno de forma esquemática



Fonte: Autoria própria

Com relação à velocidade no *inlet*, foi utilizada a velocidade de 8m/s por ser a menor velocidade que gera um número de Reynolds acima da região crítica, conforme a norma NBR 6123 (1988). De acordo com a mesma, para cilindros em geral, o número de Reynolds definido para o comprimento característico (D, em

metros) como sendo o diâmetro do cilindro deve ser maior que 420000. Ainda conforme a NBR 6123, o número de Reynolds para esse caso pode ser definido como:

$$Re = 70000 * V * D \quad (15)$$

onde V é a velocidade do ar (em m/s).

De fato, utilizando a viscosidade cinemática do ar (ν) a 20°C ($1,5 * 10^{-5}$ m²/s), temos:

$$Re = \frac{V * D}{\nu} = \frac{V * D}{1,5 * 10^{-5}} \approx 70000 * V * D$$

Para $D = 0,9\text{m}$ e $V=8\text{m/s}$, temos:

$$Re = \frac{8 * 0,9}{1,5 * 10^{-5}} = 480000 > 420000 \quad (OK)$$

Note que, assim como explicado no item 4.3.2.1, não é possível estabelecer um número de Reynolds igual à escala real. Entretanto, é importante estabelecermos que tal número esteja em mesma ordem de grandeza que a escala real, ou seja, que o escoamento tenha as mesmas características. Na escala real, teríamos aproximadamente:

$$Re = \frac{V * 90}{1,5 * 10^{-5}} = 6000000 * V$$

Ou seja, precisaríamos de uma velocidade de apenas 0,07 m/s para que Re esteja acima da região crítica. De fato, na situação em escala real, em todas as situações de engenharia analisaríamos essa estrutura em específico com o escoamento acima da região crítica.

5.3.2 Aspectos computacionais

A seguir iremos explicitar os principais dados de entrada computacionais das modelagens.

Primeiramente, definimos a metodologia de cálculo da turbulência como sendo o *Standard k-ε Model*. Utilizamos esse método por ser o mais utilizado em problemas de engenharia em geral. Demais métodos foram testados e não geraram resultados muito diferentes dos obtidos pelo *Standard k-ε Model*.

O *Standard k-ε Model* é um método semi-empírico, ou seja, parte das considerações são provenientes de soluções teóricas, parte de resultados empíricos (ANSYS, 2015). A parte teórica é proveniente da equação de transporte para a energia cinética (k), enquanto a parte empírica é proveniente da taxa de dissipaçāo da mesma (ε). Adicionalmente, o método considera que o escoamento é totalmente turbulento.

Além do método de cálculo da turbulência, o usuário deve fornecer o critério de convergência do cálculo iterativo.

No cálculo iterativo que o programa realiza, são calculados os resíduos das diversas equações do escoamento envolvidas para cada região da malha. Como critério de parada, foi estabelecido que os resíduos absolutos (soma-tória dos resíduos em cada ponto da malha) deverão ser menores que 0,001 para as equações de Navier-Stokes (para os eixos x , y e z), para as equações do k e ε do *Standard k-ε Model* e para a equação da continuidade. Testes com valores menores foram realizados e não houve diferença significativa.

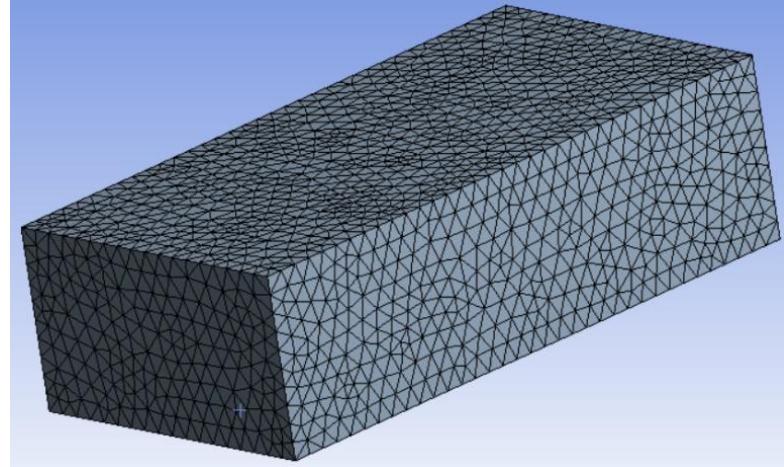
5.3.3 Malhas

As malhas em cada modelo estão representadas da Figura 45 à Figura 65. Para os modelos de 1 a 3, foi escolhido a execução de uma região de influência para uma discretização mais refinada na região próxima do objeto de estudo (paralelepípedos ao redor da estrutura na Figura 37, Figura 38 e Figura 39).

O parâmetro de refinamento foi o tamanho do elemento, fixado como 2 cm. No modelo 4, como se trata de uma geometria bastante detalhada, a especificação de automaticamente refinar as regiões de curvatura e encontros foi suficiente para proporcionar uma boa malha, com exceção da face da cúpula, que foi refinada com uma malha de tamanho 2 cm.

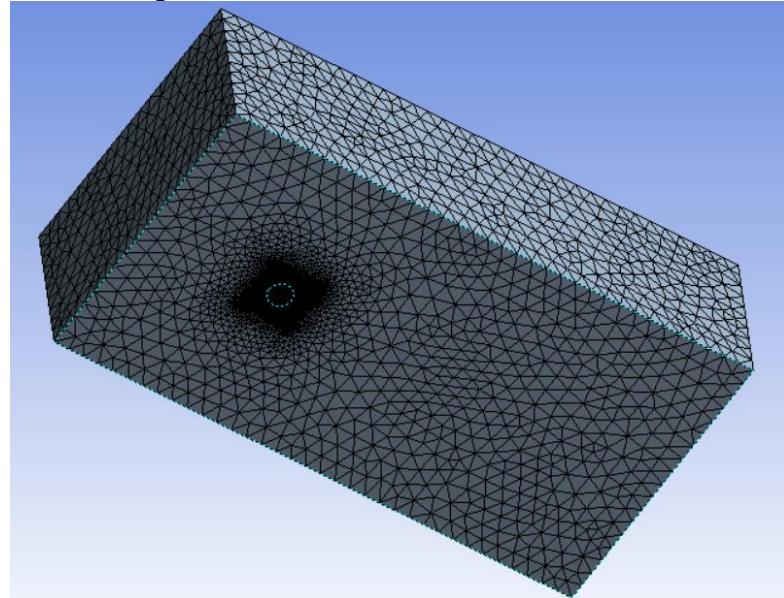
A Figura 45, em particular, mostra uma vista externa da discretização do domínio para todos os modelos. Na realidade, cada modelo possui uma discretização própria, mas todos eles resultaram em um mesmo aspecto externo.

Figura 45 - Vista externa da malha do domínio (modelos de 1 a 4 apresentam o mesmo aspecto)



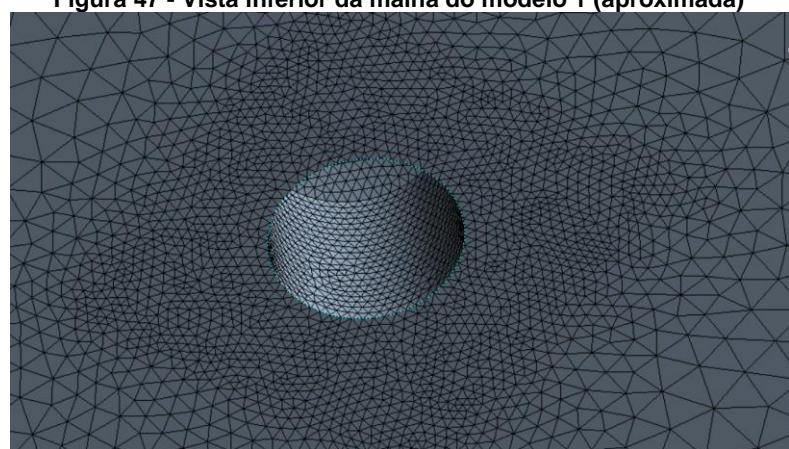
Fonte: Autoria própria

Figura 46 - Vista inferior da malha do modelo 1



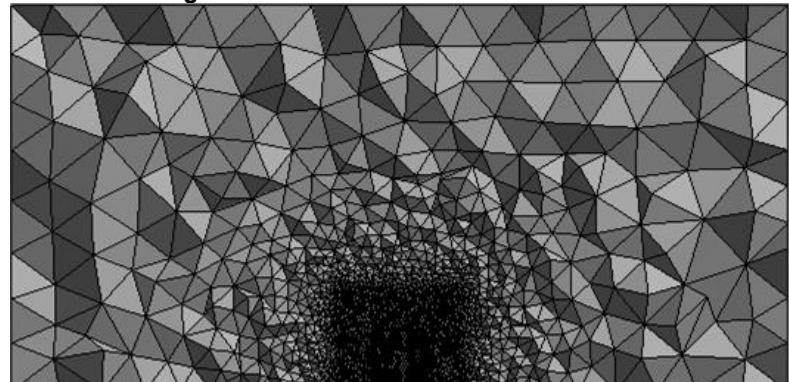
Fonte: Autoria própria

Figura 47 - Vista inferior da malha do modelo 1 (aproximada)



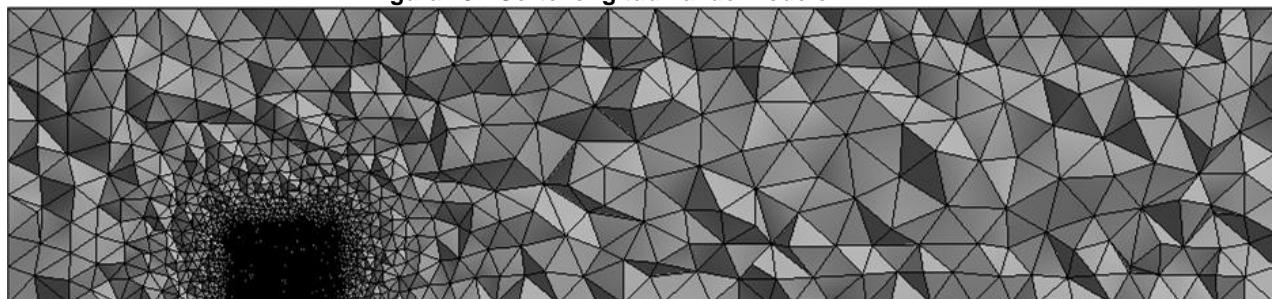
Fonte: Autoria própria

Figura 48 - Corte transversal do modelo 1



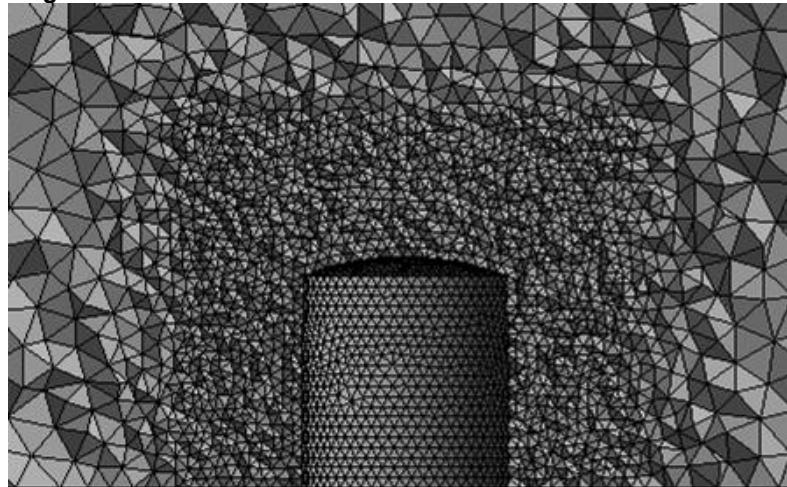
Fonte: Autoria própria

Figura 49 - Corte longitudinal do modelo 1



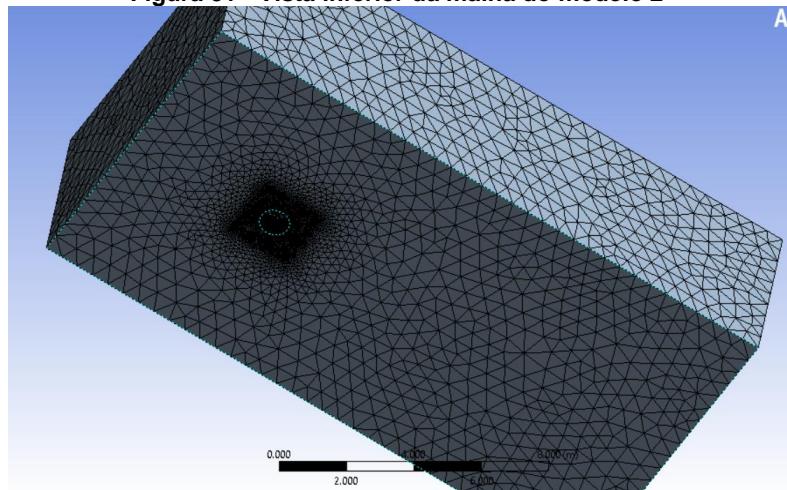
Fonte: Autoria própria

Figura 50 - Detalhe da malha no entorno da estrutura do modelo 1



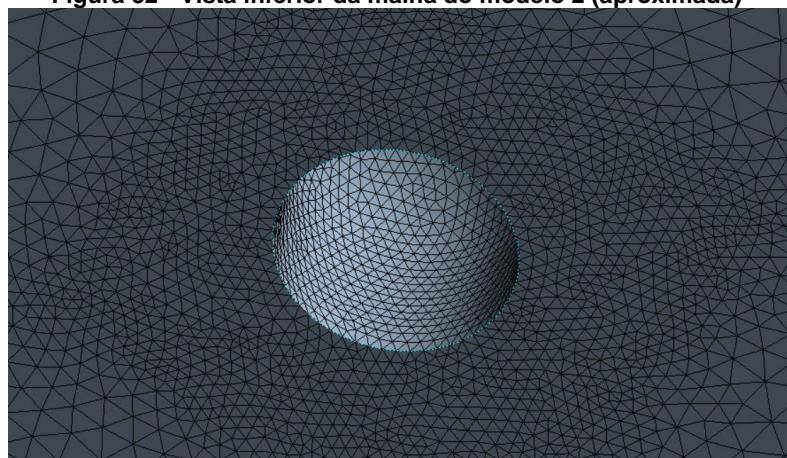
Fonte: Autoria própria

Figura 51 - Vista inferior da malha do modelo 2



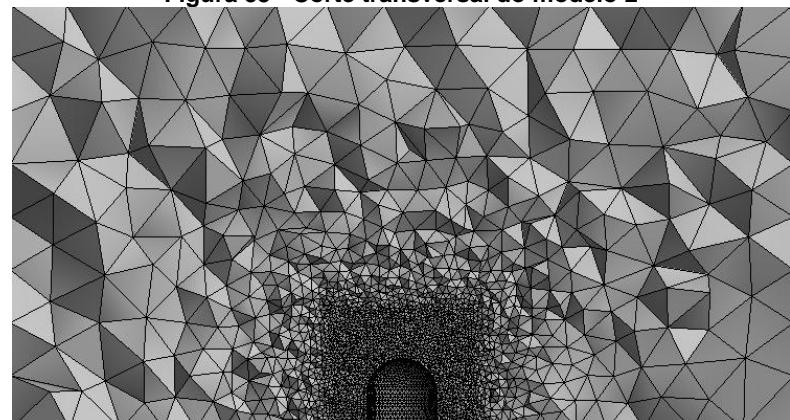
Fonte: Autoria própria

Figura 52 - Vista inferior da malha do modelo 2 (aproximada)



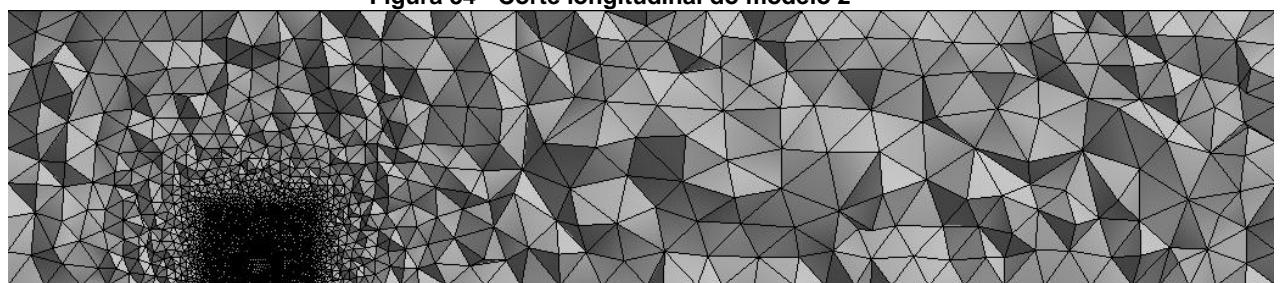
Fonte: Autoria própria

Figura 53 - Corte transversal do modelo 2



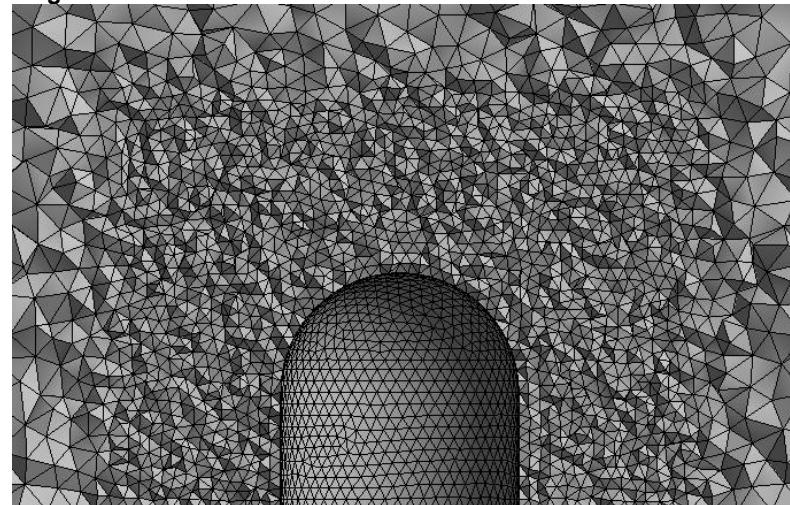
Fonte: Autoria própria

Figura 54 - Corte longitudinal do modelo 2



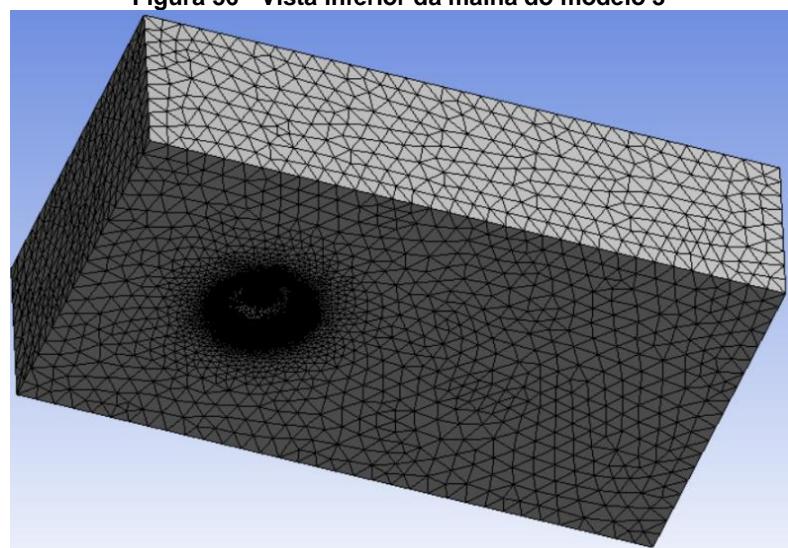
Fonte: Autoria própria

Figura 55 - Detalhe da malha no entorno da estrutura do modelo 2



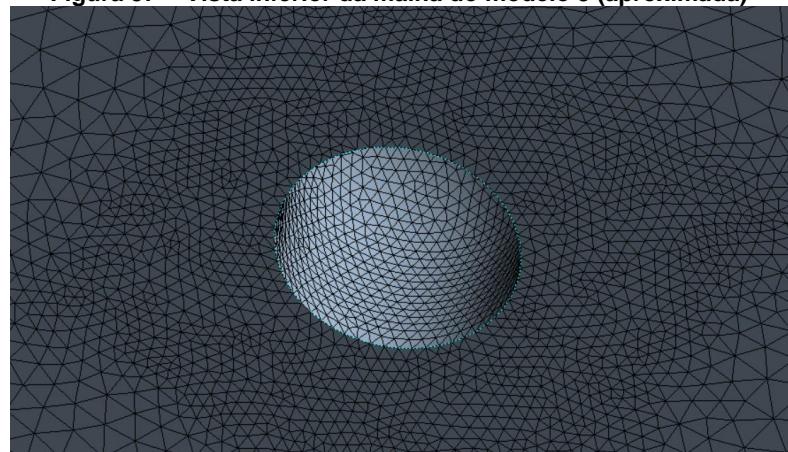
Fonte: Autoria própria

Figura 56 - Vista inferior da malha do modelo 3



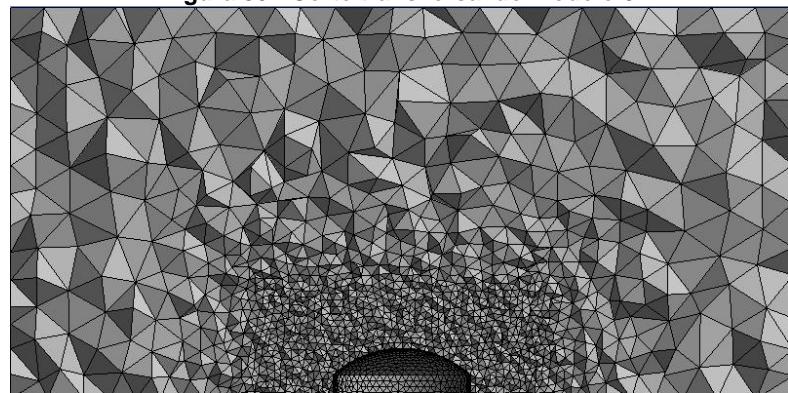
Fonte: Autoria própria

Figura 57 - Vista inferior da malha do modelo 3 (aproximada)



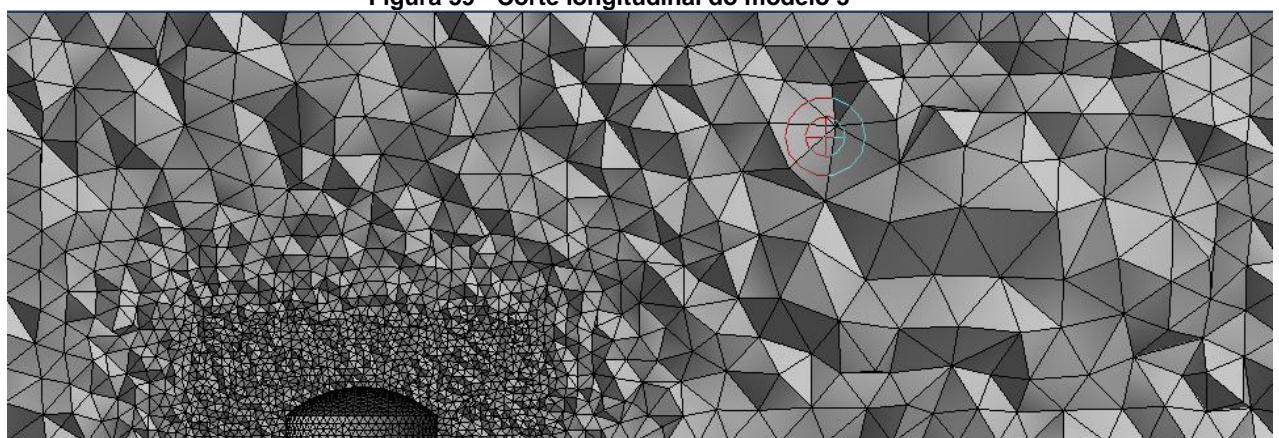
Fonte: Autoria própria

Figura 58 - Corte transversal do modelo 3



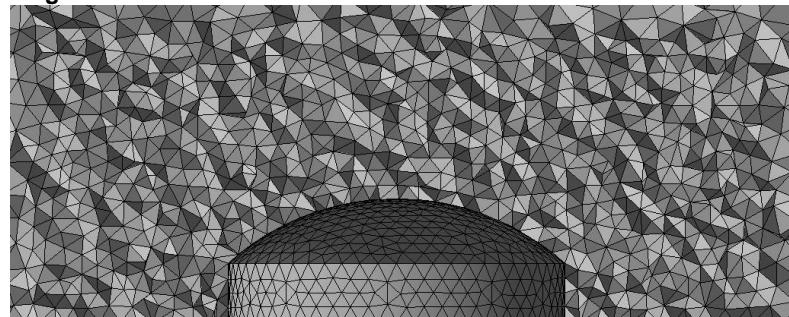
Fonte: Autoria própria

Figura 59 - Corte longitudinal do modelo 3



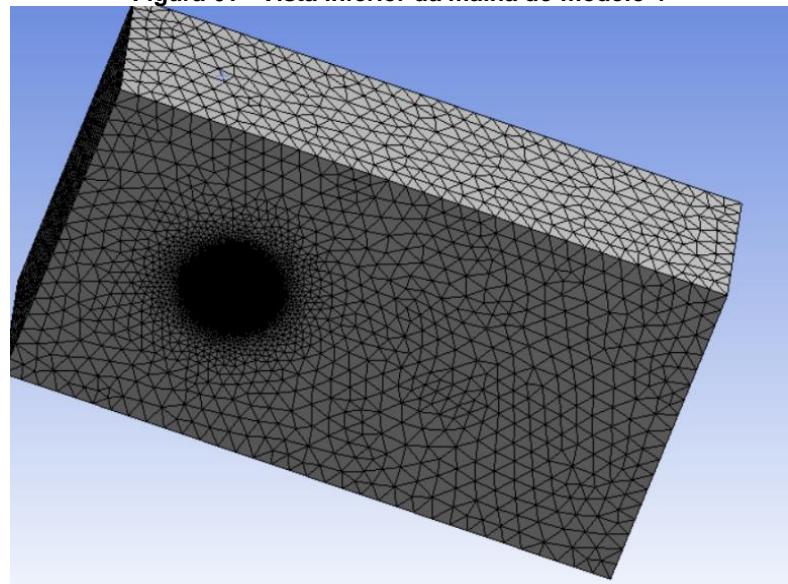
Fonte: Autoria própria

Figura 60 - Detalhe da malha no entorno da estrutura do modelo 3



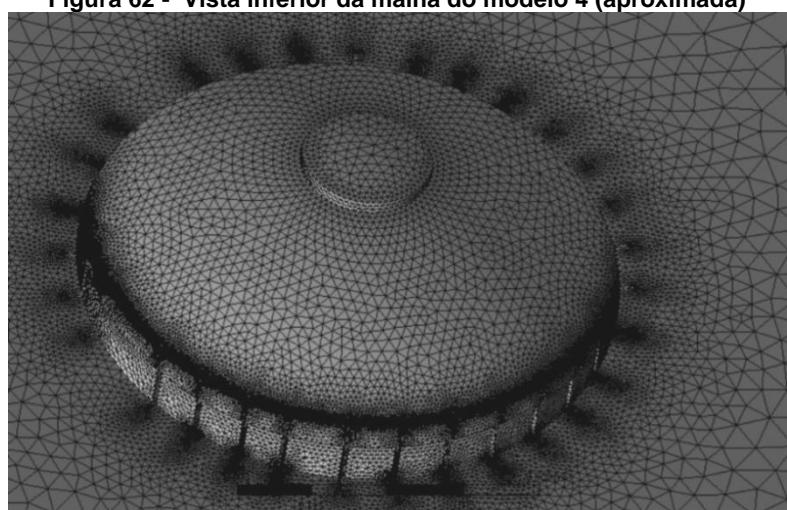
Fonte: Autoria própria

Figura 61 - Vista inferior da malha do modelo 4



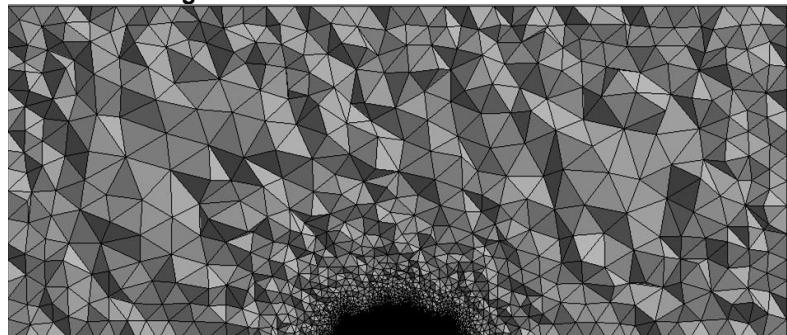
Fonte: Autoria própria

Figura 62 - Vista inferior da malha do modelo 4 (aproximada)



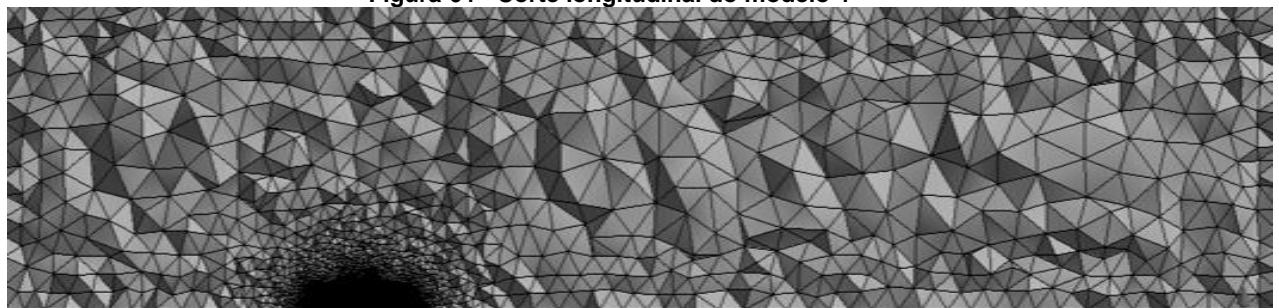
Fonte: Autoria própria

Figura 63 - Corte transversal do modelo 4



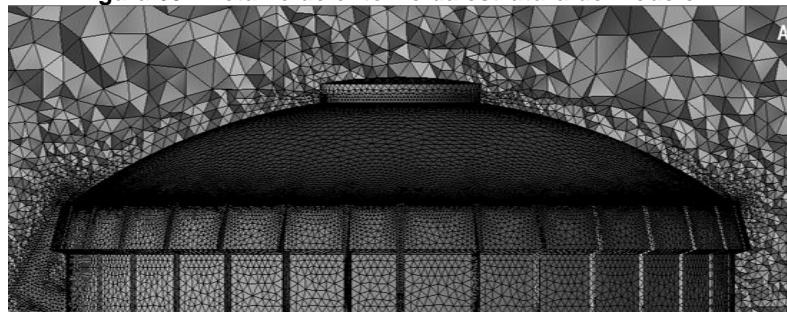
Fonte: Autoria própria

Figura 64 - Corte longitudinal do modelo 4



Fonte: Autoria própria

Figura 65 - Detalhe do entorno da estrutura do modelo 4



Fonte: Autoria própria

5.3.4 Resultados parciais para os modelos de calibração

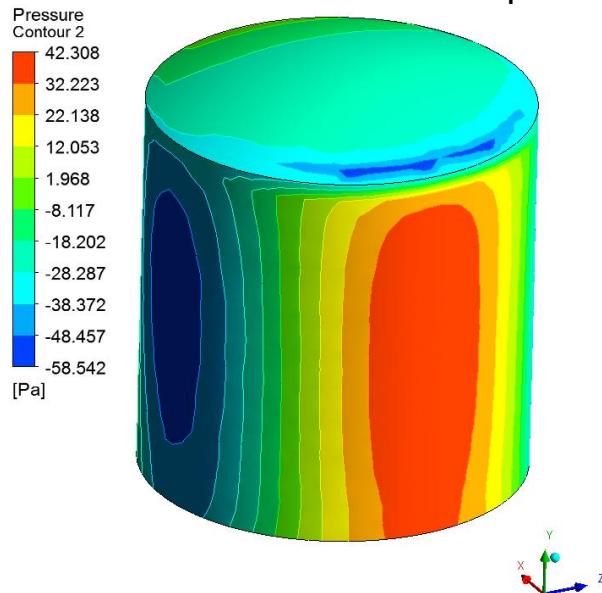
Os modelos 1 e 2 foram feitos exclusivamente para calibração do modelo, considerando que certas variáveis podem modificar os resultados obtidos. Assim como explicado anteriormente, a principal variável de calibração foi a rugosidade do terreno. Como no presente projeto não foi possível averiguar a rugosidade real do terreno em questão, assim como a rugosidade dos ensaios em túnel de vento, tal variável teve que ser estimada pelo grupo.

Diversos modelos foram gerados com diferentes rugosidades tanto para as paredes da cúpula sobre base cilíndrica quanto para o terreno e foi escolhido àquela que gerou os modelos com maior correspondência comparando-se com a norma. Em especial, foram verificadas as regiões de sucção e sobrepressão resultantes e a ordem de grandeza dos coeficientes de pressão.

5.3.4.1 Modelo 1

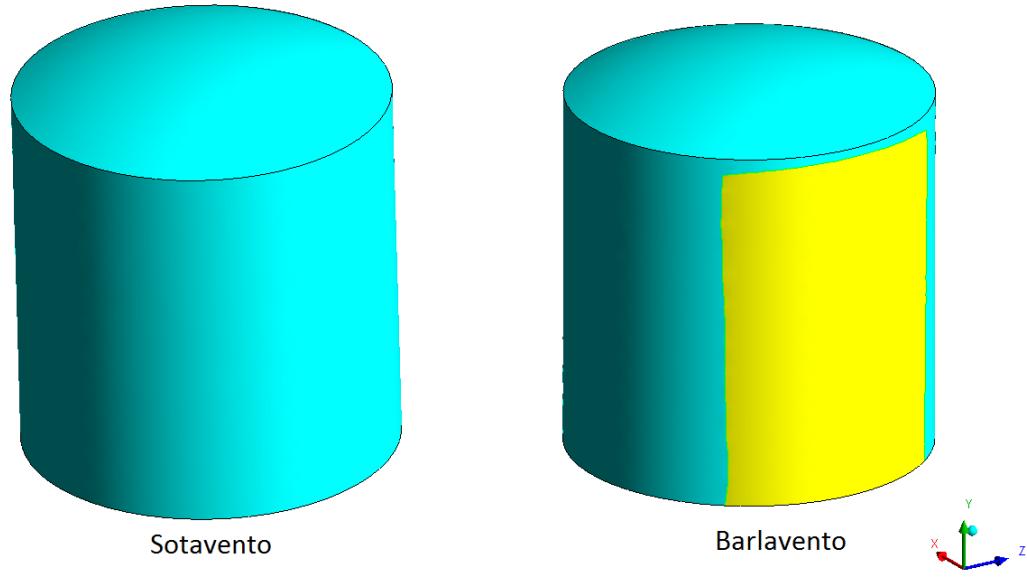
Primeiramente, a Figura 66 mostra o contorno geral de pressões no modelo e a Figura 67 mostra as regiões de sucção e sobrepressão. Percebe-se que este último está em acordo com os sinais previstos em norma. Note que o eixo X revela a direção do vento.

Figura 66 – Vista isométrica do modelo 1 mostrando as pressões resultantes



Fonte: Autoria própria

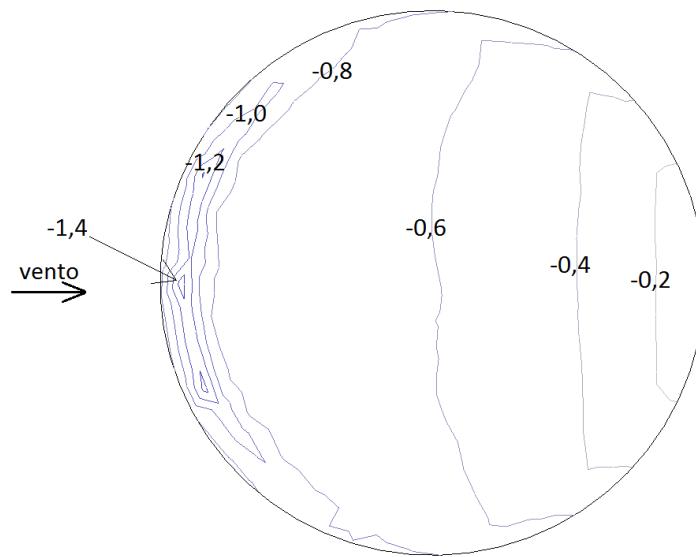
Figura 67 – Regiões de sucção (azul) e sobrepressão (amarelo) no modelo 1



Fonte: Autoria própria

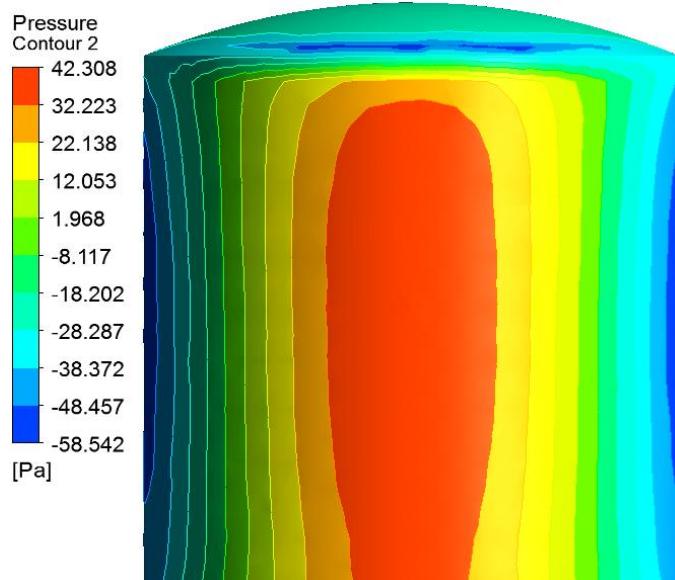
Os coeficientes de pressão na cúpula estão representados na Figura 68, enquanto a Figura 69, a Figura 70 e a Figura 71 mostram as regiões a barlavento, lateral e sotavento, respectivamente, da parede cilíndrica.

Figura 68 – Coeficientes de pressão na cúpula do modelo 1



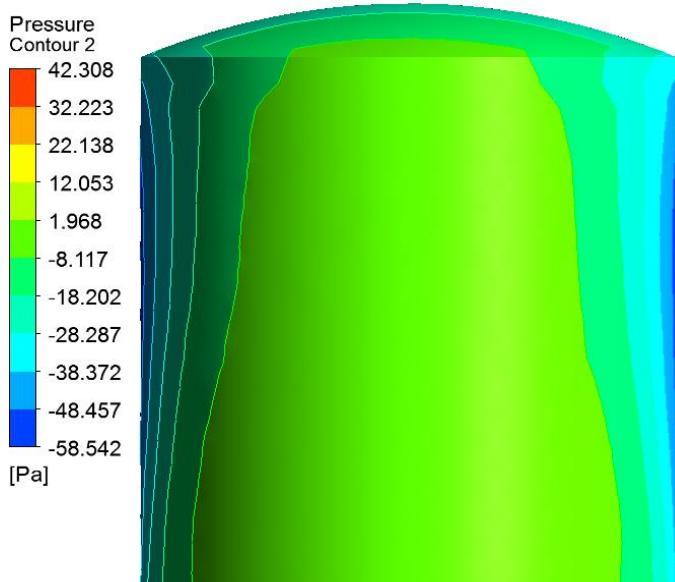
Fonte: Autoria própria

Figura 69 – Vista da região a barlavento do modelo 1 mostrando as pressões resultantes



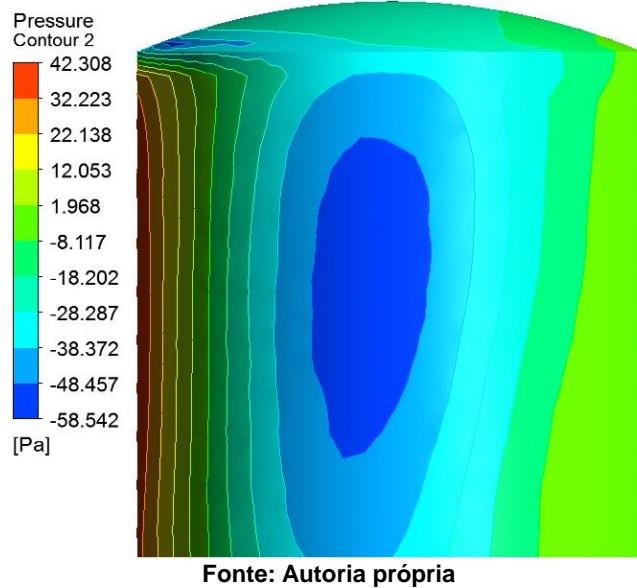
Fonte: Autoria própria

Figura 70 – Vista da região a sotavento do modelo 1 mostrando as pressões resultantes



Fonte: Autoria própria

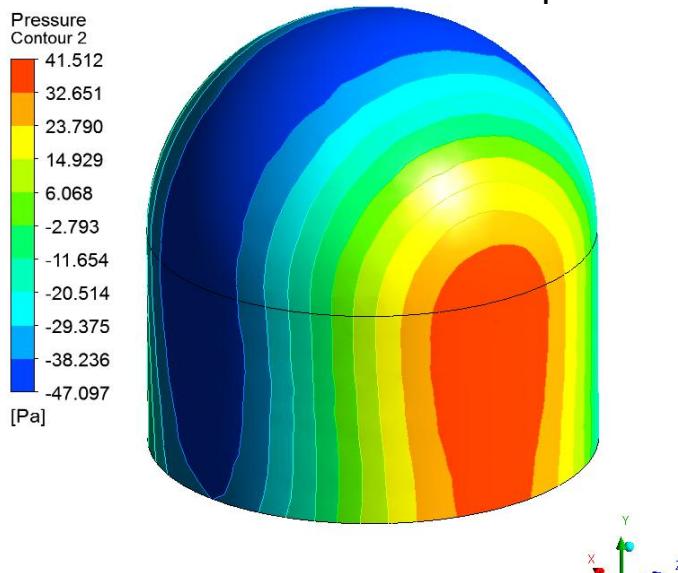
Figura 71– Vista lateral do modelo 1 mostrando as pressões resultantes (vento com direção da esquerda para a direita)



5.3.4.2 Modelo 2

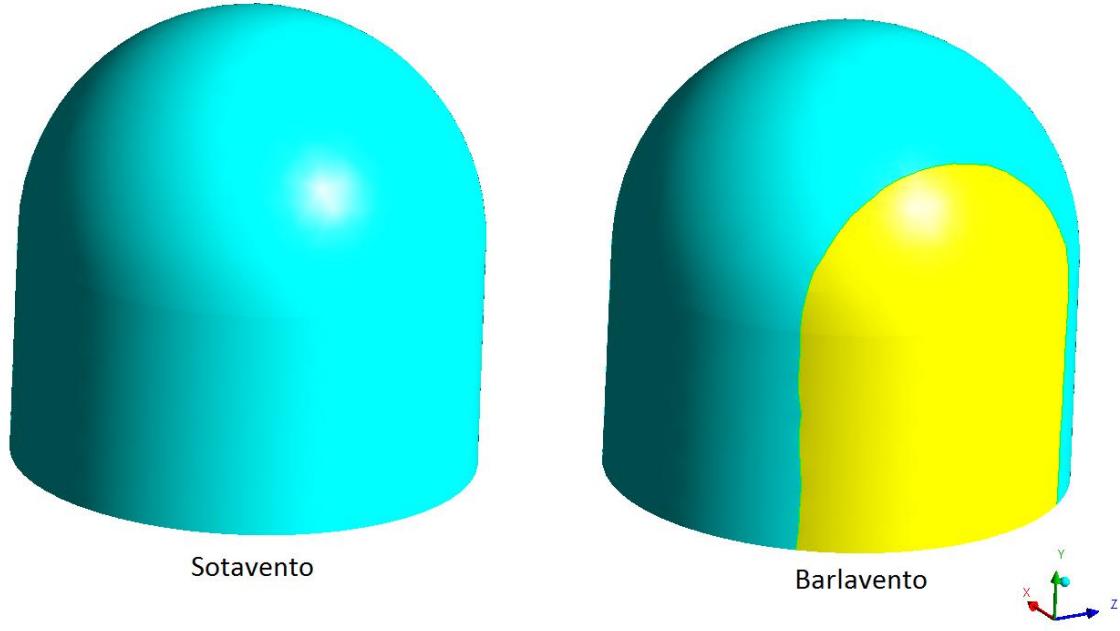
Assim como no modelo 1, a Figura 72 mostra o contorno geral de pressões no modelo e a Figura 73 mostra as regiões de sucção e sobrepressão. Novamente, eles estão em acordo com os sinais previstos em norma. Os coeficientes de pressão na cúpula estão representados na Figura 74, enquanto a Figura 75, a Figura 76 e a Figura 77 mostram as regiões a barlavento, lateral e sotavento, respectivamente, da parede cilíndrica.

Figura 72 – Vista isométrica do modelo 2 mostrando as pressões resultantes



Fonte: Autoria própria

Figura 73 – Regiões de sucção (azul) e sobrepressão (amarelo) no modelo 2



Fonte: Autoria própria

Figura 74 – Coeficientes de pressão na cúpula do modelo 2

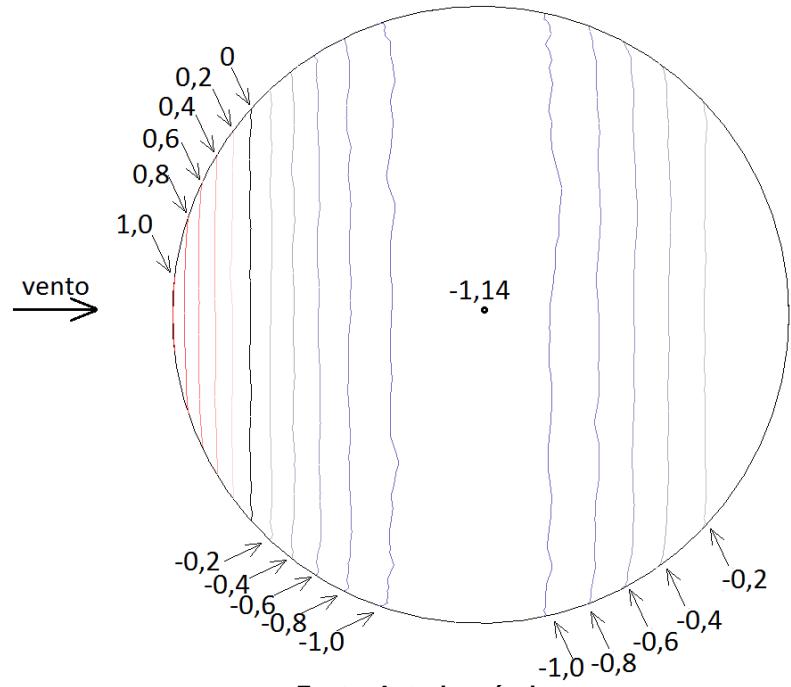
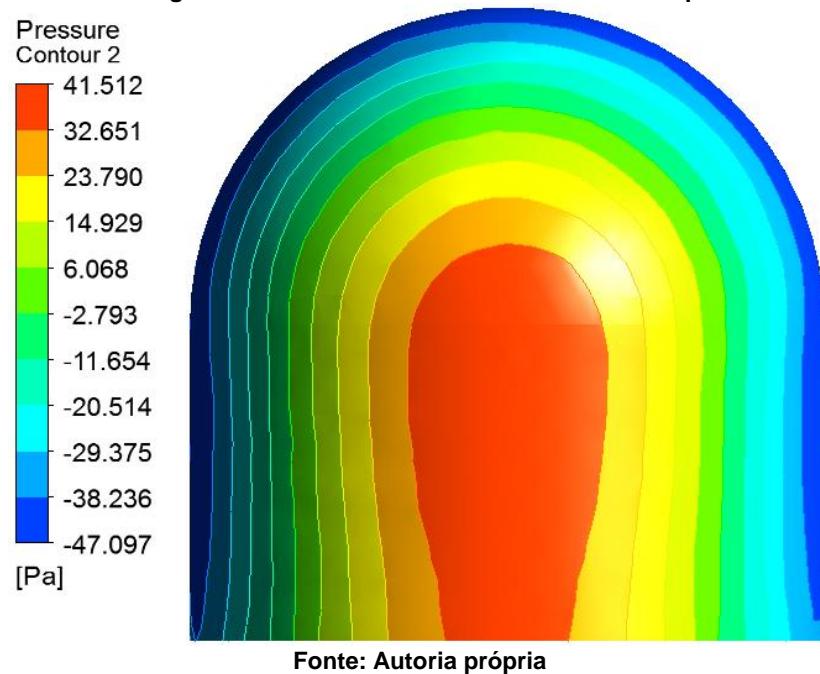
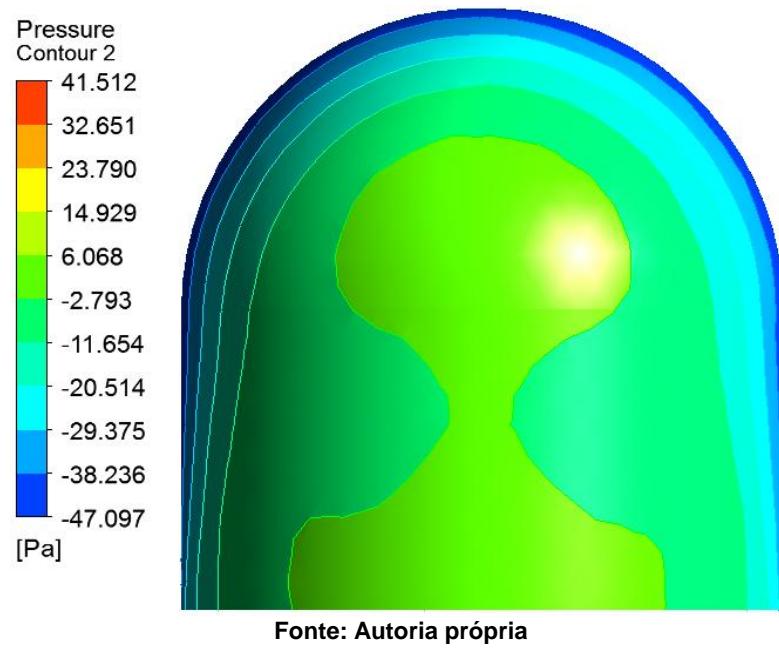


Figura 75 – Vista da região a barlavento do modelo 2 mostrando as pressões resultantes



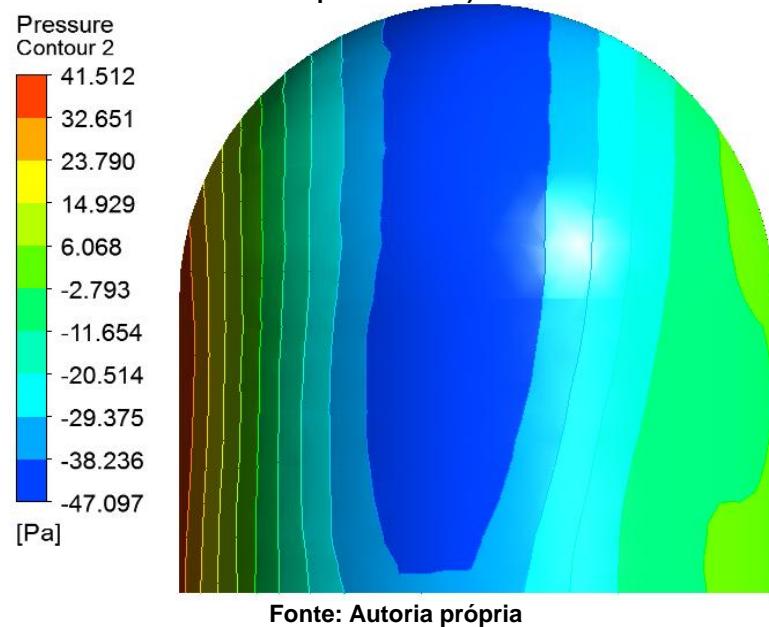
Fonte: Autoria própria

Figura 76 – Vista da região a sotavento do modelo 2 mostrando as pressões resultantes



Fonte: Autoria própria

Figura 77 – Vista lateral do modelo 2 mostrando as pressões resultantes (vento com direção da esquerda para a direita)



5.3.4.3 Comparação

A Tabela 9 resume os coeficientes de pressão para as principais regiões de interesse dos modelos.

Tabela 9 – Resultados parciais dos coeficientes de pressão externa dos modelos 1 e 2 de calibração da análise computacional

		Paredes cilíndricas			Cúpula		
		$\beta=0^\circ$	$\beta=90^\circ$	$\beta=180^\circ$	$\beta=0^\circ$	$\beta=90^\circ$	$\beta=180^\circ$
Modelo 1	Norma (paredes rugosas)	1	-0.85	-0.3	-1.7	-0.8	-0.4
	Norma (paredes lisas)	1	-1.2	-0.25			
	Modelo computacional	1.07	-1.39	-0.1	-1.4	-0.6	-0.2
Modelo 2	Norma (paredes rugosas)	1	-0.85	-0.3	0.8	-1.6	-0.2
	Norma (paredes lisas)	1	-1.2	-0.25			
	Modelo computacional	1.03	-1.16	-0.07	1	-1.14	-0.2

Fonte: Autoria própria

Há muitas variáveis indeterminadas na obtenção dos coeficientes de pressão pela NBR 6123. Por exemplo, não está explícito qual foi a técnica utilizada. Muito provavelmente esta foi realizada com ensaios em túnel de vento, mas, mesmo com essa consideração, não se sabe a rugosidade do terreno que foi considerada, as

dimensões do túnel de vento, a escala utilizada, as velocidades de vento, etc. Com tantas variáveis indeterminadas, seria praticamente impossível chegar a resultados precisos.

Dadas às considerações anteriores, concluiu-se que os resultados foram bastante próximos aos obtidos pela norma (mesma ordem de grandeza) e suficientemente representativos do problema. Portanto, o modelo está calibrado e pronto para ser utilizado para o modelo 3 (simplificação do ginásio Geraldão) e para o próprio modelo do Geraldão.

5.4 TÚNEL DE VENTO

5.4.1 Túnel de Vento TV-1 da E.E.M.

O túnel de vento a ser utilizado no nosso estudo será o Túnel de Vento TV-1 da Escola de Engenharia Mauá, localizado no Instituto Mauá de Tecnologia, São Caetano do Sul - SP e pode ser visto na Figura 78.

O Túnel de Vento TV-1 da E.E.M., utilizado exclusivamente para fins didáticos, é de circuito aberto de tipo sucção, capaz de realizar ensaios do tipo RPM, ou seja, através de modelos rígidos de pressão estática, realiza medições de pressão média, máxima e mínima, velocidade média do vento e efetiva, e pressões instantâneas.

Figura 78 - Túnel de Vento TV-1 da E.E.M.



Fonte: Montefusco

Com comprimento de cerca de 9,5 m, o túnel possui seção de 70x70 cm para ensaio do modelo. Uma hélice de 1,0m de diâmetro impulsionada por um motor elétrico de 7,5 HP controlado por um inverter de freqüência é responsável por obter o fluxo de ar dentro da câmara de ensaio, podendo atingir uma velocidade de pico de 15 m/s. Estes detalhes são ilustrados na Figura 79 e Figura 80 a seguir:

Figura 79 - Seção do túnel de vento



Fonte: Montefusco

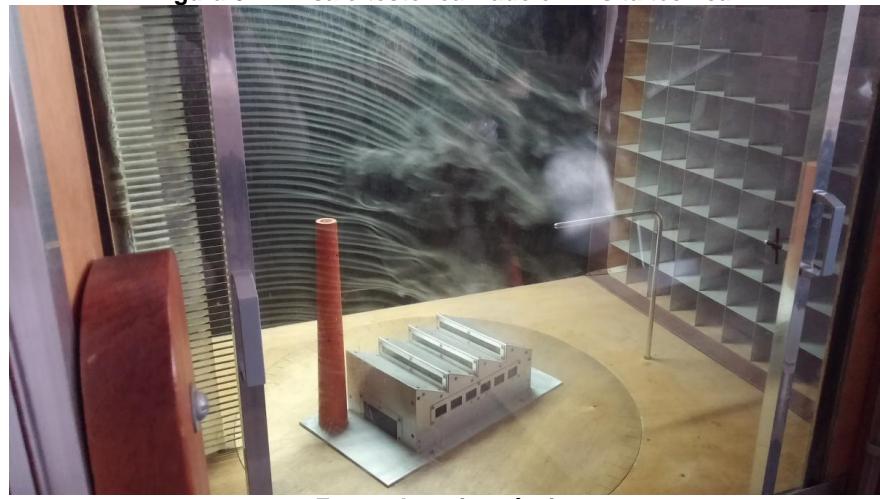
Figura 80 - Hélice no final do túnel de vento



Fonte: Autoria própria

Além disso, um recurso interessante presente no túnel é a emissão de linhas de fumaça, possibilitando a melhor visualização do comportamento do escoamento em torno do objeto ensaiado, como se nota na Figura 81.

Figura 81 - Ensaio teste realizado em visita técnica



Fonte: Autoria própria

5.4.2 Metodologia de Ensaio

Para desenvolvimento do modelo reduzido do Ginásio Geraldo Magalhães, utilizamos uma impressora 3D instalada no InovaLab@Poli, localizado no Prédio de

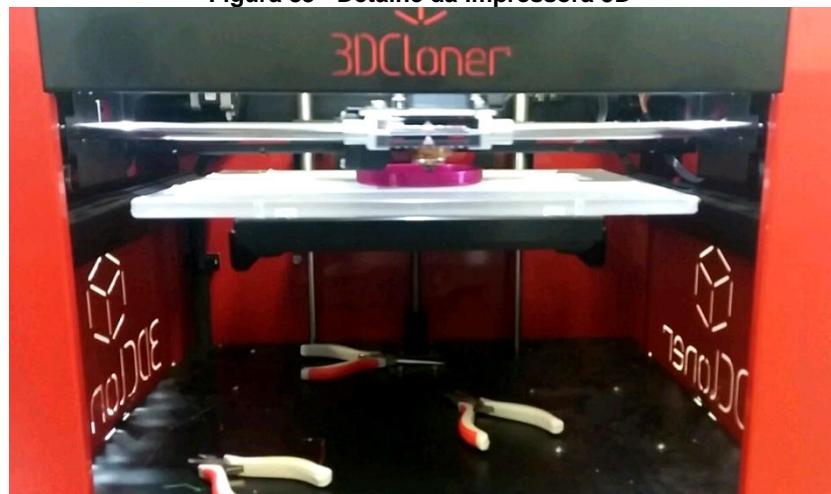
Engenharia de Produção da POLI-USP (apresentada na Figura 82 e na Figura 83). Sendo este um processo necessário para garantir maior confiabilidade nas dimensões do Geraldão. Por este motivo, as dimensões do modelo se deram em função das limitações da impressora, resultando em um modelo final com aproximadamente 20 cm de diâmetro.

Figura 82 - Impressora 3D



Fonte: Autoria própria

Figura 83 - Detalhe da impressora 3D



Fonte: Autoria própria

O material de que se dispunha era o polímero PLA (impresso em filamentos) e após a impressão, percebeu-se que havia diversas falhas na região da cúpula, como mostra a Figura 84. Durante a preparação do modelo foi necessário cobrir a estrutura com massa corrida e posterior acabamento em tinta branca para que não houvesse partes vazadas, resultando no modelo apresentado na Figura 85. Isso foi

feito para que houvesse melhor confiabilidade nos resultados, além de providenciar melhor sustentação para a realização dos furos de tomada de pressão.

Figura 84 - Modelo impresso



Fonte: Autoria própria

Figura 85 - Modelo após inserção dos furos



Fonte: Autoria própria

Posteriormente, uma chapa circular de madeira foi colada ao modelo para facilitar a posterior fixação do modelo na base para posicionamento no túnel de vento como pode ser observado na Figura 86.

Figura 86 - Modelo fixado na base circular de madeira e fixado na base metálica do túnel



Fonte: Autoria própria

Foram feitos orifícios em pontos estratégicos do modelo para posterior instalação de tomadas de pressão no momento do ensaio. Abaixo, na Figura 87, o processo de instalação das tomadas de pressão.

Figura 87 - Preparação do modelo: inserção das tomadas de pressão



Fonte: Autoria própria

Durante o ensaio, foram feitas medições com 11 velocidades diferentes, de 5 a 15 m/s (variando de 1m/s cada velocidade). As velocidades disponíveis para ensaio já eram pré-determinadas em função da rotação da hélice ao final do túnel, medidas (sem interferências) pelo Tubo de Pitot instalado na seção do ensaio, como visto na Figura 88.

Figura 88 - Tubo de Pitot com escala de transformação para m/s

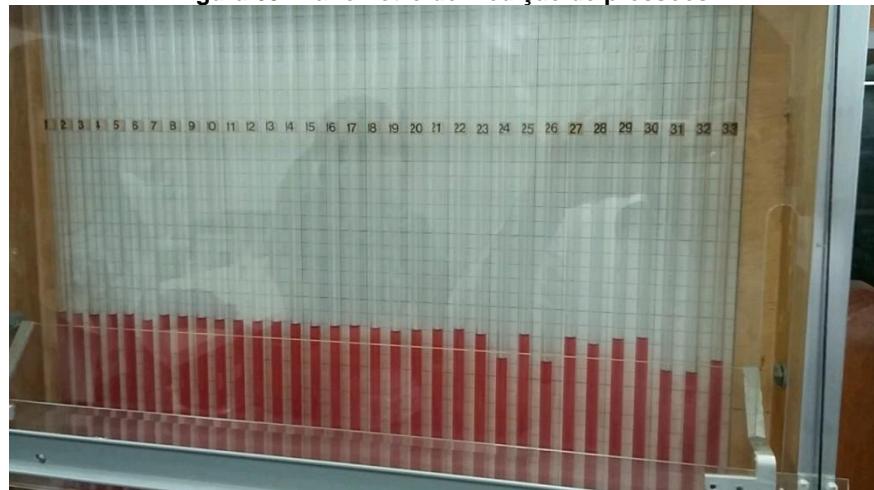


Fonte: Autoria própria

No túnel de vento, o fluido utilizado nos manômetros é um óleo não volátil cujo peso específico é 8,68 N/m³, portanto as pressões nos pontos de tomada de pressão (Δp) serão as leituras feitas pelos manômetros subtraídas pela medição de

referência (medição de pressão nula) e multiplicadas pela densidade desse fluido. Na Figura 89 podem ser vistos os manômetros para leitura de pressão, de maneira que a subida do líquido em relação à referência representa sucção e a descida, sobrepressão.

Figura 89. Manômetro de medição de pressões



Fonte: Autoria própria

Em seguida, para cada velocidade (V), calculou-se a pressão dinâmica, definida como:

$$q = 0,613 V^2 \quad (16)$$

Com a pressão dinâmica, o coeficiente de pressão pode ser calculado como a pressão resultante dividida pela pressão dinâmica, conforme a equação a seguir:

$$c_p = \Delta p / q \quad (17)$$

5.4.2.1 O Ensaio

Como se nota na Figura 90, o modelo foi colocado no túnel de vento e para cada uma das 11 velocidades foram feitas três medições diferentes para maior confiabilidade dos dados.

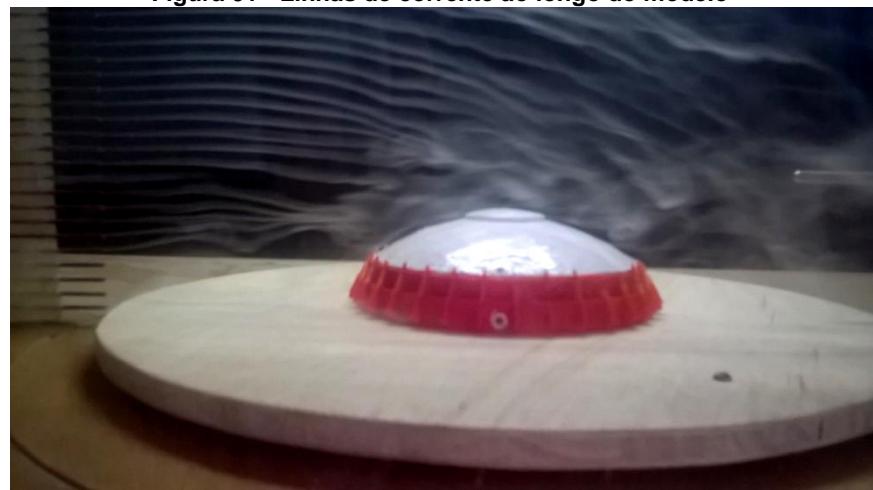
Figura 90 - Ensaio do modelo no túnel de vento



Fonte: Autoria própria

Foram tomadas as medidas em cada ponto, além da medida de referência (Tubo de Pitot interno, Figura 90). Ao final do ensaio, para uma análise mais qualitativa, foi possível observar as linhas de corrente para um escoamento de baixa velocidade, assim como mostra a Figura 91. Nesta figura, é possível perceber a interferência no escoamento da chapa de madeira fixada no modelo como um anteparo ao vento. Tal interferência será avaliada adiante.

Figura 91 - Linhas de corrente ao longo do modelo



Fonte: Autoria própria

6 RESULTADOS

6.1 COEFICIENTES OBTIDOS PELA NORMA

Como explicado na seção 5.2.1, fazendo-se a interpolação entre valores de f/d e h/d , temos:

Tabela 10 - Coeficientes de pressão interpolados para $h/d = 1/4$

f/d	h/d	C _{pe}		
		Barlavento	Topo	Sotavento
1/6	1/4	-0,10	-0,90	-0,40
1/6,2		-0,18	-0,88	-0,39
1/10		-1,20	-0,60	-0,30

Fonte: Autoria própria

Tabela 11 - Coeficientes de pressão interpolados para $h/d = 0$

f/d	h/d	C _{pe}		
		Barlavento	Topo	Sotavento
1/8	0	+0,30	-0,50	-
1/6,2		+0,39	-0,59	-
1/6		+0,40	-0,60	-

Fonte: Autoria própria

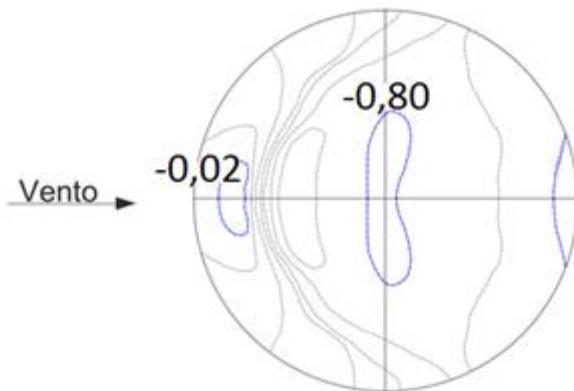
Tabela 12 - Coeficientes de pressão interpolados para a estrutura do ginásio.

f/d	h/d	C _{pe}		
		Barlavento	Topo	Sotavento
1/6,2	1/4	-0,18	-0,88	-0,39
	1/5,6	-0,02	-0,80	-
	0	+0,39	-0,59	-

Fonte: Autoria própria

Pelas linhas isóbaras, acredita-se que a que mais se adequa à estrutura é a mostrada na Figura 92, pois não possui sobrepressões.

Figura 92 - Linhas isóbaras para os valores interpolados.



Fonte: Autoria própria

Já para as paredes cilíndricas, como citado na seção 5.2.2, bastou retirar os valores tabelados da norma, resultando nos seguintes coeficientes (para algumas posições), retirados da tabela 9 da NBR6123-1988:

Tabela 13 - Coeficientes de pressão na parede cilíndrica.

B	Coeficientes de pressão externa c_{pe}
	Superfície rugosa ou com saliências
	$h/d < 2,5$
0°	+1,0
40°	0
90°	-0,85
140°	-0,3
180°	-0,3

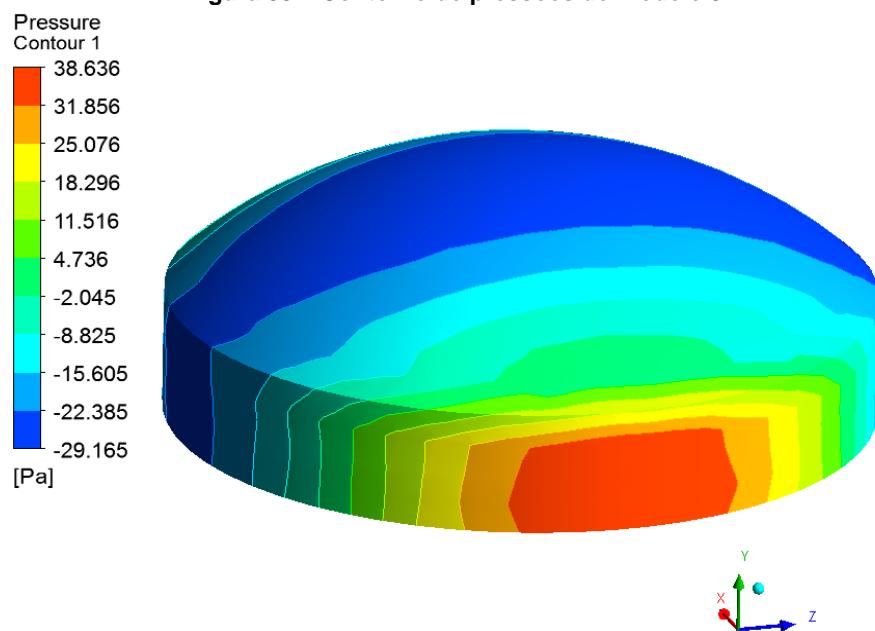
Fonte: Autoria própria

6.2 COEFICIENTES OBTIDOS PELO MODELO COMPUTACIONAL

6.2.1 Modelo 3

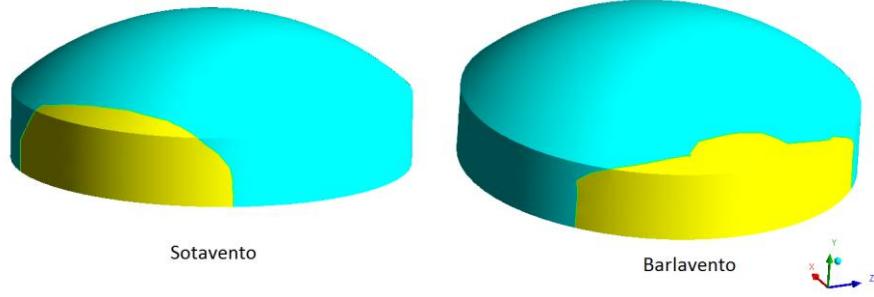
O contorno geral das pressões está mostrado na Figura 93, enquanto que as regiões de sucção e sobrepressão, na Figura 94. Pode-se perceber uma diferença significativa em relação aos resultados obtidos em 6.1, visto que a região a sotavento deveria ter resultado em sucção, de acordo com a norma. Note que o eixo X refere-se à direção do vento.

Figura 93 – Contorno de pressões do modelo 3



Fonte: Autoria própria

Figura 94 – Vista tridimensional das regiões de sobrepressão (amarelo) e sucção (azul) do modelo 3



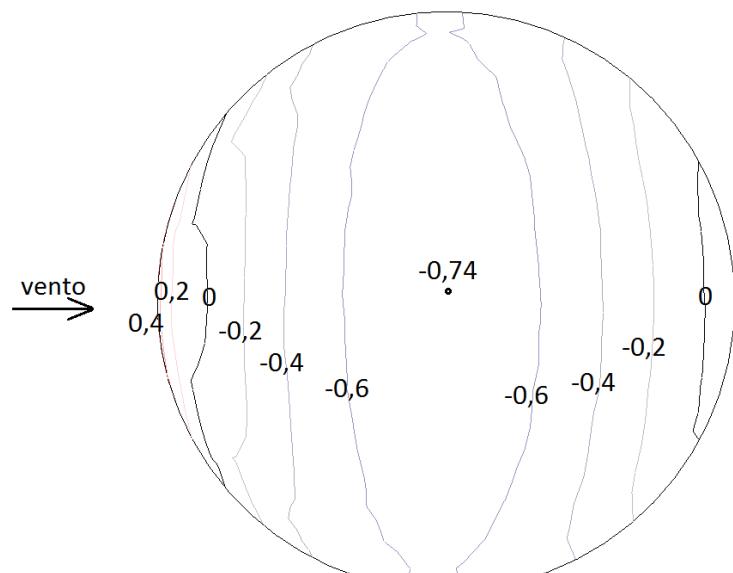
Fonte: Autoria própria

O coeficiente de pressão na cúpula está indicado na Figura 95. Novamente, percebe-se diferenças significativas na ordem de grandeza dos resultados da norma. A Figura 96, a Figura 97 e a Figura 98 mostram os resultados de pressão nas paredes cilíndricas nas regiões à barlavento, lateral e sotavento, respectivamente.

Os coeficientes de pressão na parede cilíndrica resultaram em:

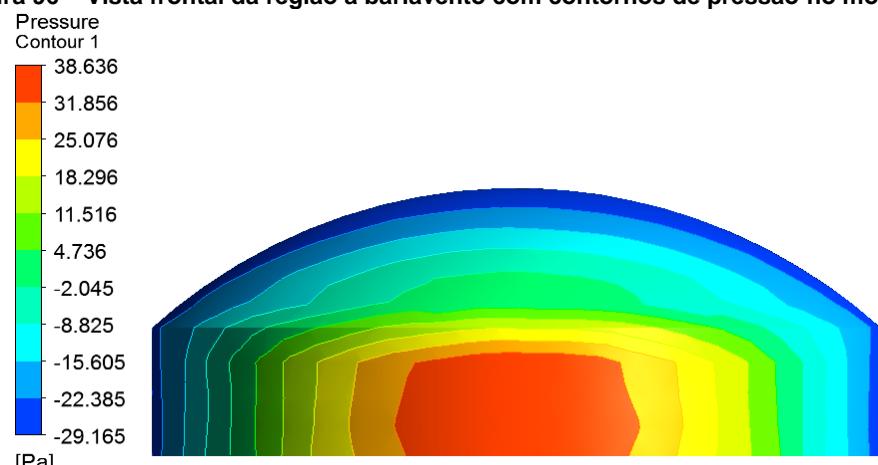
- $\beta = 0$ (barlavento): 0,96
- $\beta = 90^\circ$ (lateral): -0,66
- $\beta = 180^\circ$ (sotavento): 0,16

Figura 95 – Vista em planta dos coeficientes de pressão na cúpula do modelo 3



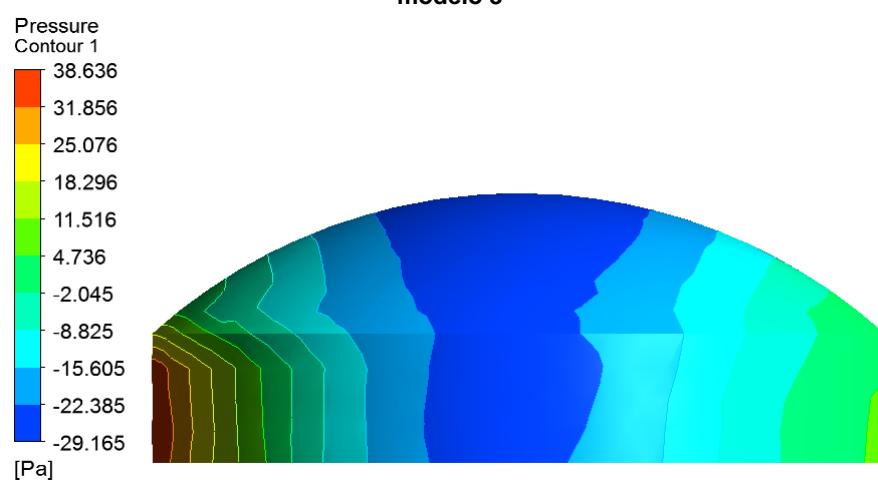
Fonte: Autoria própria

Figura 96 – Vista frontal da região a barlavento com contornos de pressão no modelo 3



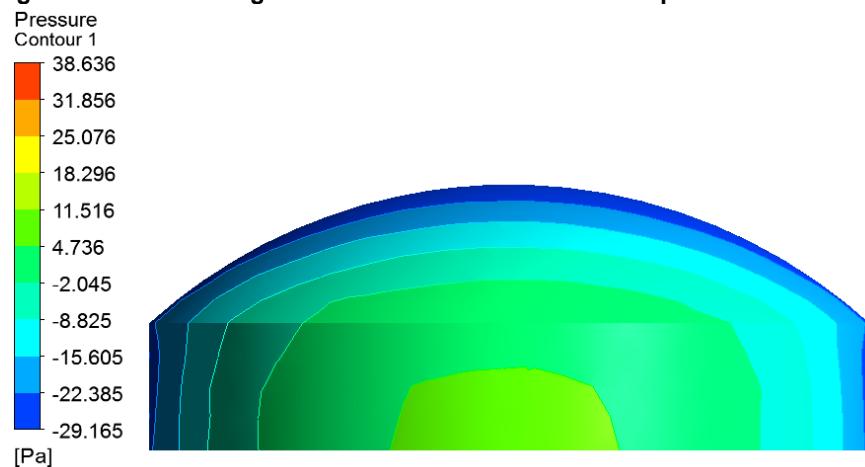
Fonte: Autoria própria

Figura 97 – Vista lateral (vento com direção da esquerda para a direita) com contornos de pressão no modelo 3



Fonte: Autoria própria

Figura 98 – Vista da região a sotavento com contornos de pressão no modelo 3

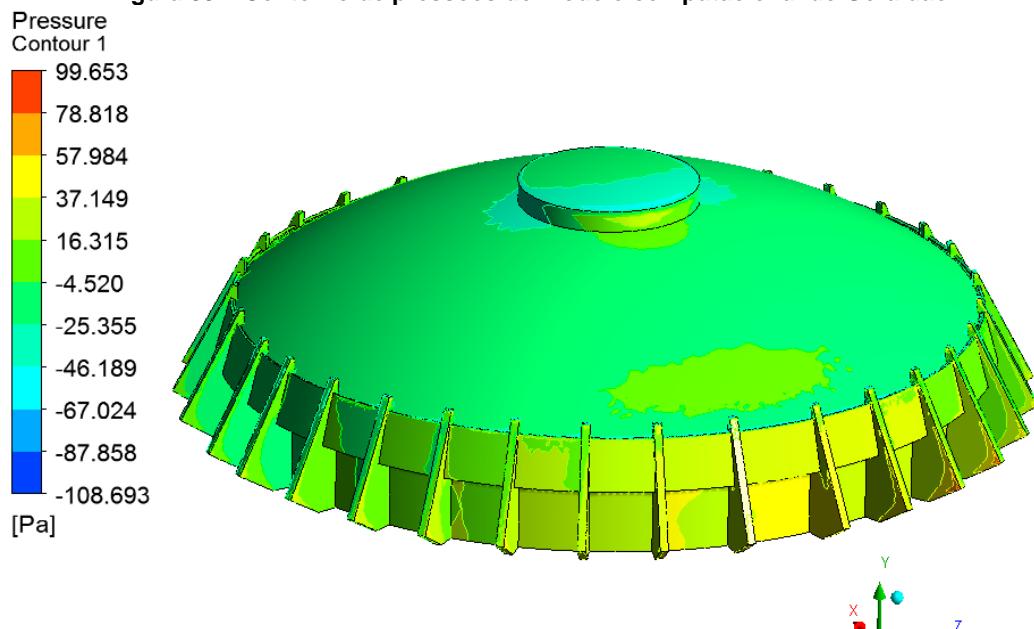


Fonte: Autoria própria

6.2.2 Modelo 4: Geraldão

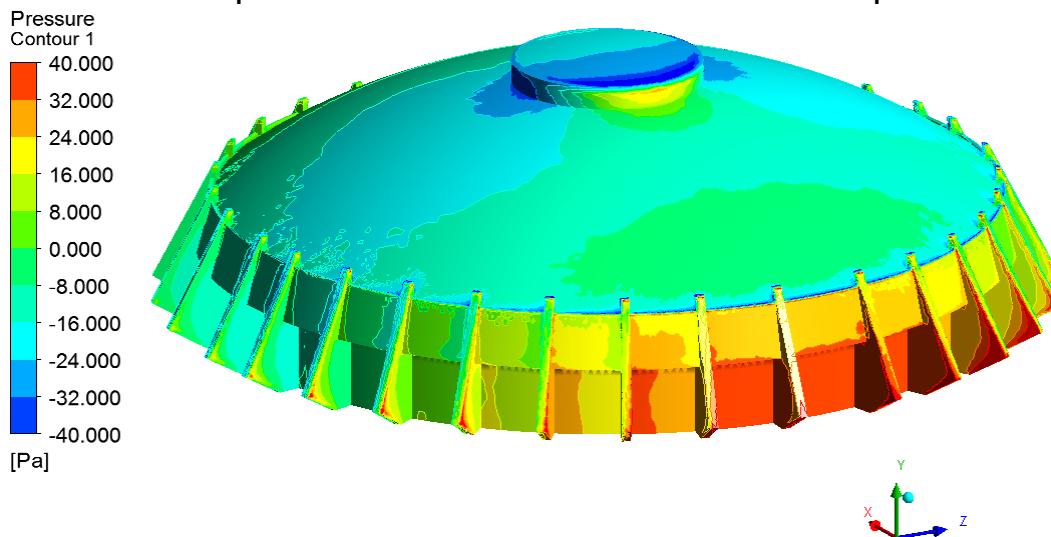
A Figura 99 mostra o contorno geral das pressões obtidas pela modelagem computacional. Percebe-se que há efeitos localizados muito aparentes na região dos pilares, fazendo com que as cores não sejam bem discretizadas para uma boa visualização dos resultados. Portanto, a Figura 100 mostra o mesmo contorno de pressões discretizadas em valores entre -40 e 40Pa.

Figura 99 – Contorno de pressões do modelo computacional do Geraldão



Fonte: Autoria própria

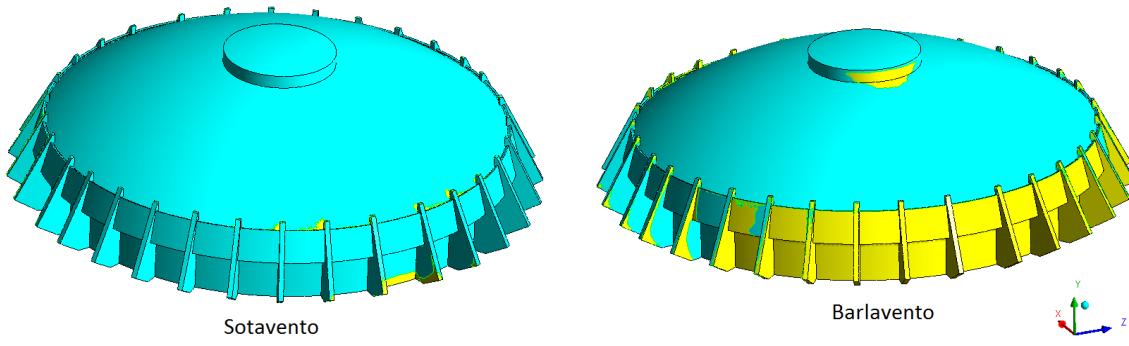
Figura 100 – Contorno de pressões discretizadas entre -40 e 40Pa do modelo computacional do Geraldão



Fonte: Autoria própria

Diferentemente do modelo 3, o modelo resultou em pressões negativas na cúpula e positivas apenas na região a barlavento da parede cilíndrica (Figura 101). Adicionalmente, pode-se perceber o efeito local da saliência no topo, que causa uma pequena região de sobrepressão, além dos pilares que geram pressões pontuais elevadas nos cantos vivos.

Figura 101 – Vista tridimensional das regiões de sobrepressão (amarelo) e sucção (azul) do modelo computacional do Geraldão



Fonte: Autoria própria

Os coeficientes de pressão no topo podem ser vistos na Figura 102. A Figura 103 e a Figura 104 mostram o detalhe da estrutura saliente de topo.

Figura 102 – Coeficientes de pressão na cúpula, vista em planta do modelo computacional do Geraldão

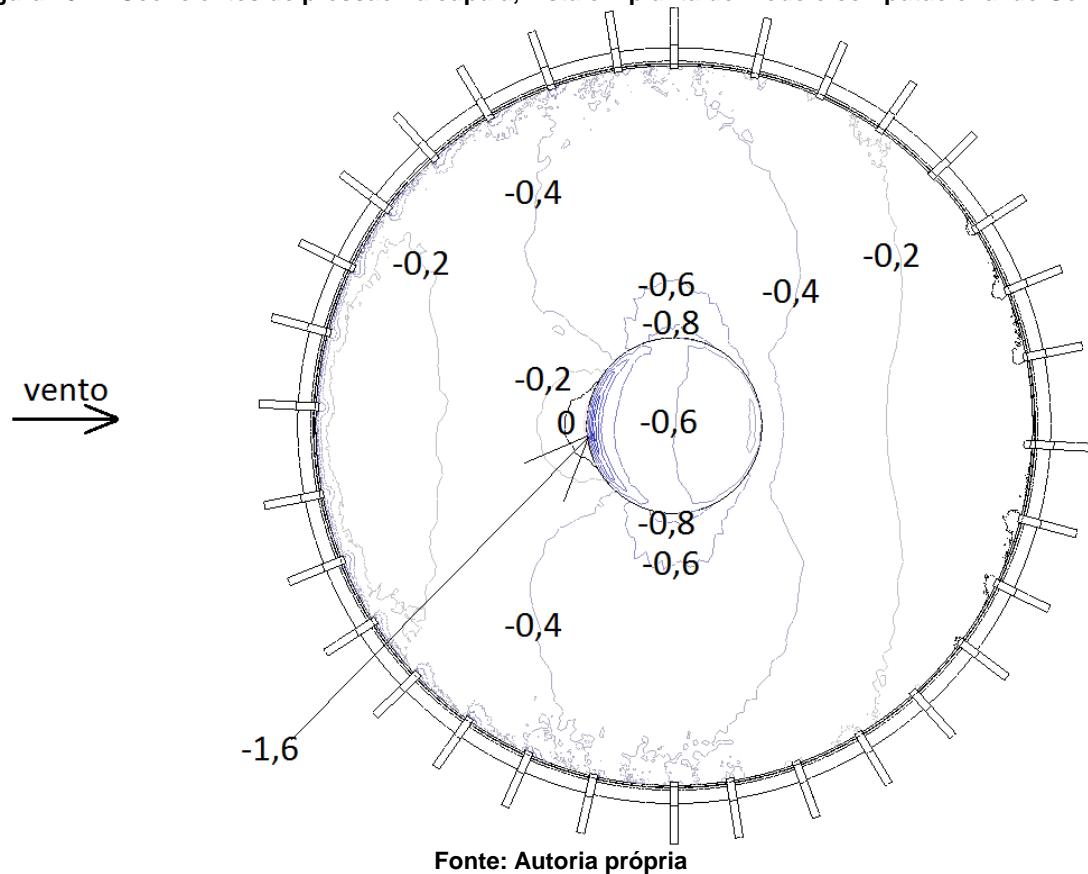


Figura 103 – Vista em planta dos coeficientes de pressão na saliência do topo da cúpula do modelo computacional do Geraldão

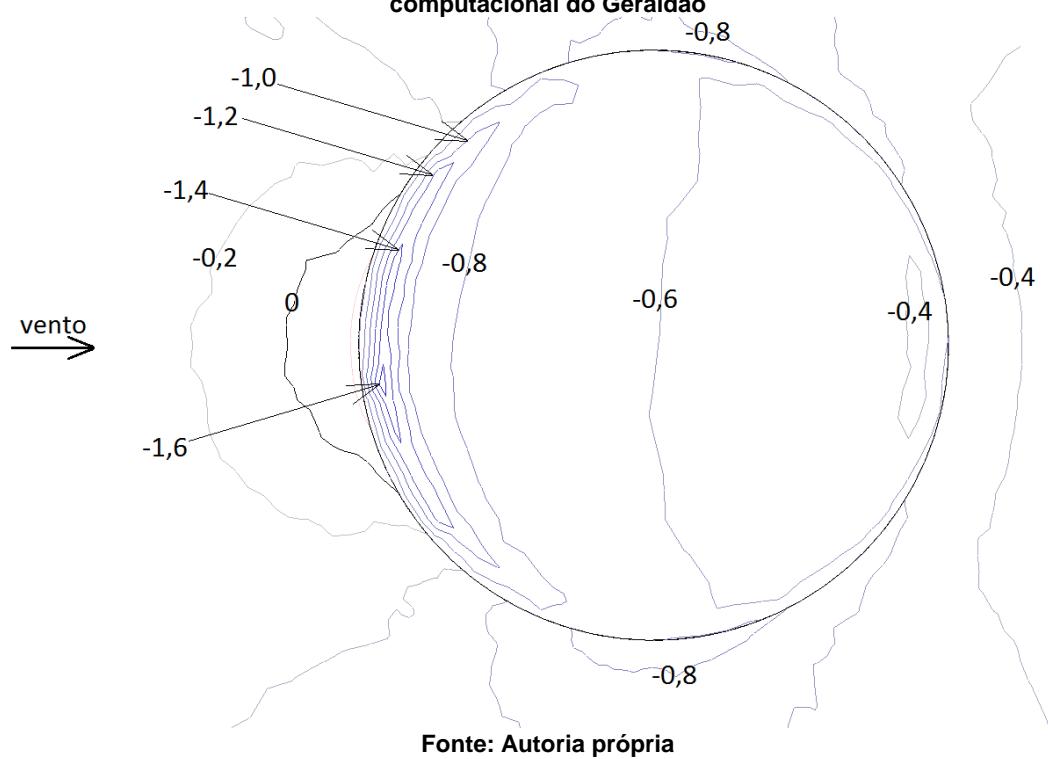
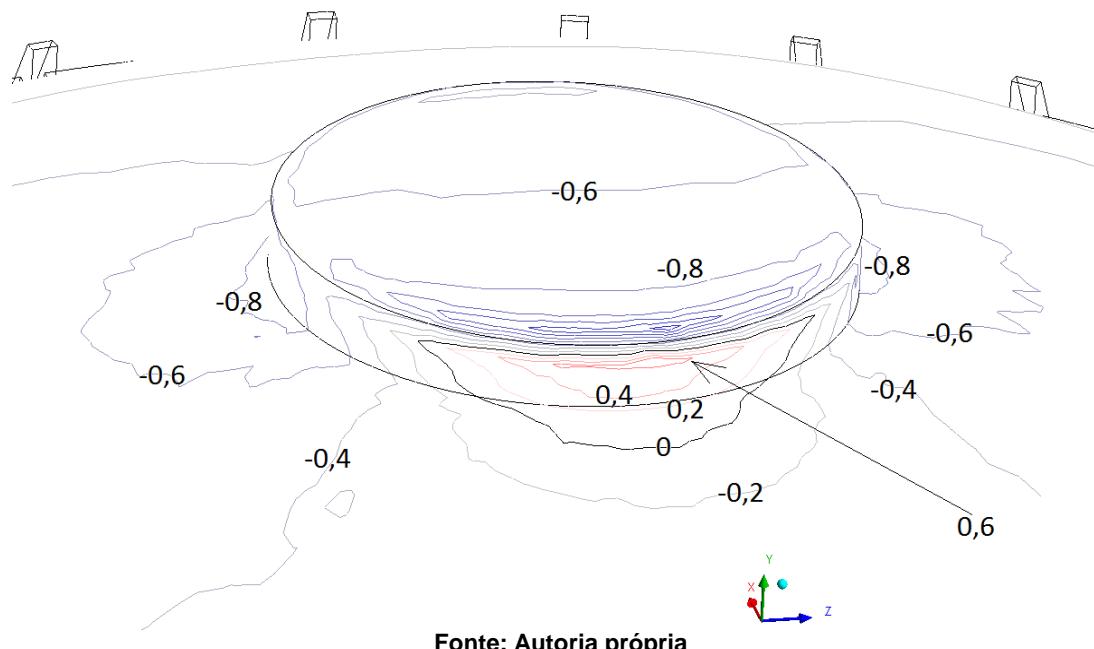


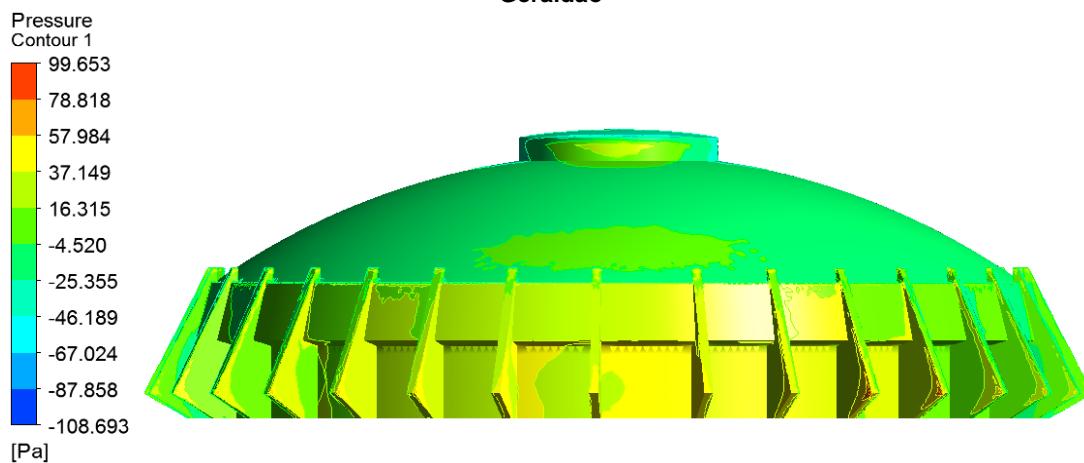
Figura 104 – Vista tridimensional dos coeficientes de pressão na região de sobrepressão da saliência do topo da cúpula do modelo computacional do Geraldão



Fonte: Autoria própria

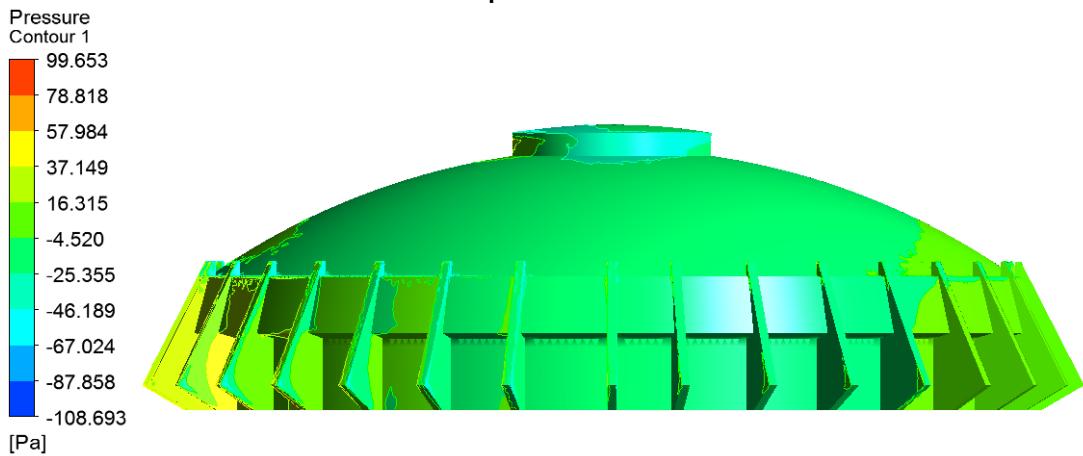
Com relação à parede cilíndrica, a figura Figura 105 mostra a região a barlavento, a Figura 106 mostra sua lateral (vento com direção da esquerda para a direita) e a Figura 107 mostra a região a sotavento.

Figura 105 – Vista frontal da região a barlavento com contornos de pressão do modelo computacional do Geraldão



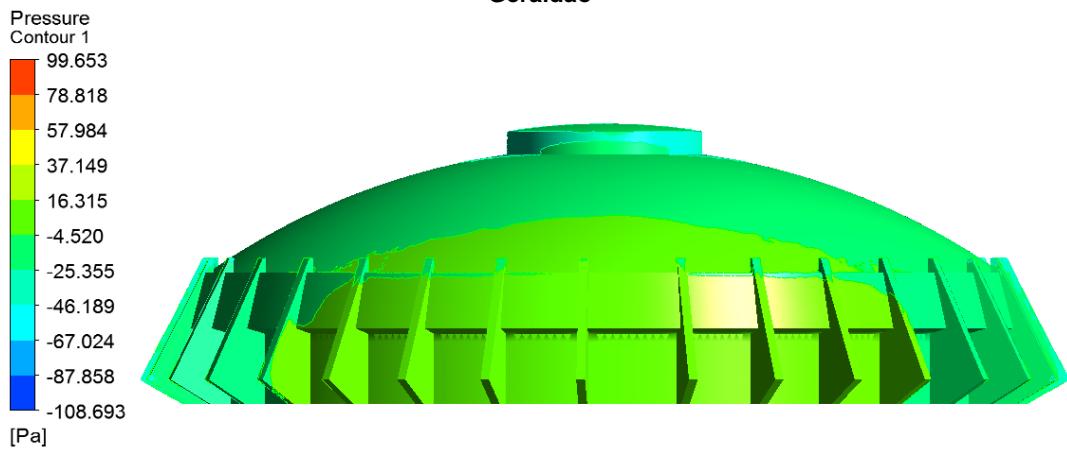
Fonte: Autoria própria

Figura 106 – Vista lateral (vento com direção da esquerda para a direita) com contornos de pressão do modelo computacional do Geraldão



Fonte: Autoria própria

Figura 107 – Vista da região a barlavento com contornos de pressão do modelo computacional do Geraldão



Fonte: Autoria própria

Analizando-se separadamente, os coeficientes de pressão na parede cilíndrica foram os seguintes, conforme a direção prescrita na norma:

- $\beta = 0$ (barlavento): 0,96
- $\beta = 90^\circ$ (lateral): -0,40
- $\beta = 180^\circ$ (sotavento): -0,01

Conclui-se que as singularidades (pilares diferenciados, saliência no topo e paredes inclinadas ao redor da região cilíndrica) modificaram expressivamente as pressões resultantes do escoamento, visto que os resultados aqui fornecidos foram bastante diferentes daqueles apresentados no modelo 3. Isso se deu tanto no aspecto global (regiões de sucção e sobrepressão, ordem de grandeza das

pressões resultantes) quanto no aspecto local (surgimento de picos de pressão), assim como mostra Tabela 14.

Tabela 14 – Resultados comparativos do modelo 3 com o modelo do Geraldão

	Paredes cilíndricas			Cúpula		
	$\beta = 0^\circ$	$\beta = 90^\circ$	$\beta = 180^\circ$	Barlavento	Topo	Sotavento
Modelo 3	0.96	-0.66	0.16	0.40	-0.74	0
Modelo Geraldão	0.96	-0.40	-0.01	-0.20	-0.60	-0.20

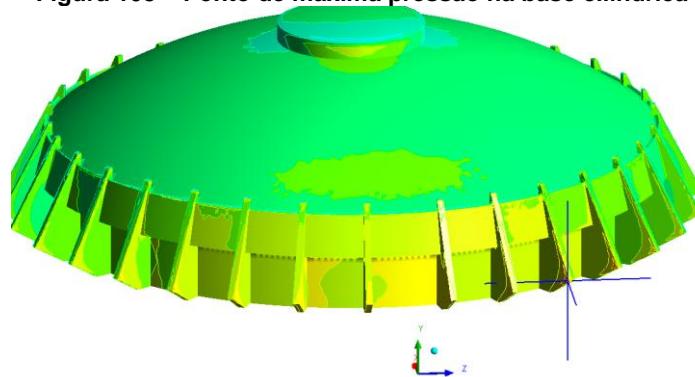
Fonte: Autoria própria

Adicionalmente, os efeitos locais tanto na cúpula quanto na parede cilíndrica foram analisados quantitativamente verificando as pressões máximas e mínimas e seus respectivos coeficientes de pressão, conforme a seguir:

- Máximo na cúpula: pressão de 29Pa, $cp = 0,74$;
- Mínimo na cúpula: pressão de -67,2Pa, $cp = -1,71$;
- Máximo na parede cilíndrica: pressão de 99Pa, $cp = 2,52$;
- Mínimo na parede cilíndrica: pressão de -108,7Pa, $cp = -2,77$.

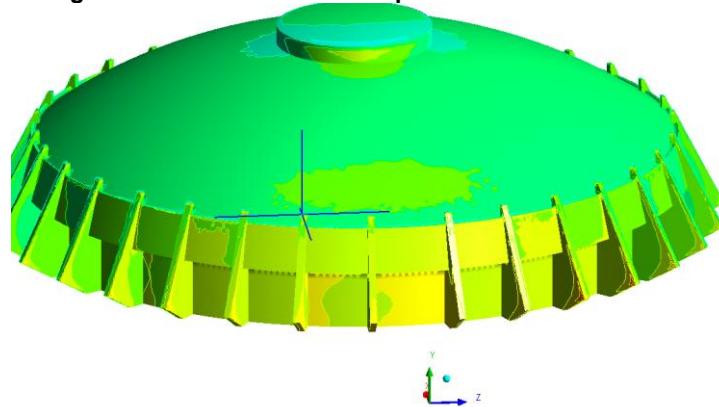
Tais valores máximos na cúpula ocorreram na estrutura saliente do topo, conforme visto na Figura 104, enquanto que os valores de máximo e mínimo na parede cilíndrica são encontrados nos pilares, conforme Figura 108 e Figura 109.

Figura 108 – Ponto de máxima pressão na base cilíndrica



Fonte: Autoria própria

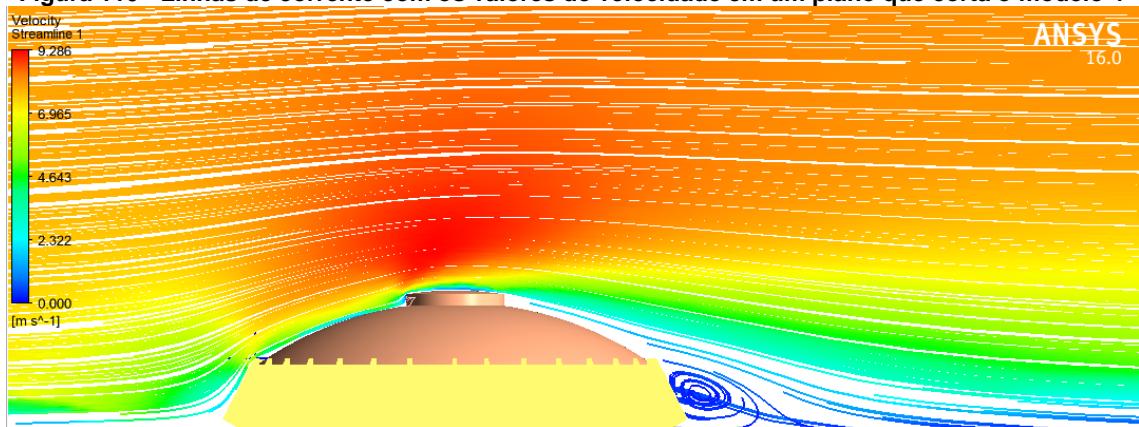
Figura 109 – Ponto de mínima pressão na base cilíndrica



Fonte: Autoria própria

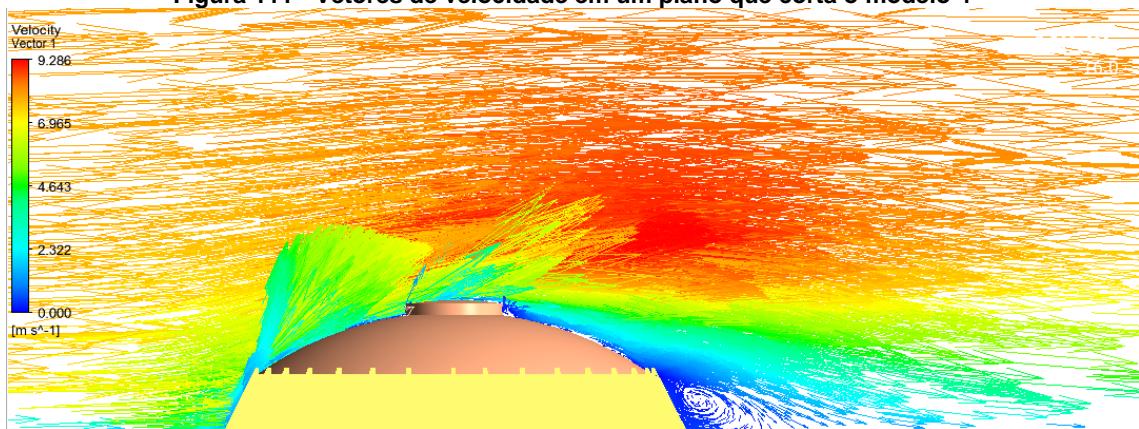
Especialmente para o modelo 4, demonstram-se as linhas de corrente com as respectivas velocidades, bem como os vetores velocidade em uma seção do modelo na Figura 110 e na Figura 111 respectivamente, de forma a melhorar o entendimento do comportamento do escoamento no entorno da estrutura.

Figura 110 - Linhas de corrente com os valores de velocidade em um plano que corta o modelo 4



Fonte: Autoria própria

Figura 111 - Vetores de velocidade em um plano que corta o modelo 4

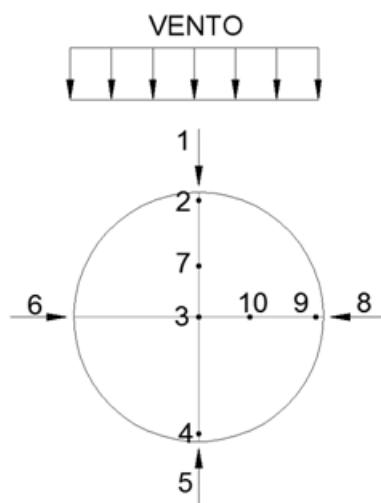


Fonte: Autoria própria

6.3 COEFICIENTES OBTIDOS NO TÚNEL DE VENTO

Na Figura 112 estão indicados os locais de tomada de pressão. As setas indicam o local dos furos nas paredes laterais e os pontos, os furos na cúpula. Conforme a direção do vento, a região de barlavento é a indicada pelo ponto 1 e o ponto 5 indica a região a sotavento.

Figura 112 - Numeração utilizada para as tomadas de pressões



Fonte: Autoria própria

Primeiramente foram realizadas as medições dos pontos 1 a 7 com velocidades variáveis de 5 m/s a 15 m/s. Devido à simetria do modelo, foi possível rotacionar o modelo e obter dados para os demais pontos. Os pontos 8 a 10 foram medidos para velocidades de 12 m/s e 15 m/s apenas por serem dados mais relevantes ao projeto. Os dados obtidos, bem como os cálculos realizados podem ser vistos nos apêndices A e B. Note que decidimos fazer parte das medições em apenas um dos lados por praticidade, visto que os resultados devem ser aproximadamente simétricos.

Como explicado em 4.3.2.2, é necessário que se obtenha escoamentos turbulentos ao redor da estrutura para que os resultados sejam comparáveis à escala real. Pela consideração da norma NBR 6123, para estruturas cilíndricas de seção circular, o número de Reynolds deve ser maior que 420000 para que o escoamento esteja acima da região crítica. Entretanto, considerando a escala do

modelo, mesmo com a maior das velocidades esse número de Reynolds não é possível ser obtido.

$$Re = 70000Vd = 70000 * 15 * 0,2 = 210000 < 420000$$

Entretanto, sabe-se que a velocidade do fluido não é a única variável que faz com que o escoamento torne-se turbulento, como explicado em 4.3.3.2. No túnel de vento, há elementos que simulam a rugosidade do terreno, como mostra a figura Figura 113. Logo, podemos esperar que o escoamento seja turbulento mesmo para velocidades abaixo da necessária para gerar $Re \geq 420000$.

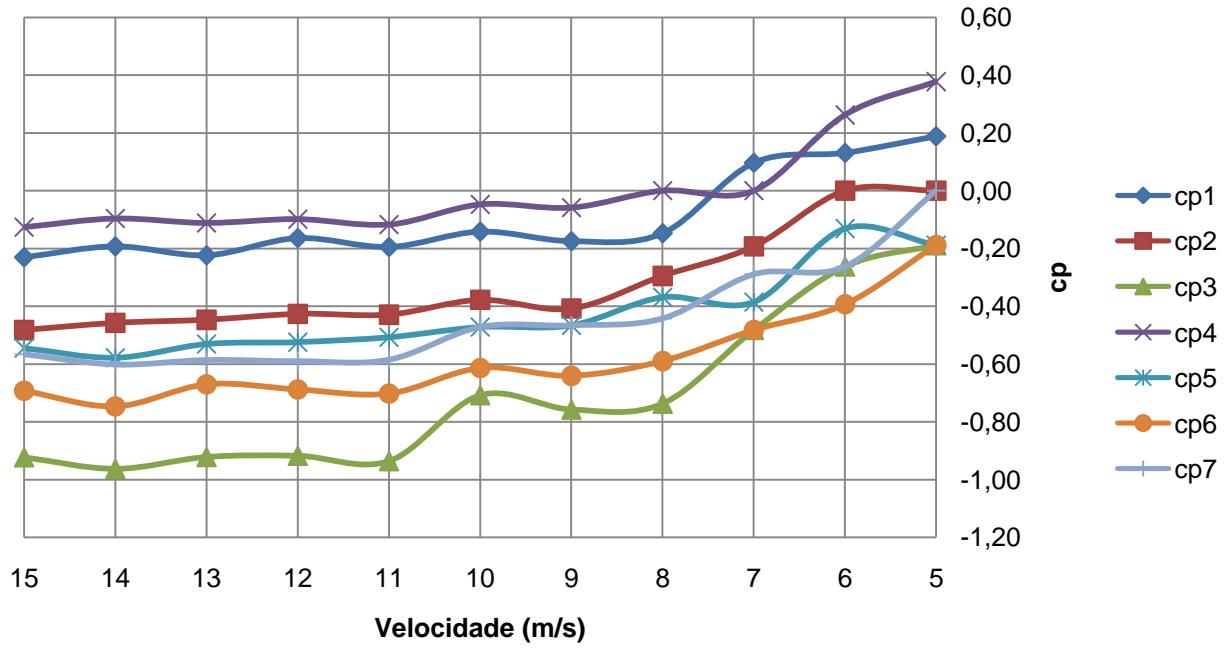
Figura 113 – Foto dos elementos de rugosidade do terreno do túnel de vento



Fonte: Autoria própria

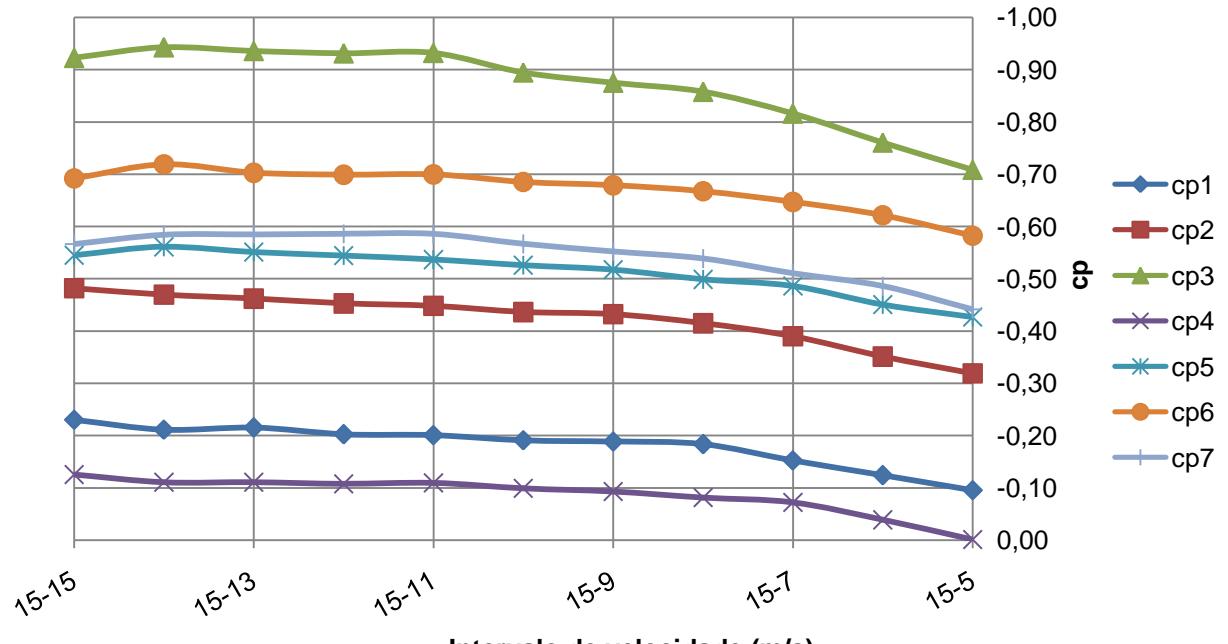
Para analisar os dados e verificar a influência da velocidade nas pressões resultantes, foi feita uma análise estatística com os dados do apêndice B, de forma a conceber os gráficos a seguir.

Gráfico 1 - Gráfico de coeficiente de pressão média por velocidade do vento



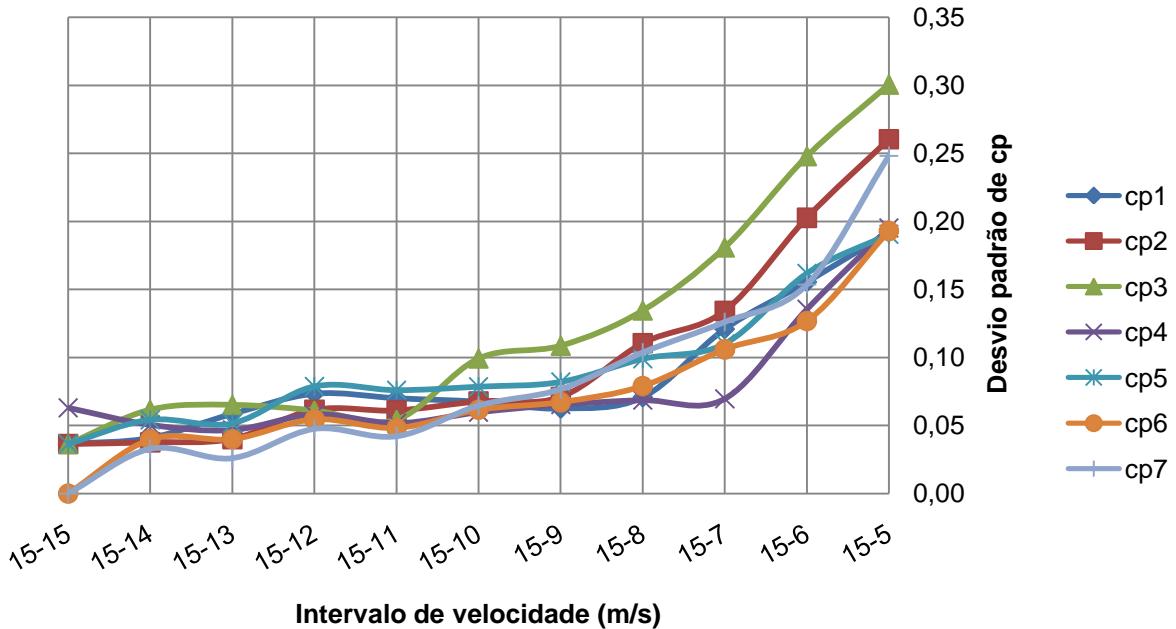
Fonte: Autoria própria

Gráfico 2 – Coeficiente de pressão média por intervalo de velocidades do vento



Fonte: Autoria própria

Gráfico 3 – Desvio padrão do coeficiente de pressão por intervalo de velocidade do vento



Fonte: Autoria própria

Assim como explicado no item 4.3.3.1, o coeficiente de pressão deve ser constante para uma dada geometria, independentemente da velocidade do vento, desde que se estabeleça um escoamento totalmente turbulento. Como pode ser visto na Gráfico 1, para velocidades do vento acima de 11 m/s, o coeficiente de pressão em todos os pontos é aproximadamente constante, tendo uma tendência decrescente com velocidades abaixo desta. Isso se confirma na Gráfico 2, onde vemos que a média de tais coeficientes de pressão também se mantém constantes com intervalos de 15 a 11 m/s.

Além da média, o desvio padrão é outra evidência de validação de resultados apenas para velocidades acima de 11 m/s, visto que tal coeficiente se mantém aproximadamente constante e baixo para velocidades acima desta, possuindo forte tendência crescente abaixo de 11 m/s (Gráfico 3).

Entre o regime turbulento e o laminar, há o regime de transição que se caracteriza por não possuir comportamento definido, havendo saltos em certas regiões de regime laminar para turbulento. Portanto, esperam-se altos valores de desvio padrão em análises com esse tipo de escoamento. Além do Gráfico 3, a

Tabela 15 revela essa forte tendência de altos desvios padrões para velocidades do vento abaixo de 11 m/s.

Tabela 15 – Desvio padrão dos coeficientes de pressão para os intervalos de velocidade especificados

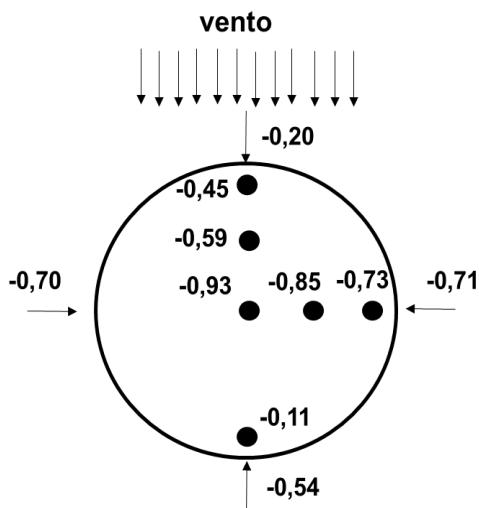
Velocidades (m/s)	c_p1	c_p2	c_p3	c_p4	c_p5	c_p6	c_p7
11-5	0.21	0.30	0.31	0.22	0.20	0.21	0.28
11-8	0.07	0.14	0.15	0.07	0.10	0.09	0.12

Fonte: Autoria própria

Concluímos, portanto, que o escoamento ao redor do modelo físico deve estar no regime transitório para velocidades abaixo de 11 m/s e no regime turbulento para velocidades acima desta, fazendo com que nossa análise seja válida apenas para o intervalo entre 11 e 15 m/s.

A Figura 114 mostra os valores encontrados de coeficiente de pressão, enquanto a Tabela 16 resume tais resultados com seus respectivos desvios padrão.

Figura 114 - Coeficientes de pressão em cada ponto.



Fonte: Autoria própria

Tabela 16 - Média e desvio padrão dos valores para velocidades entre 11 e 15m/s

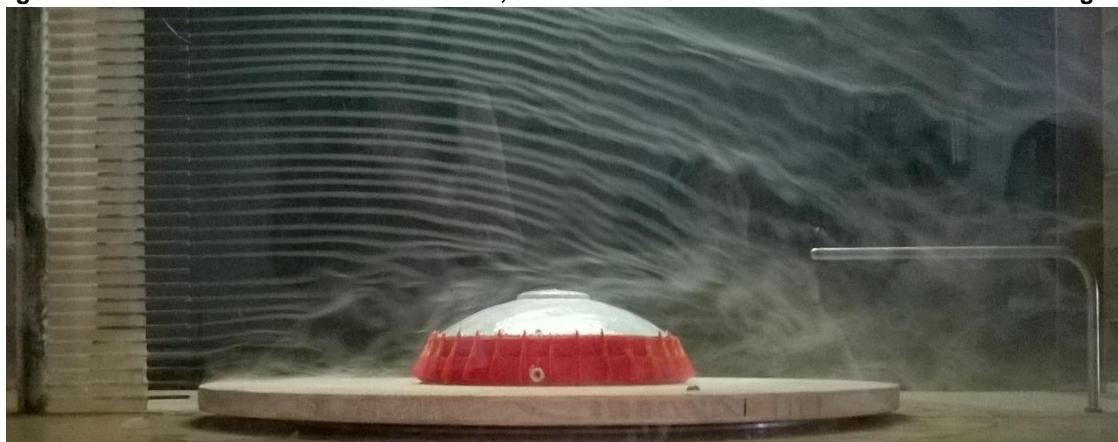
Ponto	$c_p \pm \sigma_{cp}$ (11 a 15m/s)
1	$-0,20 \pm 0,03$
2	$-0,45 \pm 0,02$
3	$-0,93 \pm 0,02$
4	$-0,11 \pm 0,01$
5	$-0,54 \pm 0,01$
6	$-0,70 \pm 0,03$
7	$-0,59 \pm 0,01$
8	$-0,71 \pm 0,07$
9	$-0,73 \pm 0,01$
10	$-0,85 \pm 0,04$

Fonte: Autoria própria

Percebe-se que todos os resultados são negativos (sucção), o que é contrário ao esperado, visto que na região a barlavento das paredes cilíndricas eram esperados valores positivos (sobrepressão). Tal resultado deve ter sido causado pela chapa de madeira colada sob o modelo físico. Conforme visto na Figura 115, a influência da chapa no escoamento é clara, desviando o escoamento na região

próxima à superfície inferior a barlavento. Note que esta interferência pode ter influenciado demais resultados, em especial no ponto 2 (cúpula a barlavento).

Figura 115 - Modelo durante o ensaio a 5m/s, com linhas de corrente mostradas através de um gás.



Fonte: Autoria própria

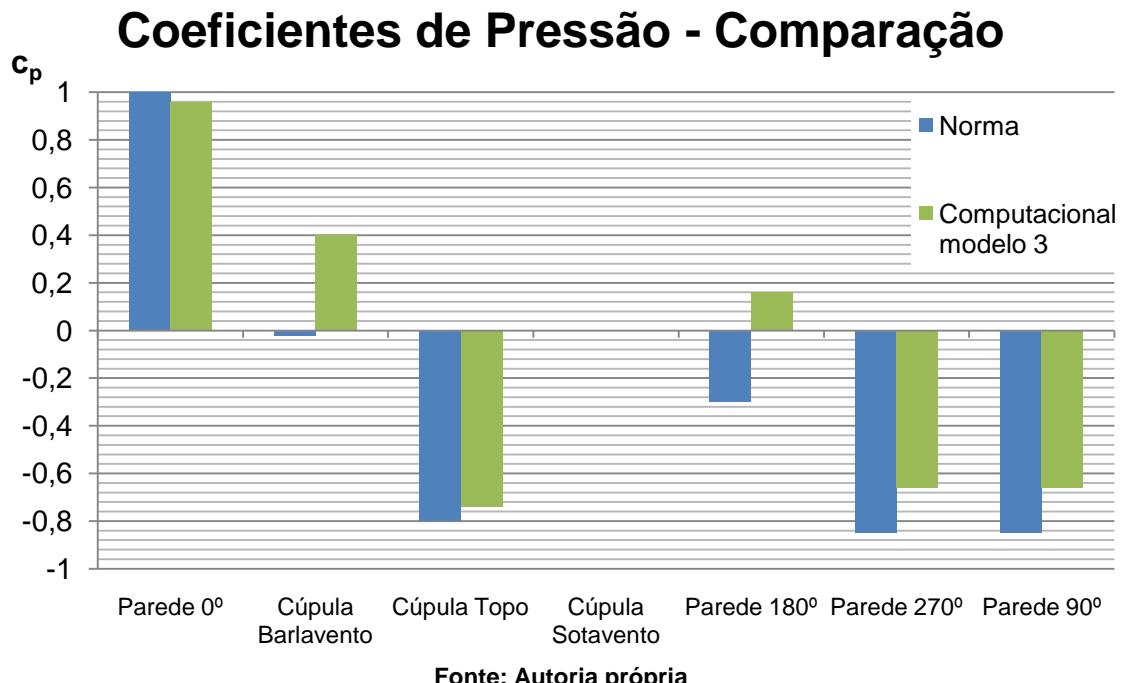
6.4 COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS

Primeiramente, iremos comparar os resultados da norma com os resultados do modelo 3, visto que ambos possuem a mesma geometria, ou seja, deveriam resultar em pressões equivalentes. Entretanto, tais resultados foram bastante diferentes, especialmente nas bordas da cúpula (a barlavento e sotavento) e na região a sotavento na parede cilíndrica.

Na parede cilíndrica, tal incongruência se deve ao fato de que a NBR 6123 considera que os resultados em um corpo cilíndrico independem da existência ou não de uma cúpula sobre ela. Isso se mostra incorreto para cilindros com baixa altura em relação ao seu diâmetro, como é o caso do modelo 3 ($h/d = 1/5,6$).

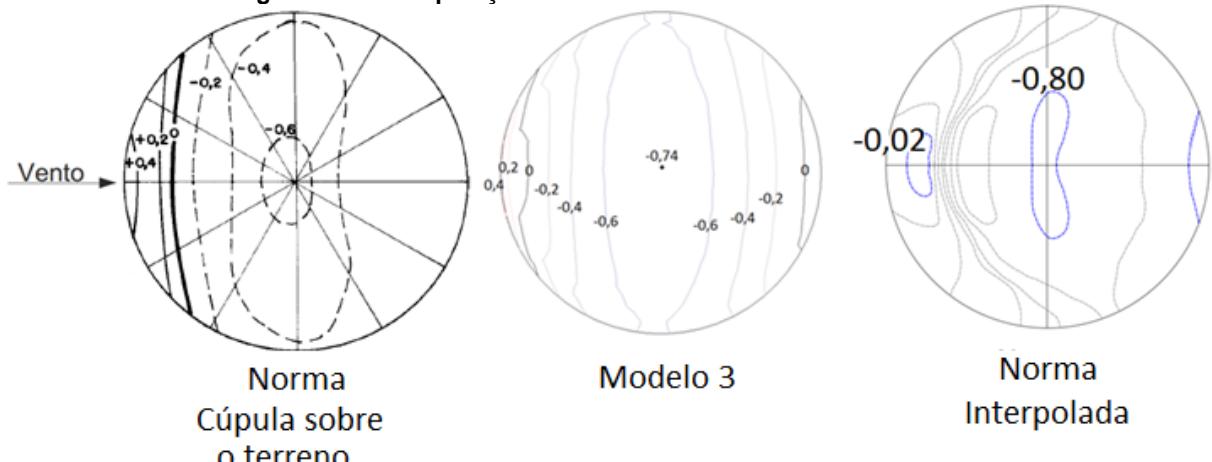
Com relação à cúpula, as incongruências se devem à interpolação entre resultados de diferentes naturezas. Assim como mostrado na Figura 116, os resultados do modelo para a cúpula foram mais próximos para a seção da norma de cúpulas sobre o terreno, a exceção do resultado de topo (subdimensionado). Isso mostra que a parede cilíndrica de baixa altura tem pouca influência sobre os resultados.

Gráfico 4 – Comparação entre resultados do modelo 3 e a norma



Fonte: Autoria própria

Figura 116 – Comparação entre resultados do modelo 3 e a norma



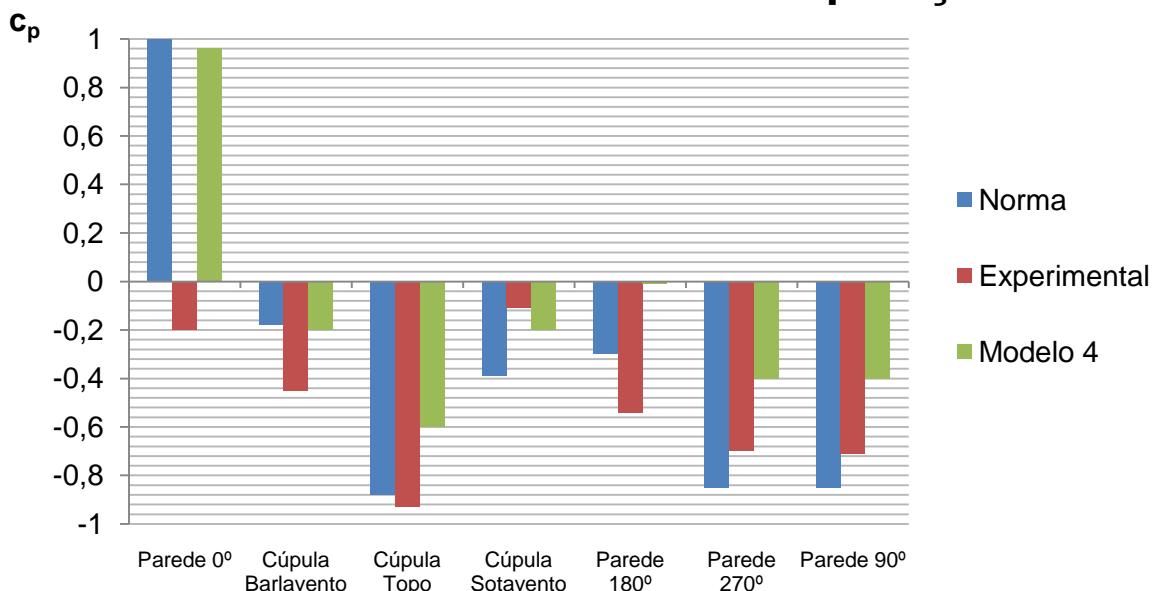
Fonte: Autoria própria

Assim como explicado em 6.2.2, as singularidades influenciaram bastante o escoamento em torno do objeto de estudo, fazendo com que o modelo 3 tenha resultados globalmente diferentes em relação ao modelo 4 (Geraldão).

Conforme a especificação dos pontos do ensaio no túnel de vento, os resultados da interpolação da norma, do ensaio de túnel de vento e do modelo computacional (modelo 4, Geraldão) estão resumidos no Gráfico 5

Gráfico 5 - Resultados comparativos.

Coeficientes de Pressão - Comparações



Há maior proximidade entre resultados obtidos na cúpula e maior diferença entre os pontos nas paredes. Era esperada certa diferença entre os resultados, dadas as diferenças entre os métodos: para a norma, uma geometria simplificada; para o experimental, a dificuldade em se criar as mesmas condições previstas no local e o numérico, em que também deveriam ser determinadas as condições do local.

É perceptível na maioria dos pontos a coerência na tendência do comportamento do escoamento, com picos no topo da cúpula, decaindo para menores valores a sotavento. Há ressalvas quanto aos resultados experimentais obtidos, principalmente para os valores nos pontos a barlavento, pois é notável a disparidade entre os valores experimentais em relação aos resultados numéricos e normativos. Como explicado anteriormente, uma explicação para tal fenômeno seriam erros inerentes ao experimento, mais especificamente, devido à base de fixação que possivelmente tornaram os resultados mais negativos.

Outra fonte de disparidades pode ter sido o escoamento em torno do experimento que resultou em um número de Reynolds ao longe abaixo do considerado necessário para um escoamento totalmente turbulento. Entretanto,

sabe-se que, assim como explicado em 6.3, o experimento foi considerado válido pela análise dos resultados.

Outro fato a se levar em conta nos resultados obtidos através de simulação computacional são os picos em locais não cobertos pela norma, como na estrutura sobre a cúpula e nos pilares. Este fato permite dizer que as particularidades realmente causam uma perturbação que pode ser relevante se em comparação à norma, que fornece apenas resultados pontuais.

Uma conclusão imediata é que a norma é conservadora com relação aos resultados obtidos nas paredes cilíndricas em pontos genéricos, pois resulta em pressões máximas e mínimas de maior valor absoluto (em situações de projeto, apenas os máximos e mínimos são relevantes, pois o vento poderia estar em qualquer direção horizontal).

7 CONCLUSÕES

Este trabalho teve como primeira motivação os acidentes causados pelo vento e em segundo plano, utilizar da pesquisa feita durante este processo para obter maiores conhecimentos em um assunto pouco abordado ao longo da graduação.

A forma encontrada para melhor desenvolver o trabalho foi o estudo do Ginásio Geraldo Magalhães sob três óticas: normativa (NBR6123/1988), experimental (túnel de vento) e numérica (através do ANSYS FLUENT, software de simulação computacional). A estrutura é propícia no sentido de possuir características geométricas próximas às de uma existente na norma, ainda que com algumas interferências e particularidades (pilares circundantes, paredes inclinadas e estrutura anexa sobre a cobertura).

Com relação aos resultados obtidos através da norma, pôde-se constatar que apresentou bons resultados em pontos genéricos, sendo, inclusive, conservadora, o que era de se esperar, dado seu caráter abrangente (apenas para a região efetivamente coberta pela norma, a parede cilíndrica), assim como concluído por Oliveira Júnior (2014). Por isso, conclui-se que esta é uma boa maneira de se analisar uma estrutura, ainda que com ressalvas por ser dependente da consciência do projetista, que deve ponderar se os pontos disponibilizados na norma representam bem os resultados devidos ao escoamento em toda região da estrutura em análise em contato com o fluido, devendo-se assim, levantar estudos específicos no caso de regiões com particularidades geométricas.

Em contrapartida, conclui-se que a cúpula sobre base cilíndrica de baixa altura (relação h/d menor que 1/4) não é contemplada totalmente na norma, sendo que os resultados para o modelo 3 mostram que tais pressões se aproximam mais da cúpula sobre o terreno, com resultados no topo subdimensionados. Note que a norma gera resultados limites e, portanto, não deveriam ser ultrapassados. É sugestão dos autores que, na próxima revisão da norma, sejam adicionados valores menores de h/d para a cúpula sobre base cilíndrica.

Com o ensaio do túnel de vento, concluímos que a maioria dos pontos apresentou resultados cujo comportamento era próximo ao obtido por outros métodos. Com este estudo foi possível tirar algumas conclusões acerca do processo experimental. Para obter bons resultados é importante que o túnel seja adequado ao que se quer analisar, por isso, para um experimento mais preciso observam-se as limitações do túnel, por exemplo, como é obtida a camada limite e se esta é bem representativa e se as dimensões do túnel permitem o ensaio de um modelo reduzido cujas dimensões sejam propícias. Sugere-se, portanto, que um novo estudo seja realizado com um modelo físico de maiores dimensões (de forma a garantir números de Reynolds ao longe maiores) e sem interferências geométricas.

As particularidades do Geraldão mostraram-se relevantes, pois nesses locais ocorreram picos de pressão, além de resultar em pressões modificadas ao longo de todo o objeto de estudo. Isto foi concluído frente aos resultados obtidos através do modelo computacional, levando à conclusão de que esta geometria pode ser considerada especial. Sugere-se, portanto, assim como Arrais (2001), que estruturas com singularidades como chanfros (caso do pilar do Geraldão), entre outras, podem ser feitas com o auxílio de ferramentas computacionais.

8 REFERÊNCIAS

ANJING BI. Probabilistic assessment of wind loads on a full scale low rise building. (Tese de PhD). Graduate Faculty of Texas Tech University, 2006.

ANSYS, Inc. ANSYS Fluent Theory Guide –Release 16.0. Canonsburg, PA, EUA, 2015.

ARRAIS, G.P. Pressões Exercidas pelo Vento em Fachadas de Edifícios Altos: Estudo Comparativo dos Valores Obtidos Através de Ensaios em Túnel de Vento e Especificações Normativas. Trabalho de Diplomação. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR6123. Rio de Janeiro, ABNT, 1988.

BLESSMANN, J. Aerodinâmica Aplicada à Engenharia Civil. Editora Faculdade de Economia do Vale dos Sinos, sem data.

BLESSMANN, J. Acidentes Causados Pelo Vento. 4^a Ed. Porto Alegre. Editora da UFRGS, 2001.

BLESSMANN, J. O Vento na Engenharia Estrutural. Porto Alegre: Editora da Universidade UFRGS, 1995.

BEAUFORT, F. National Meteorological Library and Archive Fact sheet 6 — The Beaufort Scale, 2011.

CÂNDIDO, D. H. Tornados e trombas d'água no Brasil: Modelo de risco e proposta de escala de avaliação de danos.(Tese de Doutorado). UNICAMP, São Paulo, 2012.

CERMAK, J. E. Wind Tunnel for the Study of Turbulence in the Atmospheric Surface Layer, 1958.

COOK, N. J. The Designer's Guide to Wind Loading of Building Structures – Part 1: Background, Damage Survey, Wind Data & Structural Classification. Editora: Building Research Establishment and Butterworths, London, UK, 1985

COOK, N. J. The Designer's Guide to Wind Loading of Building Structures – Part 2: Static Structures. Editora: Building Research Establishment and Butterworths, London, UK, 1990

FERREIRA, E.T. Estudo Comparativo entre a velocidade básica do vento estabelecida na NBR6123 e a obtida de estações meteorológicas na Paraíba - Impactos nos âmbitos do projeto estrutural, do meio ambiente e dos custos. (Tese de Mestrado). Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2005.

FRECHET, M. "Sur la loi de probabilité de l'écart maximum.", 1927.

GMR PROJETOS ESTRUTURAIS, Ginásio de Esportes Geraldo Magalhães - Ampliação e Modernização. (Laudo Estrutural), Recife, 2012.

GOMES, H. C. "Método dos Elementos Finitos com Fronteiras Imersas aplicado a problemas de dinâmica dos fluidos e interação fluido-estrutura". (Tese de Doutorado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, 2013.

GONÇALVES, M. R. Ação do vento nas edificações- teoria e exemplos. Escola de Engenharia de São Carlos, 2007.

JENSEN, N., FRANCK, M. Model-Scale Tests In Turbulent Wind Part 1 and 2, 1963.

LERIA, T., MONTEFUSCO, R. Forças Devido ao Vento em edificações: Determinação dos Coeficientes Aerodinâmicos. Escola de Engenharia Mauá. (s.d.)

LOPES, M. F. P. Aplicação numérica e experimental de métodos de simulação da camada limite atmosférica para o estudo da ação do vento sobre edifícios. (Tese de Mestrado). Instituto Superior Técnico. Universidade de Lisboa, Lisboa, 2008.

MONTEFUSCO, R. TV-1 Túnel de vento da Escola de Engenharia Mauá utilizado na disciplina "Introdução à Engenharia". Parte 2: Simulação da camada limite atmosférica. Escola de Engenharia Mauá. (s.d.)

MUNSON, B. R.; YOUNG, D. F. Fundamentos da Mecânica dos Fluidos. Tradução da 4^a Edição americana. Editora Edgard Blucher LTDA. São Paulo, SP, 2004.

OLIVEIRA JÚNIOR, M. A., Análise da Influência do Vento em Galpões Industriais. 2014. - Centro Acadêmico do Agreste, Universidade Federal de Pernambuco, Caruaru, 2014.

OSOKOYA, O. O. Numerical Prediction of Wind-induced Internal Pressure on a Model Low-rise Building in Nigeria. Asian Journal of Engineering and Technology. v. 001, issue 04, p. 2321-2462. Ile-Ife, Nigéria, 2013.

PADARATZ, I. J. Velocidade básica do vento no BrasilPorto Alegre: CPGEc, 1977.

PARKETA, A. L. Mudanças climáticas na atualidade-discutindo aquecimento global.SaBios:Rev. Saúde e Biol,v.8,2013.

PASQUAL, T.C.S. Um Estudo sobre a Ação do Vento nas Estruturas de Membrana. Tese de Mestrado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

SIMIU, E., SCANLAN, R.H., Wind Effects on Structures: An Introduction to Wind Engineering. John Wiley & Sons, Inc., 1978.,

UEMATSU, Y. A Computer-Assisted Wind Load Evaluation System for the Design of Cladding of Buildings: a Case Study of Spatial Structures, Wind Tunnels and Experimental Fluid Dynamics Research ,InTech. (2011).

VIEIRA, D. Tornado com ventos que ultrapassaram 200 km/h causa destruição em Xanxerê(SC).Disponível em :<<http://noticias.uol.com.br/album/2015/04/21/tornado->

com-ventos-que-ultrapassaram-200-kmh-causa-destruicao-em-xanxere-sc.htm > .
Acesso em:20 jun.2015

APÊNDICE A - Resultados das medições de pressão do ensaio em túnel de vento

Tabela A.1 - Medições dos pontos 1 a 7

Velocidade (m/s)	Medição	1 (mm)	2 (mm)	3 (mm)	4 (mm)	5 (mm)	6 (mm)	7 (mm)	Referência (mm)
15	1	25	30	37	23	30	33	31	22
	2	24	28	35	23	29	31	29	20
	3	25	28	35	23	30	32	30	21
14	1	23	26	34	22	29	31	29	20
	2	21	24	32	19	25	28	26	18
	3	20	25	30	19	26	28	26	18
13	1	20	24	30	19	25	26	25	18
	2	19	20	26	17	21	23	22	15
	3	18	21	26	17	22	24	23	16
12	1	16	20	24	16	20	22	21	15
	2	15	17	22	14	19	20	19	12
	3	15	17	23	14	18	20	19	14
11	1	14	16	21	14	17	19	18	13
	2	13	15	19	12	15	17	16	11
	3	13	15	19	12	16	17	16	11
10	1	11	12	15	10	13	14	13	10
	2	10	12	14	9	12	13	12	9
	3	10	12	14	10	13	14	13	9
9	1	9	10	12	8	10	11	10	8
	2	8	10	11	8	10	11	10	7
	3	8	9	12	7	10	11	10	7
8	1	6	7	9	5	7	8	8	5
	2	6	7	9	5	7	8	7	5
	3	5	5	7	5	6	7	6	5
7	1	4	5	6	4	5	5	5	4
	2	3	4	5	3	5	5	4	3
	3	3	4	5	4	5	6	5	4
6	1	3	3	4	2	3	4	4	3
	2	2	2	3	2	3	4	3	3
	3	2	3	3	2	3	3	3	2
5	1	2	2	2	1	2	2	2	2
	2	1	1	2	1	2	2	1	2
	3	1	2	2	1	2	2	2	1

Tabela A.2- Medições dos pontos 8 a 10

Velocidade (m/s)	Medição	8 (mm)	9 (mm)	10 (mm)	Referência (mm)
15	1	32	32	35	21
	2	32	31	33	19
	3	32	32	34	20
12	1	22	22	23	15
	2	19	20	21	12
	3	20	21	22	14

APÊNDICE B –Análise dos dados coletados no ensaio em túnel de vento

Tabela B.1 - Coeficientes de pressão para todos os pontos

Velocidade	Medição	c _p 1	c _p 2	c _p 3	c _p 4	c _p 5	c _p 6	c _p 7
15	1	-0.19	-0.50	-0.94	-0.06	-0.50	-0.69	-0.57
	2	-0.25	-0.50	-0.94	-0.19	-0.57	-0.69	-0.57
	3	-0.25	-0.44	-0.88	-0.13	-0.57	-0.69	-0.57
14	1	-0.22	-0.43	-1.01	-0.14	-0.65	-0.79	-0.65
	2	-0.22	-0.43	-1.01	-0.07	-0.51	-0.72	-0.58
	3	-0.14	-0.51	-0.87	-0.07	-0.58	-0.72	-0.58
13	1	-0.17	-0.50	-1.01	-0.08	-0.59	-0.67	-0.59
	2	-0.34	-0.42	-0.92	-0.17	-0.50	-0.67	-0.59
	3	-0.17	-0.42	-0.84	-0.08	-0.50	-0.67	-0.59
12	1	-0.10	-0.49	-0.88	-0.10	-0.49	-0.69	-0.59
	2	-0.29	-0.49	-0.98	-0.20	-0.69	-0.79	-0.69
	3	-0.10	-0.29	-0.88	0.00	-0.39	-0.59	-0.49
11	1	-0.12	-0.35	-0.94	-0.12	-0.47	-0.70	-0.59
	2	-0.23	-0.47	-0.94	-0.12	-0.47	-0.70	-0.59
	3	-0.23	-0.47	-0.94	-0.12	-0.59	-0.70	-0.59
10	1	-0.14	-0.28	-0.71	0.00	-0.42	-0.57	-0.42
	2	-0.14	-0.42	-0.71	0.00	-0.42	-0.57	-0.42
	3	-0.14	-0.42	-0.71	-0.14	-0.57	-0.71	-0.57
9	1	-0.17	-0.35	-0.70	0.00	-0.35	-0.52	-0.35
	2	-0.17	-0.52	-0.70	-0.17	-0.52	-0.70	-0.52
	3	-0.17	-0.35	-0.87	0.00	-0.52	-0.70	-0.52
8	1	-0.22	-0.44	-0.88	0.00	-0.44	-0.66	-0.66
	2	-0.22	-0.44	-0.88	0.00	-0.44	-0.66	-0.44
	3	0.00	0.00	-0.44	0.00	-0.22	-0.44	-0.22
7	1	0.00	-0.29	-0.58	0.00	-0.29	-0.29	-0.29
	2	0.00	-0.29	-0.58	0.00	-0.58	-0.58	-0.29
	3	0.29	0.00	-0.29	0.00	-0.29	-0.58	-0.29
6	1	0.00	0.00	-0.39	0.39	0.00	-0.39	-0.39
	2	0.39	0.39	0.00	0.39	0.00	-0.39	0.00
	3	0.00	-0.39	-0.39	0.00	-0.39	-0.39	-0.39
5	1	0.00	0.00	0.00	0.57	0.00	0.00	0.00
	2	0.57	0.57	0.00	0.57	0.00	0.00	0.57
	3	0.00	-0.57	-0.57	0.00	-0.57	-0.57	-0.57

Tabela B.2 – Média dos Coeficientes de pressão para cada velocidade

V (m/s)	cp1	cp2	cp3	cp4	cp5	cp6	cp7
15	-0.23	-0.48	-0.92	-0.13	-0.55	-0.69	-0.57
14	-0.19	-0.46	-0.96	-0.10	-0.58	-0.75	-0.60
13	-0.22	-0.45	-0.92	-0.11	-0.53	-0.67	-0.59
12	-0.16	-0.43	-0.92	-0.10	-0.52	-0.69	-0.59
11	-0.20	-0.43	-0.94	-0.12	-0.51	-0.70	-0.59
10	-0.14	-0.38	-0.71	-0.05	-0.47	-0.61	-0.47
9	-0.17	-0.41	-0.76	-0.06	-0.47	-0.64	-0.47
8	-0.15	-0.29	-0.74	0.00	-0.37	-0.59	-0.44
7	0.10	-0.19	-0.48	0.00	-0.39	-0.48	-0.29
6	0.13	0.00	-0.26	0.26	-0.13	-0.39	-0.26
5	0.19	0.00	-0.19	0.38	-0.19	-0.19	0.00

Tabela B.3 – Média dos Coeficientes de pressão com diferentes intervalos de velocidades

Velocidades (m/s)	c _{p1}	c _{p2}	c _{p3}	c _{p4}	c _{p5}	c _{p6}	c _{p7}
15	-0.23	-0.48	-0.92	-0.13	-0.55	-0.69	-0.57
15 - 14	-0.21	-0.47	-0.94	-0.11	-0.56	-0.72	-0.58
15 - 13	-0.22	-0.46	-0.94	-0.11	-0.55	-0.70	-0.58
15 - 12	-0.20	-0.45	-0.93	-0.11	-0.54	-0.70	-0.59
15 - 11	-0.20	-0.45	-0.93	-0.11	-0.54	-0.70	-0.59
15 - 10	-0.19	-0.44	-0.89	-0.10	-0.53	-0.69	-0.57
15 - 9	-0.19	-0.43	-0.88	-0.09	-0.52	-0.68	-0.55
15 - 8	-0.18	-0.42	-0.86	-0.08	-0.50	-0.67	-0.54
15 - 7	-0.15	-0.39	-0.82	-0.07	-0.49	-0.65	-0.51
15 - 6	-0.12	-0.35	-0.76	-0.04	-0.45	-0.62	-0.49
15 - 5	-0.10	-0.32	-0.71	0.00	-0.43	-0.58	-0.44

Tabela B.4 – Desvio padrão dos Coeficientes de pressão com diferentes intervalos de velocidades

Velocidades (m/s)	c _{p1}	c _{p2}	c _{p3}	c _{p4}	c _{p5}	c _{p6}	c _{p7}
15	0.04	0.04	0.04	0.06	0.04	0.00	0.00
15 - 14	0.04	0.04	0.06	0.05	0.05	0.04	0.03
15 - 13	0.06	0.04	0.07	0.05	0.05	0.04	0.03
15 - 12	0.07	0.06	0.06	0.06	0.08	0.05	0.05
15 - 11	0.07	0.06	0.05	0.05	0.08	0.05	0.04
15 - 10	0.07	0.07	0.10	0.06	0.08	0.06	0.06
15 - 9	0.06	0.07	0.11	0.07	0.08	0.07	0.08
15 - 8	0.07	0.11	0.13	0.07	0.10	0.08	0.10
15 - 7	0.12	0.13	0.18	0.07	0.11	0.11	0.13
15 - 6	0.16	0.20	0.25	0.14	0.16	0.13	0.15
15 - 5	0.19	0.26	0.30	0.20	0.19	0.19	0.25