PAULA MEIRELLES BOLELLI

**Avaliação numérica da
ação do vento em estruturas de membrana**

São Paulo

2020

PAULA MEIRELLES BOLELLI

**Avaliação numérica da
ação do vento em estruturas de membrana**

Versão corrigida

Dissertação apresentada à Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo para a obtenção do título de
Mestre em Ciências

Área de Concentração: Engenharia Civil

Orientador: Prof. Dr. Ruy Marcelo de Oliveira Pauletti

São Paulo

2020

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Este exemplar foi revisado e corrigido em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, 31 de março de 2020

Assinatura do autor: *Paula M. Bolelli*

Assinatura do orientador:

Catálogo-na-publicação

Bolelli, Paula Meirelles

Avaliação numérica da ação do vento em estruturas de membrana / P. M. Bolelli -- versão corr. -- São Paulo, 2020.
96 p.

Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Estruturas e Geotécnica.

1. Ação do vento nas estruturas 2. Estruturas de membranas 3. Métodos numéricos em dinâmica de fluidos I. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Estruturas e Geotécnica II. t.

Nome: BOLELLI, Paula Meirelles

Título: Avaliação numérica da ação do vento em estruturas de membrana

Dissertação apresentada à Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo para a obtenção do título de
Mestre em Ciências

Aprovado em: 04 de fevereiro de 2020

Banca Examinadora

Prof. Dr. Ruy Marcelo de Oliveira Pauletti

Instituição: Universidade de São Paulo

Julgamento: Aprovada

Prof. Dr. Henrique Campelo Gomes

Instituição: Universidade de São Paulo

Julgamento: Aprovada

Prof. Dr. Joseph Youssif Saab Junior

Instituição: Instituto Mauá de Tecnologia

Julgamento: Aprovada

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais Hercília e Newton e à minha irmã Raquel, que sempre acreditaram em mim e me incentivaram a superar as dificuldades para que eu conseguisse chegar até aqui, com muita paciência e me dando todo o suporte necessário.

Ao meu namorado Thomas Hachul Bizuti pelo companheirismo e por me apoiar, mesmo de longe, com todo seu amor, ajudando a conter as minhas crises nos últimos tempos.

Aos meus avós Pêrsio, Lúcia, Manoel e Irma, por todo carinho e pelas palavras acolhedoras.

À minha amiga Karina Bradaschia Rocha, que está ao meu lado desde a graduação, nos melhores e nos piores momentos.

Ao meu orientador Dr. Ruy Marcelo de Oliveira Pauletti, pela orientação e pelos ensinamentos.

Aos professores Dr. Joseph Youssif Saab Junior, Me. João Carlos Martins Coelho, Dr. Carlos Vinicius Xavier Bessa e MSc. Januário Pellegrino Neto pela amizade, pelos incentivos e por me acompanharem durante a minha trajetória.

Aos professores Dr. Henrique Campelo Gomes e Dr. Guilherme Rosa Franzini pela colaboração.

Aos meus amigos Bruno Cesare Lanzoni e Carolina Leutwiler Veglione por estarem presentes nesses anos.

Ao Instituto Mauá de Tecnologia, por todo o apoio e por disponibilizar que eu utilizasse as máquinas com a licença do software Ansys necessária para a realização do meu trabalho.

A todos que colaboraram direta ou indiretamente na realização desse trabalho.

RESUMO

Esse trabalho consiste na análise dos coeficientes de pressão em estruturas de membrana sob a ação do vento. Em se tratando de estruturas retesadas, o estudo de problemas de interação fluido-estrutura é de extrema importância, pois sua leveza característica faz com que as cargas de vento tenham papel fundamental em seu dimensionamento. Porém, percebe-se a falta de dados em normas brasileiras e estrangeiras, como por exemplo, no que diz respeito ao cálculo de coeficientes de pressão para estruturas com formas não convencionais, o que se aplica às estruturas retesadas. A etapa inicial da pesquisa abrange uma revisão bibliográfica do estado da arte de tensoestruturas, fornecendo a fundamentação teórica necessária que conduz à realização das etapas seguintes. A seguir, o estudo de formas típicas de estruturas em membrana, de modo a definir os parâmetros geométricos e considerações do escoamento. Os coeficientes de pressão são obtidos por meio do método computacional. Utilizando o software ANSYS Fluent, baseado no Método dos Volumes Finitos, foram feitas análises numéricas da estrutura. Por fim, os resultados obtidos pelos modos relatados foram analisados, verificando a satisfatoriedade da metodologia proposta a fim de contribuir para futuras pesquisas nesse campo.

Palavras-chave: estruturas de membrana; vento; coeficientes de pressão; fluidodinâmica computacional (CFD)

ABSTRACT

This work analyzes pressure coefficients on membrane structures under wind loads. The study of fluid-structure interaction is extremely important for taut structures, because wind has a primordial role in design of this kind of structure due to its lightness. Also, it can be noted a lack of data in some fields such as pressure coefficients for unconventional shapes in Brazilian and other Standards and Design Codes. The initial stage of the research includes a literature review of the state of the art of taut structures, providing the necessary theoretical substantiation for the following steps. Subsequently, typical shapes of membrane structures are studied, discriminating the geometric parameters and flow considerations adopted. Using the software ANSYS Fluent, based on the Finite Volume Method, numerical analyses were performed to obtain the pressure coefficients of the structures. Finally, the results obtained by the reported modes were analyzed, verifying the satisfactoriness of the proposed methodology. In order to contribute to future research in this field, this research seeks to provide guidelines to help predict the behavior of typical membrane structures from the wind action.

Keywords: membrane structures; wind; pressure coefficients; computational fluid dynamics

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Vista Panorâmica do Estádio Olímpico de Munique.....	19
Figura 2 - Terminal de Passageiros de Jeddah	20
Figura 3 - Modelo usado para parabolóide hiperbólico.....	25
Figura 4 - Coeficientes de pressão, sem vigas de contorno e paredes, para a relação $H/A = 0,5$ (conforme a Figura 3) e para as situações de vento: (a) 0° e (b) 90°	26
Figura 5 - Coeficientes de pressão, com vigas de contorno e paredes, para a relação $H/A = 0,5$ (conforme a Figura 3) e para as situações de vento: (a) 0° ; (b) 45° e (c) 90°	26
Figura 6- (a) Modelo cônico ensaiado em túnel de vento e (b) respectivo mapa simplificado dos coeficientes de pressão.....	27
Figura 7 - Modelo na forma de parabolóide hiperbólico ensaiado em túnel de vento	27
Figura 8 - Mapa simplificado dos coeficientes de pressão para parabolóide hiperbólico	28
Figura 9 - Modelo de cobertura de estádio e respectivas distribuições dos coeficientes de pressão	29
Figura 10 - Modelo de cobertura conoidal estudado: (a) vista lateral; (b) protótipo; (c) coeficientes de pressão do modelo indeformado; (d) coeficientes de pressão do modelo deformado.....	30
Figura 11 - Diferentes geometrias de parabolóide hiperbólico estudadas por Rizzo et al. (2011) e Rizzo (2012) em túnel de vento	31
Figura 12 - Modelo de parabolóide hiperbólico com os parâmetros geométricos	31
Figura 13 - Valores considerados para os parâmetros da Figura 12.....	31
Figura 14 - Coeficientes de pressão médios obtidos a partir de ensaio em túnel de vento para o modelo da Figura 13 (a) para as situações de vento: (a) 0° ; (b) 90° e (c) 45°	32
Figura 15 - Coeficientes de pressão médios obtidos a partir de ensaio em túnel de vento para o modelo da Figura 13 (b) para as situações de vento: (a) 0° ; (b) 90° e (c) 45°	32
Figura 16 - Modelo de cobertura em parabolóide hiperbólico: (a) modelo aberto, apoiado em colunas; (b) modelo fechado.....	33
Figura 17 - Modelo estudado para ser aplicado em túnel de vento para medição nas faces superior e inferior	33
Figura 18 - Distribuição dos coeficientes de pressão nas superfícies inferior e superior.....	34
Figura 19 - Coeficientes de pressão para parabolóide hiperbólico. Os valores mostrados são restritos para a situação em que obstáculos abaixo da cobertura bloqueiam menos de 50% da seção transversal exposta ao vento e para as seguintes relações: $0,25 < h/d < 0,5$; $0,1 < c/d < 0,3$; $0,75 < b/d < 1,25$	35
Figura 20 - Cúpula sobre o terreno: (a) elevação; (b) mapa dos coeficientes de pressão para a relação $f/d=0,5$; (c) mapa dos coeficientes de pressão para a relação $f/d=0,25$	36
Figura 21 - Coeficientes de pressão para cúpula	37
Figura 22 - Isopletras Da Velocidade Básica Do Vento	39
Figura 23 - Fator Topográfico S_1	40
Figura 24 - Geometria da casa do Modelo 1 em ANSYS	60
Figura 25 - Volume de controle do Modelo 1, nas seguintes situações de incidência: (a) vento a 0° ; (b) vento a 90°	60
Figura 26 - Campo de pressões na casa para vento incidindo a 0° : (a) no plano XY, perpendicular à ação do vento, passando no meio da edificação; (b) no plano YZ, passando no meio da edificação	61

Figura 27 - Campo de velocidades na casa para vento incidindo a 0°: (a) no plano XY, perpendicular à ação do vento, passando no meio da edificação; (b) no plano YZ, passando no meio da edificação	61
Figura 28 - Campo de pressões na casa para vento incidindo a 90°: (a) no plano XY, passando no meio da edificação; (b) no plano YZ, perpendicular à ação do vento, passando no meio da edificação.....	62
Figura 29 - Campo de velocidades na casa para vento incidindo a 90°: (a) no plano XY, passando no meio da edificação; (b) no plano YZ, perpendicular à ação do vento, passando no meio da edificação	62
Figura 30 - Coeficientes de pressão para o Modelo 1, nas seguintes situações de incidência: (a) vento a 0°; (b) vento a 90°	63
Figura 31 - Regiões para a determinação dos coeficientes de pressão externo, em paredes de edificações de planta retangular: (a) vento 0°; (b) vento 90°	63
Figura 32 - Regiões para a determinação dos coeficientes de pressão externo, em telhados simétricos com duas águas	64
Figura 33 - Transferência dos resultados obtidos no Fluent para análise estática no ANSYS.	65
Figura 34 - Deformações na casa: (a) Vento 0°; (b) Vento 90°	65
Figura 35 - Tensões principais máximas na casa: (a) Vento 0°; (b) Vento 90°	66
Figura 36 - Tensões principais mínimas na casa: (a) Vento 0°; (b) Vento 90°	66
Figura 37 - Modelo da cúpula apoiada sobre o terreno, com dimensões em metros: (a) modelo 2A; (b) modelo 2B.....	67
Figura 38 - Volume de controle do Modelo 2	67
Figura 39 - Campo de pressões na cúpula para o modelo 2A: (a) no plano XY, perpendicular à ação do vento, passando pelo centro da cúpula; (b) no plano YZ, passando pelo centro da cúpula	68
Figura 40 - Campo de velocidades na cúpula para o modelo 2A: (a) no plano XY, perpendicular à ação do vento, passando pelo centro da cúpula; (b) no plano YZ, passando pelo centro da cúpula.....	68
Figura 41 - Campo de pressões na cúpula para o modelo 2B: (a) no plano XY, perpendicular à ação do vento, passando pelo centro da cúpula; (b) no plano YZ, passando pelo centro da cúpula	69
Figura 42 - Campo de velocidades na cúpula para o modelo 2B: (a) no plano XY, perpendicular à ação do vento, passando pelo centro da cúpula; (b) no plano YZ, passando pelo centro da cúpula.....	69
Figura 43 - Coeficientes de pressão na cúpula do modelo 2A: (a) vista isométrica; (b) vista superior	70
Figura 44 - Coeficientes de pressão na cúpula do modelo 2B: (a) vista isométrica; (b) vista superior	70
Figura 45 - Resultados obtidos no modelo 2A: (a) tensão de cisalhamento (<i>wall shear</i>) na edificação.....	71
Figura 46 - Definição da geometria por modelagem paramétrica utilizando o <i>Grasshopper</i> ..	71
Figura 47 - Dimensões em metros da membrana do modelo 3A: (a) vista superior da membrana; (b) elevação da membrana	72
Figura 48 - Direções do vento analisadas para o parabolóide hiperbólico	73
Figura 49 - Representação do volume de controle do parabolóide hiperbólico	73

Figura 50 - Distribuição dos coeficientes de pressão ao longo da superfície do modelo 3A nas faces superior e inferior nos casos de vento estudados	74
Figura 51 - Distribuição total dos coeficientes de pressão ao longo da superfície do modelo 3A	75
Figura 52 - Obstáculos colocados embaixo da membrana a fim de estudar o impacto da distribuição dos coeficientes de pressão	76
Figura 53 - Direções do vento analisadas para o parabolóide hiperbólico com obstáculos	76
Figura 54 - Distribuição dos coeficientes de pressão na membrana do modelo 3B	77
Figura 55 - Distribuição dos coeficientes de pressão na membrana do modelo 3C	78
Figura 56 - Distribuição dos coeficientes de pressão na membrana do modelo 3D	79
Figura 57 - Distribuição dos coeficientes de pressão na membrana do modelo 3E	80
Figura 58 - Dimensões do Modelo 4A	81
Figura 59 - Volume de controle, com dimensões em metros, para o estudo do silo com cobertura cônica: (a) elevação; (b) vista superior em corte	82
Figura 60 - Coeficientes de pressão na cobertura cônica obtidos no Fluent pelo modelo $k-\epsilon$ realizável	82
Figura 61 - Coeficientes de pressão para cobertura cônica: (a) valores experimentais, obtidos em Sabransky e Melbourne (1987); (b) valores numéricos obtidos em Fouad et al. (2018)....	83
Figura 62 - Membrana com forma conoidal, com dimensões em metros	83
Figura 63 - Membrana com forma cônica: com fechamentos laterais e sem fechamentos laterais	84
Figura 64 - Coeficientes de pressão no modelo 4B	84
Figura 65 - Coeficientes de pressão no modelo 4C: (a) superfície externa; (b) superfície interna; (c) valores totais somados	85
Figura 66 - Domo pneumático reforçado por cabos	85
Figura 67 – Modelo 3: (a) vista isométrica; (b) vista em planta, em metros	86
Figura 68 - Volume de controle e incidências de vento	86
Figura 69 - Distribuição dos coeficientes: (a) Vento 0°; (b) Vento 90°	87
Figura 70 - Linhas de fluxo do escoamento: (a) vento a 0°; (b) vento a 90°	87
Figura 71 - Tensão de cisalhamento na membrana: (a) vento a 0°; (b) vento a 90°	88

LISTA DE SÍMBOLOS

V_0	Velocidade básica do vento
V_k	Velocidade característica do vento
S_1	Fator topográfico
S_2	Fator que considera a influência da rugosidade do terreno, das dimensões da edificação ou parte da edificação em estudo, e de sua altura sobre o terreno
S_3	Fator baseado em conceitos probabilísticos
F_r	Fator de rajada correspondente à categoria II
b	Parâmetro para a correção da classe da edificação
q	Pressão dinâmica do vento
θ	Ângulo de inclinação de telhados
z	Cota acima do terreno
d	Diferença de nível entre a base e o topo de morro ou talude
Δp	Pressão efetiva em um ponto na superfície da edificação
Δp_e	Pressão efetiva externa
Δp_i	Pressão efetiva interna
c_{pe}	Coeficiente de pressão externa
c_{pi}	Coeficiente de pressão interna
F	Força de vento em uma superfície plana, perpendicular à área dessa superfície
F_i	Força interna à edificação em uma superfície plana, perpendicular à área dessa superfície
F_e	Força externa à edificação em uma superfície plana, perpendicular à área dessa superfície
A	Área de uma superfície plana sobre a qual é calculada a força exercida pelo vento
C_e	Coeficiente de forma interno
C_i	Coeficiente de forma externo
F_a	Força de arrasto devida ao vento
C_a	Coeficiente de arrasto
A_e	Área frontal efetiva
Re	Número de Reynolds
U	Velocidade característica do escoamento
x	Comprimento característico do escoamento
ρ	Massa específica do fluido
μ	Viscosidade do fluido
ν	Viscosidade cinemática do fluido
N	Propriedade extensiva genérica
η	Propriedade intensiva genérica
SC	Superfície de controle
VC	Volume de controle

S	Superfície
V	Volume
$\mathbf{U}$	Vetor velocidade do fluido
u	Componente da velocidade na direção x , em um espaço cartesiano
v	Componente da velocidade na direção y , em um espaço cartesiano
w	Componente da velocidade na direção z , em um espaço cartesiano
$\mathbf{n}$	Versor normal à superfície
M	Massa total do sistema
t	Tempo
$\mathbf{F}$	Resultante de todas as forças de campo e de superfície
$\mathbf{B}$	Quantidade de movimento
$\mathbf{g}$	Vetor aceleração da gravidade
g_x	Componente da aceleração da gravidade na direção x , em um espaço cartesiano
g_y	Componente da aceleração da gravidade na direção y , em um espaço cartesiano
g_z	Componente da aceleração da gravidade na direção z , em um espaço cartesiano
$\mathbf{F}^B$	Vetor resultante das forças de campo
F_x^B	Componente da resultante das forças de campo na direção x , em um espaço cartesiano
F_y^B	Componente da resultante das forças de campo na direção y , em um espaço cartesiano
F_z^B	Componente da resultante das forças de campo na direção z , em um espaço cartesiano
$\mathbf{F}^S$	Vetor resultante das forças de superfície
F_x^S	Componente da resultante das forças de superfície do versor na direção x , em um espaço cartesiano
F_y^S	Componente da resultante das forças de superfície do versor na direção y , em um espaço cartesiano
F_z^S	Componente da resultante das forças de superfície do versor na direção z , em um espaço cartesiano
σ	Tensão normal
τ	Tensão de cisalhamento
P	Pressão termodinâmica local
$\bar{U}$	Valor médio no tempo da velocidade do escoamento
U'	Flutuação da velocidade do escoamento
τ^R	Tensor de Reynolds
k	Energia cinética turbulenta específica
$\bar{u}$	Componente da flutuação da velocidade na direção x , em um espaço cartesiano
$\bar{v}$	Componente da flutuação da velocidade na direção y , em um espaço cartesiano
$\bar{w}$	Componente da flutuação da velocidade na direção z , em um espaço cartesiano
μ_t	Viscosidade turbulenta

ε	Taxa de dissipação de energia cinética turbulenta
C_μ	Constante empírica da equação da viscosidade turbulenta
P^k	Termo da produção da média da energia cinética turbulenta
σ_k	Coefficiente de difusão turbulenta do modelo $k - \varepsilon$
σ_ε	Coefficiente de difusão turbulenta do modelo $k - \varepsilon$
$C_{1\varepsilon}$	Constante empírica do modelo $k - \varepsilon$
$C_{2\varepsilon}$	Constante empírica do modelo $k - \varepsilon$
$c_{pe,10}$	coeficiente de pressão externa (nomenclatura da norma europeia)

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
2	OBJETIVOS	17
3	METODOLOGIA E JUSTIFICATIVA DO TRABALHO	18
4	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA: ESTRUTURAS DE MEMBRANA	19
4.1	ETAPAS DE PROJETO	20
4.2	MATERIAIS UTILIZADOS	21
4.3	A AÇÃO DO VENTO EM ESTRUTURAS DE MEMBRANA	22
4.3.1	Interação Fluido-Estrutura	23
4.3.2	Estudo dos coeficientes de pressão em formas típicas	25
4.3.3	Abordagem em normas técnicas	35
5	A AÇÃO DO VENTO EM ESTRUTURAS SEGUNDO A ABNT NBR 6123:1988	38
5.1	VELOCIDADE CARACTERÍSTICA DO VENTO	38
5.1.1	Velocidade básica do vento V_0	39
5.1.2	Fator S_1	40
5.1.3	Fator S_2	41
5.1.4	Fator S_3	43
5.2	COEFICIENTES DE PRESSÃO	43
5.3	COEFICIENTES DE FORMA	44
5.4	COEFICIENTES DE FORÇA	45
6	CFD – FLUIDODINÂMICA COMPUTACIONAL	46
6.1	MÉTODO DOS VOLUMES FINITOS	46
6.2	CONCEITOS FUNDAMENTAIS	47
6.3	EQUAÇÕES GOVERNANTES DA MECÂNICA DOS FLUIDOS	48
6.3.1	Princípio da Conservação de Massa	49
6.3.2	Princípio da Conservação da Quantidade de Movimento	50
6.4	MODELOS DE TURBULÊNCIA	53
6.4.1	Modelo $k-\epsilon$	54
7	ENSAIOS EM TÚNEL DE VENTO FÍSICO	57
7.1	SEMELHANÇA	57
7.2	SIMULAÇÃO DO VENTO NATURAL PARA CAMADA LIMITE TURBULENTA	58
8	MODELOS NUMÉRICOS UTILIZANDO O FLUENT	59
8.1	MODELO 1 – CASA	59

8.1.1 Comparação dos resultados dos coeficientes de pressão	63
8.1.2 Interação fluido-estrutura no ANSYS	64
8.2 MODELO 2 – CÚPULA SOBRE O TERRENO	66
8.3 MODELO 3 – PARABOLOIDE HIPERBÓLICO	71
8.3.1 Membrana isolada	72
8.3.2. Efeitos de obstáculos no escoamento	75
8.4 COBERTURA CÔNICA.....	81
8.5 MODELO 5 – MEMBRANA PNEUMÁTICA	85
9 CONCLUSÕES	89
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	91

1 INTRODUÇÃO

Estruturas retesadas são aquelas que dependem de um estado de esforços internos de tração para seu bom desempenho e funcionamento. Esse tipo de estrutura é muito utilizado para cobertura de grandes espaços, além de outras aplicações, por razões estéticas e estruturais. Apresenta vantagens como: facilidade de execução e transporte, capacidade de vencer grandes vãos, possibilidade de maior utilização da iluminação natural, baixo peso próprio e menor custo e consumo de materiais para a cobertura de grandes espaços. Ainda, nota-se que uma característica marcante das tensoestruturas consiste na possibilidade de criação de inúmeras formas geométricas dando ampla disponibilidade criativa, por exemplos, aos profissionais de arquitetura.

Por outro lado, existem alguns grandes problemas, como a falta de parâmetros para o pré-dimensionamento estrutural e a falta de dados em alguns campos, como coeficientes de pressão para formas não convencionais (RIZZO, 2014). Essa falta de informações pode levar à determinação de coeficientes de pressão com muita imprecisão e falhas em projeto.

Em se tratando de estruturas retesadas, merecem destaque as membranas tracionadas. A rigidez à flexão nessas membranas é desprezível em consequência de sua pequena espessura e seu leve peso próprio. Assim, possuem grande sensibilidade à ação do vento, sendo essa a principal carga em seu dimensionamento, tal que o estudo da interação fluido-estrutura é extremamente importante e necessário.

Propõe-se nesse trabalho a determinação dos coeficientes de pressão do vento em tensoestruturas de membranas, por meio da modelagem computacional, permitindo a comparação dos resultados obtidos com outros trabalhos e a contribuição para a produção de conhecimento tecnológico útil para futuros projetos de engenharia e outros posteriores estudos desse caso específico.

2 OBJETIVOS

Essa pesquisa tem como objetivo estudar o comportamento de estruturas de membrana diante da ação do vento, por meio da análise dos coeficientes de pressão estáticos para geometrias típicas desse tipo de estrutura.

Essa análise é realizada a partir dos resultados obtidos pelo método computacional baseado na análise numérica do escoamento observado utilizando o Fluent da ANSYS Inc.

3 METODOLOGIA E JUSTIFICATIVA DO TRABALHO

A primeira parte do trabalho consiste em uma breve revisão bibliográfica do estado da arte de tensoestruturas, contendo aspectos históricos e estruturais, e dos fundamentos dos problemas de interação fluido-estrutura. Em seguida, é apresentada, de modo sucinto, a base teórica de mecânica dos fluidos, com o objetivo de fornecer as ferramentas necessárias para interpretação das respostas obtidas.

A ação do vento sobre as estruturas é realizada numericamente por meio do Fluent da ANSYS Inc., que se apresenta satisfatório quanto às análises na fluidodinâmica computacional e utiliza o Método dos Volumes Finitos para a obtenção dos resultados dos efeitos da ação do vento.

O item 1.2 da ABNT NBR 6123:1988 enuncia: “Esta Norma não se aplica a edificações de formas, dimensões ou localização fora do comum, casos estes em que estudos especiais devem ser feitos para determinar as forças atuantes do vento e seus efeitos.”. As estruturas de membrana e casca, em geral, possuem formas não convencionais e se enquadram nesse critério, sendo necessário realizar estudos em túneis de vento físico e numérico para que seja obtida uma análise mais correta dessas estruturas. Assim, essa pesquisa se justifica diante da falta de abrangência das normas regulamentadoras e aos desafios existentes na área de estruturas retesadas.

4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA: ESTRUTURAS DE MEMBRANA

Características estéticas e estruturais das tensoestruturas fornecem motivação à pesquisa nessa área, de modo a melhorar o entendimento de seu comportamento e agregar novas informações ao conhecimento já existente nesse campo.

A tensoestrutura em membrana é um tipo específico das tensoestruturas leves, que inclui as estruturas pneumáticas e as tracionadas por cabos ou esticadores. No projeto dessas estruturas, mesmo que não haja solicitações atuantes relevantes, é essencial que se considere o retesamento da membrana, para que se obtenham resultados mais precisos quanto à sua durabilidade e aos deslocamentos devido aos carregamentos (VILELA, 2011).

As tensoestruturas de membrana são compostas por membranas, cordoalhas de aço, estrutura de suporte e elementos de ancoragem e fundação (VILELA, 2011). As aplicações mais comuns desse tipo de estrutura são coberturas de aeroportos, estações, *shoppings*, galpões, igrejas, entre outros. Um exemplo clássico de obra é o Estádio Olímpico de Munique (Figura 1). Apesar de ser uma tendência na engenharia civil com suas grandes vantagens, a demanda por esse tipo de sistema construtivo para obras maiores no Brasil ainda é reduzida, pois existem poucos profissionais especializados nessa área e devido à falta de cultura técnica.

Ainda, merece destaque o Terminal de Passageiros de Jeddah, concluído em 1981, que possui a maior cobertura em membranas do mundo. Consiste em 210 módulos de membranas que cobrem 470.000 m² (PAULETTI, 2003), que pode ser visto na Figura 2.

Figura 1 - Vista Panorâmica do Estádio Olímpico de Munique

Fonte: Newhouse (1992)

Figura 2 - Terminal de Passageiros de Jeddah

Fonte: Forster (1994)

A geometria das estruturas de membrana é caracterizada por sua dupla curvatura. Quando suas curvaturas principais estão na mesma direção, sua superfície é dita sinclástica, como é o caso das pneumáticas. Se suas curvaturas principais estiverem orientadas em direções opostas, a superfície é chamada de anticlástica, cuja forma pode ser originada de conoide, parabolóide hiperbólico, sela ou até mesmo uma combinação entre eles.

Estruturas retesadas apresentam grande variabilidade de soluções, além de dificuldades relacionadas ao comportamento não linear devido à geometria e aos materiais, o que tornam as soluções analíticas muito complicadas e até mesmo inviáveis. Assim, as análises numéricas são as principais ferramentas para a análise desse tipo de estrutura.

4.1 ETAPAS DE PROJETO

Segundo Pauletti (2003), há três etapas características de projeto:

- Busca da forma;
- Determinação dos padrões de corte;
- Resposta aos carregamentos.

A busca da forma consiste em encontrar uma forma de equilíbrio de forças em determinadas condições para um certo estado de tensões (retesamento). Assim, deve-se garantir que as características arquitetônicas e estruturais da forma escolhida satisfaçam as equações de equilíbrio. Busca-se uma superfície minimal, de modo que não haja concentração de tensões e

com minimização da área. Segundo Veenendaal e Block (2012), o processo de busca da forma pode ser categorizado em três grandes famílias: aqueles baseados na matriz de rigidez; aqueles baseados na rigidez geométrica (método da densidade das forças e suas extensões) e aqueles baseados no equilíbrio dinâmico (método da relaxação dinâmica).

Definida a superfície espacial, essa é dividida em peças planas para sua fabricação. As tensoestruturas em membrana apresentam, em sua grande maioria, curvatura dupla, fazendo com que a planificação das superfícies apresente alguma distorção. A união entre as partes dos padrões de corte deve ser feita de modo a minimizar erros na forma final e na distribuição de tensões da membrana.

Após a determinação da geometria final, é fundamental que se considere uma variedade de carregamentos atuantes na estrutura, como peso próprio, retesamento, ação do vento e cargas acidentais. As estruturas retesadas estão sujeitas a grandes variações em sua forma, podendo sofrer grandes deflexões. É de extrema importância que a análise estrutural seja realizada de modo a assegurar resistência e estabilidade.

4.2 MATERIAIS UTILIZADOS

Quanto aos materiais empregados na fabricação das membranas, destacam-se as de fibra de vidro recobertas com teflon ou PTFE (politetrafluoretileno) e os tecidos de poliéster recobertos com PVC. A escolha pelo tipo de tecido varia em função de algumas características como resistência mecânica e ao fogo, permeabilidade, peso próprio, durabilidade, isolamento térmico e translucidez.

Em função do custo e da durabilidade, em geral, estruturas temporárias são feitas com membrana de tecido poliéster revestido com PVC e projetos permanentes mais sofisticados com membrana constituída por fibras de vidro revestidas com teflon (OLIVEIRA, 2001). No Brasil, predomina o uso de tecidos de poliéster revestido com PVC, principalmente devido ao custo mais baixo, apesar da menor durabilidade se comparados aos tecidos de fibra de vidro.

Como a resistência térmica de membranas é baixa, existem algumas possíveis soluções para contornar esse problema (RIZZO, 2014):

- membranas duplas, que proporcionam isolamento natural devido a um espaço entre elas;

- materiais isolantes que são colocados entre duas camadas de membranas (mas que, por outro lado, afetam a translucidez característica do tecido);
- membranas com várias camadas, em que são colocadas curtas fibras de poliéster entre as camadas.

Cabe salientar a importância de camadas de revestimento que são combinadas ao tecido, para se obter maior durabilidade, melhorar as propriedades de isolamento acústico e térmico e até mesmo proporcionar um certo aumento na estabilidade geométrica.

4.3 A AÇÃO DO VENTO EM ESTRUTURAS DE MEMBRANA

Devido à leveza característica de membranas, a análise dos carregamentos de vento deve ser feita minuciosamente, tanto em relação à intensidade quanto à distribuição. Porém, percebe-se que para o dimensionamento e a verificação das tensoestruturas, as normas brasileiras e internacionais não apresentam informações e diretrizes suficientes.

O método mais comum encontrado para análise do vento em estruturas são os ensaios de maquetes em túnel de vento, que possuem a capacidade de simular os fenômenos dos ventos. Contudo, a complexidade da geometria de muitas tensoestruturas pode ser um desafio para a elaboração de modelos reduzidos. Em geral, esses modelos são mais rígidos para o estudo de efeitos estáticos, porém os efeitos aeroelásticos não são levados em conta devido à rigidez (ABODONYA et al., 2016). Já modelos mais flexíveis são empregados para o estudo de efeitos dinâmicos. Muitas vezes, esses ensaios podem ter elevado custo, dependendo da quantidade de coeficientes que se deseja obter e da complexidade da estrutura que será simulada.

Recentemente, com o avanço dos modelos numéricos e computacionais, os softwares são capazes de calcular e representar tensões, deformações e outros diversos parâmetros estruturais de maneira confiável, com grau de incerteza aceitável. Dos métodos numéricos, o Método dos Elementos Finitos (MEF) é predominante na busca da forma e análise estrutural de membranas (PAULETTI, 2003). Por outro lado, a complexidade dessa modelagem pode resultar em um tempo muito grande para que o estudo seja realizado, mas os avanços de pesquisa nessa área apontam uma tendência maior na agilidade das ferramentas computacionais.

4.3.1 Interação Fluido-Estrutura

Tanto os ensaios em túnel de vento como a modelagem computacional são bons mecanismos para prever o comportamento da estrutura diante da ação dos ventos. Nota-se a relevância de trabalhos direcionados à investigação da interação fluido-estrutura em membranas, devido ao papel primordial das cargas de vento no projeto de estruturas retesadas.

Estudos fundamentais sobre estruturas infladas em membrana sob forças de vento foram realizados por Newman et al. (1984). Primeiramente, foram testados modelos rígidos de domos com diferentes proporções em túnel de vento, focando na observação da distribuição de pressão na superfície, de modo que esses resultados foram exportados para um modelo numérico em elementos finitos para obter as tensões na membrana. Em seguida, novamente em túnel de vento, foram ensaiados modelos flexíveis – os efeitos dinâmicos nessas estruturas não foram levados em conta.

Em Daw e Davenport (1989), são apresentados resultados de um estudo em túnel de vento de forças aeroelásticas dependentes de movimento em um modelo semicircular. Os coeficientes aeroelásticos se mostraram dependentes da forma da estrutura e linearmente relacionados à amplitude para pequenos valores, mas, por outro lado, independentes da intensidade da turbulência e não sensíveis aos efeitos de escala do número de Reynolds.

Em Glück et al. (2001), apresenta-se um algoritmo acoplado para análise de interação fluido-estrutura, com foco em membranas e cascas. Como exemplo de aplicação, estudou-se uma tenda de cobertura sob ação de vento em regime turbulento. Após a determinação do equilíbrio da membrana pré-tracionada, o código de fluidodinâmica computacional (CFD) resolveu as equações de Navier-Stokes combinadas com o modelo clássico de turbulência $k-\epsilon$. Posteriormente, em Glück et al. (2003), as condições foram modificadas para levar em conta uma entrada laminar tipo rajada, resultando em instabilidade. Nesses trabalhos, os campos de pressão e deformações foram determinados, porém, não foi apresentada comparação com medidas experimentais.

Um estudo numérico e experimental em túnel de vento foi conduzido por Rank et al. (2003) para um modelo com a forma de guarda-chuva em membrana, permitindo a determinação das forças nos cabos e a deformação da estrutura. Os resultados apresentaram semelhanças na comparação dos dados.

Wüchner et al. (2007) apresentou estudos sobre análise numérica da ação do vento em estruturas de membrana, com aplicação em tenda de cobertura. Empregou-se o software CFX da ANSYS Inc. para a análise dos efeitos do fluido. Já para a busca da forma e o acoplamento físico do pós-processamento dos resultados obtidos em CFD, foram utilizados programas com códigos em elementos finitos. O objetivo era avaliar as técnicas de acoplamento de interação fluido-estrutura para esse tipo de problema.

Em Hojjat et al. (2010), diversas estratégias de otimização foram testadas com sucesso em uma cobertura em membrana leve, exposta a uma camada limite turbulenta. Feita a busca da forma para a estrutura pré-tracionada, para cada estado especificado, o problema foi resolvido em regime permanente. Por fim, foi possível obter a forma final da estrutura e a distribuição de pressão.

Michalski et al. (2011, 2015) ressalta a importância do uso de ferramentas computacionais para o acoplamento entre a fluidodinâmica e a mecânica estrutural. Foram executados experimentos e simulações numéricas de uma estrutura do tipo guarda-chuva em um escoamento turbulento com camada limite, incluindo medidas detalhadas do perfil de um vento instável, registrando as deflexões instantâneas. Os resultados do experimento e a modelagem numérica apresentaram boa concordância.

Uma investigação experimental detalhada de efeitos aeroelásticos instáveis em membranas sujeitas a escoamento uniforme foi apresentada por Wu et al. (2015), utilizando modelos em túnel de vento. Nesse estudo, observou-se que as cargas de vento causaram deflexão quase estática na membrana. Ainda, sob determinadas direções do vento e dentro de certas faixas de velocidade, foi observada a presença de uma vibração induzida por vórtice (VIV), tal que a amplitude pode atingir valores altos sob essas condições e causar danos à estrutura.

Wood et al. (2016, 2018) e De Nayer et al (2018) apresentaram experimentos relacionados à interação fluido-estrutura em membranas com aplicação em engenharia civil e outros fenômenos aeroelásticos. Em trabalhos desenvolvidos por esses autores, modelos rígidos e flexíveis de uma membrana inflada em escoamento turbulento para diferentes valores de número de Reynolds foram investigados. Comparando as características médias ao longo do tempo para o modelo flexível e o modelo rígido, as maiores diferenças foram encontradas para o maior número de Reynolds considerado. Na face de barlavento, o comportamento era praticamente o mesmo, enquanto na face de sotavento aparecem pequenas diferenças entre os modelos. O estudo de estruturas flexíveis infladas submetidas a uma camada limite turbulenta

mostra-se desafiador, no que se refere à análise experimental e à simulação numérica. Ainda, uma simulação numérica de um modelo de semiesfera em escoamento turbulento usando simulação da turbulência em grandes escalas (LES) também está presente em De Nayer, et al. (2018).

No projeto de estruturas retesadas, são empregados altos coeficientes de segurança – principalmente se comparado a estruturas convencionais. Um dos principais motivos está ligado à prevenção da propagação de rasgos, que podem surgir quando o tecido é submetido à tração. Devido a esses altos coeficientes, o uso de modelos em casca rígidos combinados a uma análise estática podem ser uma boa solução, a favor da segurança. Esse tipo de representação de membrana em estudo em túnel de vento podem ser uma boa solução para referência experimental e apresentam boa concordância com modelagens numéricas. (ABODONoya et al, 2016).

De fato, a desconsideração de efeitos dinâmicos e da flexibilidade da estrutura podem levar a incertezas. Porém, são fatores cuja importância deve ser determinada de acordo com a exigência de projeto e dos estudos que serão realizados. Assim, muitas vezes, tomam-se como ponto de partida as informações obtidas de uma análise estática.

4.3.2 Estudo dos coeficientes de pressão em formas típicas

Um estudo relevante para a determinação de coeficientes de pressão para formas típicas foi feito por Beutler (1963) e resultados dessa pesquisa são apresentados em Buchholdt (1998). Na Figura 3, são apresentadas as considerações paramétricas para um modelo de parabolóide hiperbólico e em, seguida, os respectivos resultados desse estudo para diferentes situações (Figura 4 e Figura 5).

Figura 3 - Modelo usado para parabolóide hiperbólico

Fonte: Buchholdt (1998)

Figura 4 - Coeficientes de pressão, sem vigas de contorno e paredes, para a relação $H/A = 0,5$ (conforme a Figura 3) e para as situações de vento: (a) 0° e (b) 90°

Fonte: Buchholdt (1998)

Figura 5 - Coeficientes de pressão, com vigas de contorno e paredes, para a relação $H/A = 0,5$ (conforme a Figura 3) e para as situações de vento: (a) 0° ; (b) 45° e (c) 90°

Fonte: Buchholdt (1998)

O documento *Design Guide for Tensile Surface Structures* da TensiNet (FORSTER E MOLLAERT, 2004) é um bom guia para o projeto de tensoestruturas, em que reúne contribuições de diversos autores. São encontrados valores de coeficientes de pressão para coberturas em forma conoidal (Figura 6 e Tabela 1) e para parabolóide hiperbólico (Figura 7, Figura 8 e Tabela 2).

Figura 6- (a) Modelo cônico ensaiado em túnel de vento e (b) respectivo mapa simplificado dos coeficientes de pressão

Fonte: Dencher e Balz (2004)

Tabela 1 - Coeficientes de pressão externa para forma conoidal, obtidos para ângulo de 40° medido da horizontal para uma linha reta desenhada do perímetro da estrutura para o vértice

Valores de c_{pe}	Região			
	A	B	C	D
sem fechamentos laterais	-0,15	-0,60	-1,00	0,40/-0,20
com fechamentos laterais	-0,41	-0,70	-1,00	0,75/-0,60

Fonte: Dencher e Balz (2004)

Figura 7 - Modelo na forma de parabolóide hiperbólico ensaiado em túnel de vento

Fonte: Dencher e Balz (2004) – publicado em 'Das Hangende Dach' por Frei Otto em 1954

Figura 8 - Mapa simplificado dos coeficientes de pressão para parabolóide hiperbólico

Fonte: Dencher e Balz (2004)

Tabela 2 - Coeficientes de pressão externa para parabolóide hiperbólico, obtidos para a razão igual a 4,7 entre a dimensão da diagonal e a distância vertical entre o ponto mais baixo e o mais alto

Valores de C_{pe}	Região											
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	
Positivo	0,00	0,00	0,30	0,30	0,30	0,00	0,00	0,20	0,00	0,00	0,20	
Negativo	-1,45	-0,90	-0,65	0,70	-1,20	-1,80	-1,20	-0,90	-1,20	-0,65	-0,65	

Fonte: Dencher e Balz (2004)

Testes de túnel de vento precisam ser realizados quando a geometria da membrana é suficientemente diferente das existentes em normas e na literatura ou quando uma abordagem conservadora para estruturas complexas resulte em alto custo (DENCHER; BALZ, 2004). Ressalta-se também que a pressão interna merece atenção principalmente quando houver grandes aberturas nas paredes ou na própria cobertura, e nesse caso, podem ser esperados altos coeficientes de pressão interna. Para estruturas pneumáticas, a pressão dinâmica do vento atua apenas em um lado da membrana.

Além das formas mais típicas apresentadas, nesse mesmo guia, são apresentados alguns exemplos de coberturas abertas de estádios, como mostrado na Figura 9.

Figura 9 - Modelo de cobertura de estádio e respectivas distribuições dos coeficientes de pressão

Fonte: Balz e Barnes (2004)

Com o objetivo de analisar os efeitos dos deslocamentos resultantes da ação do vento, em um estudo relevante de Hincz e Gamboa-Marrufo (2016), dois modelos rígidos foram ensaiados em túnel de vento (Figura 10). O primeiro teve como base a membrana conoidal não deformada. Já o segundo era resultante da membrana deformada, sendo essa determinada pelo método da relaxação dinâmica a partir da geometria inicial com base nos efeitos dos coeficientes de pressão obtidos no primeiro modelo.

Figura 10 - Modelo de cobertura conoidal estudado: (a) vista lateral; (b) protótipo; (c) coeficientes de pressão do modelo indeformado; (d) coeficientes de pressão do modelo deformado

Fonte: Hincz e Gamboa-Marrufo (2016)

Estudos envolvendo experimentos em túnel de vento e as respectivas análises para coberturas com forma de parabolóide hiperbólico usando diferentes modelos em escala são apresentados em: Rizzo (2012, 2014), Rizzo et al (2011, 2012, 2018), Rizzo e Seppe (2015) e Rizzo e Ricciardelli (2017). Algumas configurações, como mostradas na Figura 11, foram selecionadas para serem testadas no túnel de vento, a fim de estudar o comportamento aerodinâmico e calcular os coeficientes de pressão. Mapas de pressão simplificados foram avaliados para os valores máximos e mínimos dos coeficientes de pressão e comparados com os valores fornecidos pelo Eurocódigo 1 para telhados planos. Dentre os diversos resultados obtidos nesses trabalhos, exemplifica-se o modelo encontrado na Figura 12, cujos parâmetros utilizados estão demonstrados na Figura 13 e alguns resultados nas Figura 14 e Figura 15.

Figura 11 - Diferentes geometrias de paraboloide hiperbólico estudadas por Rizzo et al. (2011) e Rizzo (2012) em túnel de vento

Fonte: Rizzo (2012)

Figura 12 - Modelo de paraboloide hiperbólico com os parâmetros geométricos

Fonte: Rizzo e Sepe (2015)

Figura 13 - Valores considerados para os parâmetros da Figura 12

Fonte: Rizzo e Sepe (2015)

Figura 14 - Coeficientes de pressão médios obtidos a partir de ensaio em túnel de vento para o modelo da Figura 13 (a) para as situações de vento: (a) 0°; (b) 90° e (c) 45°

Fonte: Rizzo e Sepe (2015)

Figura 15 - Coeficientes de pressão médios obtidos a partir de ensaio em túnel de vento para o modelo da Figura 13 (b) para as situações de vento: (a) 0°; (b) 90° e (c) 45°

Fonte: Rizzo e Sepe (2015)

Os resultados desses trabalhos mostraram que, para estruturas mais flexíveis do que as convencionais, a análise estática pode não ser satisfatória. No entanto, os coeficientes de pressão podem ser estimados com pequena incerteza usando modelos rígidos em testes de túnel de vento, mesmo para coberturas flexíveis, já que as deflexões de estruturas bem projetadas precisam atender aos requisitos de norma e geralmente são pequenas para afetar os coeficientes de pressão. Além disso, nota-se que estruturas de dupla curvatura provocam um comportamento aerodinâmico complexo e os efeitos tridimensionais da dispersão de vórtice, dependendo do ângulo de ataque do vento na estrutura, podem ter grande relevância.

Para a maior parte dos modelos construídos, a pressão é medida apenas na face externa. Os modelos em escala geralmente são feitos com fechamentos laterais, devido à dificuldade de produzir modelos abertos com pequena espessura. Em pesquisa recente apresentada Colliers et al. (2019,a), foi estudado uma metodologia com o objetivo de facilitar a determinação dos coeficientes de pressão em túnel de vento com sensores integrados (Figura 16). Foram

produzidos modelos mais representativos visando a medição simultânea da pressão nas duas faces do telhado mantendo a menor espessura possível (Figura 17). Assim, sensores foram integrados ao modelo e concluiu-se que, do modo realizado, os resultados obtidos são mais realistas em comparação aos protótipos mais convencionais, com fechamentos laterais.

Figura 16 - Modelo de cobertura em parabolóide hiperbólico: (a) modelo aberto, apoiado em colunas; (b) modelo fechado

Fonte: Colliers et al. (2019,a)

Figura 17 - Modelo estudado para ser aplicado em túnel de vento para medição nas faces superior e inferior

Fonte: Colliers et al. (2019,a)

Ainda, estudos baseados em modelagem numérica estão presentes em Colliers et al. (2019,b) utilizando o Fluent, referentes à geometria de parabolóide hiperbólico com diferentes parâmetros de forma dependentes da curvatura. Os valores de coeficiente de pressão obtidos para esse trabalho são mostrados na Figura 18 (dependentes de um fator de forma SP – razão entre a distância entre dois pontos opostos da membrana e a metade da distância entre o ponto mais alto e o ponto mais baixo).

Figura 18 - Distribuição dos coeficientes de pressão nas superfícies inferior e superior

Fonte: Colliers et al. (2019,b)

4.3.3 Abordagem em normas técnicas

Muitas das normas técnicas existentes fornecem diretrizes de projeto apenas para condições de carga estática e estruturas temporárias, além de limitações nas formas geométricas para coberturas, como na norma britânica BS 6399-2:1997, o Eurocódigo EN 1991-1-4 e a norma argentina CIRSOC 102.

Apesar de a norma da Austrália/Nova Zelândia (AS/NZS 1170.2:2002) referente à ação do vento em estruturas fornecer coeficientes de pressão para certos tipos de coberturas, também existem restrições quanto à faixa de formas especificadas (UEMATSU et al., 2009). Na Figura 19, são mostrados coeficientes de pressão para parabolóide hiperbólico.

Figura 19 - Coeficientes de pressão para parabolóide hiperbólico. Os valores mostrados são restritos para a situação em que obstáculos abaixo da cobertura bloqueiam menos de 50% da seção transversal exposta ao vento e para as seguintes relações: $0,25 < h/d < 0,5$; $0,1 < c/d < 0,3$; $0,75 < b/d < 1,25$.

Fonte: AS/NZS 1170.2:2002

Em relação à ação do vento em coberturas, a ABNT NBR 6123:1988 não abrange soluções para geometrias complexas. A norma brasileira, assim como outras normas de vento existentes em outros países, indica orientações para a determinação do coeficiente de pressão para coberturas isoladas a águas planas. Em códigos como a referente norma e a norma europeia EN 1991-1-4:2005, existem algumas recomendações de valores para coberturas isoladas a uma e duas águas planas, sem abranger superfícies de dupla curvatura.

No Anexo E da ABNT NBR 6123:1998, também são apresentados coeficientes aerodinâmicos para coberturas curvas, como abóbadas cilíndricas de seção circular e cúpulas. Ressalta-se que esses não são inteiramente válidos para edificações reais, porém, podem ser utilizados como referências para projetos. Recomenda-se que sejam feitos estudos especiais no caso de edificações de grandes dimensões ou que se afastem das formas simples apresentadas.

Um exemplo de coeficiente de pressão para o caso de cúpula sobre o terreno mostrado na norma brasileira de ação de vento nas estruturas é mostrado na Figura 20. A norma europeia EN 1991-1-4:2005 também apresenta valores de coeficientes de pressão para cúpulas, sendo que esses apresentam algumas diferenças comparadas à ABNT NBR 6123:1988. Valores recomendados para esse tipo de estrutura também podem ser encontrados em outras normas, como a AS/NZS 1170.2:2002 e AIJ:2015.

Figura 20 - Cúpula sobre o terreno: (a) elevação; (b) mapa dos coeficientes de pressão para a relação $f/d=0,5$; (c) mapa dos coeficientes de pressão para a relação $f/d=0,25$

Fonte: ABNT NBR6123:1988

Figura 21 - Coeficientes de pressão para cúpula

Fonte: EN 1991-1-4:2005

Cabe ressaltar que um documento técnico está sendo preparado pelo CEN TC 250 WG5 Membrane Structures (um grupo internacional de pesquisadores), com foco no projeto e na análise de estruturas de membrana, visando o desenvolvimento de um Eurocódigo voltado para estruturas de membrana (COLLIERS et al., 2019,b).

5 A AÇÃO DO VENTO EM ESTRUTURAS SEGUNDO A ABNT NBR 6123:1988

A norma brasileira ABNT NBR 6123:1988 define que as ações dinâmicas do vento que atuam em edificações possam ser consideradas estáticas. Determinam-se sua frequência e o período fundamental, dispensando assim a análise dinâmica se o período fundamental for inferior a 1 segundo.

A análise estática é feita por meio da avaliação de coeficientes aerodinâmicos para edifícios com geometrias variadas, porém simples (galpões, prismas retangulares, cúpulas, entre outras). No caso de análise estática de formas geométricas mais complexas e análise dinâmica, é comum a execução de ensaios em túneis de vento. Cabe ressaltar que análises dinâmicas decorrentes da ação do vento dependem não só da geometria, mas também do material, da rigidez e do amortecimento da estrutura.

Usualmente, edificações convencionais tem período fundamental menor que um segundo e rigidez que levam a pequenos deslocamentos. Por outro lado, estruturas retesadas apresentam grandes deslocamentos quando submetidas a carregamentos, levando a alterações na forma e na rigidez.

O vento é constituinte de várias rajadas simultâneas, as quais possuem intensidades e frequências diferentes, assim como a estrutura possui sua própria frequência natural. Para edificações cuja frequência natural é menor que 1 Hz, é necessário realizar um estudo dos efeitos dinâmicos do vento, pois se o vento e a estrutura possuírem uma mesma frequência, a oscilação será amplificada e poderá levar ao colapso da estrutura. Dessa forma, é possível calcular as acelerações para garantir que elas não ultrapassem o limite de $0,1 \text{ m/s}^2$ previsto pela norma.

5.1 VELOCIDADE CARACTERÍSTICA DO VENTO

Primeiramente, é necessário determinar a velocidade característica do vento a partir de quatro parâmetros: velocidade básica do vento na região de estudo (V_0), fator topográfico (S_1), fator de rugosidade do terreno, dimensões da edificação e altura sobre o terreno (S_2) e o fator estatístico

(S_3), assim como previsto no capítulo 5 da ABNT NBR 6123:1988. A formulação é apresentada na Equação (1):

$$V_k = V_0 \cdot S_1 \cdot S_2 \cdot S_3 \quad (1)$$

Determinada a velocidade característica V_k (em m/s), é possível calcular a pressão dinâmica q (em N/m²) nas condições normais de pressão (1 atm) e temperatura (15°C), pela Equação (2):

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

5.1.1 Velocidade básica do vento V_0

“A velocidade básica do vento V_0 , é a velocidade de uma rajada de 3 s, excedida em média uma vez em 50 anos, a 10 m acima do terreno, em campo aberto e plano.” (ABNT NBR 6123:1988). Além disso, é definido também que o vento básico, de maneira geral, pode soprar de qualquer direção horizontal. Dessa forma, é dada uma figura de isopletas da velocidade básica do vento V_0 em todo o país, como mostrada na Figura 22.

Figura 22 - Isopletas Da Velocidade Básica Do Vento

Fonte: ABNT NBR 6123:1988

5.1.2 Fator S_1

Para a determinação do fator topográfico S_1 , devem ser levadas em consideração as variações do relevo do terreno onde será construída a edificação, como descrito nas três situações a seguir:

- Quando o terreno for plano ou pouco ondulado tem-se $S_1 = 1,0$;
- Para taludes e morros, tem-se $S_1 = 1,0$ para os pontos A e C, conforme mostrado na Figura 23. Para todos os outros pontos, S_1 varia a partir do ângulo de inclinação θ , sendo válidas as Equações (3), (4) e (5):

$$\theta \leq 3^\circ : S_1(z) = 1,0 \quad (3)$$

$$6^\circ \leq \theta \leq 17^\circ : S_1(z) = 1,0 + \left(2,5 - \frac{z}{d}\right) \cdot \text{tg}(\theta - 3^\circ) \geq 1 \quad (4)$$

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

onde:

- z : altura no ponto considerado, medida a partir da superfície do terreno;
- d : diferença de nível entre a base e o topo (talude ou morro);
- θ : ângulo de inclinação (talude ou morro).

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

Figura 23 - Fator Topográfico S_1

Fonte: ABNT NBR 6123:1988

c) Para vales profundos, protegidos de ventos de qualquer direção, tem-se $S_1 = 0,9$.

5.1.3 Fator S_2

Esse fator considera o conjunto de efeitos de três parâmetros: rugosidade do terreno, dimensões da edificação e variação da velocidade do vento com a altura acima do terreno.

A ABNT NBR 6123:1988 divide a rugosidade do terreno, a qual é diretamente proporcional à velocidade do vento quando na presença de obstáculos, em cinco principais categorias. São elas:

- Categoria I: superfícies lisas com mais de 5 km de extensão, medida no sentido de atuação do vento, como mar calmo, lagos e rios.
- Categoria II: terrenos abertos (em nível ou próximo dele), com poucos obstáculos isolados cuja altura deve ser de no máximo 1,0 m, como zonas costeiras planas, pântanos com vegetação rala, campos de aviação, entre outros.
- Categoria III: terrenos planos ou ondulados, com obstáculos de até 3,0 m de altura, poucos quebra-ventos de árvores e edificações baixas e esporádicas, como granjas e casas de campo (sem considerar partes com matos), fazendas com sebes e/ou muros, entre outros.
- Categoria IV: terrenos cobertos por obstáculos numerosos e pouco espaçados, cuja altura deve ser de até 10,0 m, e que ainda engloba zonas com obstáculos maiores, os quais não podem ser considerados na categoria V, como zonas de parques e bosques com muitas árvores, cidades pequenas e seus arredores, áreas industriais total ou parcialmente desenvolvidas, entre outros.

- Categoria V: terrenos cobertos por obstáculos numerosos, altos (com altura de 25,0 m ou mais), grandes e pouco espaçados, como centros de grandes cidades e complexos industriais bem desenvolvidos.

Ainda, são definidas três classes de edificações com seus respectivos elementos, cujos tempos para cálculo da velocidade média são de, respectivamente, 3s, 5s e 10s:

- Classe A: engloba todas as edificações cuja maior dimensão horizontal ou vertical não seja maior que 20 m. Além disso, são consideradas todas as vedações, elementos de fixação e peças individuais de estruturas sem vedação.
- Classe B: abrange qualquer edificação (ou parte dela) cuja maior dimensão horizontal ou vertical da superfície frontal esteja compreendida entre 20 e 50 m.
- Classe C: toda edificação (ou parte dela) cuja maior dimensão horizontal ou vertical da superfície frontal seja maior que 50 m.

O cálculo do fator S_2 é possível até a altura z limite e, para tanto, utiliza-se a Equação (6):

$$S_2 = b \cdot F_r \cdot \left(\frac{z}{10} \right)^p \quad (6)$$

Onde:

- z : altura acima do terreno;
- F_r : fator de rajada correspondente à categoria II;
- b : parâmetro para a correção da classe da edificação;
- p : parâmetro meteorológico.

A tabela utilizada na obtenção dos parâmetros F_r , b e p encontra-se na página 9 da ABNT NBR 6123:1988. É possível também, em vez de efetuar o cálculo, utilizar os valores de S_2 definidos

pela Tabela 2 da página 10 da referida norma, que considera as diversas categorias de rugosidade do terreno e classe de dimensões das edificações.

5.1.4 Fator S_3

Como o próprio nome diz, o fator estatístico S_3 é baseado em conceitos probabilísticos e considera tanto o grau de segurança requerido quanto a vida útil da construção. É definido pela norma que a probabilidade da velocidade básica do vento V_0 ser igualada ou exceder o período de recorrência médio de 50 anos é de 63%. Dessa forma, caso não haja uma norma específica de segurança nas edificações ou faltem indicações na norma estrutural, são definidos valores mínimos para o fator S_3 , os quais podem ser encontrados na Tabela 3, página 10 da ABNT NBR 6123:1988.

Após essas determinações, devem-se realizar as devidas considerações dos coeficientes aerodinâmicos para edificações correntes, conforme o capítulo 6 da ABNT NBR 6123:1988. Por fim, é possível conhecer e analisar os efeitos dinâmicos relativos à turbulência atmosférica, como previsto no capítulo 9 da mesma norma.

5.2 COEFICIENTES DE PRESSÃO

A pressão efetiva Δp em um ponto da superfície de uma edificação pode ser calculada pela diferença entre as pressões efetivas externa e interna, definida na Equação (7):

$$\Delta p = \Delta p_e - \Delta p_i \quad (7)$$

Os coeficientes de pressão externa e interna são definidos, respectivamente, pelas Equações (8) e (9):

$$c_{pe} = \frac{\Delta p_e}{q} \quad (8)$$

$$c_{pi} = \frac{\Delta p_i}{q} \quad (9)$$

Valores positivos de coeficiente de pressão correspondem a sobrepressões, enquanto valores negativos correspondem a sucções. Substituindo as Equações (8) e (9) na Equação (7), obtém-se:

$$\Delta p = (c_{pe} - c_{pi})q = c_p q \quad (10)$$

Para $\Delta p > 0$, tem-se pressão efetiva no sentido de sobrepressão externa. Se $\Delta p < 0$, resulta em pressão efetiva no sentido de sucção externa

5.3 COEFICIENTES DE FORMA

A força de vento atua perpendicularmente sobre um elemento plano de edificação (NBR 6123:1988). O valor dessa força pode ser calculado pela diferença entre a força externa F_e e a força interna F_i que atuantes nessa área, conforme a Equação (11):

$$F = F_e - F_i \quad (11)$$

Os coeficientes de forma externo e interno são calculados, respectivamente, pelas Equações (12) e (13), em função de determinada superfície plana de área A :

$$C_e = \frac{F_e}{qA} \quad (12)$$

$$C_i = \frac{F_i}{qA} \quad (13)$$

Assim como foi definido para os coeficientes de pressão, valores positivos de coeficiente de forma resultam em sobrepressões e valores negativos resultam em sucções. Para os casos previstos na norma em questão, a pressão interna é considerada uniformemente distribuída e, portanto, em superfícies internas planas, tem-se $C_i = c_{pi}$.

Utilizando as Equações (12) e (13), a Equação (11) pode ser reescrita na forma da Equação (14):

$$F = (C_e - C_i)qA \quad (14)$$

tal que se F é um valor positivo, corresponde à força de vento atuando para o interior da edificação, enquanto se esse valor for negativo, resulta em força de vento atuando para o exterior.

5.4 COEFICIENTES DE FORÇA

Ainda, pode ser definida a componente de força global na direção do vento, definida como força de arrasto pela Equação (15):

$$F_a = C_a q A_e \quad (15)$$

onde C_a é o coeficiente de arrasto e A_e é a área frontal efetiva, equivalente à projeção ortogonal sobre um plano perpendicular à ação do vento.

6 CFD – FLUIDODINÂMICA COMPUTACIONAL

As normas técnicas são baseadas em estudos teóricos e experimentais e, no que se referem à ação do vento, podem ser consideradas generalistas quanto à sua aplicação para estruturas de cobertura, que possuem, muitas vezes, geometrias complexas. Nesses casos, soluções analíticas não são facilmente obtidas, em especial quando envolvem escoamentos em regime turbulento.

Aproximações realizadas por meio de modelagens numéricas são excelentes ferramentas para analisar fenômenos de interação fluido-estrutura. Os softwares atuais de Fluidodinâmica Computacional (CFD – *Computational Fluid Dynamics*) são capazes de resolver as várias equações da quantidade de movimento, continuidade e energia pelas quais a dinâmica de fluidos é descrita.

A facilidade em modificar as características de um modelo realizado em softwares de CFD faz com que a análise numérica computacional seja uma ferramenta muito vantajosa. Além disso, um experimento em túnel de vento pode ter alto custo, dependendo da quantidade de dados que se deseja obter.

6.1 MÉTODO DOS VOLUMES FINITOS

O método dos volumes finitos consiste na discretização do domínio em diversos volumes de controle e aplicação das equações governantes na forma integral em cada um deles para determinar os campos de pressão e velocidade. Nesse método, a conservação é aplicada diretamente a cada volume de controle, enquanto no método dos elementos finitos não ocorre necessariamente essa conservação de quantidades nos elementos. Por essa razão, a maior parte dos softwares de CFD utiliza o método dos volumes finitos para a solução numérica desses problemas.

As etapas para a modelagem no ANSYS Fluent, software utilizado nesse trabalho para a solução numérica computacional para a ação do vento em membranas, podem ser divididas de modo resumido em:

- definição da geometria e das condições de escoamento;
- definição do volume de controle;
- geração da malha;

- aplicação das condições de contorno;
- escolha do modelo de turbulência;
- análise de resultados referentes aos campos de velocidade e pressão.

6.2 CONCEITOS FUNDAMENTAIS

No estudo da mecânica dos fluidos em meios contínuos, existem conceitos e classificações referentes a escoamentos que são de extrema importância para a caracterização e o entendimento do problema a ser estudado.

Escoamentos *permanentes* se referem àqueles em que suas propriedades não variam ao longo do tempo, ou seja, a derivada dessas variáveis em relação ao tempo é igual a zero. Quando as propriedades variam com o tempo, o escoamento é chamado *transiente*.

Quando os efeitos devidos à viscosidade não são significativos, o escoamento é dito *não viscoso* (matematicamente, considera-se viscosidade nula); caso contrário, o escoamento é denominado *viscoso*. Por exemplo, no escoamento de um fluido sobre um corpo: nas regiões próximas à superfície em que ocorre esse escoamento, deve-se tratar como viscoso; já em regiões mais distantes, os efeitos de viscosidade podem ser desprezados, e, conseqüentemente, o escoamento é definido como não viscoso.

Escoamentos *incompressíveis* são aqueles em que a variação da massa específica é desprezível, ou seja, o valor desse parâmetro é constante. Porém, quando essa variação é considerada, o escoamento é definido como *compressível*.

Quando o escoamento de um fluido é delimitado por superfícies (como a água escoando em um tubo), denomina-se escoamento *interno*. Já o escoamento *externo* é aquele em que não há essa limitação, ou seja, o fluido age sobre o corpo (como a ação do vento em estruturas).

Um parâmetro de extrema importância no estudo da mecânica dos fluidos é o número de Reynolds. Esse adimensional traduz, em um escoamento, a relação entre forças de inércia e forças viscosas (COELHO, 2016) e é definido pelo adimensional:

$$Re = \frac{\rho Ux}{\mu} = \frac{Ux}{\nu} \quad (16)$$

Na Equação (16), tem-se que:

- U é a velocidade característica do escoamento;
- x é um comprimento característico do escoamento;
- ρ é a massa específica do fluido;
- μ é a viscosidade dinâmica do fluido;
- ν é a viscosidade cinemática do fluido.

Para valores mais baixos do número de Reynolds, camadas adjacentes de fluido deslizam entre si de maneira ordenada. Esse tipo de escoamento é chamado *laminar*.

Já para valores altos do número de Reynolds, nota-se grande mudança no comportamento do escoamento, de forma aleatória e até mesmo caótica. A velocidade das partículas apresenta flutuações aleatórias, resultando no chamado escoamento *turbulento*.

6.3 EQUAÇÕES GOVERNANTES DA MECÂNICA DOS FLUIDOS

Os princípios da física podem receber diferentes formulações dependendo da situação em que forem aplicados. No caso de se desejar obter formulações aplicáveis a volumes de controle a partir das formulações aplicáveis a sistemas, é vantajosa a utilização do Teorema do Transporte de Reynolds (FOX, McDONALD e PRITCHARD, 2006).

Considerando que N seja uma propriedade extensiva (ou seja, variável proporcionalmente à quantidade de matéria) genérica de um sistema e η a respectiva propriedade intensiva (propriedade extensiva por unidade de massa), o Teorema de Transporte de Reynolds estabelece:

$$\left. \frac{dN}{dt} \right|_{\text{sistema}} = \int_{SC} \eta \rho (\mathbf{U} \cdot \mathbf{n}) dS + \frac{\partial}{\partial t} \int_{VC} \eta \rho dV \quad (17)$$

tal que:

- $\mathbf{U}$ é o vetor velocidade do fluido escoando através da superfície de controle, que pode ser definido como: $\mathbf{U} = u\mathbf{i} + v\mathbf{j} + w\mathbf{k}$ (utilizando um referencial fixo ao volume de controle)
- $\mathbf{n}$ é o versor normal à superfície de controle

Utilizando esse resultado, pode-se transpor as equações descritivas dos princípios da física aplicáveis a sistemas para equações aplicáveis a volumes de controle. De maneira geral, em análises de fenômenos de transporte, as leis básicas aplicáveis, são:

- Conservação de massa;
- Conservação da quantidade de movimento;
- Conservação da quantidade de movimento angular;
- Conservação da energia (Primeira lei da Termodinâmica);
- Segunda lei da Termodinâmica.

Nesse trabalho, são detalhados os princípios da conservação de massa e da conservação da quantidade de movimento, por serem aqueles que se aplicam. As equações serão apresentadas em um espaço cartesiano.

6.3.1 Princípio da Conservação de Massa

O princípio da conservação de massa estabelece que a massa de um sistema permanece constante ao longo do tempo. Ou seja, se M é a massa total do sistema, esse princípio pode ser matematicamente estabelecido como:

$$\left. \frac{dM}{dt} \right|_{\text{sistema}} = 0 \quad (18)$$

Retomando o Teorema do Transporte de Reynolds definido na Equação (17), para deduzir a formulação para volumes de controle do princípio de conservação da massa, tem-se que $N = M$ e $\eta = 1$, e aplicando a formulação para sistema, obtém-se a seguinte expressão:

$$\int_{SC} \rho(\mathbf{U} \cdot \mathbf{n}) dS + \frac{\partial}{\partial t} \int_{VC} \rho dV = 0 \quad (19)$$

Na Equação (19), que corresponde à forma integral do princípio de conservação da massa para volumes de controle, o primeiro termo corresponde à taxa líquida de transferência de massa (através da superfície de controle) e o segundo termo se refere à variação temporal da massa da substância presente no interior do volume de controle.

A partir da equação da conservação da massa para volumes de controle na forma integral, pode-se obter a equação correspondente na forma diferencial. Para tal, primeiramente, define-se um volume de controle infinitesimal com dimensões dx , dy e dz . Assim, a parcela equivalente à taxa líquida de transferência de massa, usando expansão por série de Taylor e desprezando termos de ordem superior, é dada por:

$$\int_{sc} \rho(\mathbf{U} \cdot \mathbf{n}) dS = \left[\frac{\partial}{\partial x}(\rho u) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho w) \right] dx dy dz \quad (20)$$

E a parcela da taxa de variação de massa dentro do volume de controle, em qualquer instante, é dada por:

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{VC} \rho dV = \frac{\partial \rho}{\partial t} dx dy dz \quad (21)$$

Assim, a equação da continuidade, forma diferencial do princípio da conservação de massa, quando aplicada ao escoamento compressível de um fluido, é descrita pela Equação (22):

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho w) = \frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{U}) = 0 \quad (22)$$

No caso de escoamento permanente, tem-se:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = 0 \quad (23)$$

Verifica-se que, com a condição definida na Equação (23), a Equação (22) é resumida a:

$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho u) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho w) = \nabla \cdot (\rho \mathbf{U}) = 0 \quad (24)$$

No caso da adoção da hipótese de que o fluido é incompressível e, conseqüentemente, não há mudança de volume específico, a Equação (24) é reescrita por:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = \nabla \cdot \mathbf{U} = 0 \quad (25)$$

6.3.2 Princípio da Conservação da Quantidade de Movimento

O princípio da conservação da quantidade de movimento é definido pela segunda lei de Newton, estabelecendo que a resultante de todas as forças de campo e de superfície (**F**) que atuam em um sistema em movimento em relação a um referencial inercial é igual à variação da quantidade de movimento (**B**):

$$\mathbf{F} = \frac{d\mathbf{B}}{dt} \quad (26)$$

onde a quantidade de movimento é expressa por:

$$\mathbf{B} = \int_M \mathbf{U} dM = \int_V \rho(\mathbf{U} \cdot \mathbf{n}) dV \quad (27)$$

Novamente, o Teorema do Transporte de Reynolds pode ser utilizado para se fazer a transposição da formulação aplicada a sistemas para a formulação aplicada a volumes de controle. Para tal, na Equação (17), considera-se $N = \mathbf{B}$ e $\eta = \mathbf{U}$:

$$\frac{d\mathbf{B}}{dt} = \int_{SC} \mathbf{U} \rho (\mathbf{U} \cdot \mathbf{n}) dS + \frac{\partial}{\partial t} \int_{VC} \rho (\mathbf{U} \cdot \mathbf{n}) dV \quad (28)$$

Essa equação também pode ser escrita da seguinte forma:

$$\mathbf{F} = \int_{SC} \mathbf{U} \rho (\mathbf{U} \cdot \mathbf{n}) dS + \frac{\partial}{\partial t} \int_{VC} \rho (\mathbf{U} \cdot \mathbf{n}) dV \quad (29)$$

Seja um sistema infinitesimal paralelepípedo com dimensões dx , dy e dz . Para esse sistema, a segunda lei de Newton pode ser escrita na forma vetorial, definida a partir da derivada material da velocidade ($\mathbf{U}$) no tempo (t):

$$d\mathbf{F} = \rho \frac{D\mathbf{U}}{Dt} dx dy dz = \rho \left(u \frac{\partial \mathbf{U}}{\partial x} + v \frac{\partial \mathbf{U}}{\partial y} + w \frac{\partial \mathbf{U}}{\partial z} + \frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} \right) dx dy dz \quad (30)$$

Considere que a força gravitacional é a única força de campo que atua no elemento. Seja a aceleração da gravidade $\mathbf{g}$ definida na Equação (31), a força de campo resultante no elemento, em sua forma vetorial, é descrita pela Equação (32):

$$\mathbf{g} = g_x \mathbf{i} + g_y \mathbf{j} + g_z \mathbf{k} \quad (31)$$

$$d\mathbf{F}^B = \rho \mathbf{g} dx dy dz \quad (32)$$

Ainda, as forças de superfície atuantes no elemento (forças normais e de cisalhamento) podem ser expressas em função das tensões, usando expansão por série de Taylor em torno do centro do elemento diferencial definido e desprezando termos de ordem superior. Para as tensões normais, utiliza-se a letra grega σ e para as tensões de cisalhamento, utiliza-se a letra τ . Os índices das tensões possuem duas letras: a primeira indica a direção em que a tensão age e a segunda indica a orientação da superfície. Assim, obtêm-se as componentes da força de superfície $\mathbf{F}^S$:

$$dF_x^S = \left(\frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} \right) dx dy dz \quad (33)$$

$$dF_y^S = \left(\frac{\partial \tau_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} \right) dx dy dz \quad (34)$$

$$dF_z^S = \left(\frac{\partial \tau_{zx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial z} \right) dx dy dz \quad (35)$$

A força resultante nesse sistema é calculada pela soma das forças de campo às forças de superfície. Nesse caso, suas componentes são expressas por:

$$dF_x = dF_x^B + dF_x^S = \left(\rho g_x + \frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} \right) dx dy dz \quad (36)$$

$$dF_y = dF_y^B + dF_y^S = \left(\rho g_y + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} \right) dx dy dz \quad (37)$$

$$dF_z = dF_z^B + dF_z^S = \left(\rho g_z + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial z} \right) dx dy dz \quad (38)$$

Por fim, a forma diferencial da equação da quantidade de movimento, em cada uma das componentes, é expressa por:

$$\rho g_x + \frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} = \rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) \quad (39)$$

$$\rho g_y + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} = \rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) \quad (40)$$

$$\rho g_z + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial z} = \rho \left(\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) \quad (41)$$

Na hipótese de fluidos newtonianos e isotrópicos, é possível relacionar as tensões com os gradientes de velocidade, em função da pressão termodinâmica local P e da viscosidade dinâmica μ :

$$\tau_{xy} = \tau_{yx} = \mu \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right) \quad (42)$$

$$\tau_{xz} = \tau_{zx} = \mu \left(\frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \right) \quad (43)$$

$$\tau_{yz} = \tau_{zy} = \mu \left(\frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} \right) \quad (44)$$

$$\sigma_{xx} = -P - \frac{2}{3} \mu \nabla \cdot \mathbf{U} + 2\mu \frac{\partial u}{\partial x} \quad (45)$$

$$\sigma_{yy} = -P - \frac{2}{3} \mu \nabla \cdot \mathbf{U} + 2\mu \frac{\partial v}{\partial y} \quad (46)$$

$$\sigma_{zz} = -P - \frac{2}{3}\mu \nabla \cdot \mathbf{U} + 2\mu \frac{\partial w}{\partial z} \quad (47)$$

As relações mostradas anteriormente, quando aplicadas às equações diferenciais da quantidade de movimento, resultam nas equações de Navier-Stokes, válidas para escoamento incompressível e fluido newtoniano com viscosidade dinâmica constante:

$$\rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) = \rho g_x - \frac{\partial P}{\partial x} + \mu \nabla^2 u \quad (48)$$

$$\rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) = \rho g_y - \frac{\partial P}{\partial y} + \mu \nabla^2 v \quad (49)$$

$$\rho \left(\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) = \rho g_z - \frac{\partial P}{\partial z} + \mu \nabla^2 w \quad (50)$$

6.4 MODELOS DE TURBULÊNCIA

A turbulência é caracterizada por flutuações da velocidade, em que as partículas do fluido se misturam de forma aleatória. Trata-se de um fenômeno complexo e existem diversas teorias para sua explicação. O estudo por meio de modelos físicos deve ser cauteloso, pois podem ocorrer muitas interferências no comportamento do fluido. Cabe ressaltar também que as soluções analíticas, em geral, são muito complicadas ou até mesmo não podem ser obtidas desse modo em alguns casos, fazendo com que os métodos numéricos que utilizam CFD sejam a principal ferramenta no estudo desse fenômeno (WILCOX, 2006).

Em se tratando da modelagem numérica da fluidodinâmica computacional, existem algumas estratégias que podem ser adotadas para a solução de problemas de turbulência. A Simulação Numérica Direta (DNS – *Direct Numerical Simulation*) consiste na resolução numérica das equações de Navier-Stokes tal que todas escalas turbulentas são calculadas diretamente em pequenos intervalos de tempo, utilizando malhas extremamente refinadas.

Outra possibilidade é por meio da Simulação de Grandes Escalas (LES – *Large Eddy Simulation*), para casos transientes, que é realizada de acordo com o tamanho das escalas turbulentas. As grandes escalas são calculadas diretamente e as menores são resolvidas em modelos discretos com malhas refinadas.

Sabe-se ainda que, em um escoamento turbulento, as componentes de pressão e velocidade, por exemplo, podem ser descritas por uma parcela média mais uma parcela flutuante variável no

tempo. Assim, a modelagem pode ser feita a partir das equações médias de Reynolds (RANS – *Reynolds Averaged Navier-Stokes*), produzidas a partir de modificações nas equações de Navier-Stokes utilizando parâmetros médios e flutuantes. Modelos baseados nas equações RANS são conhecidos como modelos de turbulência estatística, devido ao processo estatístico médio que é empregado.

A simulação RANS reduz o esforço computacional comparado ao DNS, de modo com que seja a técnica mais utilizada na engenharia. No entanto, o procedimento de cálculo da média introduz termos desconhecidos resultantes dos parâmetros flutuantes, chamados de tensões turbulentas ou de Reynolds, atuando como tensões adicionais que são difíceis de determinar diretamente e acabam, muitas vezes, sendo desconhecidas. Esses modelos simplificam o problema para a solução de duas equações de transporte adicionais e introduzem uma viscosidade turbulenta para calcular as tensões de Reynolds.

Dentre os diversos modelos existentes no equacionamento da turbulência, esse trabalho tem como foco o estudo do modelo de duas equações $k-\epsilon$. É utilizada a metodologia RANS, que consiste na solução de duas equações diferenciais de transporte de propriedades turbulentas. Trata-se de um modelo muito popular, devido à eficiência e precisão considerável para solucionar diversos escoamentos turbulentos.

6.4.1 Modelo $k-\epsilon$

O modelo $k-\epsilon$ produz bons resultados para uma grande maioria de escoamentos turbulentos e, em particular, para escoamentos em camada limite. Porém, pode apresentar insensibilidade a gradientes de pressão adversos (ANSYS FLUENT TUTORIAL GUIDE, 2019). Percebe-se que esse é um modelo muito empregado em diversos trabalhos na área da aerodinâmica aplicada à Engenharia Civil. Existem três principais variações desse modelo: $k-\epsilon$ padrão, $k-\epsilon$ RNG e $k-\epsilon$ realizável.

Como definido, num escoamento turbulento, o parâmetro instantâneo é dado pela soma de um valor médio mais uma flutuação. Tomando como exemplo a velocidade U para esse tipo de escoamento, essa pode ser definida por um valor médio do tempo $\bar{U}$ mais uma parcela relativa à flutuação U' , como mostra a Equação (51):

$$U = \bar{U} + U' \quad (51)$$

As tensões de Reynolds correspondem à transferência de quantidade de movimento devido ao campo de velocidades flutuantes. Os termos do tensor de Reynolds τ_{ij}^R , para fluidos incompressíveis (WILCOX, 2006), podem ser definidos pela Equação (52).

$$\tau^R = -\rho \begin{bmatrix} \overline{u'u'} & \overline{u'v'} & \overline{u'w'} \\ \overline{v'u'} & \overline{v'v'} & \overline{v'w'} \\ \overline{w'u'} & \overline{w'v'} & \overline{w'w'} \end{bmatrix} \quad (52)$$

Em se tratando de turbulência, é relevante definir a viscosidade turbulenta, dada pela Equação (53).

$$\mu_t = C_\mu \rho \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (53)$$

Da equação anterior, o parâmetro k refere-se à energia cinética turbulenta específica, ou seja, a quantidade de energia contida nas flutuações, e o parâmetro ε é a taxa de dissipação de energia cinética turbulenta por unidade de massa por unidade de tempo, ou seja, a taxa com que a energia cinética turbulenta é convertida em energia interna. Ainda, C_μ é uma constante.

As equações de transporte do modelo $k - \varepsilon$ padrão são definidas nas Equações (54) e (55):

$$\begin{aligned} \rho \frac{\partial k}{\partial t} + \rho \bar{u} \frac{\partial k}{\partial x} + \rho \bar{v} \frac{\partial k}{\partial y} + \rho \bar{w} \frac{\partial k}{\partial z} = \\ \frac{\partial}{\partial x} \left[\left(\frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\left(\frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\left(\frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial z} \right] - \rho \varepsilon + \\ \mu_t \left[2 \left(\frac{\partial \bar{u}}{\partial x} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial \bar{v}}{\partial y} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial \bar{w}}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial \bar{u}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial \bar{u}}{\partial z} + \frac{\partial \bar{w}}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial \bar{v}}{\partial z} + \frac{\partial \bar{w}}{\partial y} \right)^2 \right] \end{aligned} \quad (54)$$

$$\begin{aligned} \rho \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \rho \bar{u} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} + \rho \bar{v} \frac{\partial \varepsilon}{\partial y} + \rho \bar{w} \frac{\partial \varepsilon}{\partial z} = \\ \frac{\partial}{\partial x} \left[\left(\frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\left(\frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\left(\frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial z} \right] - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + \\ C_{1\varepsilon} \mu_t \frac{\varepsilon}{k} \left[2 \left(\frac{\partial \bar{u}}{\partial x} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial \bar{v}}{\partial y} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial \bar{w}}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial \bar{u}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial \bar{u}}{\partial z} + \frac{\partial \bar{w}}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial \bar{v}}{\partial z} + \frac{\partial \bar{w}}{\partial y} \right)^2 \right] \end{aligned} \quad (55)$$

Das equações anteriores, define-se que:

- P^k é o termo da produção da média da energia cinética turbulenta;
- σ_k e σ_ε são coeficientes da difusão turbulenta;
- $C_{1\varepsilon}$ e $C_{2\varepsilon}$ são constantes empíricas.

Em Wilcox (2006), são fornecidos os valores das constantes do modelo de turbulência $k - \varepsilon$ padrão:

- $C_{1\varepsilon} = 1,44$
- $C_{2\varepsilon} = 1,92$
- $C_\mu = 0,09$
- $\sigma_k = 1,0$
- $\sigma_\varepsilon = 1,3$

Já o modelo $k - \varepsilon$ RNG pode ser considerado um refinamento do modelo $k - \varepsilon$, determinado a partir das equações de Navier-Stokes instantâneas usando uma técnica estatística denominada Teoria do Grupo de Renormalização (*Renormalization Group Method*). A variável C_μ passa a ter o valor de 0,085 (WILCOX, 2006). O modelo é bem similar ao $k - \varepsilon$ padrão, apresentando diferença na determinação de alguns parâmetros que tem seu valor modificado ou deixam de ser constantes e a presença de termos adicionais no equacionamento.

Já o $k - \varepsilon$ realizável é relativamente novo e difere do modelo padrão deste em alguns aspectos. Segundo o manual online do ANSYS para o Fluent, a determinação de μ_t sofre modificações, de modo que a variável C_μ deixa de ser constante e uma nova equação de ε é derivada de uma equação exata para o transporte do quadrado médio da flutuação da vorticidade. Esse modelo já apresenta melhores resultados para situações com gradientes de pressão adversos.

Cabe ressaltar que esse trabalho não tem como foco o desenvolvimento das equações relacionadas a esses modelos de turbulência, mas sim apresentá-los brevemente para mostrar suas aplicações no ANSYS Fluent.

7 ENSAIOS EM TÚNEL DE VENTO FÍSICO

Segundo Blessmann (1990), o uso de novas formas arquitetônicas diferentes das convencionais torna necessário um estudo preciso da ação do vento, com a correta simulação de suas características. Além disso, o emprego de estruturas mais leves também exige estudos mais minuciosos, já que os efeitos do vento possuem maior impacto nesse caso.

Para a análise da ação do vento em estruturas, é comum o ensaio de modelos em escala reduzida em túnel de vento para a análise da ação desse fluido, a partir da medição de pressões. No caso de geometrias mais complexas, a norma ABNT NBR 6123:1988 pode ser tomada uma base para os cálculos iniciais, porém, por possuir limitações nessa situação, os ensaios em túnel de vento são realizados em busca de maior confiabilidade e exatidão.

O modelo ensaiado deve ser devidamente instrumentado para medição com sensores distribuídos ao longo do protótipo, com diversas tomadas de pressão. De cada tomada de pressão existente no modelo, sai um tubo flexível ligado a um ponto no sensor. Atualmente, existem softwares que permitem a criação de imagens a partir da análise dos valores lidos, de acordo com a distribuição de pressões.

Modelos mais rígidos são usados para o estudo de efeitos estáticos das estruturas. No caso das estruturas de membrana, apesar de flexíveis, nota-se que o uso de modelos rígidos em túnel de vento pode ser uma boa solução, já que no projeto desse tipo de estrutura são empregados altos coeficientes de segurança.

7.1 SEMELHANÇA

Quando são estudadas geometrias muito complexas, é comum a aplicação de modelos que representam fisicamente estruturas, chamados protótipos. Cabe lembrar que o ensaio de protótipos em túnel de vento possui aplicações que não se restringem à engenharia civil, tal que o uso de resultados experimentais pode ser de extrema importância para o correto desenvolvimento de projetos.

O protótipo deve ser realizado de modo que haja semelhança entre as condições experimentais e reais. Dessa forma, devem ser garantidas três condições de semelhança (COELHO, 2016):

- Semelhança geométrica: o protótipo deve ser feito assegurando uma relação de escala (razão constante entre quaisquer duas dimensões correspondentes entre o modelo e o protótipo);
- Semelhança cinemática: as velocidades em pontos equivalentes devem possuir relação constante de proporcionalidade e, assim, as linhas de corrente apresentem o mesmo aspecto geométrico e mesmas características de turbulência;
- Semelhança dinâmica: as forças em pontos equivalentes do modelo e do protótipo devem possuir relação de proporcionalidade e, conseqüentemente, igualdade no número de Reynolds.

Ainda, para pontos correspondentes, a pressão dinâmica e a pressão efetiva apresentam uma relação de proporcionalidade constante e o coeficiente de pressão deve ser o mesmo (Blessmann, 1990).

7.2 SIMULAÇÃO DO VENTO NATURAL PARA CAMADA LIMITE TURBULENTA

Túneis de vento permitem a simulação dos ventos, de modo que essa seja realizada de maneira correta para que os resultados sejam próximos da realidade. Alguns dispositivos colocados a barlavento como obstáculos podem reproduzir as características e aspectos do vento na região em estudo. Para simular efeitos, são utilizados elementos rugosos, geradores de vórtices, barreira castelada, entre outros.

Dependendo do escoamento, é relevante a simulação da camada limite, tal que o escoamento tende a ser turbulento, por resultar das características de rugosidade da superfície. Assim, estudam-se as tensões de Reynolds, perfis de velocidades e outros parâmetros fundamentais para esse estudo.

Outra técnica é o lançamento de jatos de ar, perpendicularmente ao vento gerado no túnel, a partir do piso. Blessmann (1990) cita como vantagem que, diferentemente do como acontece com obstáculos sólidos, o fato de que não há diminuição da velocidade média da corrente de ar.

8 MODELOS NUMÉRICOS UTILIZANDO O FLUENT

Como ponto de partida para a modelagem numérica nesse trabalho, foram realizados alguns modelos, de modo a explorar as ferramentas oferecidas pela ANSYS Inc. Assim, nesse capítulo, serão apresentadas aplicações com *benchmarks*, utilizando esse software, permitindo a comparação dos resultados com a ABNT NBR 6123:1998. Em seguida, são apresentados modelos para estruturas de membrana.

O fluido em questão para todas as situações é o ar, incompressível, com massa específica igual a $1,225 \text{ kg.m}^{-3}$ e viscosidade dinâmica de $0,00001795 \text{ kg.m}^{-1}.\text{s}^{-1}$, referentes ao ar a 15°C . Para todos os modelos desse capítulo, trata-se de escoamento turbulento, em regime permanente. Os volumes de controle em questão são resultantes de subtrair a geometria em estudo de um paralelepípedo (cujas dimensões variam em cada situação).

Todos os modelos considerados tratam de média a alta turbulência. Os dois primeiros modelos foram realizados com velocidade mais elevada, correspondente à região próxima ao estado de São Paulo. Já os três últimos casos foram modelados com velocidades um pouco mais reduzidas, pois foram realizados com valores mais próximos ou iguais às referências de estruturas de membrana.

Cabe ressaltar que nas regiões próximas à estrutura de interesse, definiu-se uma malha mais refinada se comparada ao restante do domínio de cálculo. A qualidade da malha foi controlada e avaliada pelo seu nível de assimetria (*skewness*), de modo que esse parâmetro não ultrapassasse o valor máximo de 0,75 considerado aceitável (ANSYS Fluent TUTORIAL GUIDE, 2019).

8.1 MODELO 1 – CASA

O primeiro modelo escolhido foi uma edificação tridimensional, com as dimensões de comprimento, largura e altura iguais a 10 m e ângulo de inclinação do telhado igual a 15° . Nas modelagens, o ângulo de incidência do vento foi testado em duas situações: a 0° e a 90° , conforme ilustra a Figura 24.

Figura 24 - Geometria da casa do Modelo 1 em ANSYS

Fonte: Autora

Foi utilizado o modelo de turbulência $k-\epsilon$ padrão na solução do problema, em se tratando de escoamento turbulento em regime permanente, com intensidade de turbulência igual a 5%.

Foram testados diversos volumes de controle. Tomou-se como ponto de partida as referências encontradas em Manfrim (2006), que afirma que em suas modelagens, os coeficientes de pressão não sofreram interferência para relação entre volume de controle (domínio de cálculo) e edificação maior que 3. Por fim, para o Modelo 1, foram definidos os volumes de controle paralelepípedicos da Figura 25.

Figura 25 - Volume de controle do Modelo 1, nas seguintes situações de incidência: (a) vento a 0°; (b) vento a 90°

Fonte: Autora

Da figura anterior, destaca-se a superfície de barlavento, tal que a velocidade do vento é igual a 40 m/s, na direção perpendicular à face de incidência – ou seja, na direção z em (a) e na direção x em (b). Na face de saída do vento, a pressão é nula. Na superfície inferior e nas faces da edificação, adotou-se a condição de não deslizamento. Nas faces laterais e superior, foi considerada a condição de simetria. Quanto à malha utilizada, cabe ressaltar que foi realizado um refinamento maior na região próxima à casa.

Utilizando o Fluent, foi possível obter diversos resultados. Para a incidência do vento a 0° , o campo de pressões é mostrado na Figura 26 e o campo de velocidades na Figura 27. Para a incidência do vento a 90° , o campo de pressões é mostrado na Figura 28 e o campo de velocidades na Figura 29.

Figura 26 - Campo de pressões na casa para vento incidindo a 0° : (a) no plano XY, perpendicular à ação do vento, passando no meio da edificação; (b) no plano YZ, passando no meio da edificação

Fonte: Autora

Figura 27 - Campo de velocidades na casa para vento incidindo a 0° : (a) no plano XY, perpendicular à ação do vento, passando no meio da edificação; (b) no plano YZ, passando no meio da edificação

Fonte: Autora

Figura 28 - Campo de pressões na casa para vento incidindo a 90°: (a) no plano XY, passando no meio da edificação; (b) no plano YZ, perpendicular à ação do vento, passando no meio da edificação

Fonte: Autora

Figura 29 - Campo de velocidades na casa para vento incidindo a 90°: (a) no plano XY, passando no meio da edificação; (b) no plano YZ, perpendicular à ação do vento, passando no meio da edificação

Fonte: Autora

Quanto aos coeficientes de pressão, são observados resultados na Figura 30, que são discutidos e comparados a seguir.

Figura 30 - Coeficientes de pressão para o Modelo 1, nas seguintes situações de incidência: (a) vento a 0°; (b) vento a 90°

Fonte: Autora

8.1.1 Comparação dos resultados dos coeficientes de pressão

Os resultados calculados por meio do Fluent foram comparados com aqueles fornecidos pela ABNT NBR 6123:1988 e aqueles obtidos por Manfrim (2006) utilizando o Flotran (atualmente, esse software não está mais disponível no pacote do ANSYS).

A partir da modelagem tridimensional no Fluent, foram obtidos valores médios em cada uma das regiões definidas de acordo com a norma brasileira (Figura 31 e Figura 32). Por fim, os valores entre si se mostram coerentes, apesar de algumas diferenças.

A Tabela 3 mostra as comparações dos valores para a incidência do vento a 0°, enquanto a Tabela 4 se refere aos valores para o vento a 90°.

Figura 31 - Regiões para a determinação dos coeficientes de pressão externo, em paredes de edificações de planta retangular: (a) vento 0°; (b) vento 90°

Fonte: Autora, adaptado de ABNT NBR 6123:1988

Figura 32 - Regiões para a determinação dos coeficientes de pressão externo, em telhados simétricos com duas águas

Fonte: Autora, adaptado de ABNT NBR 6123:1988

Tabela 3 - Comparação dos valores de coeficientes de pressão para vento incidindo a 0° no Modelo 1

Valores de c_{pe}	Região						
	A_1/B_1	A_2/B_2	C	D	E/G	F/H	I/J
Bolelli (2020)	-0,85	-0,48	0,74	-0,46	-0,69	-0,56	-0,57
NBR 6123 (1988)	-0,90	-0,50	0,70	-0,50	-0,80	-0,60	-0,60
Manfrim (2006)	-0,80	-0,50	0,70	-0,40	-0,70	-0,50	-

Fonte: Autora

Tabela 4 - Comparação dos valores de coeficientes de pressão para vento incidindo a 90° no Modelo 1

Valores de c_{pe}	Região					
	A	B	C_1/D_1	C_2/D_2	E/G/I	F/H/J
Bolelli (2020)	0,73	-0,41	-0,72	-0,44	-0,92	-0,45
NBR 6123 (1988)	0,70	-0,40	-0,80	-0,50	-1,00	-0,40

Fonte: Autora

8.1.2 Interação fluido-estrutura no ANSYS

No software ANSYS, é possível realizar o acoplamento entre a fluidodinâmica e mecânica estrutural. Ou seja, os resultados dos campos de pressão obtidos em CFD no Fluent podem ser transferidos para uma análise estrutural em elementos finitos, como mostra a Figura 33.

Figura 33 - Transferência dos resultados obtidos no Fluent para análise estática no ANSYS

Fonte: Autora

Para exemplificar essa possibilidade de acoplamento, foram utilizados os resultados da presente modelagem. As superfícies do modelo da casa foram consideradas com espessura de 15 cm, cujo material tem coeficiente de Poisson igual a 0,3 e módulo de elasticidade igual a 16 GPa. Os campos de pressão do *Fluent* foram importados para esse modelo e aplicados em cada uma das superfícies dessa edificação, que está fixa em sua base.

Por fim, foram determinados os resultados desse modelo de interação fluido-estrutura “*one-way*”, possibilitando fornecer diagramas com informações como os deslocamentos totais (Figura 34), tensões principais máximas (Figura 35) e mínimas (Figura 36).

Figura 34 - Deformações na casa: (a) Vento 0°; (b) Vento 90°

Fonte: Autora

Figura 35 - Tensões principais máximas na casa: (a) Vento 0°; (b) Vento 90°

Fonte: Autora

Figura 36 - Tensões principais mínimas na casa: (a) Vento 0°; (b) Vento 90°

Fonte: Autora

8.2 MODELO 2 – CÚPULA SOBRE O TERRENO

Para o Modelo 2, foi considerada uma cúpula apoiada sobre o terreno, equivalente a uma semiesfera de diâmetro igual a 20 m. Esse foi subdividido: no modelo 2A, a flecha da cúpula é igual a 10 m – Figura 37 (a) – e no modelo 2B, a flecha da cúpula é igual a 5 m – Figura 37 (b).

Figura 37 - Modelo da cúpula apoiada sobre o terreno, com dimensões em metros: (a) modelo 2A; (b) modelo 2B

Fonte: Autora

Trata-se de um escoamento permanente e turbulento, utilizando o modelo de turbulência $k-\epsilon$ padrão na solução do problema, com 5% de intensidade de turbulência. O volume de controle adotado nessa simulação foi o paralelepípedo com dimensões 100m x 150m x 50m, conforme indicado na Figura 38. Nessa mesma imagem, está destacada a superfície de barlavento, tal que a velocidade do vento adotada foi igual a 40 m/s na direção z , perpendicular à essa face. Nas outras faces, a pressão é nula. Na superfície inferior, adotou-se a condição de não deslizamento, ou seja, a velocidade nas direções x e y é igual a zero. Para a malha, assim como no Modelo 1, utilizou-se um refinamento maior na região próxima à cúpula.

Figura 38 - Volume de controle do Modelo 2

Fonte: Autora

Desse modo, foram obtidos os resultados para o modelo em questão. Os campos de pressão e de velocidade para os modelos 2A e 2B são apresentados a seguir, da Figura 39 à Figura 42.

Figura 39 - Campo de pressões na cúpula para o modelo 2A: (a) no plano XY, perpendicular à ação do vento, passando pelo centro da cúpula; (b) no plano YZ, passando pelo centro da cúpula

Figura 40 - Campo de velocidades na cúpula para o modelo 2A: (a) no plano XY, perpendicular à ação do vento, passando pelo centro da cúpula; (b) no plano YZ, passando pelo centro da cúpula

Figura 41 - Campo de pressões na cúpula para o modelo 2B: (a) no plano XY, perpendicular à ação do vento, passando pelo centro da cúpula; (b) no plano YZ, passando pelo centro da cúpula

Fonte: Autora

Figura 42 - Campo de velocidades na cúpula para o modelo 2B: (a) no plano XY, perpendicular à ação do vento, passando pelo centro da cúpula; (b) no plano YZ, passando pelo centro da cúpula

Fonte: Autora

Ainda, foram determinados os coeficientes de pressão, mostrados na Figura 43 e na Figura 44. Esses resultados podem ser comparados com mapa fornecido na NBR 6123:1988, já apresentados na Figura 20. Apesar de algumas semelhanças, pode-se perceber que os valores obtidos no Fluent são mais elevados. Porém, sabe-se que os fornecidos em norma são aproximados e baseados em ensaios realizados em escoamento com baixa turbulência, e as modelagens no Fluent foram realizadas com alta turbulência. Assim, diferenças numéricas já poderiam ser esperadas. Os valores na região central da cúpula, onde há maior efeito de sucção, apresenta similaridade

Figura 43 - Coeficientes de pressão na cúpula do modelo 2A: (a) vista isométrica; (b) vista superior

Fonte: Autora

Figura 44 - Coeficientes de pressão na cúpula do modelo 2B: (a) vista isométrica; (b) vista superior

Fonte: Autora

Nota-se que em ambos modelos existe uma zona de sobrepressão na região à barlavento. Essa região coincide com a região em que a tensão de cisalhamento nas paredes da estrutura é nula, ou seja, onde há descolamento da camada limite e gera uma zona de recirculação, justificando, assim, a geração de uma zona de coeficientes positivos. Esses resultados são mostrados na Figura 45 para o modelo 2A, tal que esses efeitos ocorrem de maneira análoga no modelo 2B.

Figura 45 - Resultados obtidos no modelo 2A: (a) tensão de cisalhamento (*wall shear*) na edificação

(a)

Fonte: Autora

8.3 MODELO 3 – PARABOLOIDE HIPERBÓLICO

Por se tratar de uma geometria típica para estruturas de membrana, foram estudados casos de parabolóide hiperbólico. A definição da geometria estudada foi realizada no *Grasshopper*, um plug-in do software *Rhino 3D* para modelagem paramétrica.

Figura 46 - Definição da geometria por modelagem paramétrica utilizando o *Grasshopper*

Fonte: Autora

Esse modelo foi subdividido em 2 casos, que são detalhados a seguir:

- modelo 3A: membrana isolada, com bordas relaxadas;
- modelos 3B, 3C, 3D e 3E: membrana cobrindo obstáculos;

8.3.1 Membrana isolada

O primeiro estudo realizado (modelo 3A) foi de uma membrana com as dimensões mostradas na Figura 47. Para análise, foram consideradas 3 situações de vento (Figura 48), de modo que a situação de Vento 0° um dos cantos de cota mais baixa (3 m) está a barlavento e na situação de Vento 90° um dos cantos com cota mais alta (5 m) está a barlavento. A membrana tem espessura de 1 mm, adicionada no comando *Thin/Surface* no DesignModeler do ANSYS, criando um volume delgado.

Figura 47 - Dimensões em metros da membrana do modelo 3A: (a) vista superior da membrana; (b) elevação da membrana

Fonte: Autora

Figura 48 - Direções do vento analisadas para o parabolóide hiperbólico

Fonte: Autora

Quanto ao volume de controle, a geometria em questão foi subtraída de um paralelepípedo com dimensões 50m x 120m x 20m. Na face de barlavento entrada do vento, destacada em vermelho na Figura 49, a velocidade do vento é 20 m/s (localizada a 30 m do centro geométrico da membrana), com 5% de intensidade de turbulência. Na face do paralelepípedo a sotavento, destacada em azul, a pressão é nula. Nas faces lateral e superior, é aplicada condição de simetria. Na face inferior e na membrana, é considerada a condição de não deslizamento.

Figura 49 - Representação do volume de controle do parabolóide hiperbólico

Fonte: Autora

Por fim, foi possível determinar os coeficientes de pressão para essa geometria, nas faces superior e inferior da membrana, cujos resultados são apresentados na Figura 50. Podem ser notadas similaridades entre a distribuição na face inferior na situação de Vento 0° e na face superior na situação de Vento 90°, assim como ocorre entre a distribuição na face superior na situação de Vento 0° e na face inferior na situação de Vento 90°. Na borda de incidência do vento na situação de Vento 45°, na face superior, a zona de sobrepressão está próxima à região de cota mais baixa e a zona de sucção está próxima à região de cota mais alta; para a face inferior, essas zonas estão invertidas.

Figura 50 - Distribuição dos coeficientes de pressão ao longo da superfície do modelo 3A nas faces superior e inferior nos casos de vento estudados

Fonte: Autora

Em seguida, os resultados de coeficiente de pressão foram exportados para que os efeitos de coeficientes de pressão nas faces superior e inferior fossem somados, obtendo uma única distribuição ao longo da superfície, baseada na face superior. Embora seja importante observar os efeitos na face superior e inferior da membrana, em geral, é necessário em projetos determinar o valor líquido do coeficiente de pressão, considerando os dois lados da superfície da membrana.

Executando uma rotina criada na linguagem Matlab® com a entrada da simulação CFD, os efeitos nas faces inferior e superior foram combinados (com base na face superior). O resultado obtido para o valor total, em cada um dos casos de vento, é mostrado na Figura 51. Percebe-se que para o caso de Vento 0°, existe uma região de sobrepressão a barlavento, e a maior parte da superfície da membrana está submetida à sucção. Já para o caso de Vento 90°, percebe-se uma inversão, com sucção a barlavento e maior parte da superfície submetida à sobrepressão. Por fim, no caso de Vento 45°, os efeitos estão concentrados na borda de incidência do vento.

Figura 51 - Distribuição total dos coeficientes de pressão ao longo da superfície do modelo 3A

Fonte: Autora

8.3.2. Efeitos de obstáculos no escoamento

Em seguida, foram realizadas novas modelagens, a fim de analisar os efeitos na distribuição dos coeficientes de pressão na membrana sob a presença de obstáculos embaixo dela mostrados na Figura 52.

Figura 52 - Obstáculos colocados embaixo da membrana a fim de estudar o impacto da distribuição dos coeficientes de pressão

Fonte: Autora

Assim, foi necessário estudar mais casos de incidência de vento. A Figura 53 é um complemento à Figura 48.

Figura 53 - Direções do vento analisadas para o parabolóide hiperbólico com obstáculos

Fonte: Autora

Figura 54 - Distribuição dos coeficientes de pressão na membrana do modelo 3B

Fonte: Autora

Figura 55 - Distribuição dos coeficientes de pressão na membrana do modelo 3C

Fonte: Autora

Figura 56 - Distribuição dos coeficientes de pressão na membrana do modelo 3D

Fonte: Autora

Figura 57 - Distribuição dos coeficientes de pressão na membrana do modelo 3E

Fonte: Autora

Algumas situações merecem destaque para análise. Para a situação em que o obstáculo está posicionado no centro da membrana (Modelo 3B), a distribuição dos coeficientes na face superior é significativamente afetada, enquanto esse impacto não ocorre na face inferior. Quanto aos efeitos totais, os efeitos de sucção aumentam sobre a superfície nos casos de Vento 0° e Vento 90°, e o mesmo pode ser observado na borda a barlavento para o Vento 45°.

Quando o obstáculo está próximo ao ponto mais baixo (Modelo 3C), merece destaque o caso de Vento 0° , em que ambas as faces superior e inferior são notavelmente afetadas, e os valores totais de coeficiente de pressão diminuem nas regiões a barlavento e sotavento. Além disso, comparando ao Modelo 3A, no caso de Vento 45° , podem ser observados valores totais positivos próximos ao ponto mais baixo a barlavento, enquanto eles diminuem consideravelmente na situação em questão.

No Modelo 3D, os impactos do caso de Vento 90° e Vento 270° podem ser observados, onde há um leve aumento dos valores negativos ao lado do ponto mais alto da membrana e dos valores positivos em seu centro.

Ainda, no modelo 3E, com um obstáculo maior, podem ser notados grandes diferenças principalmente na situação de Vento 0° , principalmente na face inferior da membrana e, conseqüentemente, afetando a distribuição total.

8.4 COBERTURA CÔNICA

Para esse caso, o primeiro modelo estudado foi um silo com cobertura cônica. As dimensões do denominado Modelo 4A são apresentadas na Figura 58. A velocidade na face de entrada do volume de controle considerada foi de 10 m/s (na direção z , perpendicular à essa face) e a intensidade de turbulência igual a 15%. Na face de sotavento, a pressão é nula. Nas faces laterais e superior do volume de controle, foram adotadas condições simetria, enquanto na face inferior e na edificação considerou-se não deslizamento.

Figura 58 - Dimensões do Modelo 4A

Os resultados para determinação dos coeficientes de pressão devido à ação do vento para um modelo com mesmas dimensões e condições de escoamento estão presentes em Fouad et al. (2018), em que foram testados para a modelagem em CFD os modelos $k-\epsilon$ RNG e LES. Assim, para o estudo em questão, foi considerado um volume de controle com as mesmas dimensões apresentadas na Figura 59.

Figura 59 - Volume de controle, com dimensões em metros, para o estudo do silo com cobertura cônica: (a) elevação; (b) vista superior em corte

Fonte: Fouad et al. (2018)

Os resultados obtidos no Fluent, utilizando o modelo de turbulência $k-\epsilon$ realizável, são mostrados na Figura 60. Os valores obtidos se mostraram muito próximos daqueles apresentados em Fouad et al. (2018). Além dos resultados em CFD, também são apresentados na Figura 61 valores experimentais obtidos em Sabransky e Melbourne (1987), que também se mostram muito similares a ambos estudos realizados em CFD.

Figura 60 - Coeficientes de pressão na cobertura cônica obtidos no Fluent pelo modelo $k-\epsilon$ realizável

Fonte: Autora

Figura 61 - Coeficientes de pressão para cobertura cônica: (a) valores experimentais, obtidos em Sabransky e Melbourne (1987); (b) valores numéricos obtidos em Fouad et al. (2018)

Fonte: Adaptado de Fouad et al. (2018)

Em seguida, foi realizado um novo estudo, com foco para uma forma típica de estrutura retesada, na forma conoidal. A definição da geometria foi realizada no *Grasshopper*, resultando no modelo mostrado na Figura 62, com 1mm de espessura. Sob essa membrana, foi colocado uma estrutura complementar para cobrir a sua parte superior, destacada na cor cinza na figura. Além disso, a distância da base da membrana até o solo é 2 metros.

Figura 62 - Membrana com forma conoidal, com dimensões em metros

Fonte: Autora

Foram realizados dois estudos: o modelo 4B, com fechamentos laterais, e o modelo 4C, sem fechamentos laterais, mostrados na Figura 63. A velocidade na face de entrada do volume de controle considerada foi de 20 m/s (na direção z, perpendicular à essa face) e a intensidade de turbulência igual a 5%. As demais condições de contorno são iguais às do modelo 4A. O volume de controle foi adotado com as mesmas proporções daquelas determinadas no modelo 4A.

Figura 63 - Membrana com forma cônica: com fechamentos laterais e sem fechamentos laterais

Fonte: Autora

Os resultados obtidos pelo modelo de turbulência $k-\varepsilon$ realizável podem ser vistos na Figura 64, que podem ser comparados com os resultados experimentais obtidos em Hincz e Gamboa-Marrufo (2016), mostrados anteriormente na Figura 10 (c). Os valores apresentam boa concordância entre si nas regiões a barlavento e laterais. As principais diferenças encontradas foram na região à sotavento (destacada em amarelo em laranja na Figura 64), em que os coeficientes obtidos no Fluent apresentaram-se ligeiramente maiores, e na região próxima ao diâmetro menor, em que se encontra sucção mais crítica (destacada em azul escuro na Figura 64) se comparada aos valores experimentais.

Figura 64 - Coeficientes de pressão no modelo 4B

Fonte: Autora

Por fim, na Figura 65, são mostrados os coeficientes de pressão obtidos para o modelo sem fechamentos laterais. Nota-se que, ao retirar essas barreiras, a distribuição dos coeficientes de

pressão é impactada, principalmente na região a barlavento, onde aparecem coeficientes com maiores efeitos de sobrepressão.

Figura 65 - Coeficientes de pressão no modelo 4C: (a) superfície externa; (b) superfície interna; (c) valores totais somados

Fonte: Autora

8.5 MODELO 5 – MEMBRANA PNEUMÁTICA

O Modelo 5 trata do modelo real de um envelope de membrana pneumática instalado para uma usina nuclear durante o processo de preparação do solo, permanecendo no local por apenas 6 meses, e pode ser visto na Figura 66. A geometria foi baseada em estudos já realizados para essa membrana pneumática em trabalhos apresentados Pauletti (2010), Pauletti e Guirardi (2013) e Pauletti et al. (2019). Seu modelo computacional e as dimensões em planta podem ser observadas na Figura 67 com altura de 30 metros e estava ancorado a um muro de concreto em seu perímetro.

Figura 66 - Domo pneumático reforçado por cabos

Fonte: Pauletti e Guirardi (2013)

Figura 67 – Modelo 3: (a) vista isométrica; (b) vista em planta, em metros

Fonte: Autora

Foram analisadas duas situações: Vento 0° e 90°, como pode ser visto na Figura 68. Foi utilizado o modelo de turbulência $k-\epsilon$ realizável na solução do problema, com 5% de intensidade de turbulência. O volume de controle adotado nessa simulação foi o paralelepípedo com dimensões 100m x 150m x 50m, conforme indicado na Figura 68. Na superfície de barlavento, a velocidade do vento adotada foi igual a 20 m/s. Na face de sotavento, a pressão é nula. Nas faces laterais e superior, as condições foram de simetria, enquanto na face inferior e na membrana foi aplicada a de não deslizamento.

Figura 68 - Volume de controle e incidências de vento

Fonte: Autora

Assim, foi possível obter os mapas de coeficientes de pressão, ilustrados na Figura 69 e as linhas de fluxo, mostradas na Figura 70, para cada uma das situações de vento da simulação.

Figura 69 - Distribuição dos coeficientes: (a) Vento 0°; (b) Vento 90°

Fonte: Autora

Figura 70 - Linhas de fluxo do escoamento: (a) vento a 0°; (b) vento a 90°

Fonte: Autora

O descolamento da camada limite ocorre quando a tensão de cisalhamento chega ao valor nulo, gerando zonas de recirculação do ar. Percebe-se que para os modelos analisados, na Figura 71, as regiões destacadas em tons mais azulados são aquelas com gradiente de pressão positivo (desfavorável), em que as tensões de cisalhamento são baixas, porém não chegam a zero e, portanto, não há descolamento da camada limite. Ainda, nota-se que essas regiões mais críticas são relativamente pequenas se comparadas a toda a área da membrana.

Figura 71 - Tensão de cisalhamento na membrana: (a) vento a 0°; (b) vento a 90°

Fonte: Autora

9 CONCLUSÕES

Essa pesquisa visa a contribuir para o estado da arte quanto à distribuição de coeficientes de pressão devido à ação do vento em estruturas de membrana, caracterizadas por geometrias complexas, reunindo trabalhos já disponíveis na literatura e fornecendo novos estudos para formas típicas a partir da análise numérica. Aspectos importantes para projeto encontrados na norma brasileira de ação do vento em estruturas ABNT NBR 6123:1988 foram apresentados e introduziram-se conceitos importantes para o entendimento da fluidodinâmica computacional e de ensaios em túnel de vento físico.

O primeiro modelo testado no Fluent foi uma edificação com um telhado de duas águas. O modelo foi feito como um *benchmark*, com o objetivo de testar as ferramentas computacionais em questão. Esse foi validado com os valores fornecidos pela ABNT NBR 6123:1988 e com a modelagem computacional realizada em Manfrim (2006). Além disso, foi possível obter o acoplamento com o módulo estrutural para realizar a interação fluido-estrutura *one-way*.

Os modelos seguintes já trataram de formas aplicáveis para membranas. Um modelo mais simples, com forma de cúpula, foi estudado em duas proporções de altura em relação ao diâmetro. Os valores encontrados a barlavento e na região central se demonstraram mais similares com a EN 1991-1-4. Pelo princípio de Bernoulli, espera-se que na região a sotavento, ocorresse diminuição da velocidade e aumento da pressão, porém, as referências apresentavam pressões ainda negativas nessas regiões. Nos modelos em ANSYS, pressões positivas apareceram na região a sotavento, na região em que há descolamento da camada limite e geração de zona de recirculação.

Foi realizado um estudo criterioso dos coeficientes de pressão do vento para estruturas de membrana com curva dupla na forma de parabolóide hiperbólico, com e sem obstáculos embaixo dela. A superfície da membrana, aberta, foi transformada em um volume delgado, com espessura de 1 mm. O Fluent apresentou como resultados no pós-processamento os valores nas faces superior e inferior, porém, cabe ressaltar a importância dos efeitos totais somados. Para isso, foi desenvolvida uma rotina em Matlab® para que somar os coeficientes de pressão nessas faces, com malhas não coincidentes. Ainda, o efeito de bloqueio de vento por obstáculo mostrou-se significativo. Desconsiderar as condições reais, ou seja, realizar estudos para membranas abertas desimpedida, pode resultar em imprecisões na determinação dos coeficientes de pressão e levar a valores contra a segurança.

A forma conoidal é tipicamente encontrada para coberturas em membrana. Assim, inicialmente foi feita uma modelagem para esse tipo de cobertura para um silo. Os valores se mostraram coerentes aos resultados experimentais e numéricos apresentados em estudos na literatura. Em seguida, foi estudada uma forma de membrana conoidal relaxada, para duas situações: com fechamentos laterais e sem fechamentos laterais. Nota-se que o modelo aberto apresenta diferenças em relação ao com fechamentos. Sabe-se que modelos em escala geralmente são feitos com fechamentos laterais, devido à dificuldade de produzir modelos abertos com pequena espessura. Porém, é importante que haja um esforço para produzir modelos que representem de maneira fidedigna para que os coeficientes sejam determinados com maior precisão.

Por fim, um último modelo foi estudado, tratando-se de um domo pneumático reforçado por cabos, instalado para uma usina nuclear durante o processo de preparação do solo local. Foram determinados os coeficientes de pressão e, assim como no modelo do domo, em uma região em que havia tendência de descolamento da camada limite e esperava-se, à princípio obter sucção à sotavento, foram encontrados valores positivos, devido à zona de recirculação.

Por fim, nota-se que o Fluent é uma ferramenta confiável para a determinação dos coeficientes de pressão, inclusive para formas complexas aplicáveis às estruturas de membrana. Quanto ao acoplamento com módulo de análise estrutural para modelos de membranas no Fluent, ainda existe uma dificuldade para o acoplamento no Workbench para que seja realizado o processo de busca da forma da estrutura de modo iterativo e para a aplicação das condições de contorno de maneira correta. Um modelo em Workbench pode abrir comandos em linguagem APDL, porém, ainda existem alguns desafios nessa área, o que leva muitos pesquisadores a programarem seus próprios códigos de CFD e de análises estruturais. Sugere-se para trabalhos futuros a exploração dessas ferramentas dentro do ambiente Workbench, de modo a facilitar os trabalhos no ambiente de interação fluido-estrutura.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABODONYA, A. K.; ALSOFI, H.; WÜCHNER, R.; BLETZINGER, K.U. **Validation Of Wind-Structure Interaction Simulations For Pneumatic Inflatable Structures**. Sixth International Conference on Structural Engineering, Mechanics and Computation. 2016.

ANSYS INC. **ANSYS Fluent Tutorial Guide**. Disponível em:

<<https://www.afs.enea.it/project/neptunius/docs/fluent/index.htm>>. Acesso em: 20 jun. 2019.

ARCHITECTURAL INSTITUTE OF JAPAN. **AIJ: Recommendations for Loads on Buildings - Chapter 6: Wind Loads**. Tokyo: Architectural Institute of Japan, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRAS DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6123: Forças Devidas Ao Vento Em Edificações - Procedimento**. Rio de Janeiro, 1988.

AUSTRALIAN/NEW ZEALAND STANDARD. **AS/NZS 1170.2: Structural design actions – Part 2: Wind actions**. Sydney, 2002.

BALZ, M.; BARNES, M. Appendix A2: Cp Values for Open Stadium Roofs. In: FORSTER, B.; MOLLAERT, M. **European Design Guide for Tensile Surface Structures**. Bruxelas: TensiNet, 2004. 354p. ISBN 90-8086-871-X

BEUTLER, J. **Beitrag zur statischen windbelastung von seilnetzwerken - ergebnisse von windkanaluntersuchungen**. Hanging Roofs: Proceedings of the IASS Colloquium on Hanging Roofs, Continuous Metallic Shell Roofs and Superficial Lattice Roofs, Paris, 1962. North Holland Publishing Company, Amsterdam, p. 76-86, 1963.

BLESSMANN, J. **Aerodinâmica das Construções**. 2. ed. Porto Alegre: Sagra, 1990.

BUCHHOLDT, H. A. **An introduction to cable roof structures**. 2. ed. Londres: Thomas Telford, 1999. 285 p.

COELHO, J. C. M. **Energia e fluidos: Mecânica dos fluidos – vol. 2**. São Paulo: Blucher, 2016. 384 p.

COLLIERS, J.; MOLLAERT, M., DEGROOTE, J.; DE LAET, L. **Prototyping of thin shell wind tunnel models to facilitate experimental wind load analysis on curved canopy**

structures. Journal Of Wind Engineering And Industrial Aerodynamics, [s.l.], v. 188, p.308-322, maio 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jweia.2019.03.004>.

COLLIERS, J.; MOLLAERT, M., DEGROOTE, J.; DE LAET, L. **Pressure coefficient distributions for the design of hypar membrane roof and canopy structures.** In: INTERNATIONAL TENSINET SYMPOSIUM 2019, 6., 2019, Milão. Proceedings... . Milão: Tensinet, 2019. p. 84 - 94.

COMITÉ EUROPÉEN DE NORMALIZATION. **EN 1991-1-4:** Eurocode 1: Actions on structures. Part 1–4: General actions – Wind actions. 2005.

DAW, D.J.; DAVENPORT, A.G. **Aerodynamic damping and stiffness of a semi-circular roof in turbulent wind.** Journal Of Wind Engineering And Industrial Aerodynamics, [s.l.], v. 32, n. 1-2, p.83-92, set. 1989. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/0167-6105\(89\)90019-6](http://dx.doi.org/10.1016/0167-6105(89)90019-6).

DE NAYER, G; SCHMIDT, S., WOOD, J. N.; BREUER, M. **Enhanced injection method for synthetically generated turbulence within the flow domain of eddy-resolving simulations.** Computers & Mathematics With Applications, [s.l.], v. 75, n. 7, p.2338-2355, abr. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.camwa.2017.12.012>.

DENCHER, M; BALZ, M. Appendix A1: Cp Values for Simple Tensile Structure Shapes. In: FORSTER, B.; MOLLAERT, M. **European Design Guide for Tensile Surface Structures.** Bruxelas: TensiNet, 2004. 354p. ISBN 90-8086-871-X

EUROCÓDIGO 1. **EN 1991-1-4:2005:** Ações em estruturas. Parte 1–4: Ações gerais – Ações do vento. Brussels: CEN (Comité Européen de Normalization).

FORSTER, B. **Cable and membrane roofs – a historical survey.** Structural Engineering Review, p.145-174, 1994.

FOUAD, N. S.; MAHMOUD, G. H.; NASR, N. E. **Comparative study of international codes wind loads and CFD results for low rise buildings.** Alexandria Engineering Journal, [s.l.], v. 57, n. 4, p.3623-3639, dez. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.aej.2017.11.023>.

FOX, R.W.; MCDONALD, A.T.; PRITCHARD, P.J. **Introdução à Mecânica dos Fluidos**. 6ª ed. Rio de Janeiro: LTC, 2006

GLÜCK, M. BREUER, M.; DURST, F.; HALFMANN, A.; RANK, E. **Computation of fluid–structure interaction on lightweight structures**. *Journal Of Wind Engineering And Industrial Aerodynamics*, [s.l.], v. 89, n. 14-15, p.1351-1368, dez. 2001. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/s0167-6105\(01\)00150-7](http://dx.doi.org/10.1016/s0167-6105(01)00150-7).

GLÜCK, M. BREUER, M.; DURST, F.; HALFMANN, A.; RANK, E. **Computation of wind-induced vibrations of flexible shells and membranous structures**. *Journal Of Fluids And Structures*, [s.l.], v. 17, n. 5, p.739-765, abr. 2003. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/s0889-9746\(03\)00006-9](http://dx.doi.org/10.1016/s0889-9746(03)00006-9).

HINCZ, K.; GAMBOA-MARRUFO, M. **Deformed Shape Wind Analysis of Tensile Membrane Structures**. *Journal Of Structural Engineering*, [s.l.], v. 142, n. 3, mar. 2016. American Society of Civil Engineers (ASCE). [http://dx.doi.org/10.1061/\(asce\)st.1943-541x.0001437](http://dx.doi.org/10.1061/(asce)st.1943-541x.0001437).

HOJJAT, M.; STAVROPOULOU, E.; GALLINGER, T.; ISRAEL, U.; WÜCHNER, R.; BLETZINGER, K.-U. **Fluid-Structure Interaction in the Context of Shape Optimization and Computational Wind Engineering**. *Fluid Structure Interaction II*, [s.l.], p.351-381, 28 jul. 2010. Springer Berlin Heidelberg. http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-14206-2_13.

INSTITUTO NACIONAL DE TECNOLOGÍA INDUSTRIAL. **CIRSOC 102**: Reglamento Argentino De Acción Del Viento Sobre Las Viento Sobre Las Construcciones. Buenos Aires, 2005.

MANFRIM, S. T. **Estudo Numérico para a Determinação das Pressões Devidas à Ação do Vento em Edifícios Industriais**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, 2006.

MICHALSKI, A. et al. **Validation of the computational fluid–structure interaction simulation at real-scale tests of a flexible 29m umbrella in natural wind flow**. *Journal Of Wind Engineering And Industrial Aerodynamics*, [s.l.], v. 99, n. 4, p.400-413, abr. 2011. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jweia.2010.12.010>.

MICHALSKI, A et al. **Computational wind engineering of large umbrella structures.** Journal Of Wind Engineering And Industrial Aerodynamics, [s.l.], v. 144, p.96-107, set. 2015. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jweia.2015.05.002>.

OLIVEIRA, M. B. **Estudo das estruturas de membrana: uma abordagem integrada do sistema construtivo, do processo de projetar e dos métodos de análise.** 2001. Tese (Doutorado em Estruturas) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2001. doi:10.11606/T.18.2001.tde-06062006-145331. Acesso em: 11 jun. 2017.

NEWHOUSE, E.L. **The Builders.** National Geographic Society, Book of Division, Washington, 1992.

NEWMAN, B.G.; GANGULI, U.; SHRIVASTAVA, S.C. **Flow over spherical inflated buildings.** Journal Of Wind Engineering And Industrial Aerodynamics, [s.l.], v. 17, n. 3, p.305-327, set. 1984. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/0167-6105\(84\)90023-0](http://dx.doi.org/10.1016/0167-6105(84)90023-0).

PAULETTI, R. M. O. **História, Análise e Projeto das Estruturas Retesadas.** São Paulo, Tese apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, para o concurso de Livre-Docência, junto ao Departamento de Engenharia de Estruturas e Fundações, 2003.

PAULETTI, R. M. O. **Some issues on the design and analysis of pneumatic structures.** International Journal Of Structural Engineering, v. 1, p.217-240, 2010.

PAULETTI, R. M. O.; GUIRARDI, D. M. **Implementation of a simple wrinkling model into Argyris' membrane finite element.** In: VI International Conference on Textile Composites and Inflatable Structures, Munich, 2013.

PAULETTI, R. M. O; ROCHA, K. B.; BOLELLI, P.M. **Some improvements on the static analysis a large pneumatic envelop.** In: IASS Annual Symposium 2019 – Structural Membranes 2019 Form and Force. Barcelona, 2019.

RANK, E. et al. **Windbelastung leichter Flachentragwerke: Numerische Simulation und Windkanalversuch.** Bauingenieur, v. 78, p.501-508, 2003

RIZZO, F. **Wind tunnel tests on hyperbolic paraboloid roofs with elliptical plane shapes.** Engineering Structures, [s.l.], v. 45, p.536-558, dez. 2012. Elsevier BV.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.engstruct.2012.06.049>.

RIZZO, F. **Aerodinamica delle Tensostrutture.** Milão: Silvana Editoriale, 2014. 166 p.

RIZZO, F.; D'ASDIA, P.; LAZZARI, M.; PROCINO, L. **Wind action evaluation on tension roofs of hyperbolic paraboloid shape.** Engineering Structures, [s.l.], v. 33, n. 2, p.445-461, fev. 2011. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.engstruct.2010.11.001>.

RIZZO, F.; D'ASDIA, P.; RICCIARDELLI, F.; BARTOLI, G. **Characterisation of pressure coefficients on hyperbolic paraboloid roofs.** Journal Of Wind Engineering And Industrial Aerodynamics, [s.l.], v. 102, p.61-71, mar. 2012. Elsevier BV.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.jweia.2012.01.003>.

RIZZO, F.; SEPE, V. **Static loads to simulate dynamic effects of wind on hyperbolic paraboloid roofs with square plan.** Journal of Wind Engineering And Industrial Aerodynamics, [s.l.], v. 137, p.46-57, fev. 2015. Elsevier BV.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.jweia.2014.11.012>.

RIZZO, F.; RICCIARDELLI, F. **Design pressure coefficients for circular and elliptical plan structures with hyperbolic paraboloid roof.** Engineering Structures, [s.l.], v. 139, p.153-169, maio 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.engstruct.2017.02.035>.

RIZZO, F.; BARBATO, M.; SEPE, V. **Peak factor statistics of wind effects for hyperbolic paraboloid roofs.** Engineering Structures, [s.l.], v. 173, p.313-330, out. 2018. Elsevier BV.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.06.106>.

SABRANSKY, I.J.; MELBOURNE, W.H. **Design pressure distribution on circular silos with conical roofs.** Journal Of Wind Engineering And Industrial Aerodynamics, [s.l.], v. 26, n. 1, p.65-84, jan. 1987. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/0167-6105\(87\)90036-5](http://dx.doi.org/10.1016/0167-6105(87)90036-5).

UEMATSU et al. **Wind force coefficients for the design of a hyperbolic paraboloid free roof.** The Seventh Asia-Pacific Conference on Wind Engineering. Taipei, 2009.

VEENENDAAL, D.; BLOCK, P. **An overview and comparison of structural form finding methods for general networks**. International Journal Of Solids And Structures, [s.l.], v. 49, n. 26, p.3741-3753, dez. 2012. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2012.08.008>.

VILELA, C.A.B.S. **Ação Estática do Vento em Tensoestruturas**. 149 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, 2011.

WILCOX, D. C. **Turbulence modeling for CFD**. D C W Industries. 3ª edição. 2006.

WOOD, J. N.; BREUER, M.; SCHMIDT, S; DE NAYER, G. **Experimental Investigation and Large-Eddy Simulation of the Turbulent Flow past a Smooth and Rigid Hemisphere**. Flow, Turbulence And Combustion, [s.l.], v. 97, n. 1, p.79-119, 11 jan. 2016. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s10494-015-9690-5>.

WOOD, J. N.; BREUER, M.; DE NAYER, G. **Experimental studies on the instantaneous fluid–structure interaction of an air-inflated flexible membrane in turbulent flow**. Journal Of Fluids And Structures, [s.l.], v. 80, p.405-440, jul. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jfluidstructs.2018.02.006>.

WU, Y; CHEN, Z.; SUN, X. **Research on the wind-induced aero-elastic response of closed-type saddle-shaped tensioned membrane models**. Journal Of Zhejiang University-science A, [s.l.], v. 16, n. 8, p.656-668, ago. 2015. Zhejiang University Press. <http://dx.doi.org/10.1631/jzus.a1400340>.

WÜCHNER, R.; KUPZOK, A.; BLETZINGER, K. **A framework for stabilized partitioned analysis of thin membrane–wind interaction**. International Journal For Numerical Methods In Fluids, [s.l.], v. 54, n. 6-8, p.945-963, 2007. Wiley. <http://dx.doi.org/10.1002/flid.1474>.