

**UNIVERSIDADE DO VALE DO RIO DOS SINOS - UNISINOS
UNIDADE ACADÊMICA DE GRADUAÇÃO
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL**

FERNANDA DEPELEGRIN TESTOLIN

**ESTUDO COMPARATIVO ENTRE MÉTODOS DE DETERMINAÇÃO DAS AÇÕES
DO VENTO EM PROJETOS ESTRUTURAIS DE COBERTURAS METÁLICAS:
ESTUDO DE CASO – ESTÁDIO BEIRA RIO**

**São Leopoldo
2023**

FERNANDA DEPELEGRIN TESTOLIN

**ESTUDO COMPARATIVO ENTRE MÉTODOS DE DETERMINAÇÃO DAS AÇÕES
DO VENTO EM PROJETOS ESTRUTURAIS DE COBERTURAS METÁLICAS:
ESTUDO DE CASO – ESTÁDIO BEIRA RIO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil, pelo Curso de Engenharia Civil da Universidade do Vale do Rio dos Sinos (UNISINOS).

Orientador: Prof. Dr. Fabrício Longhi Bolina

São Leopoldo

2023

AGRADECIMENTOS

Não poderia começar de outra forma se não agradecendo as duas pessoas mais importantes da minha vida, meus pais Carla e Ricardo, que nunca mediram esforços para incentivar meus sonhos. Vocês são minha maior inspiração e fonte de força e determinação. Obrigado por estarem sempre ao meu lado, e me apoiarem incondicionalmente.

Aos meus familiares, meus avós e amigos, que por vezes deixei de ver em função desta pesquisa, o apoio de todos foi fundamental. Carol, obrigada por tudo, pelos inúmeros conselhos, por ler esse trabalho diversas vezes mesmo sem entender do assunto e por me acalmar nos momentos difíceis. Thais, tu foste minha luz no fim do túnel. Agradeço por usar de um tempo para me ajudar, foste fundamental para a conclusão deste trabalho. Camila, Luísa, Gabi, Luana, Rafa, Erika e Natália, gratidão pelo apoio, amizade e força, saibam que agora estou livre para nos vermos.

As muitas pessoas que contribuíram para que este trabalho fosse possível: Professora Luciana Paulo Gomes, que foi fundamental para que o contato com o Sport Club Internacional acontecesse, a diretoria do Internacional, principalmente ao Victor Grumberg e Matheus da Costa e Silva, que foram solícitos e autorizaram esta pesquisa, bem como forneceram todos os documentos necessários e estavam sempre dispostos para me auxiliar.

Também agradeço ao Prof. Ph.D Acir Mércio Loredou-Souza, por reservar um tempo para me ajudar com este tema tão complexo e desafiador. Ainda, minha gratidão a todos professores que tive contato durante a graduação pelos ensinamentos e conhecimentos. E um agradecimento especial ao meu orientador Prof. Dr. Fabrício Longhi Bolina por todo auxílio, conselhos e parceria.

Por fim, à Unisinos, por proporcionar um curso de excelência, que refletirá em todas minhas conquistas profissionais.

RESUMO

Coberturas de grandes vãos e de geometria complexa sempre foram um desafio para a engenharia do vento, pois determinar as cargas atuantes e estimar o comportamento da estrutura perante esta intempérie é fundamental para o sucesso do projeto. O trabalho tem por objetivo avaliar e comparar diferentes técnicas de determinação das ações estáticas do vento e o impacto da geometria estudada, em uma cobertura metálica leve localizada no município de Porto Alegre, sendo está o Estádio Beira Rio. A partir de ensaios de túnel de vento, simulações computacionais e o cálculo da NBR 6123 (ABNT, 1988). Inicialmente, o ensaio de túnel de vento executado sobre a cobertura do Estádio Beira Rio foi apresentado, juntamente com os resultados obtidos. Na sequência, foram calculadas por meio da NBR 6123/1988, as pressões do vento sobre 6 modelos geométricos para o módulo da estrutura estudada. E por fim, aplicaram-se os métodos de simulação computacional para estimar as pressões sobre uma parte da cobertura do estádio. Os resultados obtidos com os três métodos citados foram comparados e analisados. Concluiu-se que para todos os métodos analisados, a cobertura teve comportamento condizente com a bibliografia estudada e com o ensaio de túnel de vento, porém a ABNT NBR 6123/1988 e a simulação computacional apresentaram certos níveis de incerteza, sendo a NBR 6123/1988 considerada falha para determinação das pressões para esta tipologia de estrutura por desconsiderar diversas características de comportamentos fundamentais e específicos de superfícies curvas. Enquanto as simulações pelo método da Dinâmica dos Fluidos Computacional (DFC), mostraram-se favoráveis, todavia exigem melhorias e maiores estudos. Por fim, ficou evidente que ensaios de túnel de vento, ainda são o melhor e mais seguro método para determinação das ações do vento para estruturas com alto grau de complexidade e de tipologia arquitetônica diferenciada.

Palavras-chave: cobertura metálica; túnel de vento; NBR 6123; simulações computacionais; CFD; pressões do vento.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Estruturas metálicas afetadas pela ação do vento	15
Figura 2: Estádios no interior do túnel de vento e estruturas pós-evento.....	16
Figura 3: Perfis de velocidades médias e tensões de Reynolds na CLA.....	19
Figura 4: Curvatura média da velocidade do vento e altura da CLA conforme rugosidade superficial.....	22
Figura 5: Distribuição das velocidades do vento a curto e a longo prazo.....	24
Figura 6: Regime de escoamento de corpo isolado	26
Figura 7: Influência do número de Reynolds em diferentes geometrias.....	27
Figura 8: Resposta as ações do vento em estruturas de grandes vãos	29
Figura 9: Corrente de Carga de Vento – Alan G. Davenport.....	31
Figura 10: Mapa de isopletas e regiões brasileiras	34
Figura 11: Isopletas da velocidade básica do vento – V_0 (m/s)	38
Figura 12: Legenda para a Tabela 6	42
Figura 13: Legenda para a Tabela 7	44
Figura 14: Legenda para a Tabela 8	44
Figura 15: Partes de consideração dos coeficientes de pressão externos sobre superfície curva	46
Figura 16: Geometria - Cobertura metálica do estádio.....	48
Figura 17: Configuração geométrica do estádio analisado.....	49
Figura 18: Modelos de ensaio para estrutura de grandes vãos.....	51
Figura 19: Quatro estágios de abertura do estágio retrátil	52
Figura 20: Comparação coeficientes de pressão: túnel de vento X DFC	53
Figura 21: Fluxograma das etapas de pesquisa.....	54
Figura 22: Desenhos – Perspectivas da cobertura do Estádio Beira Rio	56
Figura 23: Principais elementos que compõem a cobertura.....	57
Figura 24: Corte longitudinal – Lado de maior dimensão	57
Figura 25: Corte longitudinal – Lado de menor dimensão	58
Figura 26: Imagens de satélite do entorno do Estádio	59
Figura 27: Entorno imediato do Estádio	59
Figura 28: Túnel de Vento Prof. Joaquim Blessmann (medidas em cm).....	60
Figura 29: Modelo da cobertura do Estádio Beira Rio no interior do túnel de vento..	60
Figura 30:Rugosidade e referência para o ângulo de incidência do vento.....	61

Figura 31: Localização das zonas para aplicação dos coeficientes de forma C.....	62
Figura 32: Diagrama de distribuição de pressões – CARREGAMENTO I (180°).....	65
Figura 33: Geometria – Modelo de cobertura 01	66
Figura 34: Geometria – Modelo de cobertura 02.....	67
Figura 35: Geometria – Modelo de cobertura 03.....	68
Figura 36: Geometria – Modelo de cobertura 04.....	68
Figura 37: Geometria – Modelo de cobertura 05.....	69
Figura 38: Geometria – Modelo de cobertura 06.....	70
Figura 39: Conversão de sinais.....	71
Figura 40: Modelo esquemático da determinação dos coeficientes de pressão	74
Figura 41: Modelagem 3D do Estádio Beira Rio	75
Figura 42: Módulos do Estádio Beira Rio submetidos a simulação	76
Figura 43: Detalhamento dos módulos submetidos a simulação	76
Figura 44: Roteiro de cálculo para simulação computacional	77
Figura 45: Cálculo dos módulos pelo <i>software Autodesk CFD</i>	79
Figura 46: Coeficientes de pressão externos e internos – Modelo 01 e 02.....	81
Figura 47: Coeficientes de pressão externos e internos – Modelo 03 e 04.....	81
Figura 48: Coeficientes de pressão externos e internos – Modelo 05 e 06.....	81
Figura 49: Combinação Carregamento I – Modelo 01 e 02.....	82
Figura 50: Combinação Carregamento I – Modelo 03 e 04.....	82
Figura 51: Combinação Carregamento I – Modelo 05 e 06.....	83
Figura 52: Gráfico de convergência das interações calculadas	85
Figura 53: Pressões (kPa) atuantes da cobertura pela simulação computacional	86
Figura 54: Comparativo dos valores de pressão atuantes nas paredes (em kPa)	89
Figura 55: Comparativo dos valores de pressão atuantes na cobertura (em kPa)	89
Figura 56: Pressões (kPa) atuantes da cobertura vistas da face interna	102
Figura 57: Pressões (kPa) atuantes da cobertura vistas da face frontal	103

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Velocidades mínimas a serem adotadas em cada região do país.....	34
Tabela 2: Parâmetro de velocidade básica do vento em normas internacionais.....	35
Tabela 3: Classes de edifícios segundo NBR 6123/1988.....	40
Tabela 4: Parâmetros meteorológicos que permitem determinar S_2	40
Tabela 5: Valores mínimos do fator estatístico S_3	41
Tabela 6: Coeficientes de pressão e de forma, para paredes de edificações de planta retangular	42
Tabela 7: Coeficientes de pressão e de forma, externos para coberturas com duas águas, simétricos, em edificações de planta retangular	43
Tabela 8: Coeficientes de pressão e de forma, externos para coberturas com uma água, em edificações de planta retangular, com $a/b < 2$	45
Tabela 9: Coeficientes de pressão externa, para vento perpendicular a geratriz da cobertura	46
Tabela 10: Dimensões e características principais do Estádio Beira Rio	56
Tabela 11: Parâmetros de cálculo e valores obtidos	63
Tabela 12: Características – Modelo de cobertura de duas águas 01 e 02.....	66
Tabela 13: Características – Modelo de cobertura de uma água 03 e 04	67
Tabela 14: Características – Modelo de cobertura curva 05 e 06	69
Tabela 15: Fatores de cálculos adotados.....	71
Tabela 16: Categorias de rugosidade adotadas.....	72
Tabela 17: Valores calculados de V_k e q	73
Tabela 18: Dados de entrada para simulação no <i>software Autodesk CFD</i>	78
Tabela 19: Parâmetros de cálculo para a simulação no <i>software Autodesk CFD</i>	78
Tabela 20: Pressões atuantes na cobertura para os modelos considerados e ângulo de 180°	84
Tabela 21: Pressão estática do vento para ângulo de incidência 180° para todos os métodos analisados	88
Tabela 22: Diferença percentual das técnicas de estudo aplicadas em comparação com resultados de túnel de vento.....	90
Tabela 23: Pressões atuantes na cobertura para os modelos considerados	101

LISTA DE SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AIJ	<i>Architectural Institute of Japan</i>
AS	<i>Australian Standard</i>
ASCE	<i>American Society of Civil Engineering</i>
BLWTL	<i>Boundary Layer Wind Tunnel Laboratory</i>
CFD	<i>Computational Fluid Dynamics</i>
CLA	Camada Limite Atmosférica
CPU	<i>Central Processing Unit</i>
CWE	<i>Computational Wind Engineering</i>
DFC	Dinâmica dos Fluídos Computacionais
DNS	<i>Direct Numerical Simulation</i>
ELU	Estado Limite Último
EN	<i>European Standard</i>
EPS	<i>Extended Pressure Systems</i>
FIFA	Federação Internacional de Futebol Associado
GB	<i>The National Standards of the People's Republic of China</i>
GPD	<i>Generalized Pareto Distribution</i>
HFPI	<i>High Frequency Pressure Integration</i>
LAC	Laboratório de Aerodinâmica das Construções
LES	<i>Large Eddy Simulation</i>
MDOP	Método da Decomposição Ortogonal Própria
NBR	Normas Brasileiras de Regulação
NZS	<i>New Zealand Standard</i>
OMM	Organização Meteorológica Mundial
POT	<i>Peaks Over Threshold</i>
PTFE	Politetrafluoretileno
RANS	<i>Reynolds Averaged Navier–Stokes</i>
RS	Rio Grande do Sul
RSM	<i>Response Surface Methodology</i>
TS	<i>Thunder Storm</i>
UFRGS	Universidade Federal do Rio Grande do Sul

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	11
1.1 OBJETIVOS	13
1.1.1 Objetivo geral	13
1.1.2 Objetivos específicos	13
1.2 JUSTIFICATIVA	14
2 REFERENCIAL BIBLIOGRÁFICO	18
2.1 CARACTERÍSTICAS DO VENTO	18
2.1.1 Camada Limite da Atmosfera	19
2.1.2 Turbulência	20
2.1.3 Rugosidade superficial	21
2.1.4 Velocidade média do vento e de rajada	22
2.1.5 O vento como um fluido	24
2.2 COMPORTAMENTO DAS ESTRUTURAS SOBRE A AÇÃO DO VENTO.....	27
2.2.1 Estruturas de grandes vãos	28
2.2.1.1 Impacto das arquibancadas no comportamento da cobertura.....	30
2.2.2 Coberturas isoladas	30
2.3 NORMAS REGULAMENTADORAS.....	31
2.3.1 Pontos de melhoria para a NBR 6123/1988	32
2.3.2 Comparação da NBR 6123/1988 com outras normas internacionais	34
2.4 CÁLCULO DAS AÇÕES DO VENTO CONFORME NBR 6123/1988.....	36
2.4.1 Determinação das ações estáticas do vento	36
2.4.1.1 Pressão dinâmica (q).....	37
2.4.1.2 Velocidade característica do vento (V_k)	37
2.4.1.3 Velocidade básica do vento (V_0)	37
2.4.1.4 Fator topográfico (S_1)	38
2.4.1.5 Fator de rugosidade do terreno, dimensões da edificação e altura sobre o terreno (S_2).....	39
2.4.1.6 Fator estatístico (S_3).....	41
2.4.1.7 Coeficientes de pressão	41
2.5 DINÂMICA DOS FLUÍDOS COMPUTACIONAIS (DFC)	46
2.5.1 Aplicação do método DFC na reprodução de ensaios de túnel de vento .	47
2.5.2 Uso de DFC como aliado de projeto	49

2.5.3 Técnicas combinadas – Túnel de vento e DFC.....	50
3 METODOLOGIA	54
3.1 CARACTERÍSTICAS DA ESTRUTURA ANALISADA	55
3.1.1 Dimensões da cobertura.....	56
3.1.2 Entorno da estrutura construída.....	58
3.2 ESTUDO 1: ENSAIOS DE TÚNEL DE VENTO.....	59
3.2.1 Classificação da rugosidade do terreno	61
3.2.2 Ações estáticas	62
3.2.2.1 Carregamento do vento – Tormentas EPS.....	62
3.2.2.2 Carregamento do vento – Tormentas TS	64
3.2.2.3 Pressões locais na cobertura	64
3.3 ESTUDO 2: NORMA BRASILEIRA – NBR 6123/1988.....	65
3.3.1 Definição da geometria simplificada	65
3.3.1.1 Geometria simplificada - Cobertura de duas águas planas	66
3.3.1.2 Geometria simplificada – Cobertura de uma água plana.....	67
3.3.1.3 Geometria simplificada – Cobertura curva	69
3.3.2 Determinação dos carregamentos Incidentes na cobertura	70
3.3.3 Definição de parâmetros de cálculo	70
3.3.3.1 Velocidade característica do vento (V_k) e pressão dinâmica (q).....	73
3.3.4 Obtenção dos coeficientes de pressão na cobertura	73
3.3.5 Cálculo das pressões locais na cobertura.....	74
3.4 ESTUDO 3: SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL – DCF	75
3.4.1 Modelagem da cobertura	75
3.4.2 Simulação e processamento dos dados	75
3.4.2.1 Roteiro de cálculo para a simulação.....	77
3.4.2.1.1 <i>Dados de entrada para simulação.....</i>	<i>77</i>
3.4.2.1.2 <i>Parâmetros de cálculo para simulação.....</i>	<i>78</i>
4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	80
4.1 RESULTADOS - PRESSÕES DO VENTO SOB A ÓTICA DA NBR 6123/1988 .80	
4.1.1 Coeficientes de pressão externos e internos	80
4.1.1.1 Coeficientes de pressão resultantes.....	82
4.1.2 Pressões locais na cobertura.....	83
4.2 RESULTADOS – PRESSÕES DO VENTO SOB A ÓTICA DA DFC.....	84
4.3 ANÁLISE E CORRELAÇÃO DOS RESULTADOS.....	87

4.3.1 Pressão do vento sobre a cobertura	87
4.3.2 Aplicabilidade dos modelos de cálculo da NBR 6123/1988 para estudo de estrutura complexas e de grandes vãos e influência da geometria	91
4.3.3 Aplicabilidade do modelo computacional para estudo de estruturas complexas e de grandes vãos.....	92
5 CONCLUSÃO	93
5.1 DIFICULDADES ENCONTRADAS.....	94
5.2 SUJESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	95
REFERÊNCIAS.....	96
ANEXO A – RESULTADOS DAS PRESSÕES CAUSADAS PELAS AÇÕES DO VENTO PELO MÉTODO DA NBR 6123/1988.....	101
ANEXO B - RESULTADOS DAS PRESSÕES CAUSADAS PELAS AÇÕES DO VENTO PELO MÉTODO DFC	102

1 INTRODUÇÃO

Ventos fortes e extremos são, potencialmente, os principais causadores de efeitos devastadores em infraestruturas de edifícios altos, tanto as cargas de revestimento quanto a dinâmica do alicerce tornam-se uma preocupação. A resposta dinâmica induzida pelo vento nas estruturas, depende de fatores diversos, por exemplo: do perfil do terreno ou da velocidade média do vento e das características de turbulência, da forma aerodinâmica do edifício, da velocidade e direção do vento e das propriedades estruturais que podem aumentar as cargas do vento em ressonância (ALY, 2014).

Os precursores desta área de estudo foram Irminger e Nokkentved, que transformaram o campo de pesquisa, ao analisar em meados de 1927, a pressão dinâmica do vento em uma série de edificações de geometrias diferentes, utilizando túneis de vento aeronáuticos da Universidade Técnica da Dinamarca para os ensaios (LAROSE; FRANCK, 1997).

Outros autores propuseram contribuições importantes para os avanços dos estudos, como Martin Jensen e Alan G. Davenport. O primeiro, cooperou com leis a partir das quais sustentavam que o escoamento obtido em túnel de vento deveria ter o comportamento turbulento idêntico ao escoamento do vento natural, encontrado na natureza (HANSEN, 2013). Enquanto o segundo, é creditado como um dos fundadores do *Boundary Layer Wind Tunnel Laboratory* (BLWTL), no Canadá (ISYUMOV, 2012), que foi um dos primeiros modelos de túnel de vento capaz de reproduzir as camadas limites da atmosfera e desta forma gerar os ensaios de acordo com as leis expostas por Martin Jensen (HANSEN, 2013).

Com as descobertas introduzidas por estes e outros autores, os ensaios tornaram-se mais completos, estruturas complexas passaram a ser ensaiadas em escalas maiores para gerar melhores resultados e amplificar o banco de dados. E conseqüentemente, as normas regulamentadoras tornaram-se mais abrangentes, e estenderam seu escopo e qualidade (HANSEN, 2013).

Na atualidade, as principais diretrizes que norteiam e regulamentam os estudos dos ventos sobre as edificações, são as seguintes normas: Europeia: *European Standard*: EUROCODE 1 - EN 1991-1-4:2005 (EN, 2010); Americana: *American Society of Civil Engineering Standard* – ASCE 7-22 (ASCE, 2022); Japonesa: *Architectural Institute of Japan* – AIJ (AIJ, 2004); e Brasileira: Associação Brasileira de

Normas Técnicas – NBR 6123: Forças Devidas ao Vento em Edificações (ABNT, 1988).

Esta última (NBR 6123/1988), passa por um processo de revisão e é um dos focos de estudo deste trabalho de conclusão. Tendo diversos artigos publicados que visam a sua adequação para as condições de exposição atuais, e que fornecem contribuições para melhorias da diretriz brasileira. Dentre os estudos, destaque para os de Loredo-Souza, et al. (2023), que basearam suas pesquisas na atualização do mapa de isopleias brasileiro, e Riera (2016), que avaliou a abrangência da ABNT NBR 6123/1988 e apontou adequações pertinentes. Já em comparação com outras normas estrangeiras, Vallis (2019) traz um estudo detalhado, onde analisa os parâmetros da velocidade do vento para 14 códigos diferentes, e os compara com os resultados expostos na NBR 6123 (ABNT, 1988).

Na atualidade, outro método para determinação das ações do vento pode ser aplicado, afinal, com o advento de tecnologias e computadores mais avançados, aliados à maturidade dos métodos numéricos já desenvolvidos, é possível que tais análises sejam feitas por meio de simulações computacionais, mediante a utilização da Dinâmica dos Fluidos Computacionais (DFC) (AWRUCH; BRAUN; GRECO, 2015).

Diversos autores aplicaram técnicas envolvendo métodos numéricos e simulações computacionais em estruturas metálicas complexas e de grandes vãos. Desta forma, eles comprovaram a eficácia e eficiência de métodos DFC's quando comparados com ensaios reais, realizados em túneis de vento. Dentre as pesquisas já publicadas, destacam-se as análises de Lu, et al. (2012), Sotofasiou, Hughes e Ghani (2017), Liu, et al. (2018) e Guo, Zhu e Hu (2020), que serão detalhadas mais adiante neste trabalho.

Com diversos avanços nas pesquisas, a engenharia de estruturas evoluiu, aliando o desenvolvimento de tecnologia dos materiais e inovações nos projetos estruturais. Tornou possível, a concepção de coberturas mais leves, flexíveis e com vãos cada vez maiores. O aço, é um material que desempenha um papel fundamental no atendimento destas características citadas. Porém, torna as estruturas mais sensíveis à ação do vento, e conseqüentemente, é de fundamental importância um conhecimento mais preciso do carregamento do vento neste tipo de construção (MAKOWSKI, 2004).

Este documento dedica-se ao estudo da aerodinâmica das construções e o impacto do vento em projetos de estruturas metálicas, a fim de validar a eficiência da

utilização de metodologias distintas, e demonstrar a importância e influência desta intempérie em estruturas frágeis como coberturas metálicas. Tomando como base uma avaliação comparativa de resultados gerados por meio da aplicação de diferentes técnicas de análise. Resultados gerados por meio de ensaios de túnel de vento, simulações computacionais e pelo cálculo da NBR 6123 (ABNT, 1988).

A estrutura metálica a ser analisada trata-se do Estádio José Pinheiro Borda, também conhecido como Beira Rio, que possui uma cobertura metálica leve e de geometria curva. A estrutura é composta por 65 módulos metálicos idênticos que contornam todo o estádio. Cada módulo contém dois pontos de apoio: um mais externo, a 9,00 m da estrutura existente, e outro na periferia do estádio (SANTINI ROCHA, 2014). A cobertura é construída com 3.800 toneladas de aço e é coberta por quase 55.000 m² de membrana PTFE (politetrafluoroetileno), material escolhido por ser leve, extremamente resistente e de fácil manutenção (HYPE STUDIO, [2022?]).

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo geral

Avaliar e comparar diferentes procedimentos para a determinação das pressões do vento em uma cobertura metálica leve, com geometria curva não considerada pelos procedimentos simplificados de cálculo da NBR 6123 (ABNT, 1988). A cobertura considerada no estudo está localizada no município de Porto Alegre, sendo o Estádio Beira Rio.

1.1.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos para este trabalho são:

- a) com base na complexidade da geometria da cobertura considerada, identificar, mediante análise aproximada, os coeficientes de pressão e as pressões estáticas da cobertura do estádio de futebol, utilizando a ABNT NBR 6123/1988;

- b) modelar e simular o estudo das ações do vento sobre módulos curvos da cobertura analisada, utilizando da Dinâmica dos Flúidos Computacionais (*CFD – Computational Fluid Dynamics*);
- c) comparar os resultados obtidos através de ensaios de túnel de vento com a NBR 6123 (ABNT, 1988) e simulações computadorizadas;
- d) verificar a viabilidade do uso de ferramentas computacionais durante a elaboração de projetos de obras arquitetônicas complexas e de grande porte.

1.2 JUSTIFICATIVA

É de conhecimento que a maioria dos acidentes causados pelo vento ocorre em construções leves, com grandes vãos livres, tais como hangares, pavilhões de exposições e industriais, depósitos, armazéns e coberturas de postos de gasolina, estes, podendo ser de pequeno até grande porte. Acidentes também são causados por projéteis que são lançados pelo vento, danificando edificações e veículos e atingindo pessoas e animais (MAKOWSKI, 2004).

Alguns episódios recentes corroboram com tal afirmação e justificam o estudo, como a queda total da cobertura do ginásio poliesportivo Dirceu Mendes Arcoverde, no Piauí (2021) (Figura 1a), o colapso de uma cobertura metálica atingida por ventos com velocidade média acima de 150 km/h, em Canoas – RS (2022) (Figura 1b), o descolamento parcial da cobertura de lona na arena multiuso “*The Arena O2*” em Londres – Inglaterra (2022), após a passagem da tempestade de nome Eunice, com ventos que atingiram 196 km/h (Figura 1c). Por fim, o desabamento da cobertura do estádio Frei Epifânio, no Maranhão (2022) (Figura 1d).

Figura 1: Estruturas metálicas afetadas pela ação do vento



a) Ginásio Poliesportivo Dirceu Mendes
Arcoverde – Piauí, Brasil (2022)



b) Estrutura atingida por forte temporal – Rio
Grande do Sul, Brasil (2022)



c) Arena O2 atingida por tempestade Eunice –
Londres, Inglaterra (2022)



d) Estádio Frei Epifânio – Maranhão, Brasil
(2021)

Fonte: Adaptado de (a) Meionorte Notícias (2022), (b) Diário de Canoas (2022), (c) MetSul Meteorologia (2022), (d) GE (2022).

Para coberturas de grandes vãos, a exemplo das estruturas para estádios de futebol que tendem a abrigar milhares de pessoas, evitar falhas e colapsos como os expostos na Figura 1 é indispensável, pois qualquer irregularidade pode ser fatal. Portanto, é necessário tomar cuidados especiais durante o processo de concepção do projeto, para cumprir rigorosamente as normas construtivas e ambientais, e a complexidade do ambiente construído exige a adoção de técnicas conjuntas para prever os fenômenos de fluxo e fornecer soluções de concepção aprimoradas (SOFOTASIOU; HUGHES; GHANI, 2017).

Makowski (2004) e Almeida (2009), foram autores que buscaram em suas pesquisas, respostas para a usabilidade da ABNT NBR 6123/1988 na determinação de coeficientes de pressão e respostas estruturais. Em ambos os casos, os autores compararam os dados obtidos por meio da Norma Brasileira, com resultados de ensaios de túnel de vento, para coberturas metálicas específicas e de médio porte. As

conclusões para as duas pesquisas, demonstraram potencial na aplicabilidade da norma como referência para a determinação de cargas do vento, porém destacam a necessidade de mais pesquisas na área.

Buscando consolidar a importância da investigação prévia para as ações do vento, em janeiro de 2016, após fortes tempestades atingirem a cidade de Porto Alegre - RS, Loredou-Souza, et al. (2016) utilizaram do evento como oportunidade para verificação e comparação do comportamento de edificações previamente testadas em túnel de vento de camada limite convencional, em escala natural e sob escoamentos oriundos de *downburst* (correntes de vento violentas e descendentes que ao alcançar a superfície se espalham de forma radial, produzindo estragos (METSUL, [2020?])). Foram analisados seis edifícios de 80 m de altura e dois estádios de futebol, sendo os referidos, a Arena do Grêmio e o Estádio Beira Rio (Figura 2a), o último citado, também objeto de estudo desta pesquisa.

Figura 2: Estádios no interior do túnel de vento e estruturas pós-evento



a) Estádio Beira Rio e Arena do Grêmio sendo submetidos a ensaio de túnel de vento



b) Danos causados aos arredores do Beira Rio pós tempestade, sem afetar o estádio

Fonte: Loredou-Souza, et al. (2016).

Na pesquisa, observou-se que todos os seis edifícios apresentaram danos em suas fachadas, mas com padrões distintos, três deles foram mais afetados. Em todas as situações, as distribuições de pressão obtidas nos testes em laboratório correspondem diretamente com as zonas danificadas nos edifícios reais. Enquanto os estádios permaneceram sem nenhum dano, o mesmo não pode ser aplicado aos arredores, conforme apresentado na Figura 2b, que mostra os estragos ocorridos no entorno do Estádio Beira Rio. Isso pode ser explicado pelo fato de que, durante a fase de projeto e após os resultados de túnel de vento, modificações e melhorias foram realizadas, contribuindo com o excelente desempenho em relação as ações do vento (LOREDO-SOUZA, et al., 2016).

O estudo apresentado, ratifica a importância de testes que preveem o comportamento das estruturas sob ventos extremos, e comprova a eficiência destes, visto que, nos casos em que ocorreram danos, foram devido a condições construtivas e operacionais das estruturas, bem como o material de revestimento utilizado. Contudo, existem diversas e severas limitações nos testes de túnel de vento para determinar com precisão as cargas e as pressões do vento em edifícios e estruturas, e estas limitações requerem melhorias e soluções.

Lu, et al (2012), citam alguns desses problemas: (1) por se tratar de ensaios feitos a partir de maquetes e modelos em escala reduzida de edifícios e estruturas, normalmente em escalas que variam entre 1/100 até 1/500, o resultado quanto ao número de Reynolds é muito menor do que o obtido em uma situação real, ocasionando diferenças significativas nos coeficientes de pressão local e de pressões máximas; (2) é difícil reproduzir as condições exatas encontradas em campo, como a rugosidade superficial, turbulência atmosférica e características do terreno.

Os dados acima apresentados, justificam a necessidade desta pesquisa, mostrando ser fundamental um estudo aprofundado sobre o assunto, que busque compreender até que ponto a NBR 6123 (ABNT, 1988) pode ser útil e qual o alcance do seu escopo para projetos e estruturas com grandes vãos e geometrias complexas, como as de superfície curva. Da mesma forma, estudar e comparar a capacidade e eficiência de técnicas computacionais de simulação também é válido, para julgar seu uso como um aliado e até mesmo substituto dos ensaios com maquetes em escala nos testes de túnel de vento.

2 REFERENCIAL BIBLIOGRÁFICO

São abordados nos tópicos abaixo as particularidades e características do vento, bem como normas técnicas que regem e norteiam os estudos das cargas de vento, ainda, as características e principais estudos sobre coberturas metálicas de grandes vãos e resultados de trabalhos que usaram como base simulações computacionais.

2.1 CARACTERÍSTICAS DO VENTO

Sabe-se que o aquecimento desigual da cobertura terrestre é a origem do vento natural e causa uma variação na pressão atmosférica. O ar desloca-se dos pontos de alta pressão para os pontos de baixa pressão em um movimento perpendicular às linhas isobáricas de pressão constante (ALMEIDA, 2009). Destacam-se os principais fatores que interferem na circulação de ar: a influência direta na rotação da terra sobre o movimento global da atmosfera; a diferença de altitude, pois as regiões equatoriais tendem a receber maior parte da radiação solar enquanto as polares recebem uma pequena fração; o tipo de cobertura terrestre, em razão da absorção solar depender das características do solo (SIMIU; YEO, 2019).

Blessmann (2013) define que ao haver massa de ar em movimento em relação a rotação da terra, ocorre o efeito da aceleração de Coriolis, que conseqüentemente gera uma força de mesmo nome. Os fenômenos climáticos causados por essa força são frequentemente observados na camada limite atmosférica e podem afetar as características do vento e da turbulência, influenciando diretamente nos efeitos da direção do vento nas estruturas, especialmente naquelas extremamente altas (LU; LI, 2022).

Logo, os autores Lu e Li (2022) dão respaldo para a hipótese de que assumir a direção constante do vento ao longo da altura do edifício pode ser aceitável para o projeto resistente ao vento de edifícios de altura baixa ou até mesmo de estruturas de altura média. Os pesquisadores concluem que em região próxima ao solo, até aproximadamente 150 m de altura, enquanto a força de Coriolis muda a velocidade do vento no sentido longitudinal, sua influência no sentido do fluxo é menor.

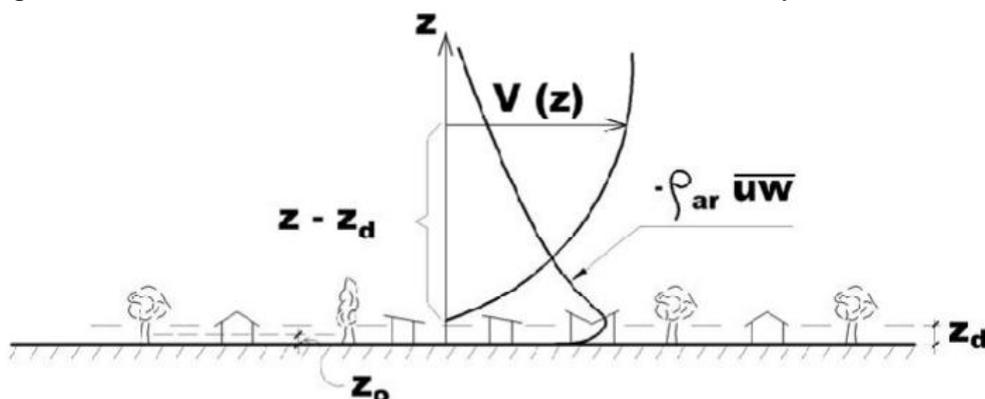
2.1.1 Camada Limite da Atmosfera

Região localizada abaixo da altura gradiente, onde as características e a velocidade do vento são alteradas por diversas causas, como a topografia do terreno, variação de temperatura e forma, dimensões e distribuição dos obstáculos naturais e artificiais (rugosidade superficial) (BLESSMANN, 2013; SIMIU; YEO, 2019). De maneira geral, as construções de engenharia estão totalmente dentro da camada limite atmosférica (CLA), onde o vento é turbulento (BLESSMANN, 2011; ALMEIDA, 2009).

As características desta região definem duas camadas dentro da CLA: a camada superficial e a camada de Ekman. A primeira região é mais próxima a superfície, tendo os fluxos e tensões altamente irregulares e caracterizados por flutuações, vórtices e turbilhões. Dentro desta camada identifica-se uma subcamada, onde as tensões moleculares dominam sobre as tensões turbulentas, a espessura desta subcamada é chamada de “deslocamento do plano-zero” e é representada por z_d . Para o caso de cidades o z_d corresponde à altura média dos edifícios (LOREDO-SOUZA, et al., 2004).

Já a camada de Ekman, situa-se entre a camada superficial até a altura gradiente, nela ocorre um decréscimo das tensões de Reynolds ($-\rho_{ar}\overline{u'w'}$) conforme o aumento da altitude, até tornarem-se nulas na altura gradiente (z_g) (MATTUELLA, 2012). Na Figura 3, é possível observar a variação do perfil vertical de velocidade média, bem como das tensões aparentes de Reynolds e o deslocamento do plano-zero.

Figura 3: Perfis de velocidades médias e tensões de Reynolds na CLA



Fonte: Loredou-Souza, et al. (2004).

2.1.2 Turbulência

As flutuações de velocidade, também chamadas de turbulência, são originadas quase que exclusivamente pela agitação mecânica do ar que é ocasionada pelos efeitos da força de arrasto sobre a superfície (BLESSMANN, 2013; BLESSMANN, 2011). No entanto, uma parcela do fenômeno é de origem térmica, proveniente dos movimentos circulatorios da atmosfera. São os fluxos de calor que acarretam os movimentos convectivos, e estes, juntamente com os turbilhões e redemoinhos, determinam as rápidas alternâncias na velocidade do vento, comumente denominadas de rajadas (BLESSMANN, 2011; MATTUELLA, 2012). Para o vento atmosférico, esse é considerado turbulento em velocidades a partir de 15 m/s (BLESSMANN, 2009).

Na engenharia do vento, a turbulência tem influência na resposta dinâmica e na carga total do vento nas estruturas. De acordo com Aly (2014), para compreender como este parâmetro afeta uma determinada construção, esta deve ser modelada física ou numericamente. O autor investigou o papel da turbulência sob condições de ventos extremos na resposta de edifícios altos com estrutura de aço. Aly (2014), concluiu que os deslocamentos médios são independentes da intensidade da turbulência quando as partes de alta frequência dos fluxos de ensaio são iguais.

Em relação ao comportamento da turbulência, o pesquisador afirma que a existência de edifícios baixos na direção a montante do vento resulta no aumento da turbulência e conseqüentemente, no aumento das respostas dinâmicas dos edifícios sob efeito de sobrepessão e uma diminuição dessas respostas sob efeitos de sucção (ALY, 2014).

Estudo realizado por Luo, et al. (2021), comprova o impacto dos aspectos do entorno nas características do vento. Ao analisar os resultados dos ensaios de túnel de vento realizados na estrutura de um ginásio poliesportivo da Universidade de Zhejiang (China), ainda na fase de projeto, e comparar com um sistema de monitoramento em tempo real instalado na construção 10 anos após a conclusão da obra, que teve uma rápida urbanização, com prédios altos sendo construídos nas redondezas.

Os resultados mostraram que a intensidade de turbulência obtida na medição de campo foi maior do que a do teste de túnel de vento, esta diferença, possivelmente se deve às várias camadas de contorno turbulento induzidas pelas mudanças do

terreno e edifícios ao redor da estrutura alvo (LUO, et al., 2021). Ainda, os autores afirmam que com o aumento da velocidade média do vento, há uma tendência decrescente na intensidade da turbulência. Outro apontamento é de que o ambiente que circunda estruturas especiais de grande escala do mundo real, como a cobertura de um ginásio poliesportivo ou de um estádio de futebol, é mais complexo, resultando em um aumento da rugosidade do terreno e da intensidade da turbulência (LUO, et al., 2021).

2.1.3 Rugosidade superficial

Caracterizada por seus efeitos acumulados estatisticamente por conta de diversos obstáculos, que podem ser naturais ou superficiais, ter diferentes dimensões, formas e densidade, como edificações, florestas, lagos, mares e bosques (ALMEIDA, 2009). Tem influência na estrutura do vento, que varia de acordo com as especificações do terreno e com a rugosidade da superfície terrestre, desacelerando proporcionalmente sua intensidade de acordo com a proximidade do solo, o que determina a constituição da camada limite atmosférica (CLA) (MATTUELLA, 2012).

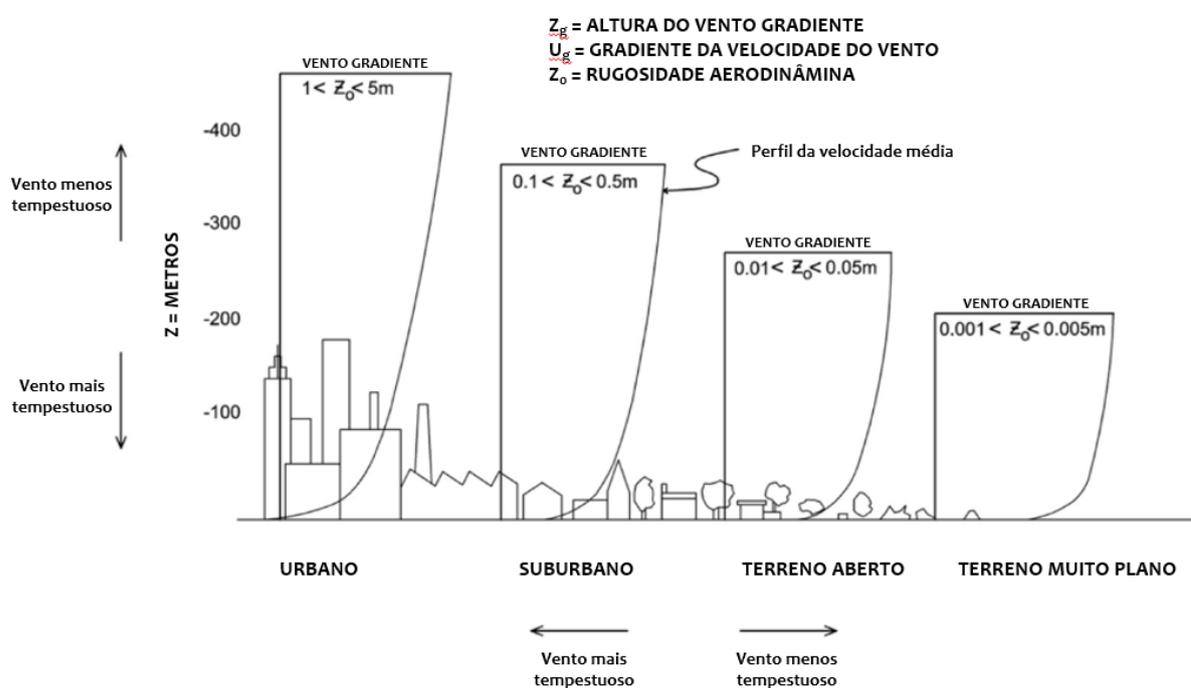
O fator da rugosidade tem relação direta com a CLA, segundo Cochran (2012), a superfície geralmente áspera tem dois efeitos principais sobre os movimentos circulatorios da atmosfera. Primeiro, retarda o fluxo médio, diminuindo-o consideravelmente perto da superfície e menos efetivamente em alturas maiores, o que resulta em um perfil de velocidade média do vento em função da altura. Blessmann (2013) corrobora com a ideia, ao afirmar que ao passo que a rugosidade do solo aumenta, ou seja, os obstáculos tornam-se maiores e mais importantes em número, maior será a agitação do ar, o intercâmbio turbulento de quantidade de movimento e a altura envolvida no processo

O segundo efeito da superfície áspera citado por Cochran (2012), causa uma mistura mecânica dos fluxos, criando turbulência ou flutuações aleatórias na velocidade do vento, cuja intensidade depende das características de aspereza da superfície. Características topográficas, tais como morros, taludes, colinas, picos e cristas, têm fortes efeitos nos perfis de velocidade do vento porque modificam o fluxo de ar que passa sobre elas. Estas atuam como obstruções para CLA, acelerando o vento perto do solo, o que leva ao aumento da pressão do vento sobre os edifícios que ficam localizados nessas regiões (NGO; LETCHFORD, 2008).

Os elementos físicos que retardam o escoamento, causando a variabilidade da velocidade do vento na CLA, são o arrasto, evaporação, evapotranspiração, transferência de calor, emissão de poluentes e alterações geradas pela topografia e pelos obstáculos localizados na superfície. Ainda, a rugosidade do terreno controla o valor de tensão de cisalhamento, desta forma, quanto mais rugosa a superfície, maior será tal tensão e o déficit de quantidade de movimento da camada limite da atmosfera. Quando a superfície passa de uma rugosidade suave para uma mais rugosa, são geradas maiores tensões de cisalhamento próximo do terreno, e conseqüentemente há uma diminuição da velocidade média do vento. Esta adaptação do escoamento à mudança de rugosidade não é instantânea (LOREDO-SOUZA, et al., 2004).

A Figura 4 exposta abaixo, demonstra um esquema para as afirmações feitas por Loredo-Souza, et al. (2004), Ngo e Letchford (2008), Mattuella (2012), Cochran (2012) e Blessmann (2013).

Figura 4: Curvatura média da velocidade do vento e altura da CLA conforme rugosidade superficial



Fonte: Adaptado de Cochran (2012).

2.1.4 Velocidade média do vento e de rajada

Quando ocorrem flutuações instantâneas em torno da média, estas são designadas por rajadas, que possuem intervalos de tempo na ordem de 3 segundos,

este intervalo é adotado universalmente e recomendado pela Organização Meteorológica Mundial (OMM) (BLESSMANN, 2013). Ainda que dados analógicos anteriores, registrados diretamente de anemômetros, mostrem que algumas rajadas têm durações inferiores a 1 segundo (HOLMES; ALLSOP; GINGER, 2014).

É de conhecimento que ventos de alta velocidade são originados de sistemas meteorológicos e são designados por tormentas (*storms*), independente de seu mecanismo de formação. Na CLA a velocidade média varia desde zero, rente à superfície terrestre, até a velocidade gradiente, localizada na altura gradiente e é determinada para intervalos de tempo entre 10 min e 1h. (BLESSMANN, 2013).

São dois os principais tipos de vento que provocam danos e até a destruição das construções. Um é causado por ciclones extratropicais, que originam ventos fortes com o melhor equilíbrio dinâmico entre a rugosidade superficial terrestre. São frequentemente estudados, e servem como base para a NBR 6123 (ABNT, 1988), por serem considerados “bem-comportados”. São chamados de Tormentas Extra Tropicais, ou simplesmente eventos EPS (*Extended Pressure Systems*). Tais ventos, formam-se ao longo de frentes frias polares, e são mais frequentes em regiões temperadas. Dados apontam que em observações de velocidade máxima anual, aproximadamente nove em cada dez registros de ventos fortes, ocorrem na altura padrão de 10 m sobre o nível do solo, e acontecem durante tormentas EPS (RIERA, 2016).

O segundo, é originado de tormentas elétricas, e é associado às correntes descendentes. São denominados de trovoadas ou ainda, eventos TS (*Thunder Storm*) e são caracterizados por uma atmosfera verticalmente instável. Na classificação dos eventos meteorológicos em sinópticos (EPS) e não sinópticos (TS), constatou-se que por um período médio de retorno de 50 anos, os ventos não-sinópticos originados pelas tempestades TS dominam a maior parte do território brasileiro (VALLIS, 2019).

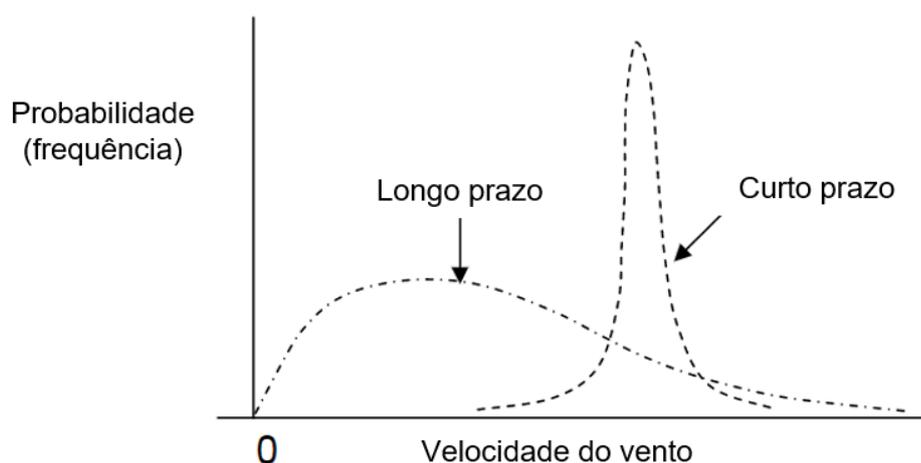
Conforme Riera (2016), a velocidade do vento, em caso de fenômenos meteorológicos do tipo TS, difere significativamente dos modelos pressupostos na maioria dos códigos de vento, incluindo a ABNT NBR 6123/1988. Esse fato é extremamente relevante, pois velocidades extremas com períodos de retorno superiores a 10 anos são frequentemente devidas a tormentas desse tipo.

Quando há a combinação dos dois eventos citados (EPS e TS), formam-se linhas de instabilidade (*squall lines*). Elas se originam quando uma frente fria de

movimento rápido se choca contra uma massa instável de ar quente e úmido. Esta situação gera ventos excepcionalmente fortes (BLESSMANN, 2013).

Para Cochran (2012), as distribuições de frequência e probabilidade que resultam durante uma única tempestade de vento, ou por um período de vários anos, são bastante diferentes umas das outras. Estas são ilustradas na Figura 5. Para o autor, a distribuição das velocidades do vento a curto prazo é muito mais estreita e tende a ser simétrica, constituindo-se de uma distribuição normal em forma de sino. Enquanto a distribuição de probabilidade a longo prazo da velocidade do vento se estende até zero na extremidade esquerda, com uma cauda inclinada na extremidade direita para acomodar as tempestades de vento extremas com potência para danificar as estruturas de projeto.

Figura 5: Distribuição das velocidades do vento a curto e a longo prazo



Fonte: Adaptado de Cochran (2012).

2.1.5 O vento como um fluido

Na engenharia do vento, o fenômeno é tratado como um fluido e segue alguns princípios já conhecidos, portanto, algumas definições e correlações são necessárias. Mattuella (2012), afirma que quando um fluido interage com um corpo sólido e move-se através deste, as moléculas que estão próximas ao objeto, se deslocam e se deformam, ou seja, escoam ao redor do mesmo, ao passo que os fluidos continuam a se deformar enquanto houver força agente, por menor que ela seja. As magnitudes das forças aerodinâmicas entre o fluido e o objeto dependem da forma, da viscosidade e da compressibilidade.

O fenômeno do escoamento de um fluido em torno de um objeto, gera duas regiões diretamente proporcionais ao número de Reynolds: uma próxima do objeto, onde os efeitos do atrito são muito importantes e uma externa, onde esses efeitos podem ser desprezados. Essa situação ocasiona a criação de uma fina camada de fluido próximo à superfície, na qual a velocidade varia desde zero até atingir a velocidade não perturbada, acima da superfície. O intervalo de crescimento entre velocidade e turbulência é denominado de camada limite e é associado ao comportamento observado para as circulações atmosféricas na CLA (MATTUELLA, 2012).

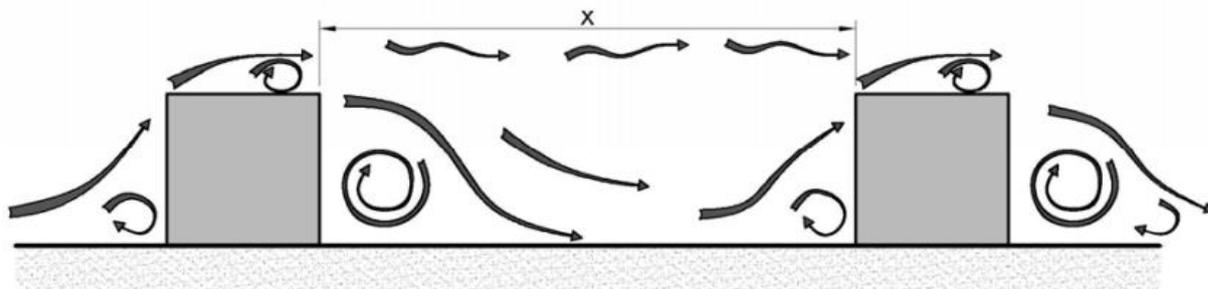
Relacionando as afirmações acima ao comportamento do vento natural e aos principais eventos causadores de ventos extremos, sabe-se que nos ventos do tipo EPS e TS, os fluxos se comportam de maneiras distintas e interagem de forma diferente com a superfície da terra: enquanto a magnitude do perfil sinóptico aumenta com a altura, as velocidades do vento do perfil não sinóptico atingem o pico a uma certa altura acima do solo (VALLIS, 2019).

Conforme supracitado, a viscosidade é a propriedade que controla a velocidade de deformação do fluido. Quando muito viscoso, maior é o tempo que se leva para atingir a mesma deformação atingida rapidamente por um fluido de baixa viscosidade. É ainda, responsável pela resistência à fricção entre as camadas fluídas adjacentes (ARYA, 1988).

Em seus estudos, Cook (1990), classifica como sendo três os regimes de escoamento que podem ser definidos para edificações alinhadas na direção do vento: regime de escoamento de corpo isolado; regime de escoamento deslizante; e regime de escoamento de interferência de esteira. Para o caso de estudo deste trabalho, é importante compreender o comportamento do escoamento para um corpo isolado, pois a cobertura do Estádio Beira Rio, é classificada como tendo esta característica.

Carpeggiani (2004), define coberturas isoladas, como construções que estão suficientemente afastadas de tal forma que cada uma atua isoladamente. Um vórtice de pé de fachada forma-se em torno de cada edifício individualmente e o escoamento posterior à esteira recoloca ao solo, antes de atingir o próximo edifício. Neste caso, a distância de separação é maior do que a soma dos comprimentos de separação a barlavento e de recolagem a sotavento, tal regime de escoamento é demonstrado na Figura 6. O efeito de proteção neste caso é menor e as forças em cada edifício individualmente são similares aos valores correspondentes ao edifício isolado.

Figura 6: Regime de escoamento de corpo isolado



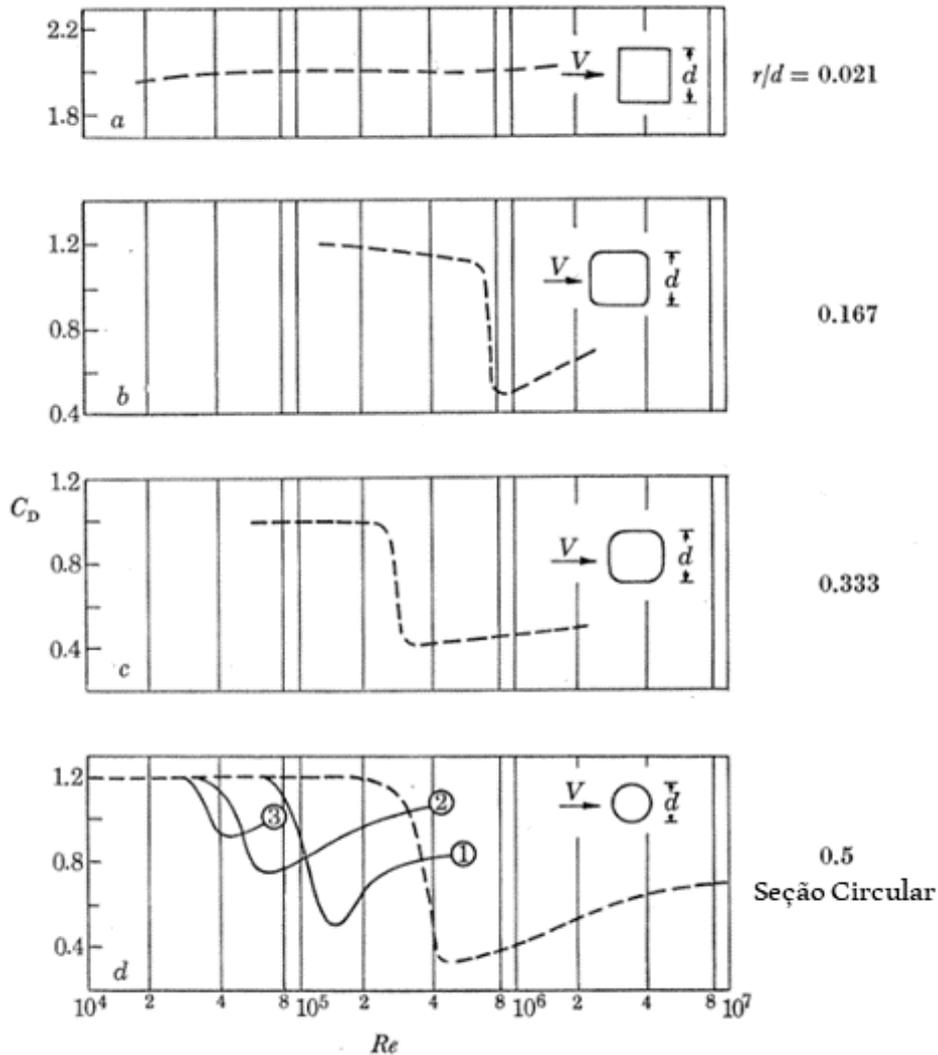
Fonte: Carpeggiani (2004).

O número de Reynolds (Re) tem influência na forma do escoamento, na distribuição de pressões e na força exercida sobre o sólido imerso no escoamento. A Figura 7, demonstra a influência da variação do número de Reynolds sobre o coeficiente de arrasto de acordo com a forma da seção transversal. Observa-se que para geometrias com pontos de escoamento bem definidos, ou seja, geometrias de arestas vivas, o escoamento é comportado. Ao passo que ao as bordas vão arredondando os coeficientes tornam-se dependentes do Re (SCRUTON; ROGERS, 1971).

Para Loredo-Souza, et al. (2010), as pressões externas em superfícies curvas, caso da cobertura do estádio Beira Rio, dependem da localização dos pontos de separação do escoamento, os quais variam com a velocidade do vento e as características de sua turbulência e rugosidade, bem como pela relação entre as dimensões da edificação e a curvatura da superfície externa da cobertura.

A distribuição das pressões adimensionais sobre modelos de escala reduzida é garantida pela preservação de Reynolds nos ensaios de túnel de vento, em conjunto com a colocação de um determinado tipo de rugosidade na superfície da cobertura ensaiada que provoque transição no regime de escoamento para um Re equivalente. Um aumento da turbulência do escoamento provoca efeito semelhante ao de um aumento na rugosidade superficial (LOREDO-SOUZA, et al., 2010).

Figura 7: Influência do número de Reynolds em diferentes geometrias



Fonte: Adaptado de Scruton; Rogers (1971).

2.2 COMPORTAMENTO DAS ESTRUTURAS SOBRE A AÇÃO DO VENTO

Conforme afirma Cochran (2012), do ponto de vista do projeto estrutural, os aspectos mais importantes das respostas de edifícios ao vento são as cargas induzidas pelo vento e os movimentos induzidos pelo mesmo. As cargas são consideradas para a segurança estrutural, e os movimentos são relacionados com a capacidade de manutenção estrutural. O autor também reforça que, ao analisar o comportamento de estruturas em relação ao vento, é importante diferenciar o comportamento das cargas de vento, pois cada uma dessas cargas consiste em um componente estático e um componente dinâmico.

As cargas estáticas do vento são o resultado da pressão média do vento e são sensíveis à geometria da estrutura estudada. No caso de edifícios altos, as cargas de

vento estático são frequentemente dominantes na direção do vento. Já as cargas dinâmicas básicas são devidas a pressões de vento instáveis. Tais pressões podem ser causadas pela turbulência do vento, ou por separações de fluxo fora da superfície da estrutura (COCHRAN, 2012). No caso de estruturas metálicas isoladas, a ação do vento é exercida diretamente nas faces dessa cobertura, o escoamento do vento pode se comportar de diversas formas, afetando a maneira que o carregamento estrutural é considerado no projeto (MAKOWSKI, 2004).

2.2.1 Estruturas de grandes vãos

Coberturas metálicas são geralmente caracterizadas por possuírem grandes vãos, serem extremamente flexíveis, leves e de baixa frequência. Desta forma, é esperado que as forças acarretadas pela ação do vento, sejam a carga predominante e dominante na estrutura (DING; TAMURA, 2013).

No caso de estruturas especiais, as pressões dinâmicas e cargas de vento que circundam a estrutura são complexas, pois diferente da superfície de edifícios, em telhados de grande envergadura, o fluxo de vento na superfície está em regiões de separação. Desta forma, as pressões induzidas pelo vento na superfície da estrutura são afetadas por diversos fatores, incluindo a geometria do telhado, a inclinação, a direção do ângulo de ataque do vento e as condições do entorno (LUO, et al., 2021; SONG, et al., 2019).

Cochran (2012), difere o comportamento do vento entre edifícios altos e estruturas de grandes vãos. Enquanto para um edifício típico, as importantes cargas de vento são aplicadas em direções horizontais e incluem cargas de vento lateral, cargas de vento cruzado e cargas de torção. Para estruturas com grandes coberturas, como arenas ou estádios, as cargas importantes de vento devem incluir a força de elevação ou de sucção que é aplicada na direção vertical sobre os telhados, e que tende a puxar a estrutura para cima do solo, este comportamento do vento é demonstrado na Figura 8.

Figura 8: Resposta as ações do vento em estruturas de grandes vãos



Fonte: Adaptado de Cochran (2012).

O aspecto de sucção, é mais bem compreendido pelos autores Lam e Zhao (2002), que estudaram coberturas de grandes vãos e em balanço, típicas de um estádio de futebol. Os pesquisadores apontam, que os efeitos do vento sobre estes telhados são caracterizados por uma grande pressão ascendente devido à separação do fluxo de vento na borda. Isto resulta em uma grande força de elevação no telhado, bem como um grande momento de flexão no ponto em balanço.

Ao contrário dos telhados de edifícios fechados, o efeito do fluxo de vento como um fluido sobre um telhado em balanço é a combinação de pressões de vento em ambas as superfícies do telhado. Portanto, a correlação entre as pressões de pico nas superfícies superior e inferior afeta as ações de elevação sobre a cobertura, sendo a superfície superior a que mais contribui para este efeito. Além disso, a inclinação do telhado e o bloqueio do vento proporcionado pelas arquibancadas também afetam o padrão da carga de vento. Se a estrutura do telhado não for perfeitamente rígida, o problema de carga se torna mais complicado com a interação entre a ação do vento e os modos de vibração do telhado (LAM; ZHAO, 2002; CHEN, et. al., 2021).

Os autores Chen, et. al (2021), contribuem quanto o impacto da inclinação da cobertura às respostas do vento. Os resultados de suas pesquisas, mostram que um telhado inclinado para baixo é mais apropriado no que diz respeito ao projeto de estruturas com coberturas em balanço porque geralmente resulta em maior redução dos coeficientes de pressão média do vento, bem como dos coeficientes de elevação da estrutura e do momento de flexão. Em contraste, um telhado inclinado para cima

está associado ao aumento dos coeficientes de sucção e elevação da estrutura sob a ação do vento, bem como um acréscimo do momento de flexão.

2.2.1.1 Impacto das arquibancadas no comportamento da cobertura

Em estudo mais antigo, Hansen, Højholt e Nielsen (1992), constataram diferenças no comportamento da cobertura em se tratando de arquibancadas isoladas e arquibancadas que constituem todo o perímetro do estádio. No caso de arquibancadas em todo perímetro, a resposta para cima tende a reduzir, enquanto a resposta para baixo tende a aumentar. Para as arquibancadas isoladas, a carga global de vento para baixo é aproximadamente da mesma grandeza que a carga global de vento para cima no telhado, atuando na mesma direção que o peso próprio.

2.2.2 Coberturas isoladas

Para Blessmann (2013), neste tipo de cobertura o vetor velocidade do vento, em um dado instante, pode ter uma direção inclinada no plano vertical, devido a composição da velocidade média, horizontal, com a componente vertical da turbulência. Assim, para intervalos de tempo de alguns segundos, o vento pode soprar com uma inclinação que se situa entre $+10^\circ$ e -10° . Estes limites podem inclusive ser ultrapassados em temporais com turbulência muito elevada. A consequência prática deste fenômeno é que diferentes padrões de carregamento são fisicamente possíveis de ocorrer na mesma estrutura, para a mesma direção do vento médio incidente (LOREDO-SOUZA, et al., 2010).

Makowski (2004), buscou compreender a distribuição de pressões para diferentes modelos de coberturas isoladas de duas águas através de ensaios realizados em túnel de vento. A autora comparou os resultados de coeficientes aerodinâmicos obtidos nos testes com o que é sugerido pela NBR 6123 (ABNT, 1988), para determinação da ação estática do vento em coberturas.

Esta, considerou que os valores para coeficientes de pressão e de forma apresentados pela NBR 6123/1988 são conservadores e constituem-se de valores elevados quando em comparação com os resultados obtidos em túnel de vento e medições *in situ*, contudo, destaca que todos estão dentro do aceitável (MAKOWSKI, 2004).

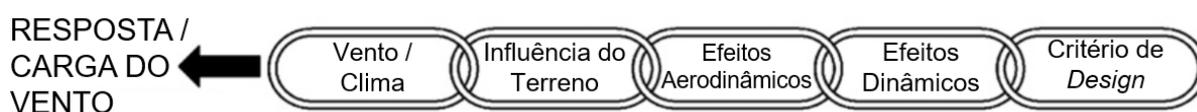
Já Almeida (2009), comparou os resultados da resposta estrutural obtida pelo cálculo da NBR 6123 (ABNT, 1988), com ensaios realizados em túnel de vento que posteriormente foram submetidos ao Método da Decomposição Ortogonal Própria (MDOP). A estrutura submetida para análise trata-se de uma cobertura treliçada, do tipo espacial em arco semicircular, o método MDOP foi aplicado para que fosse possível difundir o desvio padrão devido às pressões de uma extremidade a outra da cobertura.

Como resultado, o autor concluiu que o MDOP fornece projetos mais seguros e otimizados. As solicitações obtidas na direção 0°, para diferentes parâmetros analisados, foram maiores pelo MDOP quando em comparação com a NBR 6123 (ABNT, 1988), enquanto nas outras direções de ataque analisadas, as solicitações foram menores. Almeida (2009) entende que o método adotado pela ABNT NBR 6123/1988, no ângulo de ataque na direção 0°, não contempla os acréscimos de energia no campo de pressões decorrentes do modelo observado.

2.3 NORMAS REGULAMENTADORAS

Em sua tese de doutorado, o pioneiro Alan G. Davenport, desenvolveu um conceito que serve como base para grande parte das normas regulamentadoras. Com abordagem sustentada por uma corrente de pensamento da qual reconhece que a carga do vento em que uma estrutura ou edifício é submetido, é determinado por parâmetros como: exposição ao vento local, este é influenciado pela rugosidade do terreno e topografia; características aerodinâmicas dos edifícios; o potencial para o aumento de carga devido a vibrações ressoantes induzidas pelo vento, e ainda, a importância de critérios claros para avaliar a magnitude das consequências provocadas pelas ações do vento (ISYUMOV, 2012). Esta ideia ficou conhecida como “corrente de carga de vento” (*wind load chain*) de Alan G. Davenport, e um fluxograma representativo da teoria é apresentado na Figura 9.

Figura 9: Corrente de Carga de Vento – Alan G. Davenport



Fonte: Adaptado de Isyumov (2012).

Davenport (2002) e Hansen (2013), definem este processo de avaliação do vento, como uma cadeia de cinco parâmetros interligados, cada qual requer uma avaliação minuciosa e cuidadosa, estes são apresentados da seguinte forma:

- Fator climático: fornece estatísticas sobre vento de referência, pressão, velocidade média, direção do vento, intervalo de recorrência e o tipo de tormentas e tempestades que prevalecem na região;
- Fator de exposição: define a influência da rugosidade e topografia do terreno sobre a pressão e velocidade do vento, sendo expostos critérios de classificação dos terrenos;
- Fator de forma aerodinâmica: descreve as respostas aerodinâmicas aplicadas a forma geométrica da estrutura e a distribuição das pressões locais sobre a estrutura;
- Fator de influência mecânica: define coeficientes globais internos e externos das respostas da estrutura à pressão do vento local;
- Fator de concepção: fator de amplificação global e dinâmica que descreve a influência da vibração, forma geométrica e material nas respostas globais. Critérios de projeto para estabelecer padrões de dimensionamento utilizados e desta forma avaliar a resposta mecânica calculada.

2.3.1 Pontos de melhoria para a NBR 6123/1988

A maioria dos códigos de projeto estrutural admite que em terreno horizontal e plano, o vetor da velocidade média do vento incidente na superfície de fachada está orientado em direção paralela ao solo. O modelo que justifica esta hipótese é válido no caso de ventos sinóticos, causado por eventos EPS (RIERA, 2016).

Riera (2016), aponta alguns fatores que devem ser levados em consideração em uma futura revisão da NBR 6123 (ABNT, 1988). O autor conclui que a NBR 6123 (ABNT, 1988) não difere de outros códigos modernos, e necessita de ajustes em tópicos isolados. No entanto, aponta evidências inquestionáveis de que outros fenômenos meteorológicos, especialmente as correntes descendentes (eventos TS), são responsáveis pelas velocidades de projeto associadas a baixas probabilidades de ocorrência e com grandes períodos de retorno e, em consequência, não podem ser ignoradas na atualização da norma. Riera (2016), sugere que o primeiro passo deve

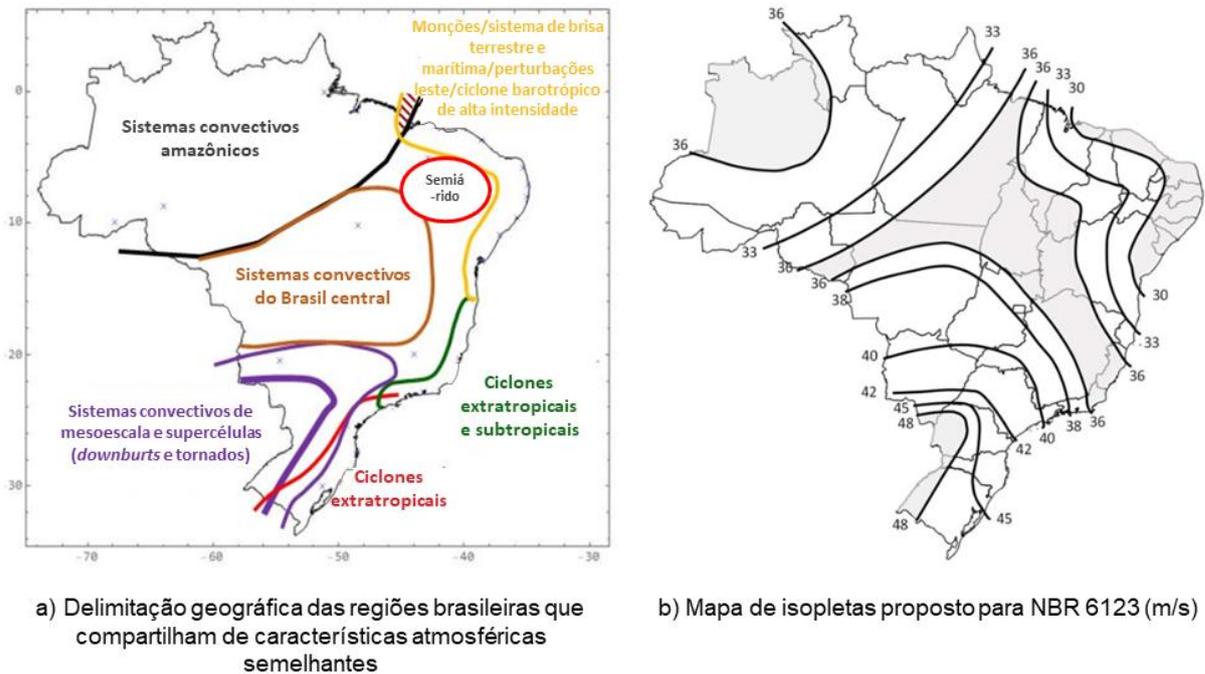
ser a reformulação dos estudos meteorológicos, considerando os ventos identificados como EPS ou TS, como eventos independentes.

A citada reformulação sugerida por Riera (2016), foi publicada por Loredou-Souza, et al. (2023), que apresentam uma nova proposta para atualização do mapa de isopletas da NBR 6123 (ABNT, 1988). Baseados em dados mais atuais e levando em consideração ambos os ventos de origem EPS e TS, além das características climáticas do país, os pesquisadores partiram do propósito que a velocidade básica do vento para cada região do Brasil é definida pela média de velocidade das rajadas com duração de 3 s, com um tempo de retorno de 50 anos, medidas em terreno plano na altura de 10 m.

As regiões brasileiras foram subdivididas levando em consideração as características climatológicas e condições atmosféricas semelhantes que geram ventos intensos, a classificação não levou em conta fatores não naturais, como cidades ou fronteiras administrativas. As subdivisões são apresentadas na Figura 10a. Na escolha das estações climatológicas para obtenção dos dados históricos de ventos, foram privilegiadas aquelas que apresentavam as maiores velocidades médias de cada região de análise, provavelmente causadas por tormentas do tipo TS, muito recorrentes no sul do país. Na Tabela 1, é demonstrado a velocidade mínima a ser considerada no mapa das isopletas, para cada região do Brasil (LOREDO-SOUZA, et al., 2023).

Por fim, o mapa de isopletas atualizado das velocidades básicas com valores que variam de 30 e 48 m/s, é apresentado na Figura 10b. A adoção de ventos fortes com tempos de retorno maiores do que 50 anos não foi possível, devido à falta de séries históricas que corroborassem com tal metodologia (LOREDO-SOUZA, et al., 2023).

Figura 10: Mapa de isopletas e regiões brasileiras



Fonte: Adaptado de Loredo-Souza, et al. (2023).

Tabela 1: Velocidades mínimas a serem adotadas em cada região do país

Região geográfica	Regiões climáticas (cores Figura 10)	Velocidade básica (V_0)
Norte (Amazônia)	Sistemas convectivos amazônicos	$V_0 > 30$ m/s
Sul	Sistemas convectivos de mesoescala e supercélulas (linha roxa grossa), ciclones extratropicais VS	$V_0 > 40$ m/s
Centro-Oeste e Sudeste	Sistemas convectivos de mesoescala (linha roxa fina) em MS e SP	$V_0 > 36$ m/s
Centro-Oeste	Sistemas convectivos do Brasil central	$V_0 > 33$ m/s
Sudeste (Litoral)	Ciclones extratropicais e subtropicais VS	$V_0 > 34$ m/s
Nordeste	Monções / sistema de brisa terrestre e marítima / perturbações leste / ciclone barotrópico de alta intensidade	$V_0 > 30$ m/s
Nordeste	Semiárido	$V_0 > 33$ m/s

Fonte: Adaptado de Loredo-Souza, et al. (2023).

2.3.2 Comparação da NBR 6123/1988 com outras normas internacionais

Em estudo detalhado, Vallis (2019), apresentou os principais parâmetros relacionados a velocidade básica do vento presentes em importantes normas internacionais, e os comparou com aqueles expostos pela NBR 6123 (ABNT, 1988). Os indicadores chaves utilizados para comparação incluem o comprimento de rugosidade (z_0) da velocidade básica do vento, o intervalo médio de tempo de rajada

(τ), bem como os valores das velocidades básicas máximas e mínimas para cada região (de acordo com o tempo de retorno (R) estimado). A Tabela 2 expõe em detalhes os critérios citados.

Tabela 2: Parâmetro de velocidade básica do vento em normas internacionais

Região	Norma de Vento	Parâmetros de Velocidade Básica do Vento				
		z_0 (m)	τ (s)	Tipo de GEVD	Velocidade do vento - Máx/Min (m/s) (R anos)	Âmplitude de R (em anos)
Brasil	NBR 6123 (ABNT, 1988)	0,07	3	II (Fréchet)	30/50 (50)	2 - 200
Argentina	CIRSOC 102 (2005)	0,02	3	II (Fréchet)	34/67,5 (50)	50
Bolívia	APNB 1225003 (2014)	0,01	3	I (Gumbel)	24/44,3 (50)	5 - 500
Chile	NCh432. Of71 (1971)	-	-	-	33/41,2 (-)	-
Colômbia	NSR-10 (2010)	0,02	3	-	17/36 (50)	50
Equador	CPE INEN-NEC-SE-CG 26-1 (2014)	-	Inst.	-	21/- (-)	-
Peru	E. 020 (2006)	-	-	-	20,8/36,1 (50)	-
Paraguai	NP Nº 196 (1991)	0,07	3	II (Fréchet)	40/55 (50)	-
Venezuela	COVENIN 2003 (1989)	-	-	-	19,4/27,8 (50)	-
Uruguai	UNIT 50 (1984)	-0,03	3	II (Fréchet)	37,5/43,9 (20)	2 - 200
Austrália/Nova Zelândia	AS/NZS 1170.2 (2002)	0,02	3	III (GPD)	39/66 (50)	1 - 10,000; Eq.
	AS/NZS 1170.2 (2011)	0,02	0,2	III (GPD)	39/66 (50)	1 - 10,000; Eq.
Estados Unidos	ASCE 7-05 (2005)	0,02	3	I (Gumbel)	38/67 (50)	Eq.
	ASCE 7-10 (2010)	0,02	3	I (Gumbel)	45/76 (300)	300, 700, 1,700; Eq.
	ASCE 7-16 (2016)	0,02	3	III (POT)	31/58 (50)	300, 700, 1,700, 3,000. (10, 25, 100)
Asia - Pacífico	HB212 (2002)	0,02	3	III (GPD)	32/60 (50)	Eq.
Singapura	NA para SS EM 1991-1-4 (2009)	0,05	600	-	20 (50)	-
Malasia	MS 1553 (2002)	0,02	3	-	32,5/33,5 (50)	20, 100

Fonte: Adaptado de Vallis (2019).

O referido autor, concluiu que a maior parte das normas de vento, tratam as velocidades básicas de vento a partir de rajadas com duração de 3 segundos, com exceção da norma AS/NZS 1170.2: 2011 que após revisão de dados históricos, passou a adotar $\tau = 0,2 s$. Quanto a interpretação de tais dados, para normas mais antigas (maior parte das normas da América Latina), o método adotado é conservativo, representado pela distribuição de Fréchet, já para aqueles códigos que passam por atualizações e melhorias constantes (AS/NZS 1170.2 e ASCE 7) houve uma mudança de método probabilístico, da distribuição de Gumbel para a distribuição de Pareto Generalizada (*Generalized Pareto Distribution* – GPD) e para o método POT (*Peaks Over Threshold*), respectivamente (VALLIS, 2019).

Ainda, as normas da Austrália/Nova Zelândia e Estados Unidos carregam outras diferenças em comparação com as demais analisadas, estas, utilizam intervalos de retorno maiores, com uma probabilidade anual muito pequena, para estimativa das cargas das ações do vento no ELU (Estado Limite Último), sem aplicação de um fator de carga adicional. Em ambos os códigos, o R apropriado depende da categoria de risco, tipologia e importância da estrutura (VALLIS, 2019).

Vallis (2019), faz outras observações relevantes, ao analisar as velocidades básicas do vento, o autor trás apontamentos para a velocidade básica mínima, dentre as normas analisadas, a mínima trata-se de 17 m/s, encontrada na costa do Pacífico, na Colômbia, enquanto a mais alta, localiza-se em Comodoro Rivadavia, na costa leste da Patagônia Argentina, com 67,5 m/s.

2.4 CÁLCULO DAS AÇÕES DO VENTO CONFORME NBR 6123/1988

A NBR 6123 (ABNT, 1988) expõe algumas condições exigidas e o formato de cálculo para as considerações das forças devidas à ação estática e dinâmica do vento em edificações. O documento traz fatores de correção da velocidade do vento, em função de características do ambiente, altura do terreno e dimensões da edificação, a fim de obter o perfil de velocidades e de pressões do vento. A norma também apresenta os coeficientes aerodinâmicos para alguns formatos de construções presentes em fluxos de ar.

2.4.1 Determinação das ações estáticas do vento

A NBR 6123/1988 classifica que de um modo geral, a força global do vento sobre uma edificação ou parte da edificação, em superfícies planas e nas projeções oblíquas e curvas (onde $C_{p\text{ médio}} = C$ sobre uma dada projeção), é determinada pela Equação 1.

$$F = C_f q A \quad (1)$$

Onde:

F = Força externa exercida pela ação do vento (N);

C_f = Coeficiente de força, especificado em cada caso;

q = Pressão dinâmica (Pa);

A = Área da zona de estudo (ou da sua projeção) para qual está sendo especificado a força F do vento.

2.4.1.1 Pressão dinâmica (q)

A partir da velocidade característica do vento (V_k), e seguindo as definições da NBR 6123 (ABNT, 1988), define-se a Equação 2, que representa a pressão dinâmica do vento.

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

Onde:

q = Pressão dinâmica (N/m²);

V_k = Velocidade característica do vento (m/s);

2.4.1.2 Velocidade característica do vento (V_k)

A obtenção da velocidade característica do vento, baseia-se na Equação 3, determinada pela NBR 6123/1988.

$$V_k = V_0 S_1 S_2 S_3 \quad (3)$$

Onde:

V_k = Velocidade característica do vento (m/s);

V_0 = Velocidade básica do vento (m/s);

S_1 = Fator topográfico;

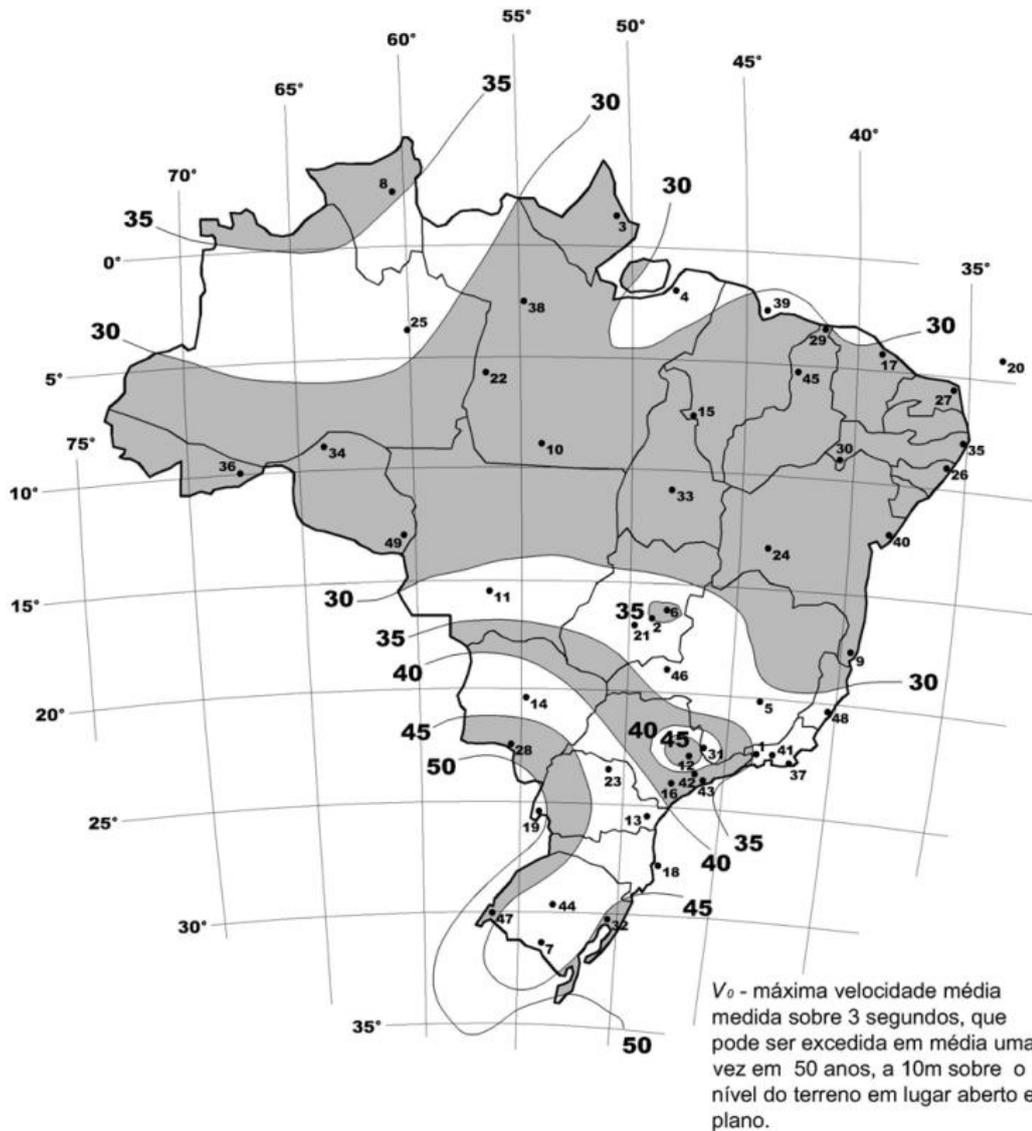
S_2 = Fator que considera a rugosidade do terreno, dimensões da edificação e altura sobre o terreno;

S_3 = Fator estatístico;

2.4.1.3 Velocidade básica do vento (V_0)

Caracterizada pela NBR 6123 (ABNT, 1988) como sendo a velocidade de uma rajada de 3 s, que é excedida em média uma vez a cada 50 anos, a 10 m do terreno em campo aberto plano. O valor de V_0 pode ser determinado a partir do gráfico de isopleias da velocidade básica no Brasil (Figura 11), presente na referida norma.

Figura 11: Isopletas da velocidade básica do vento – V_0 (m/s)



Fonte: ABNT NBR 6123 (1988).

2.4.1.4 Fator topográfico (S_1)

Fator que leva em consideração variações do relevo do terreno, e que foi determinado seguindo as classificações da NBR 6123 (ABNT, 1988). Abaixo, as propriedades para definição do S_1 são apresentadas.

- Terreno plano ou fracamente acidentado: $S_1 = 1,00$;
- Taludes e morros: $S_1 = \text{Variável}$ (valores obtidos através de formulações e tabelas específicas mostradas no item 5.2 da NBR 6123 (ABNT, 1988, p. 5);
- Vales profundos, protegidos de ventos de qualquer direção: $S_1 = 0,9$.

2.4.1.5 Fator de rugosidade do terreno, dimensões da edificação e altura sobre o terreno (S_2)

Este leva em consideração o perfil de velocidade do vento da atmosfera, segundo a rugosidade do terreno e dimensões das edificações. A NBR 6123 (ABNT, 1988) classifica em cinco categorias a rugosidade do terreno e em 3 classes as propriedades segundo as dimensões da edificação. Sendo estas, as que seguem:

- CATEGORIA I: Superfícies lisas de grandes dimensões, com mais de 5km de extensão (Exemplos: mar calmo; lagos e rios e; pântanos sem vegetação);
- CATEGORIA II: Terrenos abertos em nível, com poucos obstáculos isolados, tais como árvores e edificações baixas. A cota média do topo dos obstáculos é inferior ou igual a 1 m (Exemplos: zonas costeiras planas; pântanos com vegetação rala; campos de aviação; fazendas sem sebes ou muros);
- CATEGORIA III: terrenos planos ou ondulados com obstáculos e poucos quebra-ventos de árvores, edificações baixas e esparsas. Cota média do topo dos obstáculos é igual a 3 m (Exemplos: granjas e casas de campo, com exceção das partes com matos; fazenda com sebes e muros; subúrbios a considerável distância do centro, com casas baixas e esparsas);
- CATEGORIA IV: terrenos cobertos por obstáculos numerosos e pouco espaçados, em zona florestal, industrial ou urbanizada. A cota média do topo dos obstáculos é igual a 10 m. Esta categoria também inclui zonas com obstáculos maiores e que ainda não possam ser consideradas na Categoria V (Exemplos: zonas de parques e bosques com muitas árvores; cidades pequenas e seus arredores; subúrbios densamente construídos de grandes cidades; áreas industriais plena ou parcialmente desenvolvidas);
- CATEGORIA V: terrenos cobertos por obstáculos numerosos, grandes, altos e pouco espaçados. A cota média do topo dos obstáculos é igual ou superior a 25 m (Exemplos: florestas com árvores altas, de copas isoladas; centros de grandes cidades; complexos industriais bem desenvolvidos).

Quanto a classe segundo as dimensões da edificação, a NBR 6123 (ABNT, 1988) baseia-se originalmente em três intervalos de tempo para o cálculo da velocidade média (3 s, 5 s e 10 s), tais intervalos são respectivamente correlacionados com as classes na Tabela 3 abaixo.

Tabela 3: Classes de edifícios segundo NBR 6123/1988

Classe	A	B	C
Intervalo de tempo	3 segundos	5 segundos	10 segundos
Descrição	Toda edificação, ou parte dela para qual a maior dimensão horizontal ou vertical não exceda 20 m.	Edificação ou parte da edificação na qual a maior dimensão horizontal ou vertical da superfície frontal esteja entre 20 m e 50 m.	Toda edificação ou parte dela na qual a maior dimensão horizontal ou vertical da superfície frontal exceda 50 m.

Fonte: Adaptado de ABNT NBR 6123 (1988).

Já a determinação do fator S_2 por meio de uma altura z metros acima do nível geral do terreno é obtido pela Equação 4. Onde p é um parâmetro que depende do intervalo de tempo de rajada e da categoria do terreno, enquanto o fator F_r é sempre correspondente à categoria II. Esta equação é aplicável até a altura z_g , relativa à altura gradiente, que define o contorno superior da camada atmosférica. Os parâmetros que permitem determinar o S_2 através da Equação 4 são apresentados na Tabela 4.

Tabela 4: Parâmetros meteorológicos que permitem determinar S_2

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	p	0,085	0,09	0,10
		b	0,94	0,94	0,93
IV	420	p	0,10	0,105	0,115
		b	0,86	0,85	0,84
V	500	p	0,12	0,125	0,135
		b	0,74	0,73	0,71
		p	0,15	0,16	0,175

Fonte: Adaptado de ABNT NBR 6123 (1988).

$$S_2 = bF_r \left(\frac{z}{10} \right)^p \quad (4)$$

2.4.1.6 Fator estatístico (S_3)

O S_3 apoia-se em conceitos estatísticos, considerando o grau de segurança requerido e a vida útil da edificação. Segundo a NBR 6123/1988 a probabilidade de o vento exceder a velocidade básica V_0 no período de recorrência médio a ela atribuído, ou seja, em 50 anos, é de 63%, para edificações normais. A Tabela 5 apresenta os valores mínimos de S_3 para cada grupo de edificações.

Tabela 5: Valores mínimos do fator estatístico S_3

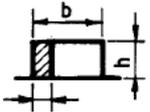
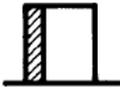
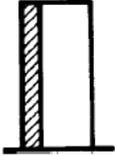
Grupo	Descrição	S_3
1	Edificações cuja ruína total ou parcial pode afetar a segurança ou possibilidade de socorro a pessoas após uma tempestade destrutiva (hospitais, quartéis de bombeiros e de forças de segurança, centrais de comunicação etc.).	1,10
2	Edificações para hotéis e residências. Edificações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

Fonte: ABNT NBR 6123 (1988).

2.4.1.7 Coeficientes de pressão

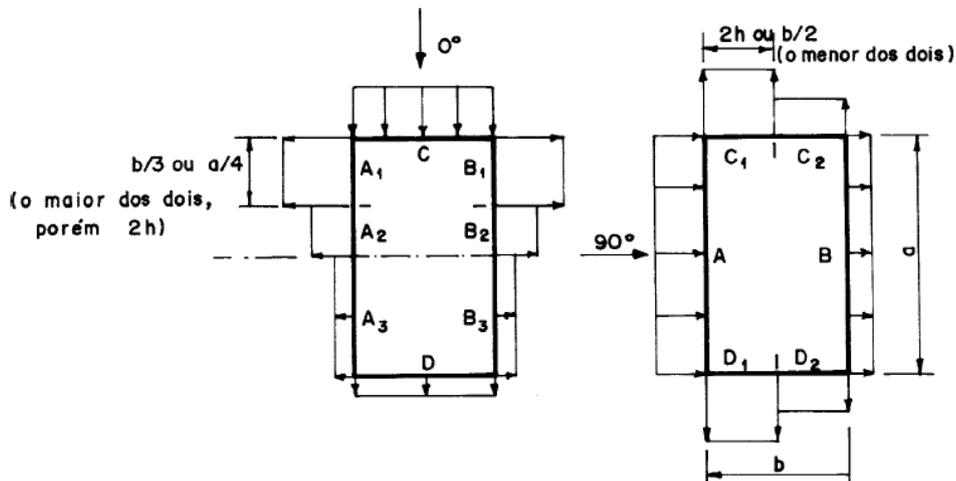
Os coeficientes de pressão e de forma externos apresentados nas Tabela 6, Tabela 7 e Tabela 8, presentes na NBR 6123 (ABNT, 1988), contemplam coberturas de uma ou duas águas, planas e paredes para edificações retangulares. Segundo a norma brasileira, zonas de alta sucção se manifestam junto às arestas de paredes e telhados, variando sua localização conforme ângulo de incidência do vento, desta forma, as tabelas apresentam valores médios de pressão externa, referentes a estas áreas críticas.

Tabela 6: Coeficientes de pressão e de forma, para paredes de edificações de planta retangular

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

Fonte: ABNT NBR 6123 (1988)

Figura 12: Legenda para a Tabela 6



Fonte: ABNT NBR 6123 (1988)

Conforme indicado em NBR 6123/1988, as tabelas abaixo fornecem os valores e os sentidos dos coeficientes de pressão, os quais englobam as ações que exercem perpendicularmente às duas faces da cobertura para os ventos com ângulo de incidência a 90° e 0°.

Tabela 7: Coeficientes de pressão e de forma, externos para coberturas com duas águas, simétricos, em edificações de planta retangular

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

Fonte: Adaptado de ABNT NBR 6123 (1988).

Conforme NBR 6123 (ABNT, 1988), para o vento incidindo a 0° em coberturas de duas águas, para as zonas denominadas I e J (Figura 13), o coeficiente de forma C_e tem os valores que seguem:

- Para $a/b = 1$: mesmo valor das partes F e H;
- Para $a/b \geq 2$: $C_e = -0,2$;
- Para $1 < a/b < 2$: interpolar linearmente.

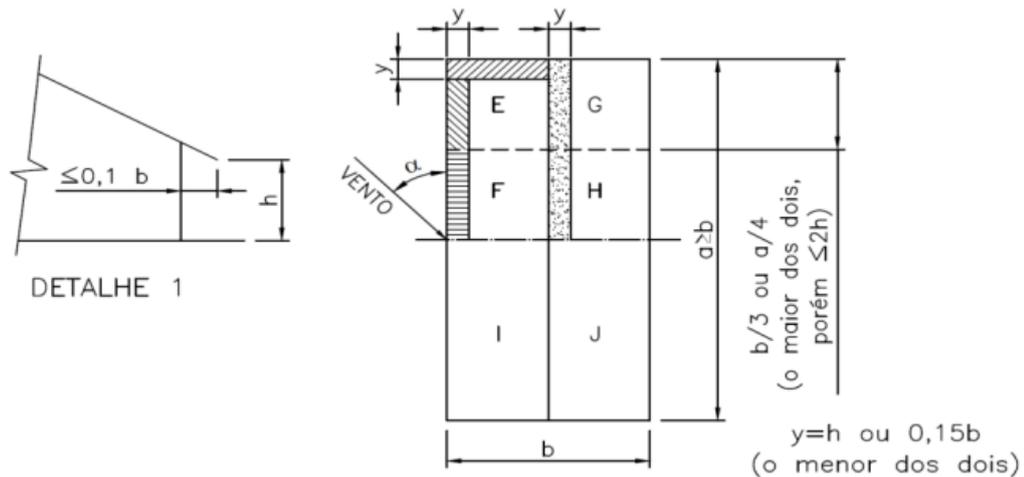
Onde:

a = Maior dimensão em planta (m);

b = Menor dimensão em planta (m);

h = Altura do pé direito mais baixo da estrutura considerada (m).

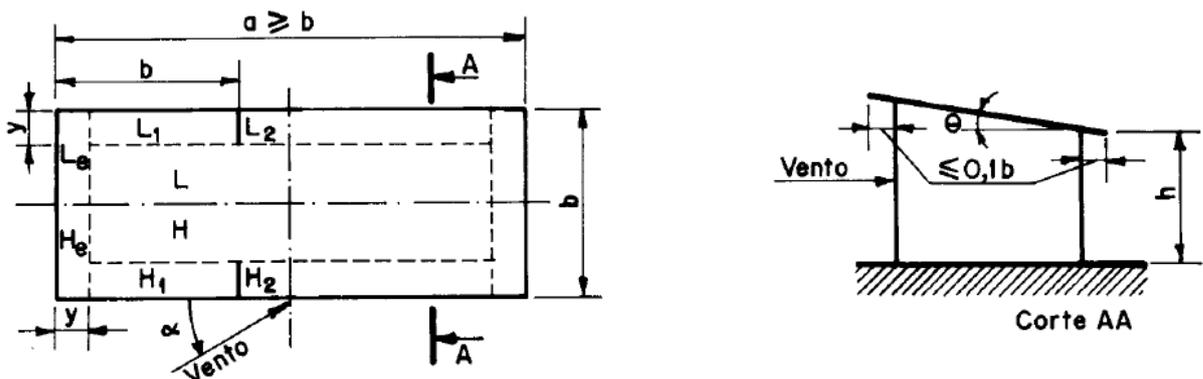
Figura 13: Legenda para a Tabela 7



Fonte: Adaptado de ABNT NBR 6123 (1988).

No caso de cobertura de uma água, a NBR 6123/1988 refere-se as superfícies H e L, como sendo para todo o respectivo quadrante.

Figura 14: Legenda para a Tabela 8



Fonte: Adaptado de ABNT NBR 6123 (1988).

Onde:

- $y = h$ ou $0,15b$ (tomar o menor dos dois valores).

Tabela 8: Coeficientes de pressão e de forma, externos para coberturas com uma água, em edificações de planta retangular, com $a/b < 2$

θ	Valores de C_e para ângulo de incidência do vento:									
	90° (C)		45°		0°		-45°		-90°	
	H	L	H	L	H e L (A)	H e L (B)	H	L	H	L
5°	-1,0	-0,5	-1,0	-0,9	-1,0	-0,5	-0,9	-1,0	-0,5	-1,0
10°	-1,0	-0,5	-1,0	-0,8	-1,0	-0,5	-0,8	-1,0	-0,4	-1,0
15°	-0,9	-0,5	-1,0	-0,7	-1,0	-0,5	-0,6	-1,0	-0,3	-1,0
20°	-0,8	-0,5	-1,0	-0,6	-0,9	-0,5	-0,5	-1,0	-0,2	-1,0
25°	-0,7	-0,5	-1,0	-0,6	-0,8	-0,5	-0,3	-0,9	-0,1	-0,9
30°	-0,5	-0,5	-1,0	-0,6	-0,8	-0,5	-0,1	-0,6	0	-0,6

θ	c_{pe} médio					
	H_1	H_2	L_1	L_2	H_e	L_e
5°	-2,0	-1,5	-2,0	-1,5	-2,0	-2,0
10°	-2,0	-1,5	-2,0	-1,5	-2,0	-2,0
15°	-1,8	-0,9	-1,8	-1,4	-2,0	-2,0
20°	-1,8	-0,8	-1,8	-1,4	-2,0	-2,0
25°	-1,8	-0,7	-0,9	-0,9	-2,0	-2,0
30°	-1,8	-0,5	-0,5	-0,5	-2,0	-2,0

(A) Até uma profundidade igual a $b/2$.

(B) De $b/2$ até $a/2$.

(C) Considerar valores simétricos do outro lado do eixo de simetria paralelo ao vento.

Nota: Para vento a 0° , nas partes I e J, que se referem aos respectivos quadrantes, o coeficiente de forma C_e tem os seguintes valores: $a/b = 1$, mesmo valor das partes H e L $a/b = 2 - C_e = -0,2$. Interpolarmos linearmente para valores intermediários de a/b .

Fonte: ABNT NBR 6123 (1988).

Para os coeficientes aerodinâmicos aplicados em coberturas curvas, a NBR 6123 (ABNT, 1988) tem um anexo específico, o ANEXO E (ABNT, 1988, pg. 50). A norma ressalta que as pressões externas para este tipo de superfície curva dependem da localização dos pontos de separação do fluxo, que variam conforme diversos parâmetros (velocidade do vento, características da turbulência, dimensões da edificação, curvatura e rugosidade do telhado).

Os coeficientes foram determinados a partir de ensaios em túnel de vento, com fluxo uniforme e baixa turbulência e superfície externa rugosa. A Tabela 9 apresenta os coeficientes de pressão para um vento soprando perpendicularmente à geratriz da

cobertura, que é dividida em seis partes iguais (Figura 15), onde os coeficientes são constantes.

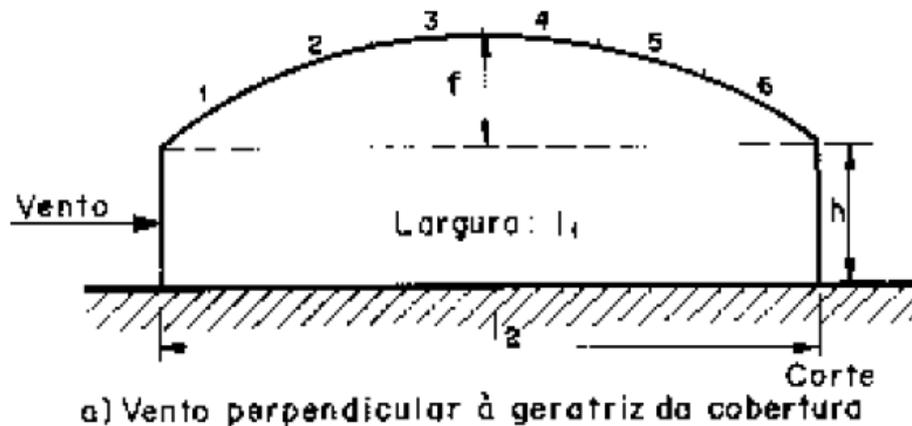
Tabela 9: Coeficientes de pressão externa, para vento perpendicular a geratriz da

f/l_2	h/l_2	c_{pe} para a parte					
		1	2	3	4	5	6
1/5	0	+0,3	-0,3	-0,6	-0,7	-0,6	-0,2
	1/8	-0,5	-0,5	-0,7	-0,7	-0,5	-0,2
	1/4	-0,9	-0,6	-0,8	-0,8	-0,4	-0,2
	1/2	-1,2	-0,7	-0,9	-0,8	-0,3	-0,2
	1	-1,4	-0,8	-0,9	-0,9	-0,4	-0,4
	5	-1,8	-1,0	-1,1	-1,2	-0,8	-0,7
1/10	1/8	-1,0	-0,4	-0,4	-0,4	-0,4	-0,3
	1/4	-1,2	-0,5	-0,4	-0,4	-0,4	-0,3
	1/2	-1,5	-1,0	-0,7	-0,5	-0,4	-0,3
	1	-1,6	-1,0	-0,8	-0,6	-0,4	-0,3

cobertura

Fonte: ABNT NBR 6123 (1988).

Figura 15: Partes de consideração dos coeficientes de pressão externos sobre superfície curva



Fonte: ABNT NBR 6123 (1988).

2.5 DINÂMICA DOS FLUÍDOS COMPUTACIONAIS (DFC)

São três os principais métodos de aplicação da Dinâmica dos Fluidos Computacionais disponíveis para a engenharia do vento computacional: o RANS (*Reynolds Averaged Navier–Stokes*), o DNS (*Direct Numerical Simulation*) e o método de Simulação de Grandes Escalas (LES – *Large Eddy Simulation*). Segundo Lu, et al. (2012), o mais bem sucedido dos métodos é o último citado, o LES, pois é capaz de

realizar simulações completas de fluxos de Reynolds elevados e fornece informações detalhadas sobre fenômenos não periódicos e pressões localizadas.

Tamura, Nozawa e Kondo (2008), sintetizaram considerações importantes no que se refere a aplicabilidade dos métodos LES e RANS. O LES pode simular ventos (turbilhões) instáveis e de grande escala usando uma abordagem de marcação do tempo, por consequência, é possível obter séries temporais das pressões e forças do vento, e prever as cargas de vento tanto em revestimentos quanto em estruturas. Já o método RANS pode simular tempos médios de fluxos e fluxos instáveis nos quais grandes vórtices são gerados periodicamente na esteira das edificações. O uso de RANS deve ser limitado a estimar o tempo médio das forças de vento em edifícios (TAMURA; NOZAWA; KONDO, 2008).

Yang, et al. (2008), ressaltam dois erros comuns nas análises feitas através da engenharia do vento computacional (*Computational Wind Engineering – CWE*): erros durante a modelagem, decorrente das condições de contorno adotadas e modelos de turbulência aplicados, e ainda, erros relativos ao processamento da simulação numérica, devido a capacidade da máquina para executar análises e cálculos complexos e o tamanho do domínio computacional para lidar com a técnica.

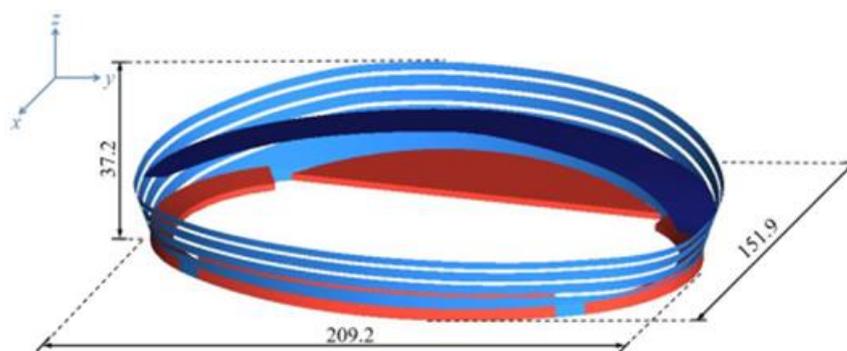
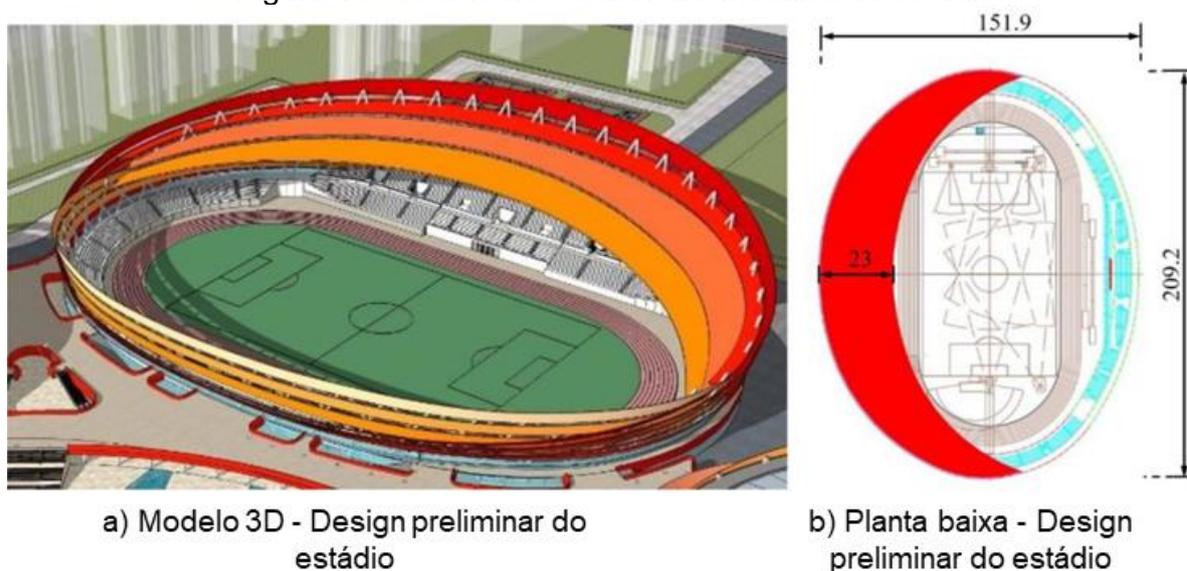
Para amenizar tais erros, os autores ressaltam que modelar corretamente a camada limite de equilíbrio é fundamental para a exatidão dos resultados numéricos de distribuição de pressão, e quanto ao modelo de turbulência, este deve ter parâmetros cuidadosamente considerados, para que desta forma, constituam fielmente as características específicas do fluxo turbulento estudado (YANG, et al., 2008).

2.5.1 Aplicação do método DFC na reprodução de ensaios de túnel de vento

Guo, Zhu e Hu (2020), utilizaram de simulações computacionais para analisar os fatores de pressões na cobertura metálica leve, flexível e em balanço de um estádio em formato de lua crescente (Figura 16a e Figura 16b), sob diferentes ângulos de ataque. O estudo, localizado na China, teve como base a Norma Regulamentadora Chinesa, GB 50009-2012 - *Load code for the design of building structures*, que não contempla em seu escopo fatores de forma e cargas de vento para cobertura em balanço de grande envergadura e de geometria complexa.

Desta forma, o teste numérico se justifica, através da aplicação do modelo de turbulência $k-\epsilon$, considerado de ampla aplicação, de cálculo econômico e precisão razoável e partindo de um modelo numérico e geometria simplificada (Figura 16c) para garantir exatidão de cálculo.

Figura 16: Geometria - Cobertura metálica do estádio



c) Modelo de túnel de vento utilizado no cálculo de simulação computacional

Fonte: Guo; Zhu; Hu (2020).

O uso da simulação computacional para verificação das cargas e pressões dinâmicas do vento se mostrou satisfatório em todos os ângulos de ataque ao vento analisados. Resultando em fatores de forma máximos de sinal negativo, indicando comportamento de sucção no telhado metálico, desempenho já esperado por conta das características geométricas da cobertura. Por outro lado, algumas particularidades ligadas as pressões do vento local na microrregião não foram

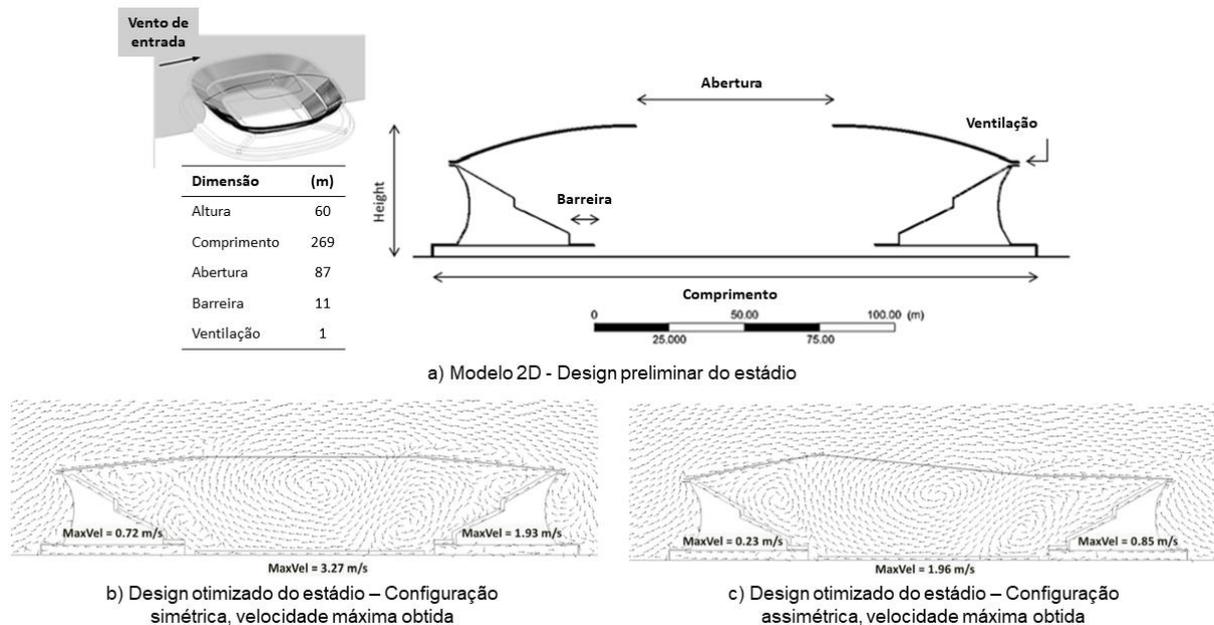
analisadas, devido a deficiências do modelo de cálculo neste quesito (GUO; ZHU; HU, 2020).

2.5.2 Uso de DFC como aliado de projeto

Outra aplicação relevante para o método de simulação computacional é a adoção da técnica para prever os fenômenos de escoamento do vento para otimizar soluções de design na geometria de coberturas de um estádio de futebol. Esta foi a pesquisa desenvolvida por Sotofasiou, Hughes e Ghani (2017), que combinaram dois métodos computacionais, sendo estes: dinâmica dos fluidos computacionais e o método da superfície de resposta (*Response Surface Methodology – RSM*).

Os autores (SOTOFASIOU; HUGHES; GHANI, 2017), investigaram parâmetros de conforto térmico e otimizaram a geometria da cobertura metálica leve para um modelo de estádio bidimensional com capacidade para 60.000 mil pessoas e dimensões de 60 x 269 m (H x L), conforme indicado na Figura 17a. As geometrias otimizadas estão apresentadas nas Figura 17b e Figura 17c, sendo a primeira com configuração simétrica com ambos os lados da cobertura de mesma altura e inclinação e a segunda de configuração assimétrica.

Figura 17: Configuração geométrica do estádio analisado



Fonte: Adaptado de Sotofasiou; Hughes; Ghani (2017).

A verificação da otimização da geometria foi fundamentada em termos de velocidade máxima e distribuição de fluxo interna do vento. A partir da análise dos resultados, foi possível reduzir as velocidades do vento na cobertura simétrica em 26,5%, 15,4% e 25,9% nos níveis dos telespectadores da parte da frente e de trás, bem como na área de inclinação da cobertura, respectivamente. Para a cobertura assimétrica as reduções foram de 76,5%, 62,7% e 55,6% (SOTOFASIOU; HUGHES; GHANI, 2017).

Os pesquisadores apontam que na microrregião das arquibancadas, a velocidade do vento e o fluxo de ar é determinado majoritariamente pelo ar induzido das aberturas presentes na cobertura. Ainda, foi possível verificar uma considerável economia de tempo e dinheiro ao adotar técnicas de simulação computacional (SOTOFASIOU; HUGHES; GHANI, 2017).

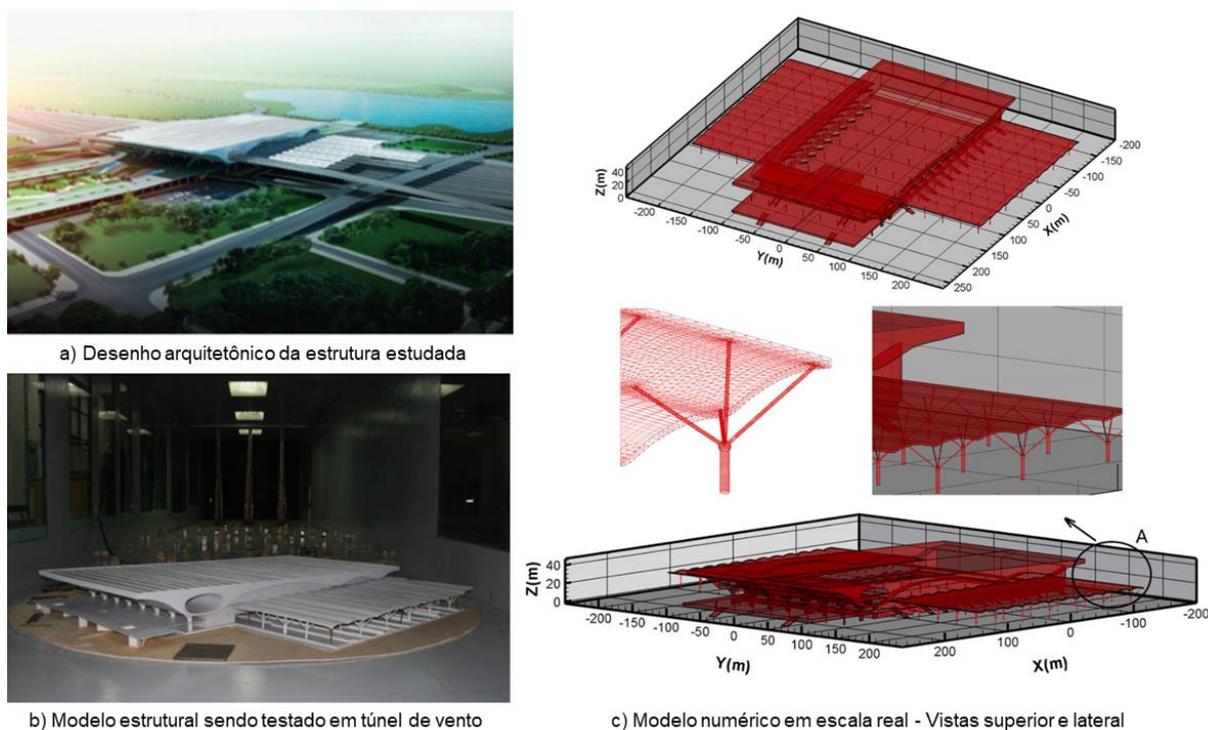
2.5.3 Técnicas combinadas – Túnel de vento e DFC

Em comparações feitas por Lu, et al. (2012), foram feitos usos de técnicas de túnel de vento e simulações LES, para estimar os efeitos do vento em uma cobertura metálica complexa e de grande vão, com projeto previsto para ser executado na China, tratando-se de uma nova estação de trem (Figura 18a). Para esse estudo, optou-se por modelar a estrutura a partir da escala real, adotando um número de Reynolds considerado alto (10^8).

Em paralelo à investigação numérica, medições de pressões em torno de todo o edifício foram conduzidas em ensaios de túnel de vento de camada limite, realizados na Universidade de Hunan, seguindo coeficientes de rugosidade superficial presentes na Norma Regulamentadora Chinesa de vento GB 50009-2001, a partir de um modelo do edifício com escala de 1:200, conforme Figura 18b, e ângulos de ataque do vento variando de 0° a 360° , com incrementos de 15° no sentido horário do relógio (LU, et al., 2012).

A simulação numérica computacional baseada no método de LES, foi proposta a partir de um modelo de escala real para um campo de escoamento de três dimensões (Figura 18c), alguns detalhes estruturais específicos, como escadas e pilares foram considerados. Foram utilizadas 32 CPUs em paralelo para o cálculo em grande escala, com precisão de 0,05 s. Deste modo, foram obtidos 26,5 s de tempo de resistência de fluxo para a estrutura estudada (LU, et al., 2012).

Figura 18: Modelos de ensaio para estrutura de grandes vãos



Fonte: Lu, et al. (2012).

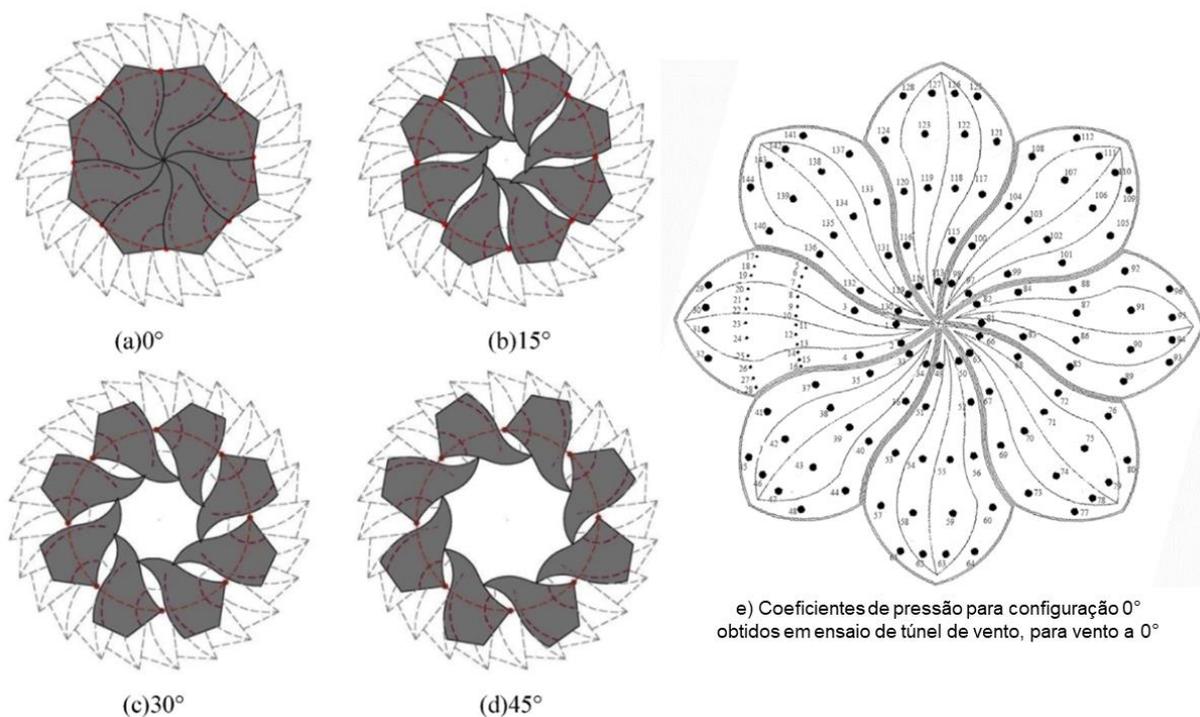
Como resultado da comparação, Lu, et al. (2012), concluíram que em ambos os testes realizados, o desempenho obtido pela simulação computacional foi satisfatório e converge com o ensaio real em túnel de vento de camada limite. Foi possível concluir que o DFC pode captar gradientes de pressão mais precisos em áreas muito pequenas, isso pode ser explicado devido a quantidade limitada de sensores usados no teste de túnel de vento. Observou-se ainda, que os campos com maiores velocidades de vento possuem também as maiores pressões no telhado.

Já Liu, et al. (2018), para determinar as ações e cargas do vento para uma cobertura metálica de um estádio de futebol com telhado retrátil, utilizaram técnicas conjuntas com experimentos de túnel de vento e simulações de dinâmica dos fluidos computacionais, pelo método de LES. Ainda, verificou-se a eficácia e confiabilidade de ambas as técnicas aplicadas.

O estádio estudado, também localizado na China, é composto de 8 módulos estruturais em formato de pétalas, a cobertura retrátil funciona em quatro ângulos diferentes, 0° , 15° , 30° e 45° , conforme demonstrado nas Figura 19a, Figura 19b, Figura 19c e Figura 19d (LIU, et al., 2018).

Para o ensaio de túnel de vento, foram elaborados modelos em escala de 1:200 para os quatro estágios de abertura da cobertura, e os ângulos de ataque de vento estudados foram de 0° , 90° , 180° e 270° . Os resultados dos coeficientes de pressão para configuração 0° e com vento de ataque de 0° são expostos na Figura 19e (LIU, et al., 2018).

Figura 19: Quatro estágios de abertura do estágio retrátil

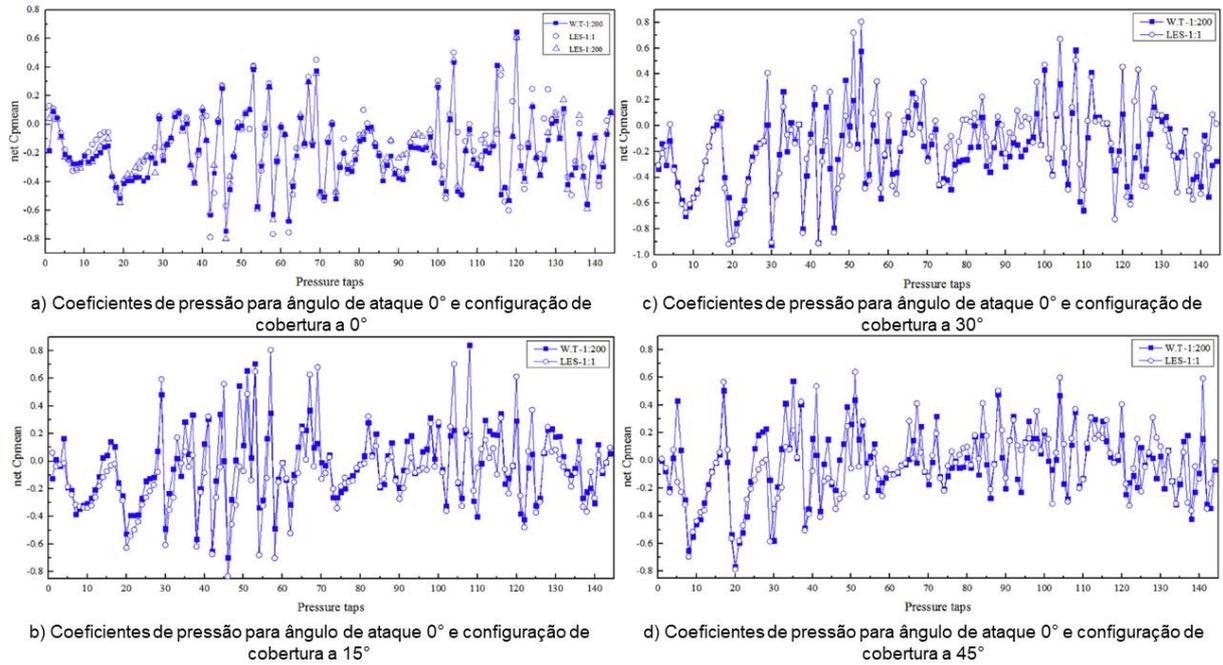


e) Coeficientes de pressão para configuração 0° obtidos em ensaio de túnel de vento, para vento a 0°

Fonte: Liu, et al. (2018).

Já para as simulações computacionais através do método LES, os coeficientes de pressão obtidos foram satisfatórios e conversaram com os obtidos em túnel de vento, porém a simulação computacional falhou em captar valores máximos e mínimos, devido ao número limitado de pontos nos modelos em escala. Ainda, por se tratar de um telhado complexo com 4 configurações diferentes, por óbvio os coeficientes de pressão obtidos são distintos. O método LES, provou ser eficaz para avaliação dos efeitos do vento em edifícios de geometria complexa e sujeitos a fluxos turbulentos de elevado número de Reynolds, conforme demonstrado nos gráficos na Figura 20 abaixo (LIU, et al., 2018).

Figura 20: Comparação coeficientes de pressão: túnel de vento X DFC

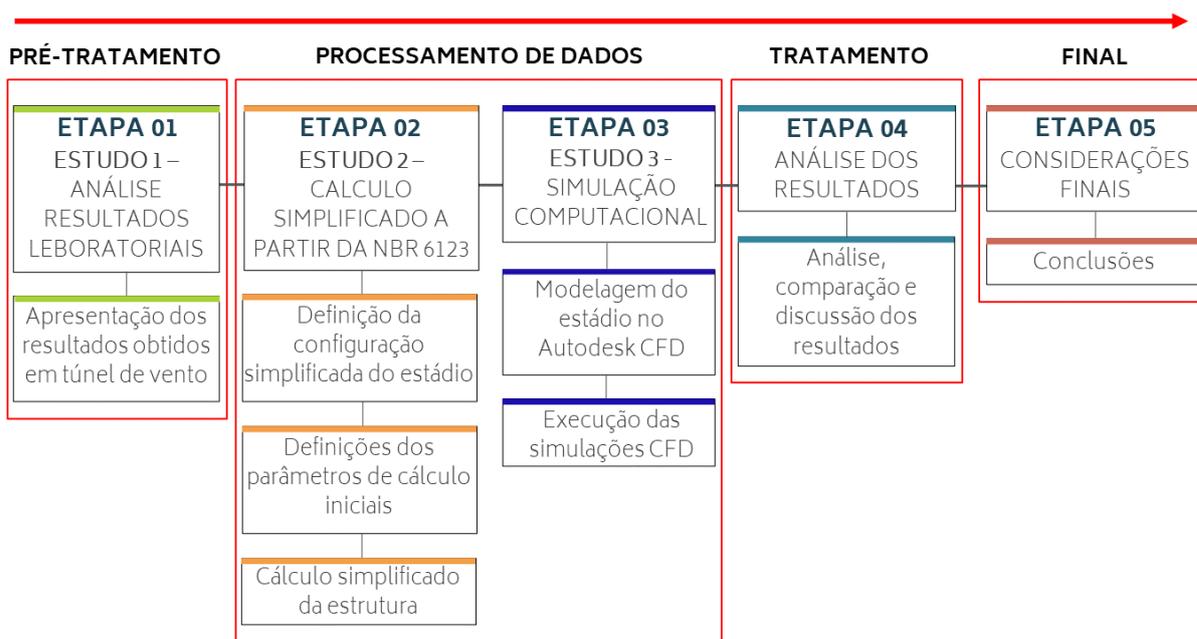


Fonte: Liu, et al. (2018).

3 METODOLOGIA

Considerando os objetivos propostos, a Figura 21 apresenta o fluxograma das etapas adotadas para o programa experimental desta pesquisa. Que está dividida em 3 métodos de estudo, conforme especificados abaixo.

Figura 21: Fluxograma das etapas de pesquisa



Fonte: Elaborado pela autora.

Na Etapa 01, na fase de pré-tratamento dos dados, foram apresentados os resultados dos ensaios de túnel de vento da qual a estrutura do Estádio Beira Rio já foi submetida, realizados no Laboratório de Aerodinâmica das Construções – LAC, da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), no ano de 2009. Os ensaios foram contratados pela empresa responsável pelo projeto estrutural, a qual cedeu os resultados para que esta pesquisa fosse viabilizada.

Na Etapa 2 foram realizados os cálculos para obtenção dos coeficientes médios de pressões externas e internas, e efetivamente as pressões resultantes das ações do vento atuantes na cobertura metálica do estádio, tomando como base os procedimentos da ABNT NBR 6123/1988 descritos no item 2.4 desta pesquisa. Haja vista que a norma não apresenta procedimentos para coberturas com o formato do Estádio da Beira Rio, simplificou-se sua geometria, admitindo-se somente um dos 65 módulos da cobertura do estádio, visando tornar o procedimento mais otimizado.

A simulação computacional da cobertura ocorreu na Etapa 3, inicialmente, a estrutura total do estádio foi modelada em 3D, porém por falta de recursos computacionais, tornou-se impossível o processamento dos dados, que exigiam um supercomputador extremamente potente. Portanto, apenas quatro módulos foram submetidos aos testes de dinâmica dos fluídos computacionais por meio do programa *Autodesk CFD*, e desta maneira, verificou-se os resultados das pressões médias sobre a geometria curva do telhado.

Na Etapa 4, foi feito o tratamento dos dados, onde foram produzidas análises comparativas dos resultados das pressões estáticas sob a cobertura, obtidos por meio dos três métodos distintos: o ensaio de túnel de vento; pelo procedimento de cálculo da NBR 6123/1988 e; através da simulação computacional. As respostas para cada estudo foram validadas e as análises feitas levando em consideração as similaridades dos resultados. Foi estabelecida uma discussão quanto a eficiência, diferenças e aplicabilidade das técnicas utilizadas, bem como a influência da geometria nos resultados dos coeficientes de pressão do vento sobre a cobertura.

Por fim, na Etapa 5, já na fase final da pesquisa, foram apresentadas as conclusões para o estudo proposto.

3.1 CARACTERÍSTICAS DA ESTRUTURA ANALISADA

A estrutura estudada corresponde ao Estádio de futebol Beira Rio, com capacidade para 50.842 pessoas. O estádio, que sediou jogos da Copa do Mundo FIFA em 2014, passou por reformas de modernização entre os anos de 2010 e 2014 para atender a padrões internacionais.

O projeto, executado pela Hype Studio Arquitetura e calculado pela Simon Engenharia, contemplou uma nova cobertura, constituída de módulos inovadores de estrutura metálica e coberto por uma membrana de PTFE (HYPE STUDIO, [2022?]; ESTÁDIO BEIRA RIO, [2022?]). Na falta de uma norma específica para segurança das edificações, coube a projetista fixar a vida útil da edificação, de acordo com as características da estrutura, neste caso, foi adotado um período de 100 anos. Na Figura 22, são apresentados aspectos gerais e perspectivas artísticas da estrutura do estádio.

Figura 22: Desenhos – Perspectivas da cobertura do Estádio Beira Rio



Fonte: LAC (2009).

3.1.1 Dimensões da cobertura

As características dimensionais indicam uma estrutura total do estádio com área construída de 74.830,17 m². A cobertura foi projetada com aproximadamente 280 m de comprimento e 223 m de largura. Sendo composta por 65 folhas metálicas (módulos), caracterizadas por terem 60 m da base até a ponta da estrutura, além de 40 m de balanço. Abaixo, é apresentada uma tabela resumo com as principais dimensões do estádio e da cobertura.

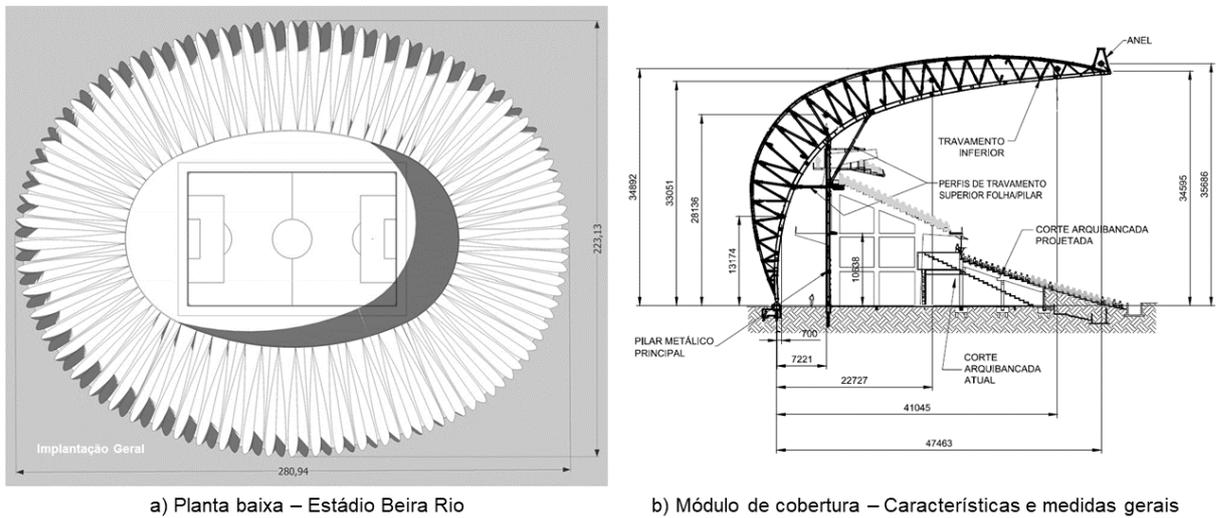
Tabela 10: Dimensões e características principais do Estádio Beira Rio

Estrutura	Parâmetros	Medidas
Estádio	Área	74.830,17 m ²
	Comprimento	280,94 m
	Largura	223,13 m
Cobertura / Módulo	Altura	35,47 m
	Comprimento em balanço	40,00 m

Fonte: Elaborado pela autora.

A Figura 23, mostra a planta baixa simplificada, bem como um desenho com as principais propriedades do módulo metálico do qual a cobertura é composta.

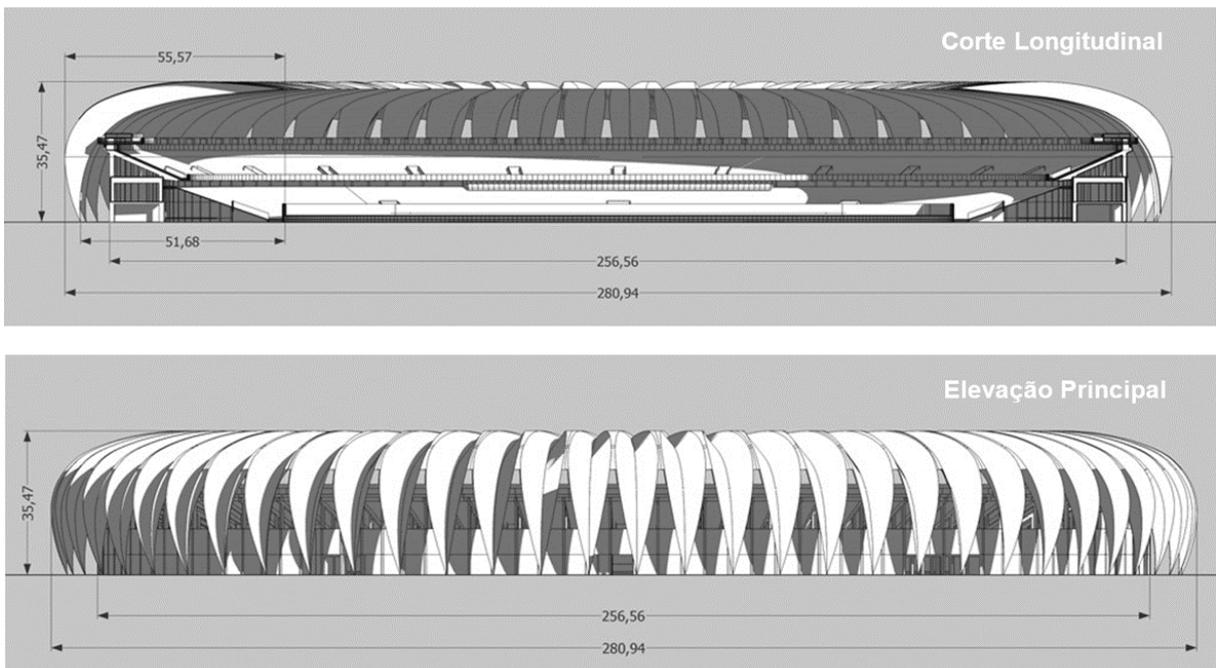
Figura 23: Principais elementos que compõem a cobertura



Fonte: a) LAC (2009), b) Simon Engenharia (2013).

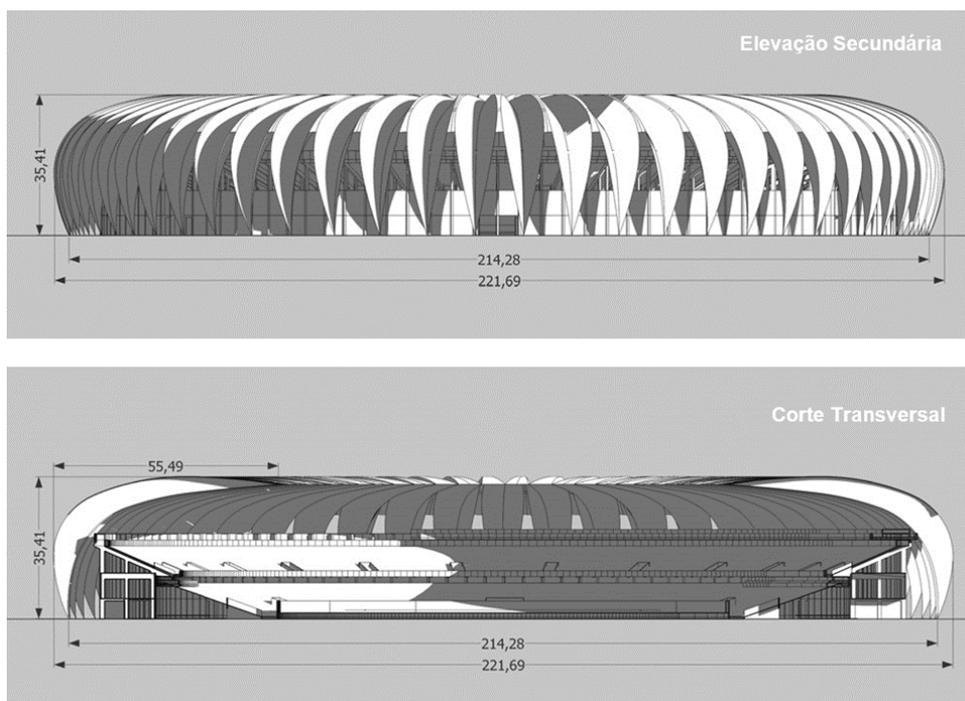
As Figura 24 e Figura 25 apresentam os cortes longitudinais de ambas as fachadas do estádio.

Figura 24: Corte longitudinal – Lado de maior dimensão



Fonte: LAC (2009).

Figura 25: Corte longitudinal – Lado de menor dimensão



Fonte: LAC (2009).

3.1.2 Entorno da estrutura construída

A descrição do entorno é necessária para a definição das ações do vento. O estádio fica localizado em Porto Alegre, na Av. Padre Cacique - bairro Praia de Belas. Zona fortemente desenvolvida da cidade, bem arborizada, com muitos prédios e residências, que se encontra a beira do Rio Guaíba. Levando em consideração as características do bairro em que o empreendimento está inserido, seu entorno é descrito por diferentes propriedades.

De um lado, a construção faz divisa com o Rio Guaíba, enquanto nas outras faces, parques com árvores densas e de médio porte dividem espaço com muitas construções e casas baixas, relativamente espaçadas entre si. O terreno da região é plano, sem ondulações significativas ou depressões acentuadas. Logo no entorno imediato, o estádio compartilha o terreno com um ginásio poliesportivo de médio porte.

Nas imagens abaixo, comparou-se o entorno da estrutura em períodos diferentes, são apresentadas fotos do no ano de 2009, antes da reforma, e em seguida, fotos atuais de 2022. Como não houve mudanças significativas no entorno

imediate, as considerações e classificações utilizadas na época do estudo se provaram eficientes para serem aplicadas atualmente.

Figura 26: Imagens de satélite do entorno do Estádio



a) Imagem de satélite do entorno do Estádio – Ano de 2009

b) Imagem de satélite do entorno do Estádio – Ano de 2022

Fonte: a) LAC (2009), b) *Google Earth* [2022?].

Figura 27: Entorno imediato do Estádio



a) Entorno imediato do Estádio – Ano de 2009

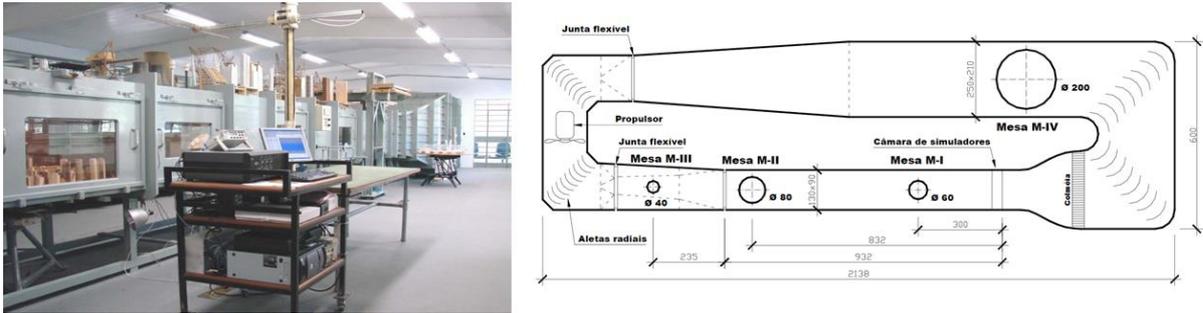
b) Entorno imediato do Estádio – Ano de 2022

Fonte: a) LAC (2009), b) Estádio Beira Rio [2022?].

3.2 ESTUDO 1: ENSAIOS DE TÚNEL DE VENTO

Os ensaios de túnel de vento foram executados pela UFRGS, no Túnel de Vento Prof. Joaquim Blessmann (Figura 28) que pertence ao LAC, durante a fase de projeto para a reforma do Estádio Beira Rio, no ano de 2009. Trata-se de um túnel de vento de camada limite de retorno fechado, que permite a simulação das principais características de ventos naturais.

Figura 28: Túnel de Vento Prof. Joaquim Blessmann (medidas em cm)



Fonte: LAC (2009).

O modelo reduzido da cobertura foi construído em escala de 1/500. A face externa foi instrumentada com 956 tomadas de pressão e na face interna foram colocadas 528, totalizando 1.484. Estas foram posicionadas de modo a possibilitar um levantamento da distribuição das pressões instantâneas ao longo de toda a edificação, a cada 15° de incidência do vento, considerando-se ensaios adicionais com a simulação detalhada da topografia local. Fotografias do modelo ensaiado isoladamente e rodeado da topografia, são mostradas na Figura 29.

Figura 29: Modelo da cobertura do Estádio Beira Rio no interior do túnel de vento



Fonte: LAC (2009); Loredo-Souza, et al. (2010).

Para o ensaio, foram simulados todos os detalhes significativos da edificação real, visando que as condições de semelhança geométrica fossem preservadas. Ainda assim, algumas simplificações ocorreram, para que certos detalhes arquitetônicos não afetassem localmente as medidas de determinadas tomadas de pressão, principalmente devido aos efeitos do número de Reynolds (Re) na distribuição de pressões sobre superfícies curvas. Foram reproduzidas as características topográficas do entorno do terreno na mesma escala do modelo do estádio, de modo que os cenários de escoamento correspondessem o mais fielmente às condições reais que a edificação testada seria exposta quando construída.

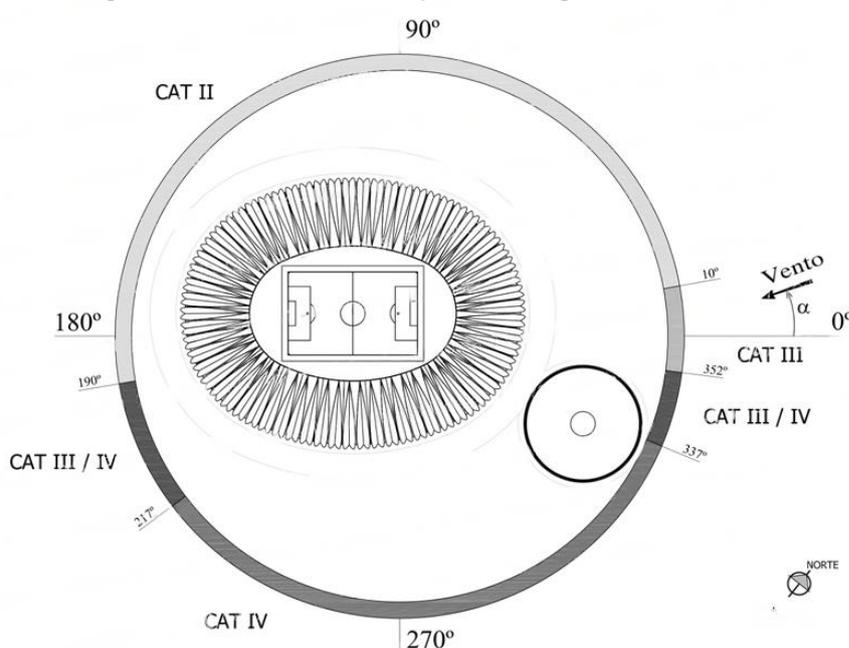
Para o ensaio, a seguinte conversão de sinais foi adotada:

- Coeficientes positivos: sobrepressão (+);
- Coeficientes negativos: sucção (-).

3.2.1 Classificação da rugosidade do terreno

Com base nas características do entorno, definiram-se as categorias de rugosidade conforme NBR 6123 (ABNT, 1988), sendo estas classificadas como de I a IV. Na Figura 30, é possível observar a referência para os ângulos de incidência, bem como, a classificação das categorias de rugosidades para o entorno da edificação, que foram utilizadas nos ensaios.

Figura 30: Rugosidade e referência para o ângulo de incidência do vento

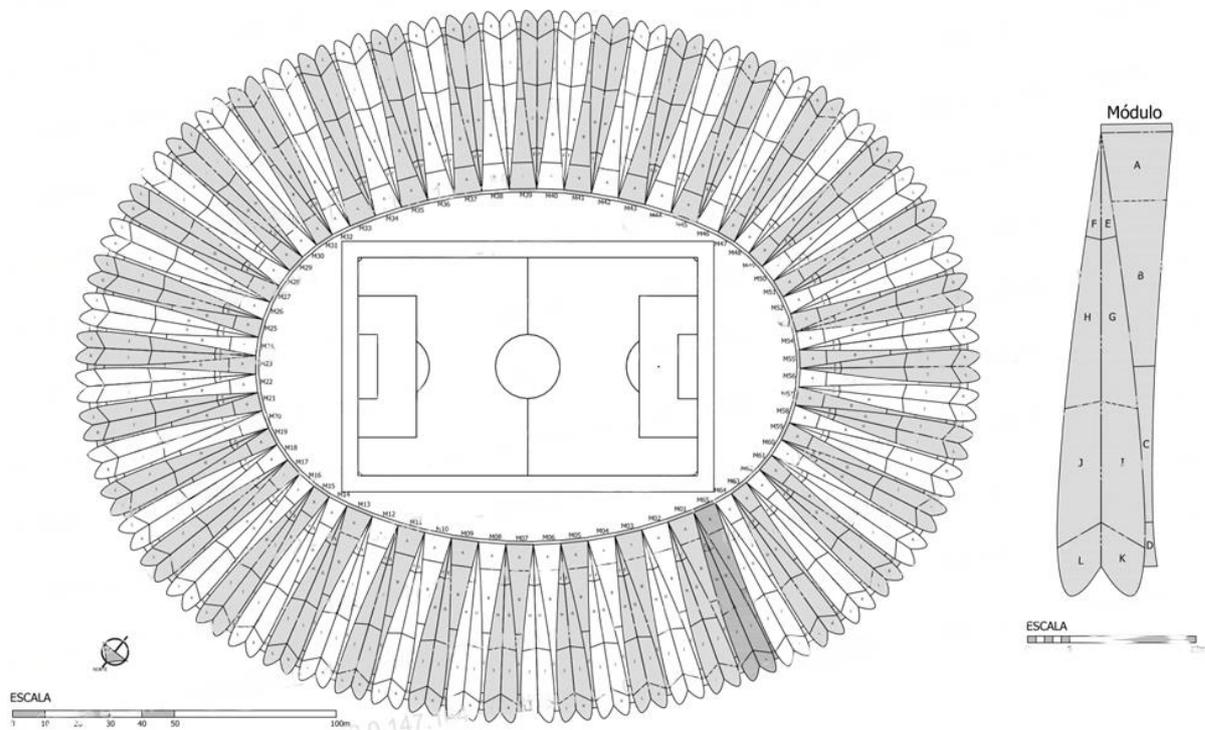


Fonte: LAC (2009).

3.2.2 Ações estáticas

Os resultados obtidos através dos testes de túnel de vento, são apoiados por padrões de carregamento para ventos oriundos de tormentas EPS e para um vento simulando uma tormenta TS, tomando como base fatores de pico medidos nos ensaios em túnel de vento e admitindo correlações distintas entre as pressões medidas na face externa e interna. Os 65 módulos da cobertura, foram divididos em zonas de atuação dos coeficientes de pressão C , conforme Figura 31 abaixo.

Figura 31: Localização das zonas para aplicação dos coeficientes de forma C



Fonte: LAC (2009).

3.2.2.1 Carregamento do vento – Tormentas EPS

A partir de simulações de vento do tipo tormenta EPS, foram definidos 5 padrões de carregamento, calculados em termos dos coeficientes de forma resultantes C , eles correspondem a distintas combinações dos coeficientes externos e internos medidos nos ensaios. As combinações utilizadas são as que seguem:

Carregamento I: $C_{\text{médio externo}} - C_{\text{médio interno}}$

Carregamento II: $C_{\text{pico máx. externo}} - C_{\text{pico mín. interno}}$

Carregamento III: $C_{\text{pico mín. externo}} - C_{\text{pico máx. interno}}$

Carregamento IV: $C_{\text{pico máx. externo}} - C_{\text{pico máx. interno}}$

Carregamento V: $C_{\text{pico mín. externo}} - C_{\text{pico mín. interno}}$

Para estimar propriamente os carregamentos sobre a estrutura, se seguiram os parâmetros compreendidos pela NBR 6123 (ABNT, 1988), tomando como base, as categorias do terreno (Figura 30). Os resultados são apresentados na Tabela 11.

Tabela 11: Parâmetros de cálculo e valores obtidos

Parâmetros de Cálculo	Valores Obtidos
Velocidade Básica do Vento (V_0)	$V_0 = 46 \text{ m/s}$ (CAT. II, 10 m)
Fator Topográfico (S_1)	$S_1 = 1,0$
Fator de Rugosidade do Terreno (S_2)	S_2 (5 s, 40 m, CAT. II, Classe B) = 1,11
	S_2 (5 s, 40 m, CAT. III, Classe B) = 1,06
	S_2 (5 s, 40 m, CAT. IV, Classe B) = 0,99
	S_2 (600 s, 40 m, CAT. II) = 0,85
	S_2 (600 s, 40 m, CAT. III) = 0,77
	S_2 (600 s, 40 m, CAT. IV) = 0,67
Fator Estatístico (S_3)	$S_3 = 1,0$
Velocidades de Projeto (V_k)	V_k (5 s, 40 m, CAT. II, Classe B) = 51,1 m/s
	V_k (5 s, 40 m, CAT. III, Classe B) = 48,8 m/s
	V_k (5 s, 40 m, CAT. IV, Classe B) = 45,5 m/s
	V_k (600 s, 40 m, CAT. II) = 39,1 m/s
	V_k (600 s, 40 m, CAT. III) = 35,4 m/s
	V_k (600 s, 40 m, CAT. IV) = 30,8 m/s
Pressões Dinâmicas de Projeto (q_k)	q_k (5 s, 40 m, CAT. II, Classe B) = 1,60 kPa
	q_k (5 s, 40 m, CAT. III, Classe B) = 1,46 kPa
	q_k (5 s, 40 m, CAT. IV, Classe B) = 1,27 kPa
	q_k (600 s, 40 m, CAT. II) = 0,94 kPa
	q_k (600 s, 40 m, CAT. III) = 0,77 kPa
	q_k (600 s, 40 m, CAT. IV) = 0,58 kPa

Fonte: Adaptado de LAC (2009).

3.2.2.2 Carregamento do vento – Tormentas TS

Para ventos característicos de tormentas TS, foram indicados dois padrões de carregamento, oriundos de uma simulação simplificada de ventos TS tipo micro explosão. A metodologia aplicada para tal definição, foi a mesma dos carregamentos do tipo EPS.

Carregamento VI: $C_{\text{pico mín. externo}} - C_{\text{pico máx. interno}}$

Carregamento VII: $C_{\text{pico máx. externo}} - C_{\text{pico mín. interno}}$

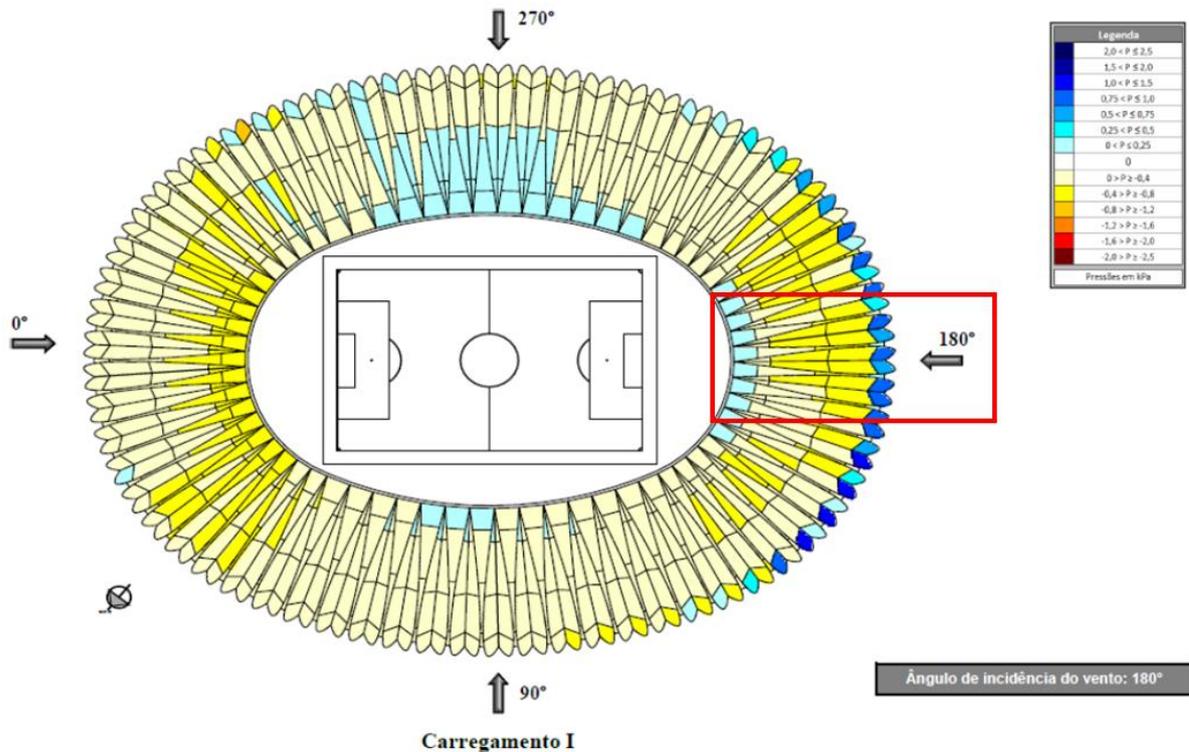
3.2.2.3 Pressões locais na cobertura

No ensaio elaborado pelo LAC em 2009, as pressões externas e internas foram medidas diretamente no túnel de vento, por meio de transdutores elétricos de pressão. Foram registradas as pressões para cada ponto de medição indicado, sendo obtidos os valores mínimos, médios, máximos e *rms* (raiz média quadrada) dos coeficientes de pressão. Os valores das pressões dinâmicas foram multiplicados pelos coeficientes de forma obtidos: 5 segundos para o Carregamento I e 10 minutos para os Carregamentos II a V.

Para esta pesquisa, apenas as pressões do Carregamento I foram consideradas, por se tratar das combinações feitas exclusivamente com os coeficientes médios de pressão, visto que coeficientes máximos e mínimos não podem ser determinados pelos métodos da NBR 6123 (ABNT, 1988) e DFC, não sendo passível de comparação. Os resultados das pressões incidentes na cobertura para o Carregamento I, considerando a topografia do terreno e um ângulo de incidência do vento a 180° , são apresentados abaixo.

Figura 32: Diagrama de distribuição de pressões – CARREGAMENTO I (180°)

Cobertura do Estádio Beira-Rio
Pressões causadas pela ação do vento



Fonte: LAC (2009).

3.3 ESTUDO 2: NORMA BRASILEIRA – NBR 6123/1988

Nesta etapa de pesquisa, foram aplicadas as informações contidas na NBR 6123 (ABNT, 1988) para a determinação dos coeficientes médios das pressões do vento sob a cobertura do estádio, bem como para as pressões estáticas, com base na estrutura e dimensões já apresentadas.

3.3.1 Definição da geometria simplificada

Para a obtenção dos coeficientes de pressões e de forma, apenas um componente, dos 65 módulos, foi estudado. Foram definidos 6 modelos de geometria para representar o módulo do Estádio Beira Rio. Destes, 2 são referentes a modelos de cobertura de duas águas planas, outros 2 para coberturas de uma água plana e ainda, 2 modelos representam a geometria curva das folhas do estádio, possibilitando que os coeficientes médios de pressão presentes na NBR 6123 (ABNT, 1988) fossem aplicados.

3.3.1.1 Geometria simplificada - Cobertura de duas águas planas

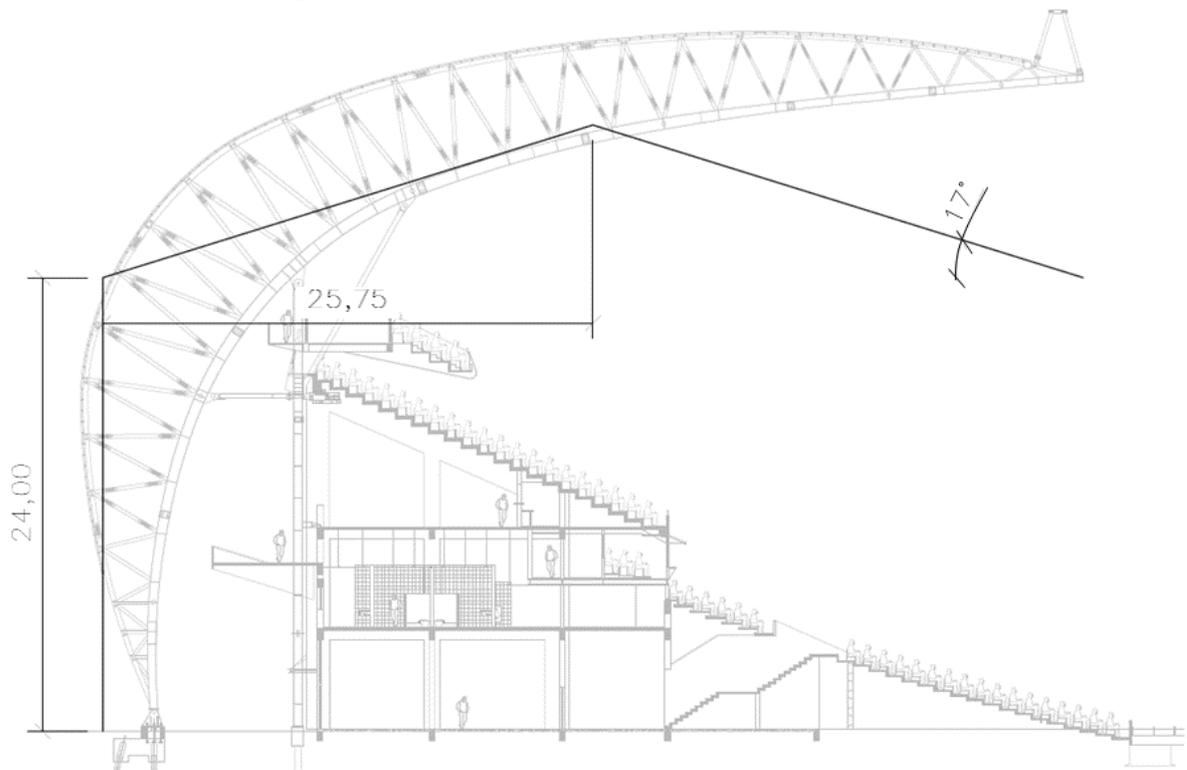
A definição dos modelos para coberturas de duas águas foi baseada no módulo em curva original, cada amostra atende a alguma característica existente na cobertura. As principais informações quanto as dimensões destes módulos são apresentadas na Tabela 12, enquanto as geometrias de cada um são expostas nas Figura 33 e Figura 34.

Tabela 12: Características – Modelo de cobertura de duas águas 01 e 02

Modelo 01	Modelo 02
$h = 24,00 \text{ m}$	$h = 34,00 \text{ m}$
$a = 51,50 \text{ m}$	$a = 51,50 \text{ m}$
$b = 12,00 \text{ m}$	$b = 12,00 \text{ m}$
$\theta = 17,00^\circ$	$\theta = 6,00^\circ$
$h/b = 2,00$	$h/b = 2,83$

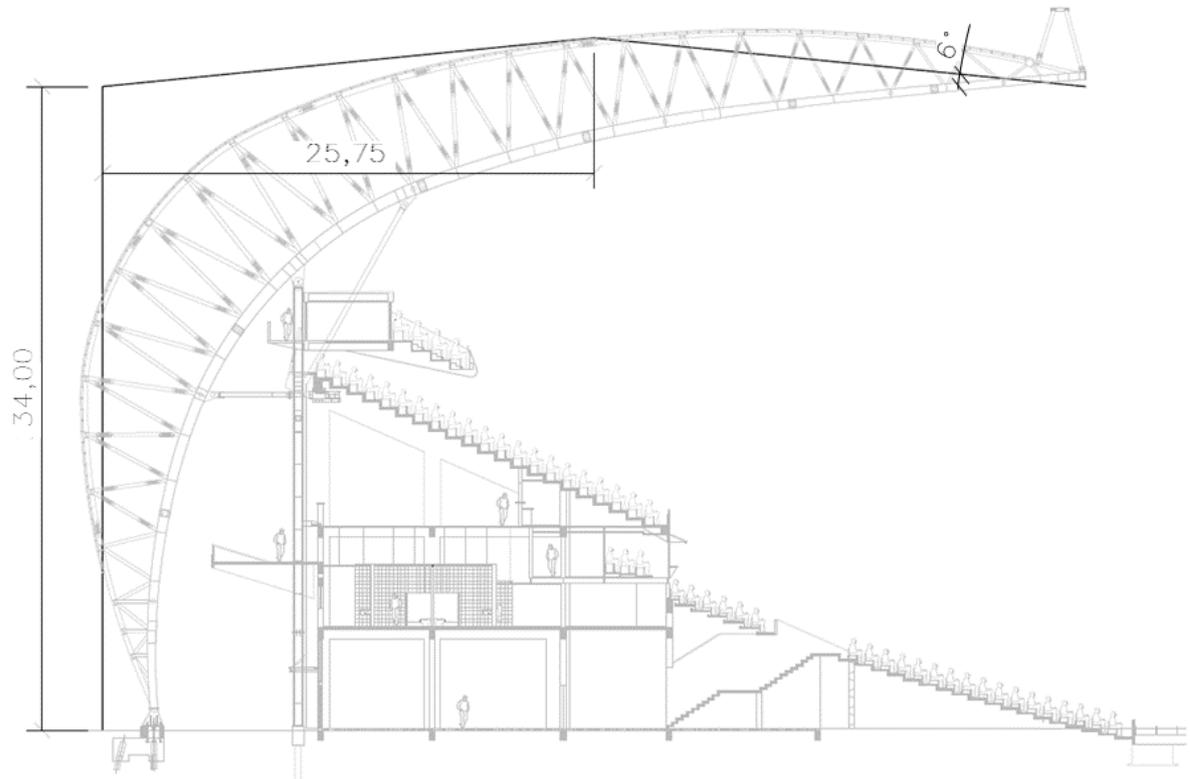
Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 33: Geometria – Modelo de cobertura 01



Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 34: Geometria – Modelo de cobertura 02



Fonte: Elaborado pela autora.

3.3.1.2 Geometria simplificada – Cobertura de uma água plana

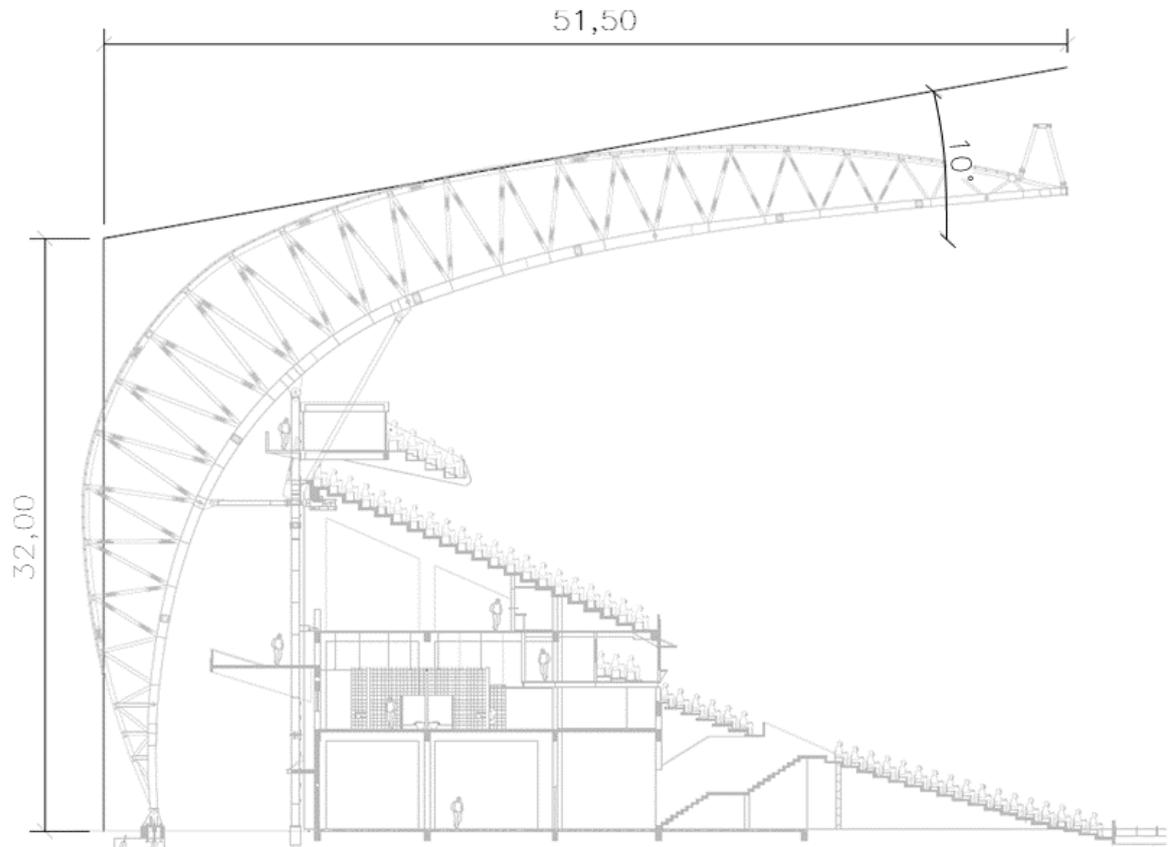
Assim como para os modelos de geometria de duas águas, os modelos de uma água foram deliberados a partir do módulo original, buscando simular da maneira mais fiel possível a superfície curva da cobertura. A Tabela 13 exibe as dimensões desses modelos, e as Figura 35 e Figura 36, as geometrias.

Tabela 13: Características – Modelo de cobertura de uma água 03 e 04

Modelo 03	Modelo 04
$h = 32,00 \text{ m}$	$h = 29,00 \text{ m}$
$a = 51,50 \text{ m}$	$a = 51,50 \text{ m}$
$b = 12,00 \text{ m}$	$b = 12,00 \text{ m}$
$\theta = 10,00^\circ$	$\theta = 6,00^\circ$
$h/b = 2,67$	$h/b = 2,42$

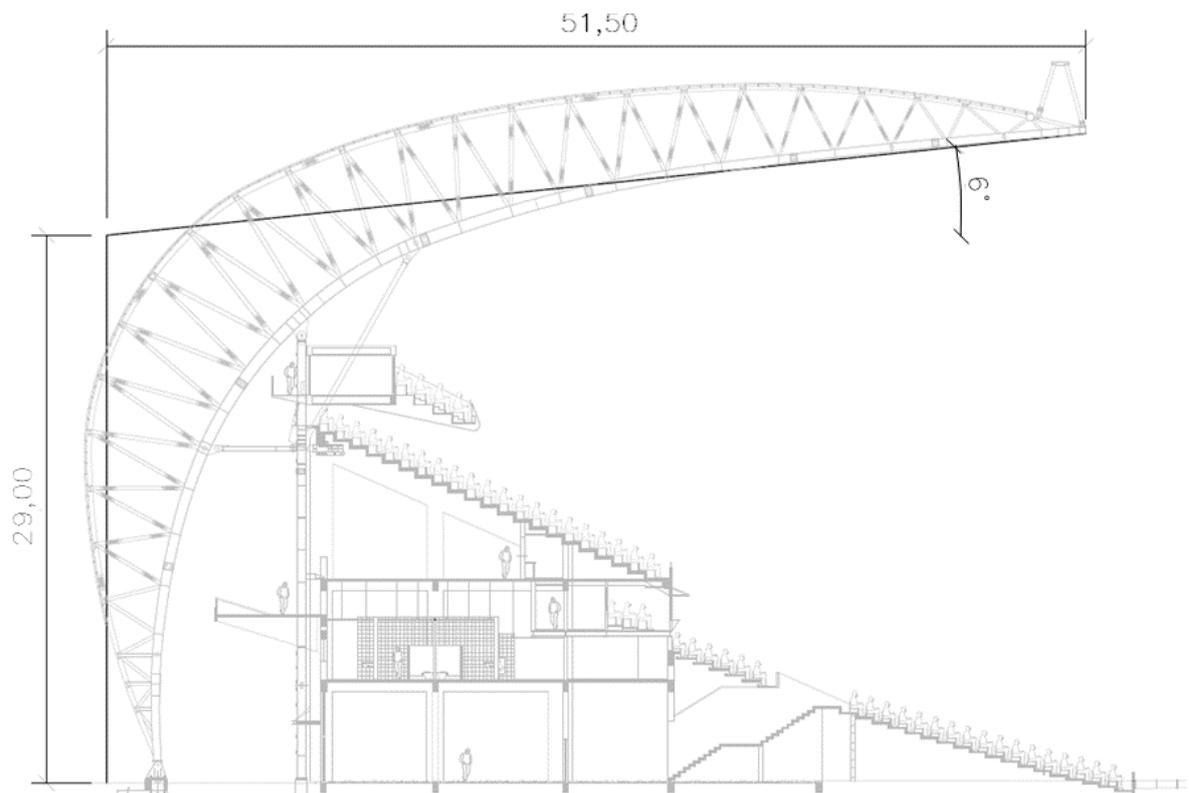
Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 35: Geometria – Modelo de cobertura 03



Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 36: Geometria – Modelo de cobertura 04



Fonte: Elaborado pela autora.

3.3.1.3 Geometria simplificada – Cobertura curva

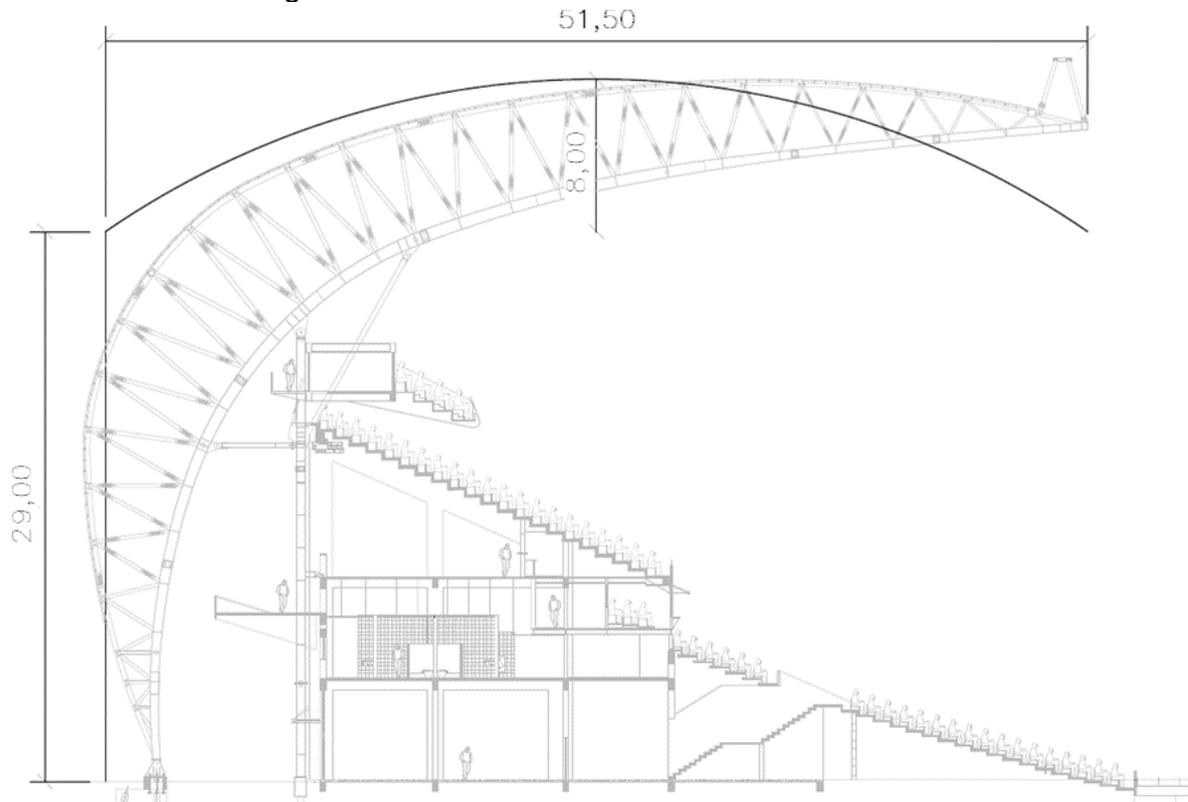
Os dois modelos para cobertura curvas foram estimados visando representar os fenômenos que ocorrem neste tipo de estrutura, que são muito particulares. Nas geometrias para os modelos 5 e 6 buscou-se seguir a curvatura do módulo original. Mais detalhes são apresentados na Tabela 14 e nas Figura 37 e Figura 38.

Tabela 14: Características – Modelo de cobertura curva 05 e 06

Modelo 05	Modelo 06
$h = 29,00 \text{ m}$	$h = 27,00 \text{ m}$
$l_2 = 51,50 \text{ m}$	$l_2 = 51,50 \text{ m}$
$b = 12,00 \text{ m}$	$b = 12,00 \text{ m}$
$f = 8,00 \text{ m}$	$f = 9,50 \text{ m}$
$f/l_2 = 0,16$	$f/l_2 = 0,18$
$h/l_2 = 0,56$	$h/l_2 = 0,52$

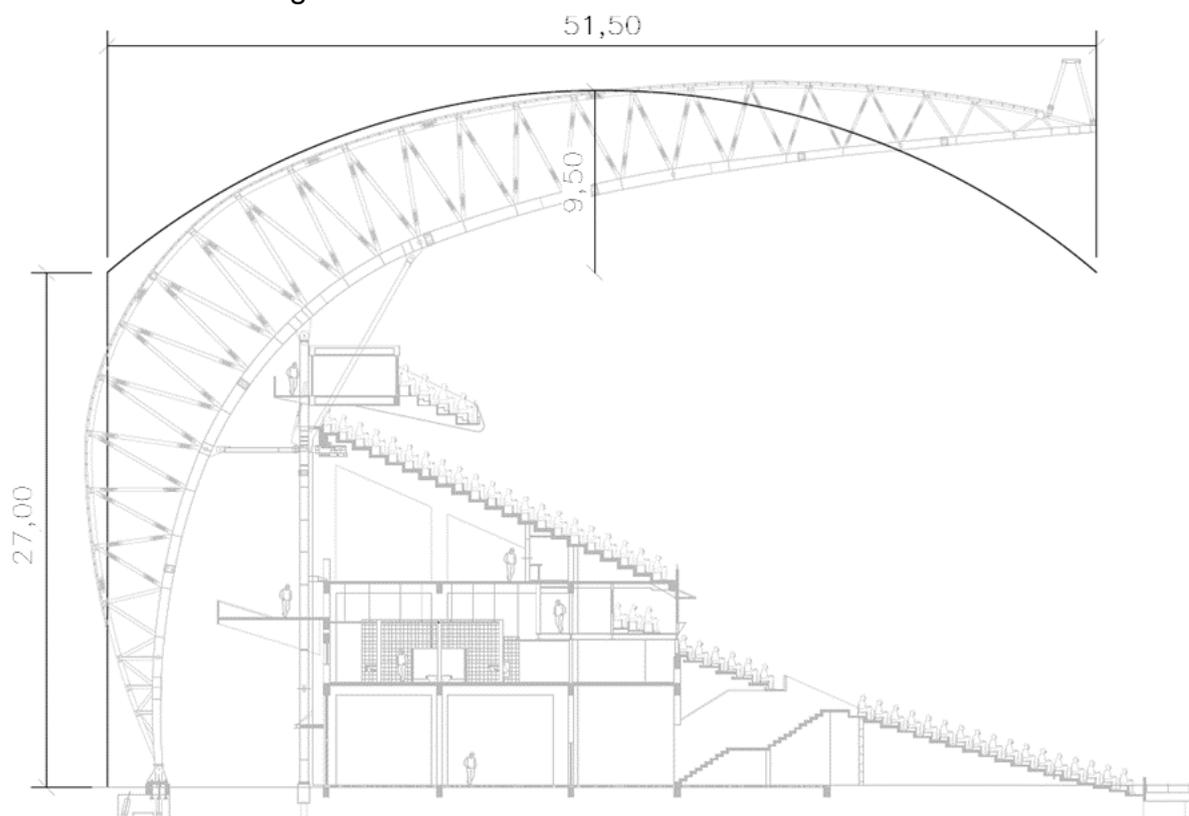
Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 37: Geometria – Modelo de cobertura 05



Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 38: Geometria – Modelo de cobertura 06



Fonte: Elaborado pela autora.

3.3.2 Determinação dos carregamentos Incidentes na cobertura

O carregamento ao qual o elemento está sujeito é determinado pela diferença entre as pressões externas e internas e defini-lo na fase inicial deste cálculo é fundamental, pois este terá impacto direto em outros parâmetros, como classe da estrutura e intervalo de tempo para o cálculo da velocidade média.

Haja visto que a ABNT NBR 6123/1988 fornece apenas coeficientes médios de pressão e não há maneira de se obter coeficientes de pico exclusivamente por ela, e presando que a comparação com os estudos de túnel de vento fosse possível, foi considerado apenas o Carregamento I, composto pela combinação dos coeficientes médios.

Carregamento I: $C_{\text{médio externo}} - C_{\text{médio interno}}$

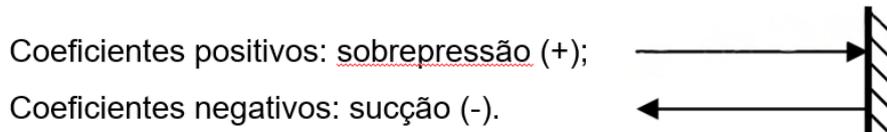
3.3.3 Definição de parâmetros de cálculo

Os parâmetros adotados seguiram os empregados nos ensaios de túnel de vento, bem como os procedimentos da NBR 6123/1988 (item 2.4 do referencial

teórico), algumas simplificações foram consideradas. Foi admitida a conversão de sinais conforme Figura 39 e os ângulos de incidência para o vento considerados foram: 0°, 90°, 180° e 270°.

Por ser o único tipo de vento do qual a NBR 6123/1988 fornece suporte, o cálculo foi baseado na condição de análise de ventos do tipo EPS. Dadas as explicações iniciais, os principais parâmetros são expostos na Tabela 15.

Figura 39: Conversão de sinais



Fonte: Elaborado pela autora.

Tabela 15: Fatores de cálculos adotados

θ Vento	Parâmetros de Cálculo	Valores Obtidos
0°	Velocidade Básica Vento (V_0)	$V_0 = 46$ m/s (CAT. II, 10 m, POA)
	Fator Topográfico (S_1)	$S_1 = 1,00$ (terreno plano)
	Fator (S_2)	$S_2 = 1,07$ (5 s, CAT. III, Classe B, 40 m)
	Fator Estatístico (S_3)	$S_3 = 1,00$ (alto fator de ocupação)
90°	Velocidade Básica Vento (V_0)	$V_0 = 46$ m/s (CAT. II, 10 m, POA)
	Fator Topográfico (S_1)	$S_1 = 1,00$ (terreno plano)
	Fator (S_2)	$S_2 = 1,11$ (5 s, CAT. II, Classe B, 40 m)
	Fator Estatístico (S_3)	$S_3 = 1,00$ (alto fator de ocupação)
180°	Velocidade Básica Vento (V_0)	$V_0 = 46$ m/s (CAT. II, 10 m, POA)
	Fator Topográfico (S_1)	$S_1 = 1,00$ (terreno plano)
	Fator (S_2)	$S_2 = 0,99$ (5 s, CAT. IV, Classe B, 40 m)
	Fator Estatístico (S_3)	$S_3 = 1,00$ (alto fator de ocupação)
270°	Velocidade Básica Vento (V_0)	$V_0 = 46$ m/s (CAT. II, 10 m, POA)
	Fator Topográfico (S_1)	$S_1 = 1,00$ (terreno plano)
	Fator (S_2)	$S_2 = 0,99$ (5 s, CAT. IV, Classe B, 40 m)
	Fator Estatístico (S_3)	$S_3 = 1,00$ (alto fator de ocupação)

Fonte: Elaborado pela autora.

Os tópicos que exigem explicações detalhadas, estão elencados abaixo:

- Fator de rugosidade do terreno (S_2)

Para o cálculo do fator S_2 conforme Equação 4, as categorias do terreno foram mantidas, seguindo o estabelecido nos ensaios do LAC, apenas ajustadas conforme ângulo de incidência do vento analisado, visto que, os arredores do Estádio Beira Rio não sofreram modificações significativas em 13 anos. Desta forma, as categorias de rugosidade são as expostas na Tabela 16 e a altura sobre o terreno considerada foi de 40 m.

Quanto a classe conforme as dimensões da edificação, está foi definida levando em conta dois fatores: apenas o módulo unitário, que possui dimensões de superfície frontal adequadas para a Classe B (Tabela 3) e tempo de referência de 5 segundos; e ainda, considerando que o Carregamento I foi o adotado para comparação, este deve ter seus coeficientes determinados com um tempo de 5 s, conforme especificado no relatórios dos ensaios de túnel de vento e no item 3.2.2.3 desta metodologia.

Tabela 16: Categorias de rugosidade adotadas

Categoria	Características
CAT. I	Superfícies lisas de grandes dimensões, com mais de 5 km de extensão
CAT. II	Terrenos abertos em nível, com poucos obstáculos isolados e cota média ≤ 1 m
CAT. III	Terrenos planos ou ondulados com obstáculos de altura igual a 3 m
CAT. IV	Terrenos cobertos por obstáculos numerosos e pouco espaçados, com cota média de 10 m

Fonte: Elaborado pela autora.

- Fator estatístico (S_3)

É importante ressaltar que o fator estatístico da ABNT NBR 6123/1988, tem seus parâmetros calculados para uma vida útil de projeto de 50 anos, diferente dos 100 anos estimados para o Estádio Beira Rio. Para fins de comparação, os cálculos das pressões foram baseados nestes 50 anos, porém, destaca-se que para a obtenção das pressões correspondentes a um período de recorrência de 100 anos (para a mesma probabilidade de 0,63 já citada em 2.4.1.6, $S_3 = 1,11$. Portanto, as pressões correspondentes ao período de 50 anos, são multiplicadas por $(S_3)^2 = 1,23$.

3.3.3.1 Velocidade característica do vento (V_k) e pressão dinâmica (q)

De posse dos parâmetros iniciais, verificou-se a velocidade característica do vento e conseqüentemente, a pressão dinâmica sobre a cobertura, considerando os quatro ângulos de incidência do vento e suas respectivas categorias de rugosidade.

Foram utilizadas as Equações 2 e 3 expostas no item 2.4. Os valores obtidos são apresentados na Tabela 17.

Tabela 17: Valores calculados de V_k e q

θ Vento	Valores Obtidos
0°	$V_{k, 0^\circ}$ (5 s, CAT. III, Classe B, 40 m) = 49,01 m/s q_{0° (5 s, CAT. III, Classe B, 40 m) = 1,47 kPa
90°	$V_{k, 90^\circ}$ (5 s, CAT. II, Classe B, 40 m) = 51,07 m/s q_{90° (5 s, CAT. II, Classe B, 40 m) = 1,60 kPa
180°	$V_{k, 180^\circ}$ (5 s, CAT. IV, Classe B, 40 m) = 45,57 m/s q_{180° (5 s, CAT. IV, Classe B, 40 m) = 1,27 kPa
270°	$V_{k, 270^\circ}$ (5 s, CAT. IV, Classe B, 40 m) = 45,57 m/s q_{270° (5 s, CAT. IV, Classe B, 40 m) = 1,27 kPa

Fonte: Elaborado pela autora.

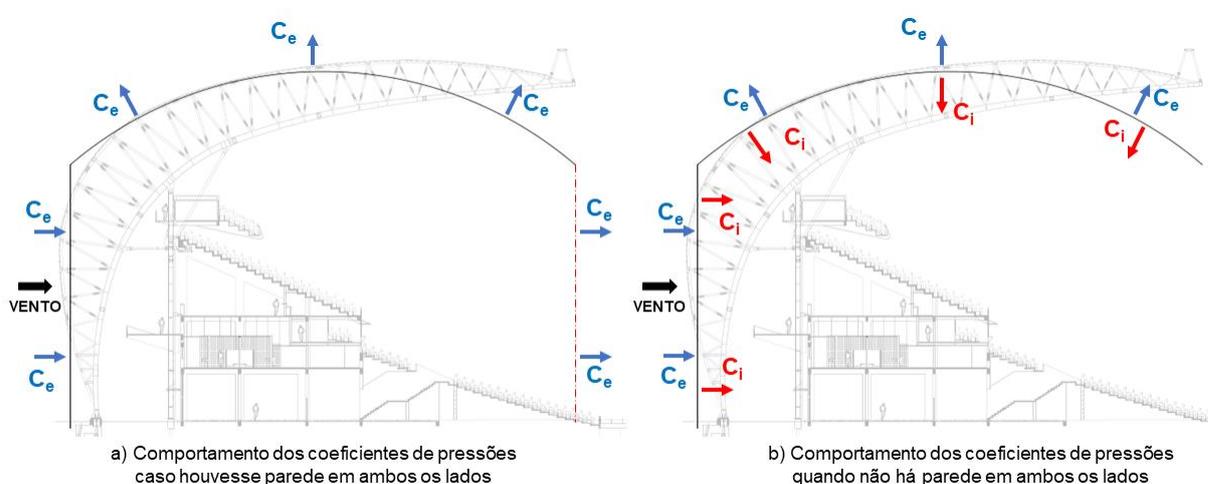
3.3.4 Obtenção dos coeficientes de pressão na cobertura

Os coeficientes médios de pressão do vento sobre a cobertura, foram obtidos por meio das tabelas de cálculo e equações presentes na NBR 6123/1988 e no item 2.4.1.7 desta pesquisa, seguindo as características geométricas dos 6 modelos empregados. Simplificações e interpolações foram consideradas para que os coeficientes fossem cabíveis.

O método simplificado para a obtenção dos coeficientes é demonstrado na Figura 40 abaixo. Basicamente, utilizou-se dos coeficientes externos para as paredes e cobertura, para determinar os coeficientes internos e conseqüentemente, os coeficientes resultantes da combinação referente ao Carregamento I. A combinação destes coeficientes se justifica por meio dos estudos de Chen, et. al (2021), apresentados no item 2.2.1.

A norma trata de coeficientes para edificações fechadas, onde o vento incidente em uma parede tem seus efeitos nas demais. Portanto, a interpretação feita, considera que pelo fato do módulo se tratar de uma cobertura em balanço, constituída de um lado fechado e o outro aberto, os efeitos que deveriam ocorrer na parede oposta ao ângulo de incidência (Figura 40a), são transferidos para o interior da estrutura (Figura 40b). Foi justamente esse efeito, que foi considerado como sendo o coeficiente interno. E possibilitou os cálculos de coeficientes resultantes, que foram combinados seguindo os padrões do Carregamento I e a direção vetorial dos coeficientes.

Figura 40: Modelo esquemático da determinação dos coeficientes de pressão



Fonte: Elaborado pela autora.

3.3.5 Cálculo das pressões locais na cobertura

As pressões locais esperadas, foram determinadas por meio da combinação dos coeficientes aerodinâmicos obtidos pela NBR 6123/1988, com a estatística do vento na região de construção da edificação, conforme exposto na Equação 5.

$$P = qC_p \quad (5)$$

Onde:

P = Pressão local na cobertura (kPa);

q = Pressão dinâmica de referência, correspondente à velocidade média de referência, medida sobre um intervalo de aproximadamente 5 segundos (medida a uma altura equivalente a 40 m) (kPa);

C_p = Coeficiente de pressão médio;

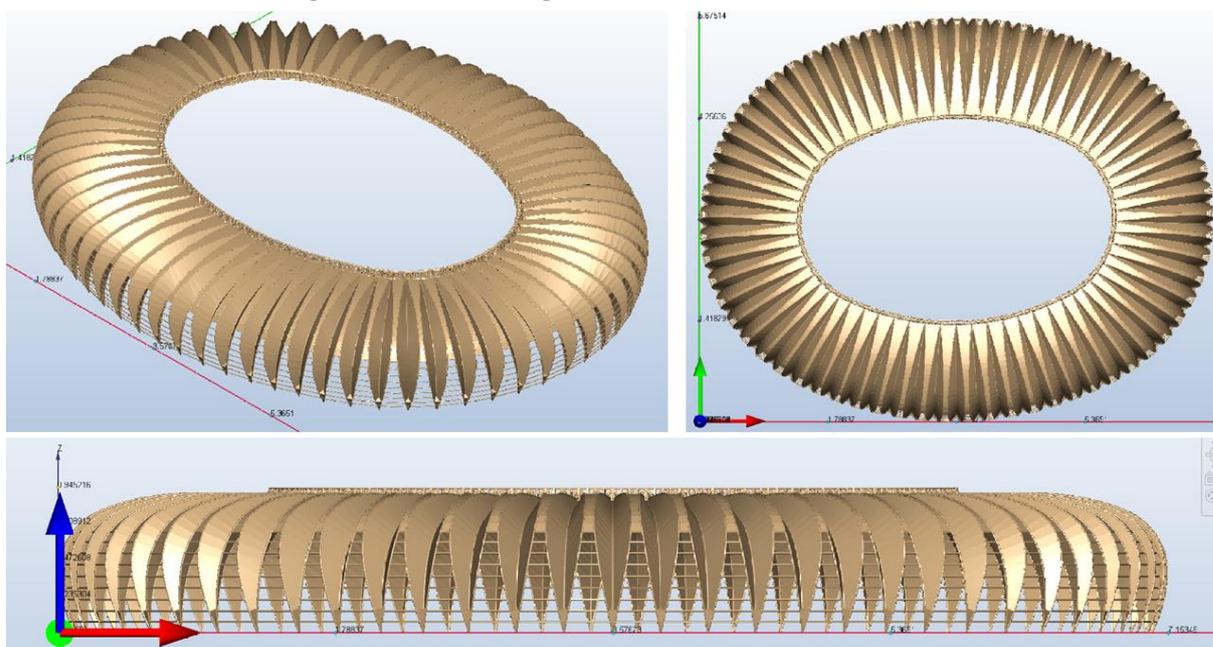
3.4 ESTUDO 3: SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL – DCF

Esta etapa, trata da simulação computacional sobre o Estádio Beira Rio utilizando o *software* de dinâmica dos fluídos computacionais *Autodesk CFD*, para determinar as pressões incidentes sobre a cobertura.

3.4.1 Modelagem da cobertura

A modelagem 3D do estádio foi elaborada a partir do modelo estrutural da cobertura metálica do estádio, com o auxílio do *software SketchUp* conforme Figura 41. O modelo serviu como dado de entrada da simulação computacional, e seguiu os detalhes construtivos originais do projeto arquitetônico, salvo pequenos ajustes e simplificações que foram considerados irrelevantes para simulação e resultados.

Figura 41: Modelagem 3D do Estádio Beira Rio



Fonte: Elaborado pela autora.

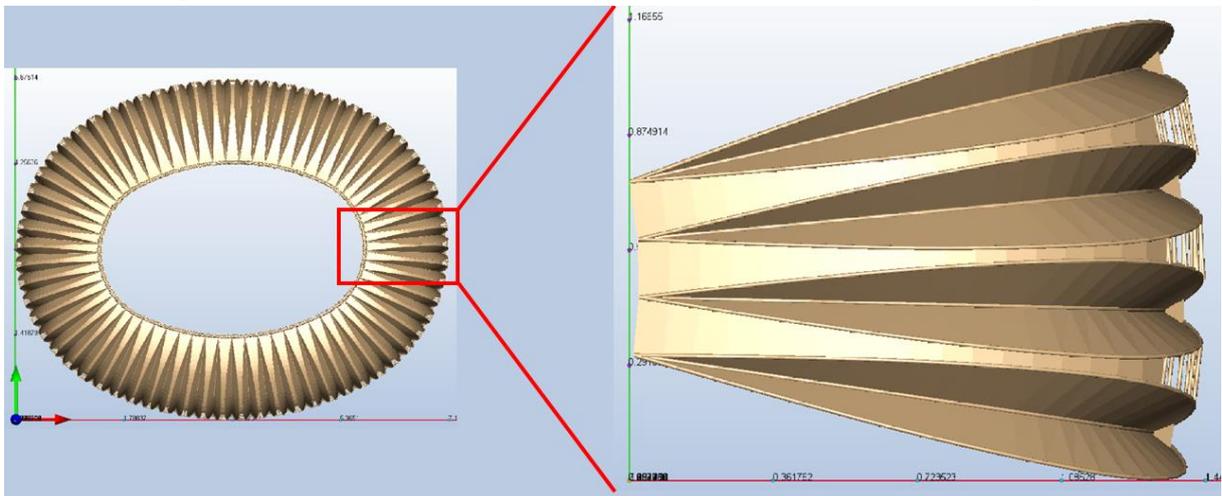
3.4.2 Simulação e processamento dos dados

Para simulação, utilizou-se da licença de estudante do *software Autodesk CFD*, que proporciona o mesmo padrão de qualidade da versão paga, contendo as mesmas ferramentas, para a realização dos cálculos computacionais.

Inicialmente, tentou-se a simulação da cobertura total do estádio, porém, por falta de recursos computacionais, o plano inicial não foi possível, visto que o processamento dos dados demandaria um elevado tempo de processamento e alocação de espaço em disco para armazenamento de informações. Portanto, apenas 4 módulos da cobertura foram considerados na análise do comportamento do vento sobre superfície curva.

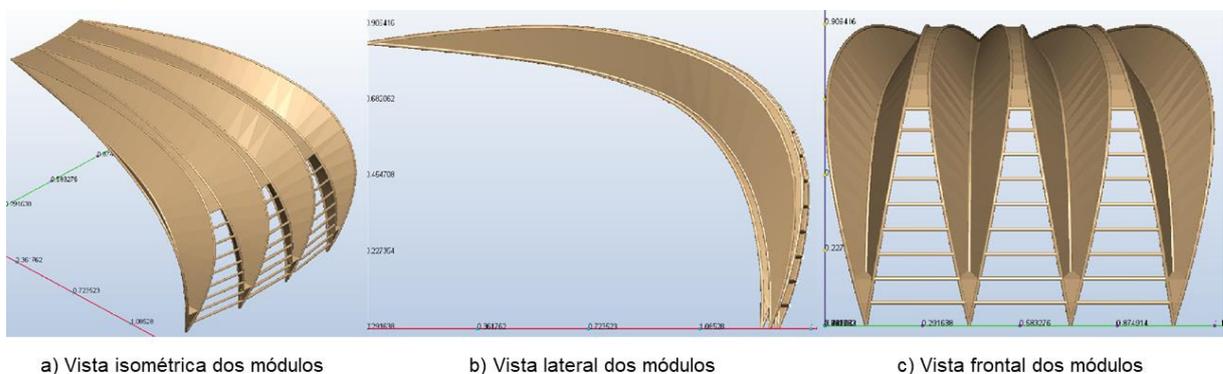
A Figura 42 expõe a localização dos módulos escolhidos para a simulação, esses representam o ângulo de incidência do vento a 180° , seguindo padrão aplicado no ensaio de túnel de vento. Enquanto, na Figura 43 mais detalhes dos módulos simulados são apresentados.

Figura 42: Módulos do Estádio Beira Rio submetidos a simulação



Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 43: Detalhamento dos módulos submetidos a simulação



a) Vista isométrica dos módulos

b) Vista lateral dos módulos

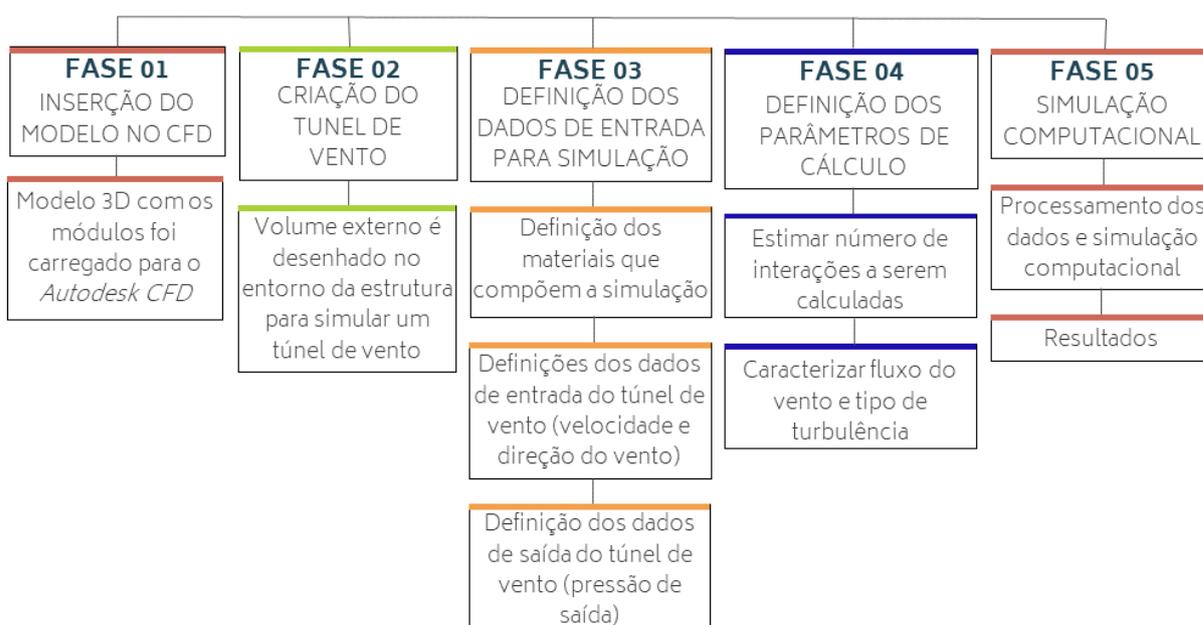
c) Vista frontal dos módulos

Fonte: Elaborado pela autora.

3.4.2.1 Roteiro de cálculo para a simulação

O roteiro de cálculo para a simulação computacional é apresentado abaixo, na Figura 44, para um melhor entendimento, 5 fases foram determinadas. Na primeira, o modelo 3D dos módulos da cobertura (Figura 42 e Figura 43) foi inserido no programa *Autodesk CFD*. A fase 2, é referente a criação de um volume, uma caixa, que envolveu a estrutura e tem papel de reproduzir um túnel de vento. As fases 3 e 4, serão detalhadas nos tópicos abaixo, e são referentes a definições dos dados de entrada da simulação e parâmetros de cálculo. A fase final, é propriamente o processamento dos dados e a simulação computacional.

Figura 44: Roteiro de cálculo para simulação computacional



Fonte: Elaborado pela autora.

3.4.2.1.1 Dados de entrada para simulação

Para que a simulação computacional funcionasse corretamente, e fornecesse resultados válidos que convergissem com o ensaio de túnel de vento, algumas definições iniciais foram pertinentes. Dados de entrada foram inseridos no programa com base no projeto e na NBR 6123/1988. Nesta etapa de pesquisa, a estrutura foi simulada isoladamente, sem a influência do entorno do terreno, seguindo comportamento apresentando por Carpeggiani (2004).

Foram caracterizados os materiais para os objetos da simulação, a direção e o valor da velocidade de entrada do vento e a pressão de saída. Mais detalhes são expostos na Tabela 18, que resume os principais dados considerados.

Tabela 18: Dados de entrada para simulação no *software Autodesk CFD*

Materiais	Túnel de vento (Vol. externo)	Ar
	Módulos da cobertura	Metal (unificado para toda estrutura)
Dados de entrada	Velocidade do vento	46 m/s (NBR 6123/1988 - POA)
	Direção do vento de ataque	Perpendicular a face frontal da estrutura
Dados de saída	Definição da pressão de saída do túnel de vento	0 kPa

Fonte: Elaborado pela autora.

3.4.2.1.2 Parâmetros de cálculo para simulação

Nesta fase, foram definidos os parâmetros para base de cálculo do processamento da simulação computacional. Estes parâmetros definiram a qualidade dos resultados obtidos. Características do fluxo e fatores de turbulência foram determinados, bem como o número de interações do cálculo, que quanto maior, melhor a qualidade dos resultados.

Para este trabalho, 135 interações foram estimadas, visando resultados razoáveis e considerando a capacidade computacional da máquina utilizada. O modelo de turbulência adotado foi o k-épsilon ($k-\epsilon$), por possuir ampla aplicação na simulação de fluxos médios, ter cálculo relativamente econômico e fornecer resultados de precisão razoável. A Tabela 19 mostra os parâmetros citados e ainda, as definições das características do fluxo.

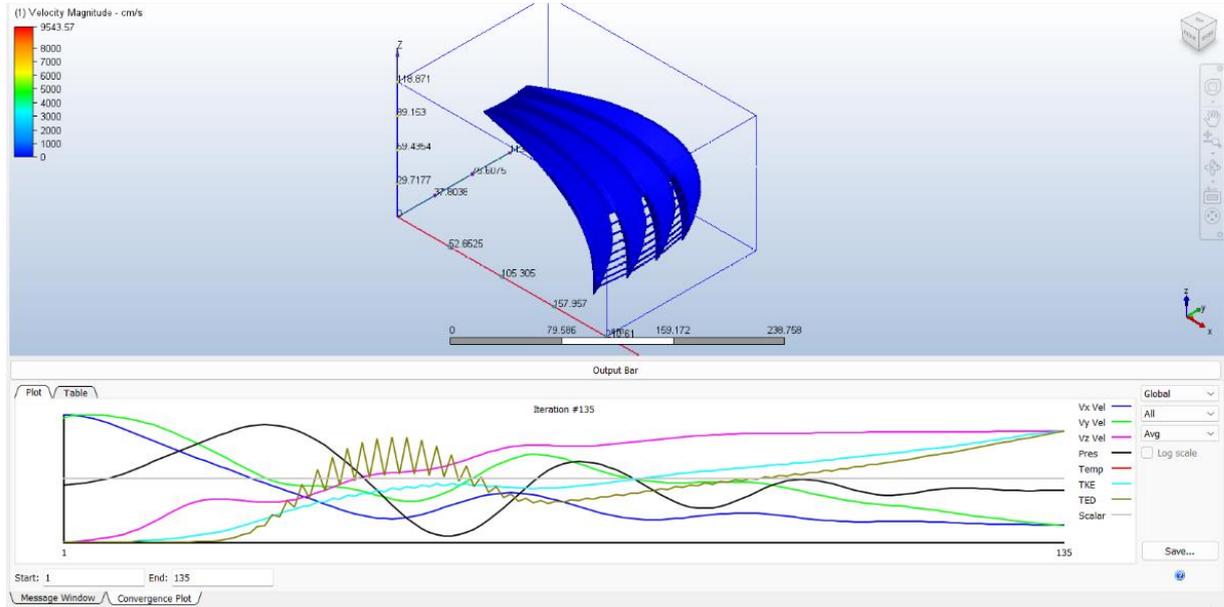
Tabela 19: Parâmetros de cálculo para a simulação no *software Autodesk CFD*

Número de interações de cálculo	135	
Características de fluxo	Tipo de compressibilidade	Compressível
	Temperatura do fluido	20°C
Modelo de turbulência	k-épsilon ($k-\epsilon$)	

Fonte: Elaborado pela autora.

Com todos os parâmetros definidos, a simulação foi iniciada, um exemplo dos cálculos é demonstrado na Figura 45.

Figura 45: Cálculo dos módulos pelo *software Autodesk CFD*



Fonte: Elaborado pela autora.

4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Na sequência são apresentados os resultados obtidos com a aplicação da metodologia já detalhada para os Estudos 2 e 3, bem como a análise e comparação dos resultados. Estes estão divididos entre as duas frentes de trabalho, a primeira consiste na determinação dos coeficientes de pressão e de forma e pressões de projeto com base na aplicação da NBR 6123/1988 e a segunda, trata dos resultados de pressões obtidos através da simulação computacional.

4.1 RESULTADOS - PRESSÕES DO VENTO SOB A ÓTICA DA NBR 6123/1988

Este tópico exhibe os resultados relativos aos cálculos de parâmetros, coeficientes de pressões e pressões locais do vento sobre os modelos definidos para a simplificação dos módulos da cobertura do Estádio Beira Rio, utilizando o escopo disponível na ABNT NBR 6123/1988.

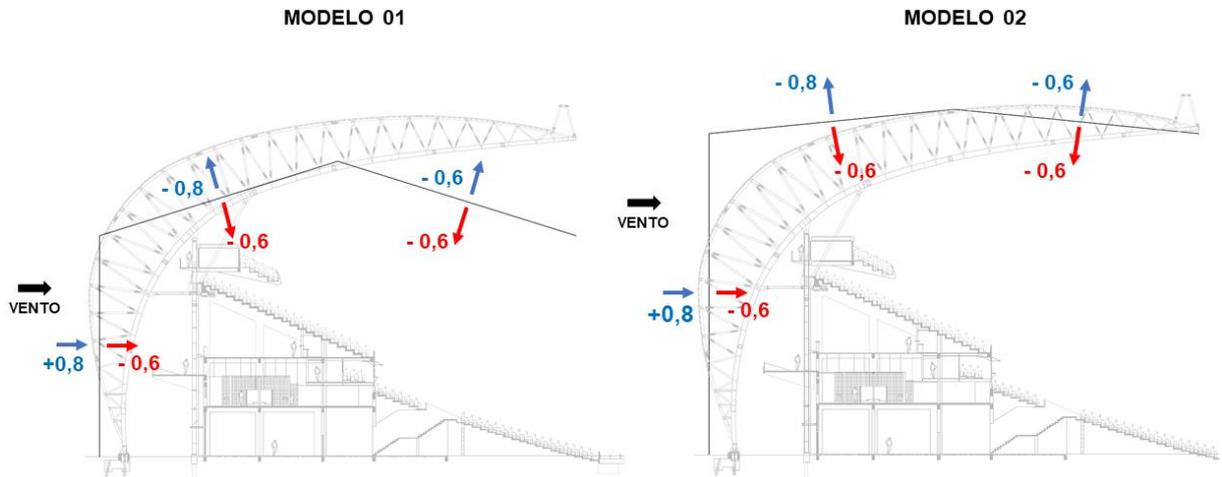
4.1.1 Coeficientes de pressão externos e internos

Neste item são apresentados os resultados dos coeficientes de pressão do vento sob a cobertura, estes obtidos através da metodologia disponível na NBR 6123/1988, utilizando de geometria simplificada e técnica de cálculo descrita no item 3.3.4. Os modelos divididos em 3 tipologias geométricas de cobertura, tem seus coeficientes apresentados abaixo nas Figura 46, Figura 47 e Figura 48.

Os valores dos coeficientes de pressão para a cobertura do Estádio Beira-Rio, obtidos para o Estudo 1, são coerentes do ponto de vista aerodinâmico com relação à forma da edificação estudada. Os resultados dos coeficientes externos atuantes na cobertura apresentam sinais negativos, ou seja, a cobertura está sob o efeito de sucção.

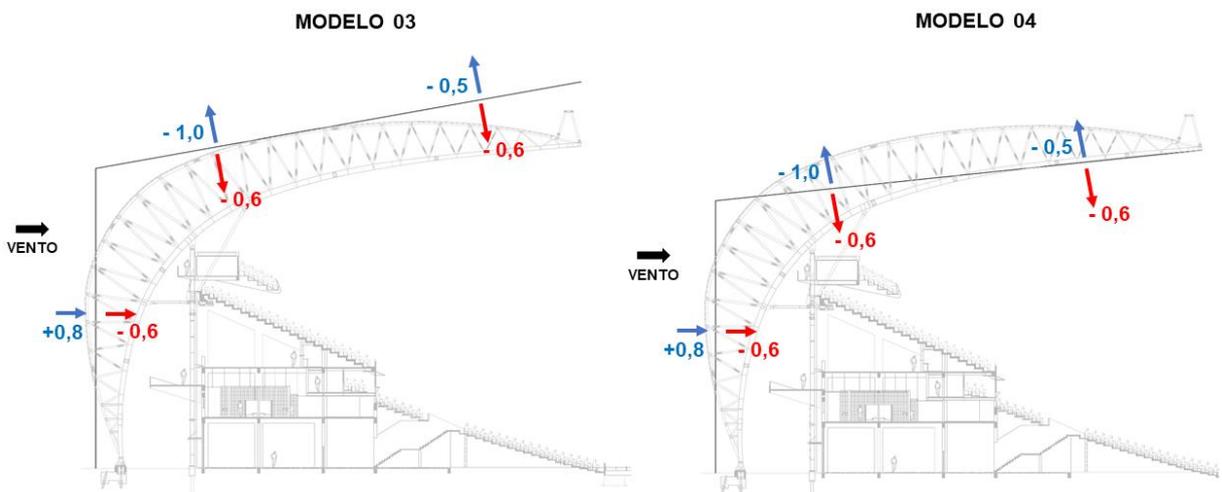
Interessante observar como para todos os casos, o coeficiente de pressão interno se manteve o mesmo, independentemente da geometria analisada (- 0,6), isso pode ser explicado em razão da altura da estrutura, única dimensão variável entre os módulos, ser maior que 18 m para todos os modelos, convergindo para o mesmo ponto na Tabela 6, de coeficientes externos para paredes, resultando na igualdade dos coeficientes internos.

Figura 46: Coeficientes de pressão externos e internos – Modelo 01 e 02



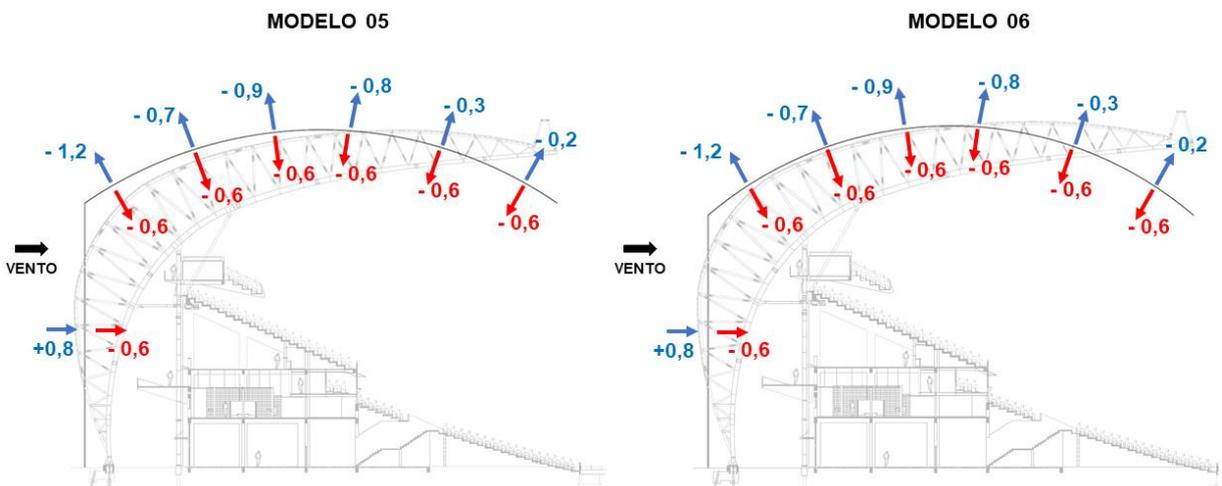
Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 47: Coeficientes de pressão externos e internos – Modelo 03 e 04



Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 48: Coeficientes de pressão externos e internos – Modelo 05 e 06



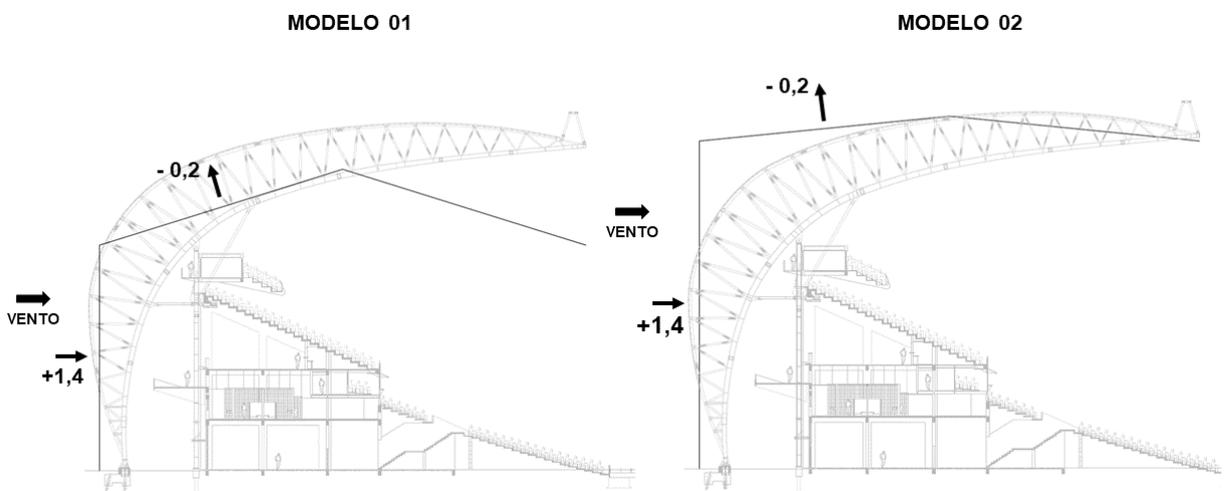
Fonte: Elaborado pela autora.

4.1.1.1 Coeficientes de pressão resultantes

As combinações para os coeficientes de pressão foram baseadas no já citado Carregamento I, que faz correlação entre os coeficientes médios de pressão externos e internos. Nas Figura 49, Figura 50 e Figura 51, os resultados são apresentados.

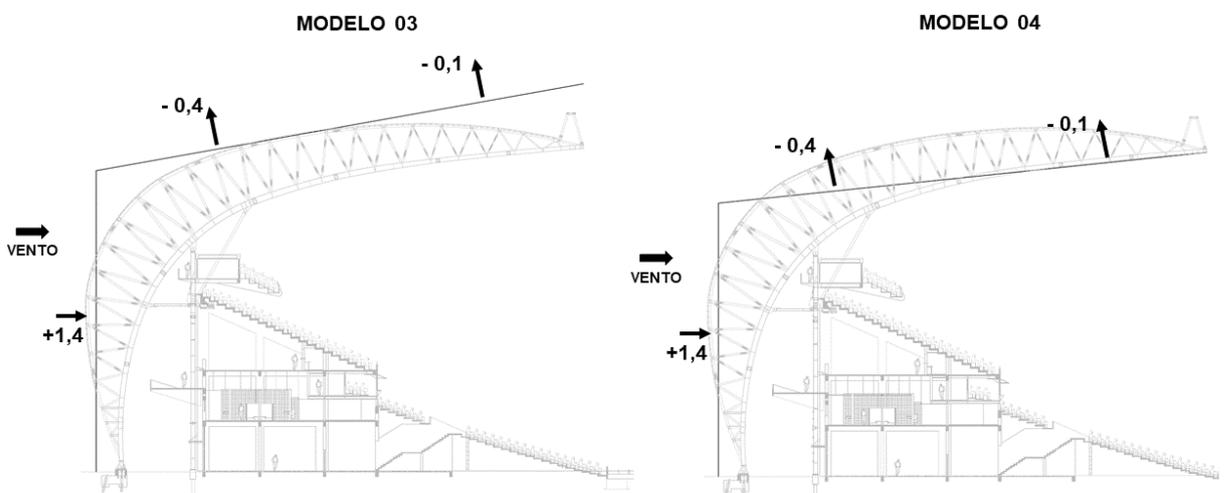
Nota-se que os resultados dos coeficientes de pressão resultantes, não sofreram modificações entre os modelos de mesma geometria, indicando que no caso deste estudo, para estruturas de grandes alturas, fatores como inclinação do telhado, ou curvatura da superfície não possuíram influência sobre tais coeficientes.

Figura 49: Combinação Carregamento I – Modelo 01 e 02



Fonte: Elaborado pela autora.

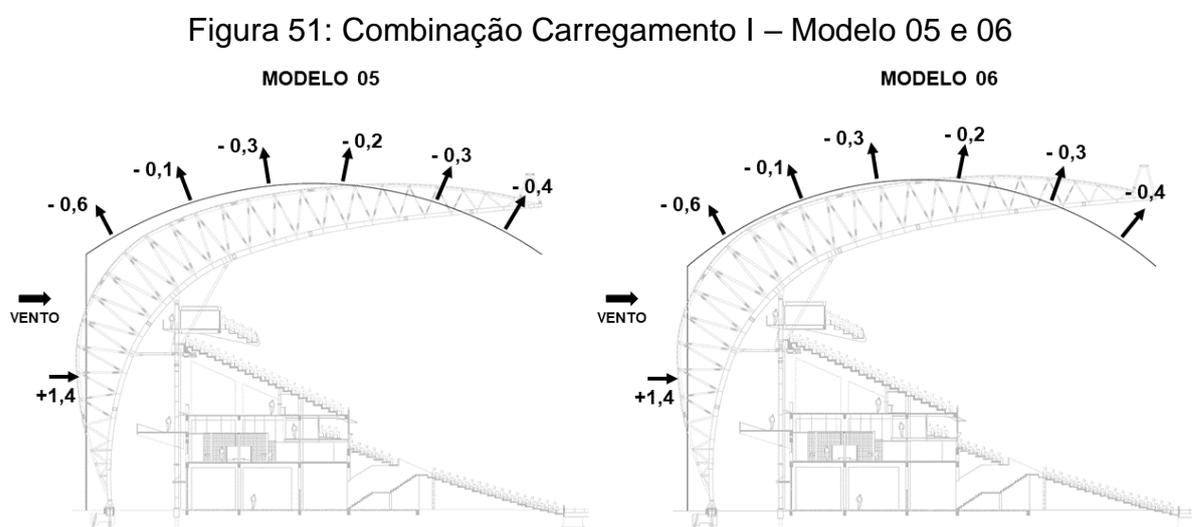
Figura 50: Combinação Carregamento I – Modelo 03 e 04



Fonte: Elaborado pela autora.

Ressalta-se a diferença de comportamento entre as estruturas com características de arestas vivas e as de cobertura curva, tal diferença pode ser compreendida pela mudança de comportamento do escoamento, que difere para cada tipologia, pois as geometrias influenciam no local de separação do vento.

Enquanto para coberturas de ângulo reto a separação do vento ocorre nas arestas, gerando coeficientes constantes no telhado e locais de separação bem definidos, para as superfícies curvas os coeficientes ficam variáveis, dependentes da localização dos pontos de escoamento, que são mais complexos para esse tipo de cobertura, conforme apontado por Loredou-Souza, et al. (2010) e Scruton e Rogers (1971), bem como observado nos resultados apontados na Figura 51.



Fonte: Elaborado pela autora.

4.1.2 Pressões locais na cobertura

As pressões locais na cobertura, determinadas pela Equação 5, são expostas por completo, para os todos ângulos de incidência considerados (0° , 90° , 180° e 270°), no ANEXO A deste trabalho. Para este tópico, apenas as pressões do ângulo de 180° serão expostas, por ser o único para o qual foram obtidos os resultados das pressões dos ensaios de túnel de vento. Desta maneira, para análise e comparação dos resultados, apenas esse ângulo será considerado.

Portanto, a Tabela 20 demonstra os resultados obtidos para as pressões de projeto para o ângulo de incidência do vento de 180° para os modelos considerados. Na tabela abaixo, os modelos de 01 a 06 foram unificados conforme a tipologia geométrica, haja vista que os resultados de pressões foram iguais entre ambos.

Tabela 20: Pressões atuantes na cobertura para os modelos considerados e ângulo de 180°

θ Vento		180°
Modelo 01 e 02	Parede	1,78 kPa
	Cobertura	-0,25 kPa
Modelo 03 e 04	Parede	1,78 kPa
	Cobertura	-0,51 kPa
		-0,13 kPa
Modelo 05 e 06	Parede	1,78 kPa
	Cobertura	-0,76 kPa
		-0,13 kPa
		-0,38 kPa
		-0,25 kPa
		-0,38 kPa
-0,51 kPa		

Fonte: Elaborado pela autora.

Nota-se que quando em comparação com as demais pressões, para os demais ângulos de incidência, as pressões locais na cobertura para 180°, independente da geometria da cobertura, resultaram nos menores valores. Isso pode ser correlacionado com a categoria de rugosidade do terreno e conseqüentemente com a velocidade característica do vento (V_k) para tal ângulo de ataque, esta calculada com base na NBR 6123/1988.

Considerando que o ângulo de 180° é referente à maior categoria considerada nesse trabalho (categoria IV), este possui área de entorno com obstáculos mais significativos e de maior rugosidade. O que segundo Loredou-Souza, et al. (2004) e Mattuella (2012), tem influência na diminuição da velocidade do vento na CLA, e por óbvio, nas pressões incidentes na cobertura.

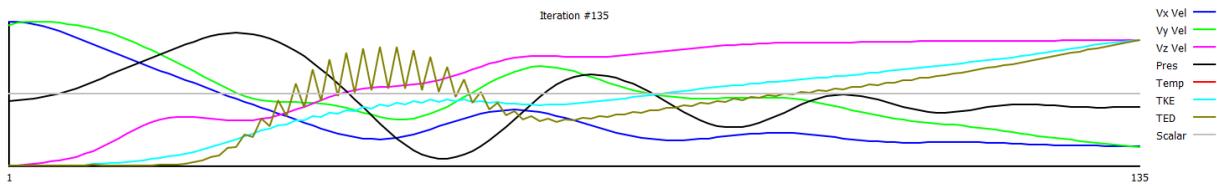
4.2 RESULTADOS – PRESSÕES DO VENTO SOB A ÓTICA DA DFC

A simulação foi realizada em um notebook com processador Intel® Core™ i7 de 1.8GHz, placa de vídeo dedicada NVIDIA® GeForce® MX230 de 2GB e memória RAM de 8GB e 256GB de SSD. O tempo médio de processamento para uma

simulação foi de 8 horas, levando em consideração o processamento do modelo no programa, criação da malha da superfície e o cálculo da simulação propriamente.

A Figura 52, apresenta o gráfico de convergência das 135 iterações calculadas para a simulação computacional, é possível observar certa estabilidade no final da simulação, o que indica convergência razoável e que os resultados encontrados são válidos e aceitáveis.

Figura 52: Gráfico de convergência das iterações calculadas



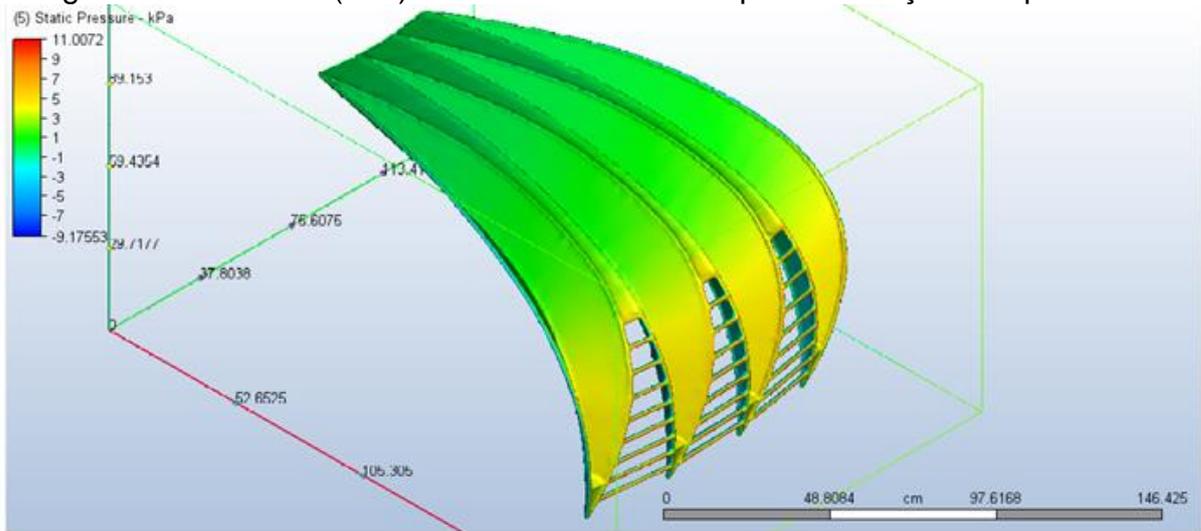
Fonte: Elaborado pela autora.

Os resultados para as pressões médias (em kPa) encontradas são apresentados na imagem abaixo. A Figura 53a, representa as pressões incidentes nos módulos da cobertura a partir de uma vista isométrica, enquanto na Figura 53b, é possível ter o conhecimento do comportamento dessas pressões tanto na face externa quanto interna da cobertura, a Figura 53b também demonstra a direção do vento de ataque, a partir do vetor da velocidade. No ANEXO B são apresentadas outras vistas para análise dos resultados de pressões sobre a superfície.

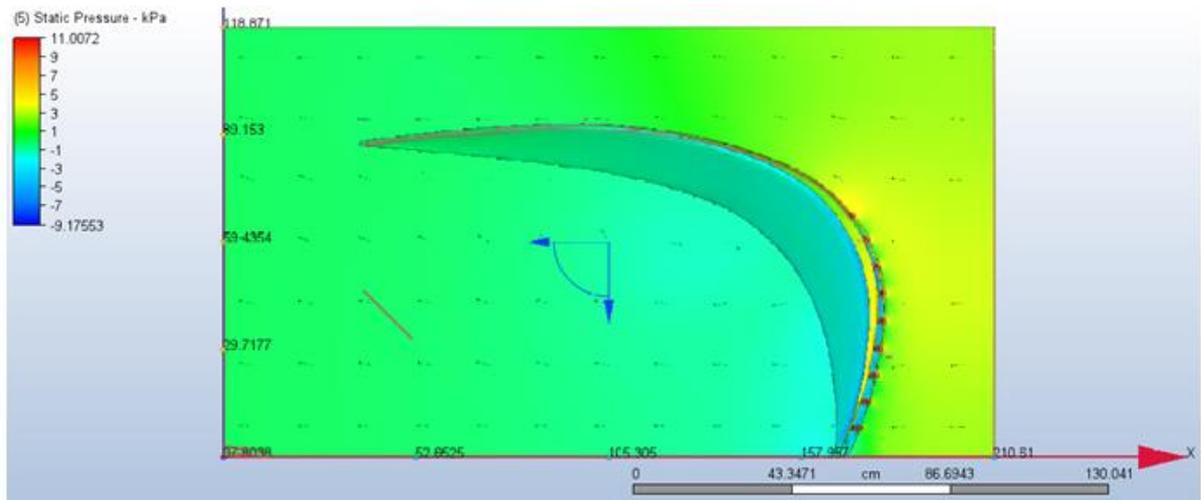
Constatou-se que o comportamento da estrutura analisada foi convergente com o obtido no ensaio de túnel de vento, com uma sobrepressão atuante na parede perpendicular ao ângulo de incidência do vento, e pressões de sucção no telhado, que tendem a levantar a cobertura.

Outro apontamento pertinente, é referente as pressões observadas na face interna da cobertura, que são negativas em toda a superfície, inclusive nas paredes. São valores considerados altos, resultando em pressões de até $\approx - 2,00$ kPa.

Figura 53: Pressões (kPa) atuantes da cobertura pela simulação computacional



a) Vista isométrica da pressão atuante do lado externo da estrutura



b) Plano lateral para as pressões atuantes sobre a estrutura e vetor da velocidade do vento

Fonte: Elaborado pela autora.

Ainda, é possível perceber que as barras de ligação entre um módulo e outro, são as mais solicitadas em termos de pressão, chegando a ter pressões atuantes na face externa de até $\approx 5,00$ kPa e na face interna de $\approx -4,00$ kPa (ambas informações, são mais bem observadas no ANEXO B). O que possivelmente é explicado pela geometria e espessura das barras.

4.3 ANÁLISE E CORRELAÇÃO DOS RESULTADOS

A comparação dos resultados foi feita entre as respostas do ensaio em túnel de vento realizado pela equipe técnica do LAC, dos modelos da NBR 6123/1988 e da simulação computacional por DFC, de maneira que fosse possível avaliar:

- A aplicabilidade dos modelos sugeridos pela NBR 6123 (ABNT, 1988) para a determinação da pressão e coeficientes de pressão do vento em coberturas de geometria complexa e de grandes vãos;
- A influência da geometria do modelo simplificado nos valores de pressão externas nos cálculos pela NBR 6123/1988;
- A aplicabilidade da técnica de simulação computacional e modelagem numérica, como substituta ou aliada dos ensaios em túnel de vento;
- A comparação entre os resultados das pressões, obtidas pelos métodos de cálculo estudados, quando em comparação com a pressão resultante no ensaio de túnel de vento.

4.3.1 Pressão do vento sobre a cobertura

Na Tabela 21, são sintetizados os resultados das pressões do vento sobre a estrutura (parede e cobertura), a um ângulo de incidência de 180° para os três métodos estudados, desta forma, é possível realizar as devidas análises e tirar as conclusões necessárias.

Os valores para os resultados das pressões, referentes ao ensaio de túnel de vento e para a simulação computacional são aproximados, visto que, não foram obtidos os resultados numéricos, e estes foram retirados de escalas de cores. Ainda, os valores em túnel de vento utilizados para a comparação das pressões são referentes aos módulos destacados na Figura 32.

Outra observação pertinente, é alusiva aos valores das pressões de cobertura para os Modelos 3, 4, 5 e 6, calculadas pela ABNT NBR 6123/1988 e que apresentam mais de uma zona de pressão incidente no telhado, nesta etapa de análise comparativa, foi considerada a pior pressão que atua sobre o telhado das tipologias geométricas citadas.

Tabela 21: Pressão estática do vento para ângulo de incidência 180° para todos os métodos analisados

		Parede	Cobertura
NBR 6123/1988	Modelo 01	1,78 kPa	- 0,25 kPa
	Modelo 02	1,78 kPa	- 0,25 kPa
	Modelo 03	1,78 kPa	- 0,51 kPa
	Modelo 04	1,78 kPa	- 0,51 kPa
	Modelo 05	1,78 kPa	- 0,76 kPa
	Modelo 06	1,78 kPa	- 0,76 kPa
Simulação DFC		≈ 4,00 kPa	≈ - 0,50 kPa
Túnel de Vento		≈ 1,00 kPa	≈ - 0,60 kPa

Fonte: Elaborado pela autora.

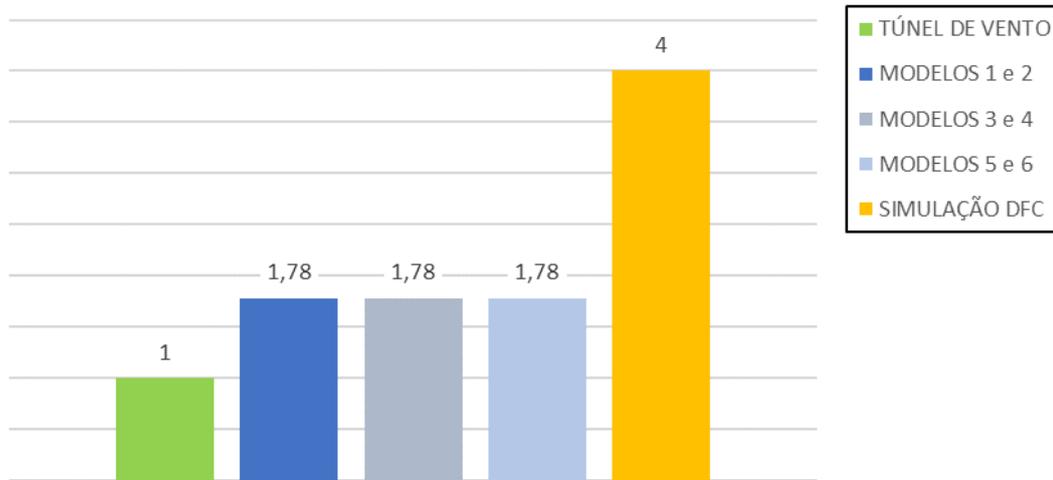
Da Tabela 21, observa-se:

- Para todos os métodos calculados, o comportamento do vento, quanto a forças de sucção e sobrepressão são compatíveis com o ensaio de túnel de vento;
- O comportamento observado especificamente no telhado, está de acordo com as ideias de Cochran (2012) quanto ao comportamento do vento em estruturas de grandes vãos, a exemplo de estádios de futebol, ou seja, estão exercendo forças de elevação sobre a superfície.

O gráfico apresentado na Figura 54, traz um comparativo visual dos resultados encontrados referentes as pressões influentes na parede da estrutura testada. Os modelos para coberturas relativos ao método da NBR 6123 (ABNT, 1988) estão agrupados em azul, demais informações estão na legenda.

- A simulação computacional, forneceu um resultado extremamente alto para as pressões incidentes na parede dos módulos simulados, triplicando os valores das pressões externas. Isso pode ser devido a geometria complexa da estrutura, que tem impacto direto na formação da malha de cálculo e análise da superfície;
- As pressões para todos os modelos calculados pelo método de estudo 2 (NBR 6123/1988), permaneceram constantes em todas as geometrias consideradas, uma hipótese para este fato, é devido a já citada altura das paredes e ainda, pode-se considerar que em todos os modelos, as paredes foram julgadas como impermeáveis, sem aberturas, resultando nas mesmas pressões.

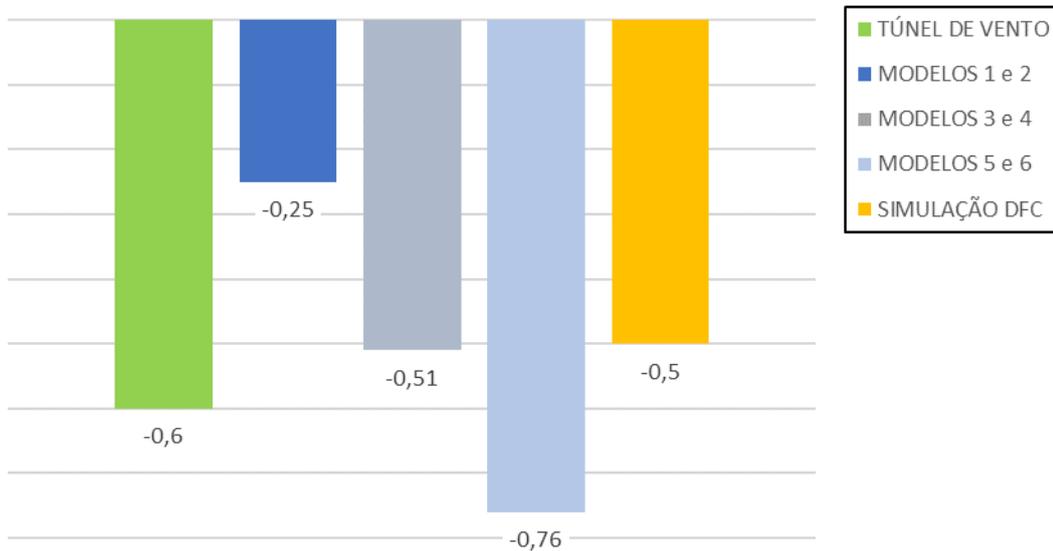
Figura 54: Comparativo dos valores de pressão atuantes nas paredes (em kPa)



Fonte: Elaborado pela autora.

Quanto ao comparativo das pressões incidentes na cobertura dos módulos estudados, a Figura 55 mostra graficamente os resultados, sendo possível visualizar a diferença entre os valores obtidos.

Figura 55: Comparativo dos valores de pressão atuantes na cobertura (em kPa)



Fonte: Elaborado pela autora.

- Em comparativo direto, a maior pressão incidente na cobertura é observada na consideração do pior caso das pressões atuantes na tipologia curva, calculada pela NBR 6123/1988. Indicando que a Norma Brasileira tende a ser conservadora para este tipo de geometria;

- Quando comparadas com as pressões obtidas nas paredes, os resultados para a cobertura foram mais condizentes e próximos com o ensaiado em túnel de vento, para todos os métodos analisados;
- A diferença entre as geometrias consideradas pela ABNT NBR 6123/1988 fica bastante evidente, sendo o pior desempenho obtido nos modelos de duas águas planas, fator pode ser explicado pelo fato desta tipologia ter mais arestas vivas em comparação com as demais, fazendo com que as pressões se comportem de maneira diferente;
- A simulação computacional mostrou resultados favoráveis, ainda que minorando as pressões quando comparada com o comportamento em túnel de vento, porém há de se considerar o impacto das simplificações. Haja visto que apenas quatro módulos passaram pela simulação computacional, e desta forma, o efeito do vento sobre a cobertura total não foi considerado.

Tabela 22: Diferença percentual das técnicas de estudo aplicadas em comparação com resultados de túnel de vento

		Parede	Cobertura
NBR 6123/1988	Duas águas	< 78%	> 58%
	Uma água	< 78%	> 15%
	Curvas	< 78%	< 27%
Simulação DFC		< 300%	> 17%

Fonte: Elaborado pela autora.

A Tabela 22 demonstra a diferença percentual dos métodos empregados em comparação com as pressões médias resultantes do ensaio de túnel de vento, é possível fazer a seguinte análise:

- Ambas as técnicas apresentam falhas na determinação das pressões, porém os pontos de fraqueza são distintos;
- A simulação computacional, majorou em 300% as pressões na parede perpendicular ao ângulo de incidência do vento, este resultado é extremamente alto e pode estar relacionado a diversos motivos, como complexidade da estrutura analisada, técnica de cálculo e parâmetros de entrada adotados e falta da cobertura total para análise mais precisa;

- O desempenho do método DFC para as pressões atuantes na cobertura são bastante animadores, tendo em vista que são valores aproximados, estes podem ser ainda melhores, ainda, é importante ressaltar que tal método minorou os resultados em 17% em comparação com os ensaios de túnel de vento;
- A atuação dos Modelos 03 e 04 mostrou-se surpreendente, minorando em 15% as pressões no comparativo direto com os ensaios em escala real, ainda que, ressalvas devem ser feitas quanto a geometria, que não considera a complexidade do escoamento observado em coberturas curvas;
- As coberturas com geometria de duas águas planas se mostraram extremamente ineficientes para a determinação das pressões sobre a cobertura e não podem ser consideradas como possíveis substitutas para a técnica, visto que tende a minorar os resultados em até 58%, não podendo ser usadas nem como estimativas de projeto em fase inicial;
- O melhor desempenho observado entre as tipologias geométricas empregadas no Estudo 2, foi a cobertura curva, por se aproximar mais fielmente às características da cobertura original, e ter seu resultado de pressão majorado em 27%, o que é considerado conservador, mas que trabalha em favor da segurança, e ainda, os Modelos 5 e 6 levam em consideração comportamentos complexos e observados apenas neste tipo de estrutura (cobertura curva);
- As pressões obtidas para as paredes em ambas as técnicas (NBR 6123/1988 e simulação computacional) foram conservadoras.

4.3.2 Aplicabilidade dos modelos de cálculo da NBR 6123/1988 para estudo de estrutura complexas e de grandes vãos e influência da geometria

Comparando os resultados das pressões com o ensaio de túnel de vento, notou-se que os valores apresentados pela NBR 6123 (ABNT, 1988) em 4 dos 6 casos analisados, são aceitáveis e estão de acordo com o apresentado nos ensaios de túnel de vento, sendo possível a aplicação destes, desde que excluindo veementemente coberturas de duas águas planas, porém algumas ressalvas devem ser feitas.

Constatou-se que o método adotado é extremamente simples e ignora fatores importante e únicos que ocorrem em estruturas da magnitude e geometria do Estádio Beira Rio. A adoção de geometrias com telhados planos, não é o ideal para prever o

comportamento de telhados curvos, visto que, as arestas vivas presentes em coberturas de uma ou duas águas planas, mudam o comportamento do escoamento do fluxo de vento, que em tipologias curvas se comportam de maneira mais indefinida.

4.3.3 Aplicabilidade do modelo computacional para estudo de estruturas complexas e de grandes vãos

O método de determinação das ações do vento por meio de simulações computacionais, mostrou-se ser extremamente complexo, e os resultados, apesar de expressar comportamento conforme bibliografia estudada, coincidem em partes com o apresentado no ensaio de túnel de vento (resultado crítico sobre as paredes). E estes podem variar conforme modelos de turbulência adotados. A aplicação deste método exige alto grau de conhecimento das técnicas de dinâmica dos fluídos computacionais e requer computadores poderosos, porém é aplicável e serve como parâmetro para ensaios de túnel de vento.

5 CONCLUSÃO

Esta pesquisa teve como foco fundamental, avaliar e comparar três diferentes técnicas de cálculo para determinação das pressões do vento: a) Estudo 1 – Túnel de vento; b) Estudo 2 – ABNT NBR 6123/1988 e; c) Estudo 3 – Simulação computacional, sob a ótica da cobertura do Estádio Beira Rio, caracterizado por sua estrutura metálica leve e de geometria complexa e curva. A partir dos resultados apresentados e de suas análises, pode-se concluir que:

- Os desempenhos observados em ambas as técnicas comparativas foram satisfatórios, porém apresentam ressalvas e requerem melhorias;
- No caso da linha de Estudo 2, a geometria com melhor desempenho foi a de cobertura curva, referente aos Modelos 5 e 6, que majorou os resultados de pressão na cobertura em 27%, indo a favor da segurança. Importante citar, bom desempenho quantitativo dos Modelos 3 e 4, alusivos as coberturas de uma água, que obteve desempenho razoável, com as pressões apresentadas 15% menores que as resultantes em ensaio de escala real;
- Em comparativos direto entre os modelos adotados, o ângulo de inclinação do telhado e curvatura das superfícies curvas, não foi fator fundamental para diferença dos coeficientes de pressão e das pressões médias obtidas;
- Para as técnicas de simulação computacional pelo método de DFC, os resultados obtidos sobre a cobertura mostraram-se eficientes, ainda que minore em 17% os valores encontrados em comparação com o ensaio de túnel de vento. Para as paredes da estrutura o comportamento observado foi atípico em termos dos valores das pressões, haja visto que os resultados foram 3x maiores;
- Em comparação direta entre ensaios de túnel de vento e métodos da NBR 6123/1988, fica claro que falta escopo para que o método da Norma Brasileira seja um substituto fiel aos ensaios em escala real. Conclui-se que a NBR 6123 (ANBT, 1988) pode ser utilizada nas fases iniciais de projeto, apenas para verificação e estimativa do comportamento desse tipo de estrutura, não sendo seguro a execução de um projeto de grande porte apenas com base da norma, haja visto o nível de incertezas e de simplificações que envolvem o método, e ainda, a impossibilidade de se determinar os coeficientes máximos e mínimos;

- A geometria simplificada de uma água plana, apesar de ter resultado em valores de pressão satisfatórios, não leva em consideração fatores importantes e que são característicos de geometrias e coberturas curvas, como é o caso da rugosidade da superfície e o número de Reynolds, além de apresentar um comportamento quanto ao escoamento diferente por conta das arestas vivas que influenciam nos pontos de separação do fluxo;
- O emprego da simulação ficou limitado pelos recursos computacionais disponíveis, não sendo possível verificar a estrutura completa. Desta forma, conclui-se que para estruturas complexas do nível do Estádio Beira Rio, empregar a técnica é viável, porém é necessário alto poder de processamento, bem como, ter domínio da técnica, que assim como a quantidade de cálculos empregados, é fundamental para a qualidade dos resultados;
- A simulação computacional fica condicionada aos dados de entrada e de saída adotados, que podem variar de projetista para projetista, bem como à qualidade e nível de detalhamento do modelo 3D;
- Fica evidente que a melhor e mais qualificada técnica para determinação das ações do vento em estruturas metálicas complexas, de grandes vão e com geometrias especiais, ainda é o túnel de vento, que por ser mais difundido, tem mais estudos que comprovem sua eficácia e aplicabilidade, fornece resultados mais precisos e permite a verificação de diversos parâmetros em apenas um ensaio.

5.1 DIFICULDADES ENCONTRADAS

- A ABNT NBR 6123/1988 só contempla ventos do tipo EPS, não sendo possível aplicar os parâmetros presentes na Norma Brasileira para ventos do tipo TS, impossibilitando a comparação completa dos resultados de túnel de vento e limitando o estudo para estruturas complexas e de grandes vãos;
- As técnicas de simulação computacional para determinação das ações do vento sobre estruturas, não são amparadas pela NBR 6123 (ABNT, 1988) ou alguma outra norma regulamentadora brasileira ficando a cargo do projetista, a determinação das técnicas e parâmetros a serem simulados;
- Por se tratar de um projeto de grande porte, que teve estudo realizado há mais de 10 anos, alguns documentos foram de difícil acesso, e a comunicação entre

as equipes de projeto da época também envolveu burocracias. O que dificultou o desenvolvimento do trabalho e atrasou algumas etapas.

5.2 SUJESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para trabalhos futuros, sugere-se que seja feita uma análise quantitativa e comparativa, onde a mesma estrutura seja projetada e calculada com base nos resultados das ações do vento pelo método de túnel de vento e por simulação computacional, tendo como objetivo estimar a diferença entre os projetos estruturais e os materiais adotados, bem como verificar o impacto no orçamento final da obra, mediante a utilização dos métodos citados.

REFERÊNCIAS

ABNT. Associação Brasileira De Normas Técnicas. **ABNT NBR 6123: Forças devidas ao vento em edificações**. Rio de Janeiro: ABNT, 1988.

AIJ. Architectural Institute of Japan. **AIJ Recommendations for Loads on Buildings**. Japão, 2004.

ALY, A. M. Influence of Turbulence, Orientation, and Site Configuration on the Response of Buildings to Extreme Wind. **The Scientific World Journal**, v. 2014, 2014.

ARYA. S. P. **Introduction to Micrometeorology**. 2. ed. São Diego, California: Academic Press. Inc, 1988.

ASCE. American Society of Civil Engineers. **ASCE/SEI 7: Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures**. Estados Unidos, 2022.

AWRUCH, A. M.; BRAUN, A. L.; GRECO, M. Engenharia do vento computacional e suas aplicações na engenharia civil. Análise aerodinâmica e aeroelástica. **Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería**, v. 31, n. 1, p. 55–64, 2015.

BEIRA-RIO suportará ventos de até 170 km/h: Entenda o projeto estrutural do Beira-Rio. In: GRANDES Construções. São Paulo, 23 fevereiro 2011. Disponível em: <https://grandesconstrucoes.com.br/Noticias/Exibir/beira-rio-suportara-ventos-de-ate-170-kmh-entenda-o-projeto-estrutural-do-beira-rio>. Acesso em: 10 nov. 2022.

BIAGINI, P.; BORRI, C.; FACCHINI, L. Wind response of large roofs of stadiums and arena. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, v. 95, n. 9–11, p. 871-887, Oct. 2007.

BLESSMANN, J. **Ação dos Ventos em Telhados**. 2. ed. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 2009.

BLESSMANN, J. **Aerodinâmica das Construções**. 3. ed. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 2011.

BLESSMANN, J. **O Vento na Engenharia Estrutural**. 2. ed. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 2013.

CARPEGGIANI, E. A. **Determinação dos Efeitos Estáticos de Torção em Edifícios Altos Devidos à Ação do Vento**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – PPGEC, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004.

CHEN, F. et al. Experimental investigation of wind pressure characteristics and aerodynamic optimization of a large-span cantilevered roof. **Structures**, v. 34, p. 303-313, Dec. 2021.

CHUVA com fortes ventos arranca parte da cobertura do ginásio Verdão. Piauí, 01 janeiro 2022. Disponível em: <https://www.meionorte.com/noticias/chuva-com-fortes-ventos-arranca-parte-da-cobertura-do-ginasio-verdao-456562>. Acesso em: 05 nov. 2022.

COCHRAN, L. **Wind issues in the design of buildings**. Virginia: American Society of Civil Engineers (ASCE), 2012.

CONFIRA imagens dos estragos causados pela tempestade em Canoas. Canoas, 16 agosto 2022. Disponível em: <https://www.diariodecanoas.com.br/noticias/canoas/2022/08/16/confira-imagens-dos-estragos-causados-pela-tempestade-em-canoas.html>. Acesso em: 05 nov. 2022.

CUNHA DE ALMEIDA, P. R. **Estudo Comparativo de Dimensionamento de uma Cobertura Metálica Submetida à Ação do Vento pela NBR 6123 e pelo Método da Decomposição Ortogonal Própria**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – PPGEC, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.

DAVENPORT, A. G. Past, present and future of wind engineering. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, v. 90, n. 12–15, p. 1371-1380, Dec. 2002.

DELAI, D. V. **Resposta Dinâmica de Edifícios Altos Frente à Ação do Vento: Comparação de Técnicas Experimentais em Túnel de Vento**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – PPGEC, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

DING, Z.; TAMURA, Y. Contributions of wind-induced overall and local behaviors for internal forces in cladding support components of large-span roof structure. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, v. 115, p. 162-172, Apr. 2013.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION: EN 1991 - **Eurocode 1: Actions on structures. Part 1.4: General actions - Wind actions**. EN, v. 1, n. 2005. Bruxelas, 2010.

GB. National Standard of the People's Republic of China. **GB 50009-2012: Load code for the design of building structures**. China, 2012.

GUO, J.; ZHU, M.; HU, C. Study on wind load shape factor of long-span stadium roof. **Advances in Structural Engineering**, v. 23, n. 11, p. 2333-2342, Aug. 2020.

HANSEN, S. O. Wind Loading Design Codes. **Fifty Years of Wind Engineering**. v.1. p. 35-68. 2013.

HANSEN, S. O.; HØJHOLT, P.; NIELSEN, K. Wind load on grandstands around a full perimeter of a stadium. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, v. 42, n. 1–3, p. 1423-1434, Oct. 1992.

HOLMES, J. D.; ALLSOP, A. C.; GINGER, J. D. Gust durations, gust factors and gust response factors in wind codes and standards. **Wind and Structures, An International Journal**, v. 19, n. 3, p. 339–352, Sept. 2014.

HYPE STUDIO. Estádio Beira-Rio. Porto Alegre: Hype Studio, [2022?]. Disponível em: <https://www.hypestudio.com.br/br/estadio-beira-rio>. Acesso em: 11 nov. 2022.

ISYUMOV, N. Alan G. Davenport's mark on wind engineering. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, v. 104–106, p. 12-24, May-July. 2012.

LAM, K. M.; ZHAO, J. G. Occurrence of peak lifting actions on a large horizontal cantilevered roof. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, v. 90, n. 8, p. 897–940, Aug. 2002.

LAROSE, G. L.; FRANCK, N. Early wind engineering experiments in Denmark. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, v. 72, n. 1–3, p. 493-499, Nov.-Dec. 1997.

LEITE MATTUELLA, J. M. **Avaliação em Túnel de Vento do Comportamento da Camada Limite Atmosférica em Terrenos Complexos**. Dissertação de Doutorado em Engenharia Civil, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – PPGEC, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012.

LIU, M. et al. Evaluation of wind effects on a large span retractable roof stadium by wind tunnel experiment and numerical simulation. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, v. 179, p. 39–57, Aug. 2018.

LOREDO-SOUZA, A. M. et al. A climatology-based wind speed map for NBR 6123. **IBRACON Structures and Materials Journal**, v. 16, n. 4, 2023.

LOREDO-SOUZA, A. M. et al. Estudo Comparativo entre Ensaios em Túnel de Vento e Danos em Estruturas Reais Causados por um Downburst. *In: JORNADAS SUDAMERICANAS DE INGENIERÍA ESTRUCTURAL*, 37., 2016, Paraguai. **Anais [...]**. Assunção, Paraguai, 2016.

LOREDO-SOUZA, A. M. et al. **Estudo em Túnel de Vento da Cobertura do Estádio Beira-Rio, Porto Alegre**. *In: CONSTRUMETAL – CONGRESSO LATINO-AMERICANO DA CONSTRUÇÃO METÁLICA*, 2010, São Paulo. **Anais [...]**. São Paulo, 2010.

LOREDO-SOUZA, A. M.; SCHETTINI, B. C.; PALUCH, J. M. Simulação da Camada Limite Atmosférica em Túnel De Vento. *In: ESCOLA DE PRIMAVERA DE TRANSIÇÃO E TURBULÊNCIA*, 4., 2004, Porto Alegre. **Anais [...]**. Porto Alegre: UFRGS/PUCRS, 2004.

LU, B.; LI, Q. S. Large eddy simulation of the atmospheric boundary layer to investigate the Coriolis effect on wind and turbulence characteristics over different terrains. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, v. 220, Jan. 2022.

LU, C. L. et al. Large eddy simulation of wind effects on a long-span complex roof structure. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, v. 100, n. 1, p. 1-18, Jan. 2012.

LUO, Y. et al. Field measurement of wind pressure on a large-scale spatial structure and comparison with wind tunnel test results. **Journal of Civil Structural Health Monitoring**, v. 11, n. 3, p. 707-723, Mar. 2021.

MADEIRA, E.; MARTINS, J. Zagueiro narra "momentos de terror" após estrutura de estádio desabar em jogo da Série D. Teresina, 28 agosto 2021. Disponível em: <https://ge.globo.com/pi/futebol/times/4-de-julho/noticia/zagueiro-narra-momentos-de-terror-sobre-venda-val-que-fez-estrutura-de-estadio-desabar-em-jogo-da-serie-d.ghtml>. Acesso em: 05 nov. 2022.

MAKOWSKI, D. G. **Ação do Vento em Coberturas Isoladas**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – PPGEC, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004.

METSUL. Downburst – Pouco conhecido e destrutivo. Porto Alegre, 17 setembro 2022. Disponível em: <https://metsul.com/downburst-pouco-conhecido-e-destrutivo/>. Acesso em: 11 nov. 2022.

METSUL. Vento arranca cobertura de arena e balança estádio na Inglaterra. Porto Alegre, 19 fevereiro 2022. Disponível em: <https://metsul.com/vento-arranca-cobertura-de-arena-e-balanca-estadio-na-inglaterra/>. Acesso em: 05 nov. 2022.

N. J. COOK. **The designer's guide to wind loading of building structures. Part 2: Static structures**. 1. ed. Butterworths/BRE, 1990.

NGO, T.; LETCHFORD, C. A comparison of topographic effects on gust wind speed. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, v. 96, n. 12, p. 2273-2293, Dec. 2008.

O Beira-Rio. Porto Alegre: Beira Rio, [2023?]. Disponível em: <https://estadiobeirario.com.br/o-beira-rio>. Acesso em: 2 mar. 2023.

RIERA, J. D. Sobre a Definição do Vento para Projeto Estrutural na NBR 6123 (1989) e Outras Normas Sul Americanas. **Revista Sul-americana de Engenharia Estrutural**, v. 13, n. 3, dez. 2016.

SANTINI ROCHA. **Memorial Descritivo Sport Club Internacional**. Porto Alegre: Santini Rocha, 2014. Documento de uso interno da instituição.

SCRUTON C; ROGERS EWE. Steady and unsteady wind loading of buildings and structures. **Phil Trans Roy Soc London Ser A. Math Phys Sci**, v. 269, n. 1199, p. 353–379, 1971.

SIAS, E. Vento pode ter atingido até 150 km/h na grande Porto Alegre. Porto Alegre, 16 agosto 2022. Disponível em: <https://metsul.com/vento-pode-ter-atingido-ate-150-km-h-na-grande-porto-alegre/>. Acesso em: 05 nov. 2022.

SIMIUI, E.; YEO, D. **Wind Effects on Structures: Modern Structural Design for Wind**. 4. Ed. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons Ltd, 2019.

SOFOTASIOU, P.; HUGHES, B.; GHANI, S. A. CFD optimisation of a stadium roof geometry: a qualitative study to improve the wind microenvironment. **Sustainable Buildings**, v. 2, p. 8, 2017.

SONG, J. et al. Non-Gaussian properties and their effects on extreme values of wind pressure on the roof of long-span structures. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, v. 184, p. 106–115, Jan. 2019.

TAMURA, T.; NOZAWA, K.; KONDO, K. AIJ guide for numerical prediction of wind loads on buildings. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, v. 96, n. 10–11, p. 1974-1984, Oct.-Nov. 2008.

VALLIS, M. B. **Brazilian Extreme Wind Climate**. Dissertação de Doutorado em Engenharia Civil, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – PPGEC, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2019.

YANG, W. et al. Influences of equilibrium atmosphere boundary layer and turbulence parameter on wind loads of low-rise buildings. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, v. 96, n. 10–11, p. 2080–2092, Oct. 2008.

ANEXO A – RESULTADOS DAS PRESSÕES CAUSADAS PELAS AÇÕES DO VENTO PELO MÉTODO DA NBR 6123/1988

Resultado completo para as pressões atuantes na cobertura dos 6 modelos geométricos calculados pelos procedimentos da NBR 6123 (ABNT, 1988) é apresentado na Tabela 23.

Tabela 23: Pressões atuantes na cobertura para os modelos considerados

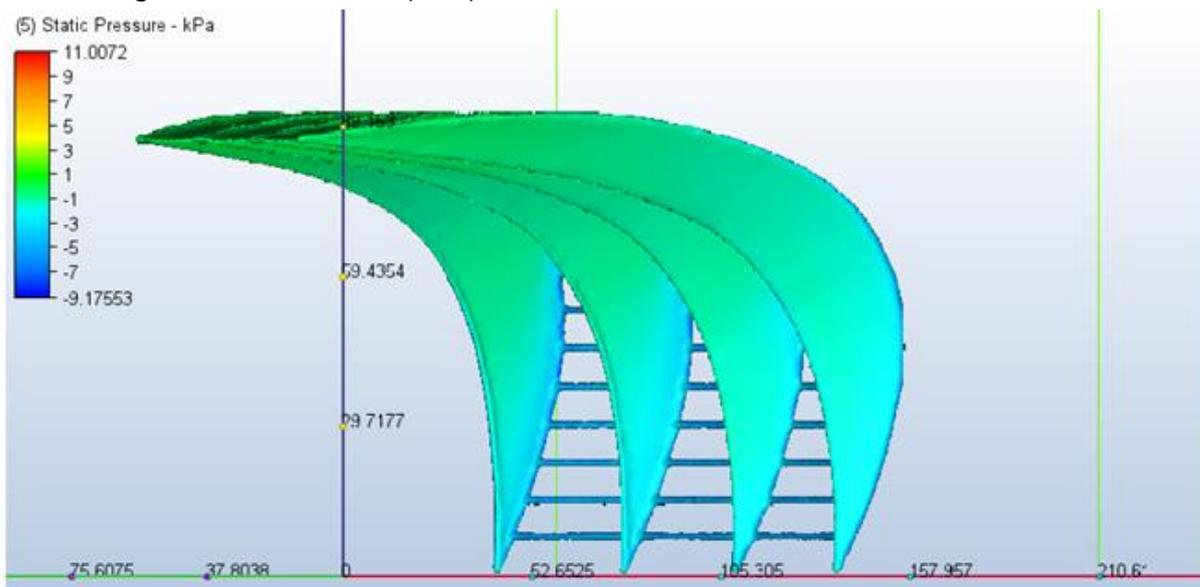
θ Vento		0°	90°	180°	270°
Modelo 01	Parede	2,06 kPa	2,24 kPa	1,78 kPa	1,78 kPa
	Cobertura	-0,29 kPa	-0,32 kPa	-0,25 kPa	-0,25 kPa
Modelo 02	Parede	2,06 kPa	2,24 kPa	1,78 kPa	1,78 kPa
	Cobertura	-0,29 kPa	-0,32 kPa	-0,25 kPa	-0,25 kPa
Modelo 03	Parede	2,06 kPa	2,24 kPa	1,78 kPa	1,78 kPa
	Cobertura	-0,59 kPa	-0,16 kPa	-0,51 kPa	-0,51 kPa
		-0,15 kPa	-0,64 kPa	-0,13 kPa	-0,13 kPa
Modelo 04	Parede	2,06 kPa	2,24 kPa	1,78 kPa	1,78 kPa
	Cobertura	-0,59 kPa	-0,16 kPa	-0,51 kPa	-0,51 kPa
		-0,15 kPa	-0,64 kPa	-0,13 kPa	-0,13 kPa
Modelo 05	Parede	2,06 kPa	2,24 kPa	1,78 kPa	1,78 kPa
	Cobertura	-0,88 kPa	-0,96 kPa	-0,76 kPa	-0,76 kPa
		-0,15 kPa	-0,16 kPa	-0,13 kPa	-0,13 kPa
		-0,44 kPa	-0,48 kPa	-0,38 kPa	-0,38 kPa
		-0,29 kPa	-0,32 kPa	-0,25 kPa	-0,25 kPa
		-0,44 kPa	-0,48 kPa	-0,38 kPa	-0,38 kPa
		-0,59 kPa	-0,64 kPa	-0,51 kPa	-0,51 kPa
Modelo 06	Parede	2,06 kPa	2,24 kPa	1,78 kPa	1,78 kPa
	Cobertura	-0,88 kPa	-0,96 kPa	-0,76 kPa	-0,76 kPa
		-0,15 kPa	-0,16 kPa	-0,13 kPa	-0,13 kPa
		-0,44 kPa	-0,48 kPa	-0,38 kPa	-0,38 kPa
		-0,29 kPa	-0,32 kPa	-0,25 kPa	-0,25 kPa
		-0,44 kPa	-0,48 kPa	-0,38 kPa	-0,38 kPa
		-0,59 kPa	-0,64 kPa	-0,51 kPa	-0,51 kPa

Fonte: Elaborado pela autora.

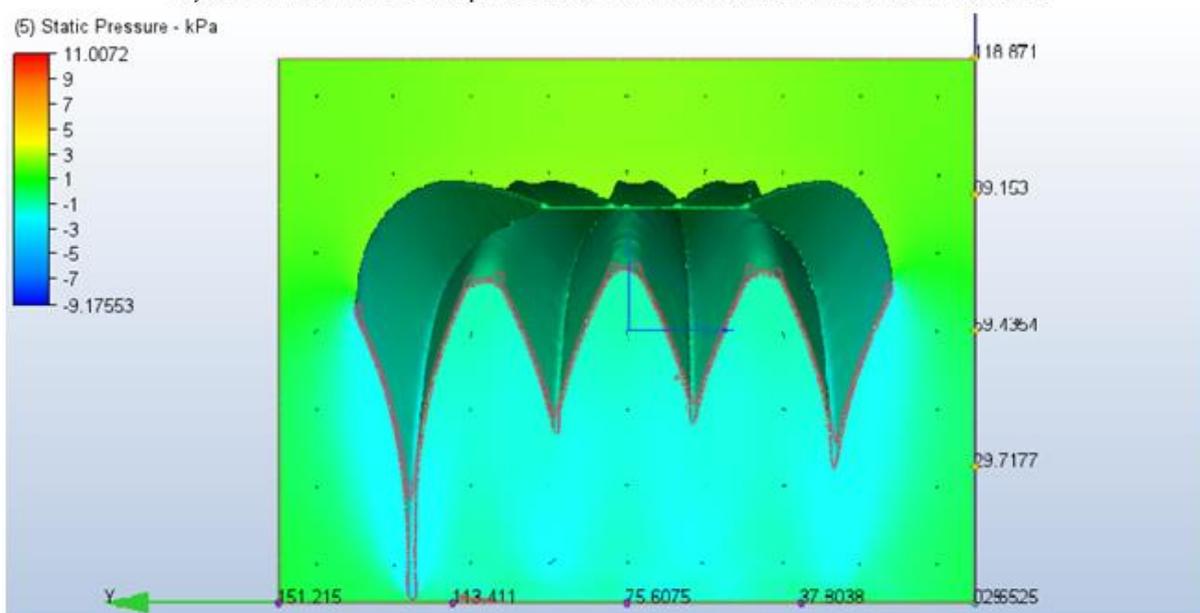
ANEXO B - RESULTADOS DAS PRESSÕES CAUSADAS PELAS AÇÕES DO VENTO PELO MÉTODO DFC

As Figura 56 e Figura 57 apresentam mais resultados para as pressões do vento sobre o módulo do Estádio Beira Rio.

Figura 56: Pressões (kPa) atuantes da cobertura vistas da face interna



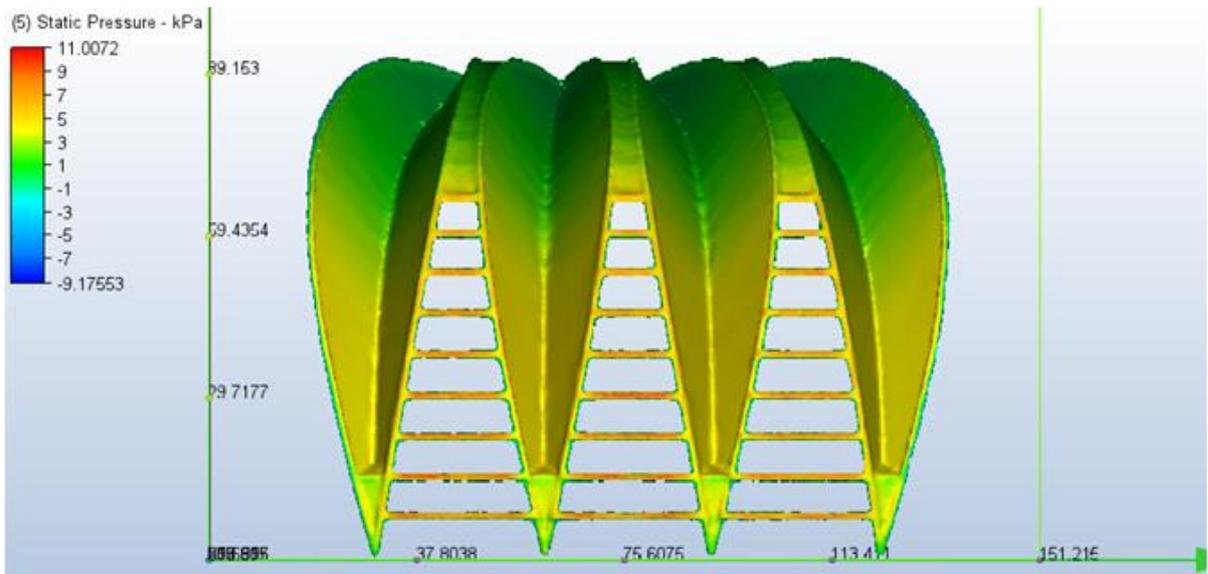
a) Vista isométrica da pressão atuante do lado interno da estrutura



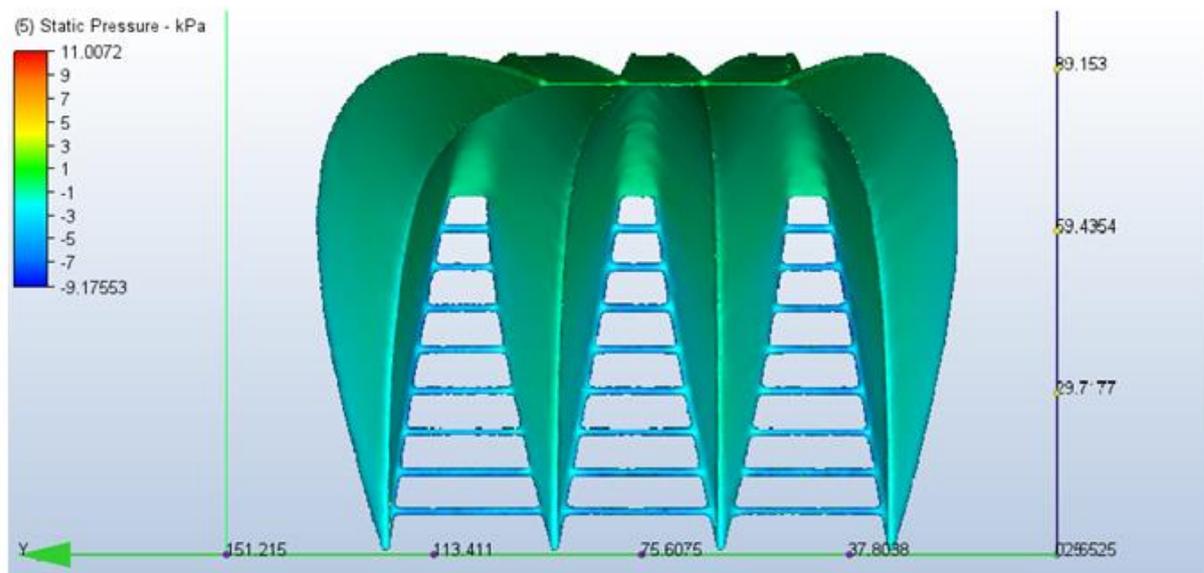
b) Plano das pressões atuantes na parte interna da estrutura e vetor da velocidade do vento

Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 57: Pressões (kPa) atuantes da cobertura vistas da face frontal



a) Vista das pressões externas atuantes sobre a estrutura



b) Vista das pressões internas atuantes sobre a estrutura

Fonte: Elaborado pela autora.