

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

AÇÃO ESTÁTICA DO VENTO EM TENSOESTRUTURAS

CRISTINA ALMEIDA BUENO E SILVA VILELA

ORIENTADOR: ATHAIL RANGEL PULINO FILHO

CO-ORIENTADOR: ACIR MÉRCIO LOREDO SOUZA

**TESE DE DOUTORADO
EM ESTRUTURAS E CONSTRUÇÃO CIVIL**

PUBLICAÇÃO: E.TD – 002A/11

BRASÍLIA/DF: JUNHO – 2011

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

AÇÃO ESTÁTICA DO VENTO EM TENSOESTRUTURAS

CRISTINA ALMEIDA BUENO E SILVA VILELA

TESE SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL DA FACULDADE DE TECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTOR EM ESTRUTURAS E CONSTRUÇÃO CIVIL.

APROVADA POR:

Prof. Athail Rangel Pulino Filho, DSc. (UnB – FT – ENC)
(Orientador)

Profa. Graciela Nora Doz de Carvalho, Dr.Ing. (UnB – FT – ENC)
(Examinadora Interna)

Prof. José Luis Vital de Brito, DSc. (UnB – FT – ENC)
(Examinador Interno)

Prof. Vinicius Fernando Arcaro, DSc. (Unicamp – FEC)
(Examinador Externo)

Prof. Ruy Marcelo de Oliveira Pauletti, DSc. (EPUSP – PEF)
(Examinador Externo)

Prof. William Taylor Matias Silva, Dr.Ing. (UnB – FT – ENC)
(Suplente)

BRASÍLIA/DF, 10 DE JUNHO DE 2011.

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

VILELA, C.A.B.S. **Ação estática do vento em tensoestruturas**. Tese de Doutorado em Estruturas e Construção Civil, Publicação E.TD-002A/11, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília. Brasília: 2011. 149 p.

CESSÃO DE DIREITOS

Nome da Autora: Cristina Almeida Bueno e Silva Vilela

Título da Tese de Doutorado: Ação estática do vento em tensoestruturas.

Grau / Ano: Doutor / 2011

É concedida à Universidade de Brasília a permissão para reproduzir cópias desta tese de doutorado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. A autora reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta tese de doutorado pode ser reproduzida sem a autorização por escrito da autora.

Cristina Almeida Bueno e Silva Vilela
SQN 415 Bloco I Apartamento 204
70878-090 – Brasília/DF – Brasil
crisabs@gmail.com

AGRADECIMENTOS

“Muito obrigado” não é suficiente para o tanto que quero agradecer...

- ... a Deus por estar sempre iluminando os caminhos.
- ... ao Fernando, marido amado, pelo carinho, apoio, paciência e atenção durante este período.
- ... à Alice, filha querida que chegou para alegrar ainda mais a nossa vida.
- ... aos meus pais, Luiz César e Néli, meus irmãos, Luiz Otavio e Guilherme, minhas cunhadas Carolina e Luiza, e minha avó Erondina, pelo apoio incondicional desde o primeiro momento em que decidi tornar este sonho realidade, especialmente depois da chegada da Alice, e por me fazerem acreditar que tudo é possível, basta querer.
- ... aos familiares que sempre me incentivaram a perseguir meus objetivos.
- ... ao professor Athail Rangel Pulino Filho pela orientação, dedicação e paciência durante estes dez anos de pesquisa sobre tensoestruturas, desde a iniciação científica até o doutorado.
- ... ao professor Acir Mércio Loredó Souza, por ter confiado na proposta de pesquisa de uma moça de Brasília que bateu à porta do LAC/UFRGS em julho/2005 e ter aceitado o convite para ser co-orientador deste trabalho.
- ... aos professores Graciela Nora Doz de Carvalho, José Luis Vital de Brito, Ruy Marcelo de Oliveira Pauletti e William Taylor Matias Silva pela disponibilidade e interesse em participarem da banca examinadora.
- ... ao professor Vinicius Fernando Arcaro por sempre dar apoio à distância.
- ... a toda equipe do Laboratório de Aerodinâmica das Construções – LAC/UFRGS pela amizade e colaboração imprescindíveis para que os experimentos se tornassem realidade, especialmente aos Eng. Gustavo J. Z. Núñez, Eng. Mário G. K. Oliveira, Eng. Elvis A. Carpeggiani, Eng. Guilherme M. Siqueira, Arq. Gustavo M. B. Klein, aos técnicos Paulo Francisco Bueno e Emerson F. Menezes, aos auxiliares Maria Cristina Dolz Bênia, Miguel C. Custódio, Rafael H. Jantsch, Roberto B. Oliveira e Roges M. Leopoldo, e demais pessoas dedicadas que passaram pelo laboratório neste período.
- ... às famílias Pacini Valls, Malmann Parreira, Basso, Maciel, Maraschin, Deobber e a todos os membros do Gente Nova de Porto Alegre pela amizade e disponibilidade em apoiar concretamente as inúmeras idas e vindas ao Sul desde 2005.
- ... aos amigos queridos que tornaram esse tempo inesquecível!
- ... e a todos aqueles que de alguma forma contribuíram para que esta meta fosse alcançada.

“A falsa ciência gera ateus; a verdadeira ciência leva os homens a se curvar diante da divindade” (Voltaire).

“To give anything less than your best is to lose the gift” (Prefontaine).

RESUMO

O objetivo desta tese de doutorado é contribuir para o estado da arte em tensoestruturas, especificamente no que se refere à ação estática do vento sobre algumas estruturas cônicas de coberturas.

Sete modelos rígidos de estruturas de membrana cônicas com um pico sem cone de fechamento no topo, um modelo com um pico e cone de fechamento no topo, um modelo com dois picos e outro com três picos foram ensaiados no túnel de vento do Laboratório de Aerodinâmica das Construções da Universidade Federal do Rio Grande do Sul – LAC/UFRGS.

Os coeficientes de pressão interna, externa e resultante de todos os modelos foram obtidos a partir dos ensaios dos modelos em túnel de vento e calcularam-se, então, as forças estáticas que devem ser utilizadas no cálculo e dimensionamento destas estruturas.

Observou-se que os valores máximos de sucção e sobrepressão calculados ocorreram com maior frequência com os ângulos de incidência do vento de 30° e 0° e que a maior parte da superfície dos modelos ensaiados não está sujeita a picos severos de sucção ou sobrepressão.

Foram testadas algumas opções de aglutinação de tomadas para obtenção de coeficientes de forma e simplificação do carregamento aplicado, mas observou-se que o resultado não representa bem a realidade por ser aplicável apenas em situações de baixo gradiente de pressões.

Buscou-se resumir os resultados dos ensaios com os modelos de dois e três picos com o cálculo de fatores de redução, mas não foi possível devido à grande variabilidade dos valores dos coeficientes de pressão. Nestes modelos, observou-se, em geral, um aumento da sobrepressão e uma redução da sucção nos picos localizados a sotavento.

Os carregamentos obtidos dos experimentos foram aplicados em uma tensoestrutura de um pico no programa LightsGiD com visualização de gráficos nos programas AutoCAD e GiD, e o resultado foi comparado com valores de carga utilizados por algumas empresas que não realizam testes em túnel de vento antes da construção de seus projetos de coberturas com membrana.

As tensões principais na membrana e as forças nos cabos de borda com a aplicação dos carregamentos obtidos nos ensaios apresentam, em geral, valores inferiores aos resultados obtidos com as cargas distribuídas utilizadas quando não são realizados experimentos.

A aplicação na maioria dos casos de coeficientes de pressão incorretos nos projetos faz com que os riscos de acidentes provocados pela ação do vento sejam maiores.

Para melhorar a precisão dos dados que estão sendo usados como carregamento de vento em tensoestruturas é necessário disponibilizar mais informações, especialmente para os projetos menores em que testes em túnel de vento não são economicamente viáveis e não há tempo hábil para sua realização. Para atingir esta meta, mais séries de testes em túnel de vento devem ser feitas com configurações típicas, metodologia clara e divulgação de resultados. Uma vez que existam dados suficientes publicados, estes poderiam ser utilizados para a elaboração de normas específicas com orientações para projeto, construção e manutenção de estruturas de membrana.

Palavras-chave: estrutura tensionada, tensoestrutura, estrutura de membrana, estrutura leve, cobertura de tecido tensionado, cobertura de membrana, cobertura tensionada, ensaio em túnel de vento, vento, ação estática do vento, pressão do vento, coeficiente de pressão.

ABSTRACT

The goal of this thesis is to contribute to the state of the art in tension structures, specifically with regard to the static wind action on some conical roof structures

Seven rigid models of conic shaped membrane structures without closing the top, a conic model with a cone to close its top, a two and a three bay arrangements were tested in the wind tunnel at Laboratório de Aerodinâmica das Construções at Universidade Federal do Rio Grande do Sul – LAC/UFRGS.

Internal, external and net pressure coefficients for all models were obtained from wind tunnel tests and static forces were calculated to be used in the design of these structures.

It was observed that the maximum calculated values of suction and pressure occurred more frequently with the wind directions of 30° and 0° and that most of the surface of the models tested is not subject to severe peaks of suction nor pressure.

Some options of averaging pressure coefficients over larger areas were done to simplify the applied loads, but it was observed that the result did not represent reality because it is applicable only in situations of low pressure gradient.

To summarize the results of tests with two and three bay arrangements, the calculation of reduction factors was tried, but it was not possible due to the large range in the values of the pressure coefficients. In these models, in general, there was an increase of pressure and a decrease of suction in the peaks located downwind.

Loadings obtained from the experiments were applied on a conic shaped fabric roof using LightsGiD program with results seen in AutoCAD and GiD programs. These results were compared with load values used by some companies that do not make wind tunnel tests before construction of their membrane roofing projects.

Principal stresses in the membrane and forces in the cables with the application of loads obtained from the tests presented, in general, lower values than results shown with distributed loads used when experiments are not performed.

The application in most cases of incorrect pressure coefficients in projects means that the risk of accidents caused by wind is larger.

To improve the accuracy of the data being used as wind load on fabric roofs it is necessary to provide more information, especially for smaller projects since for these, wind tunnel tests are not economic or possible within the time-scale. To achieve this goal, more series of wind tunnel tests should be done with typical configurations, clear methodology and released results. Once there is sufficient data published, they could be used for the development of codes and standards with specific guidelines for design, construction and maintenance of membrane structures.

Key words: tension structure, tensile surface structure, lightweight structure, tensioned fabric roof, membrane roof, membrane structure, wind tunnel test, wind, static wind load, wind pressure, pressure coefficient.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1: Tipos de tenda: (a) do povo Nganasan; (b) do povo Yakut; (c) dos índios norte-americanos; (d) dos mongóis; (e) dos nômades do deserto; (f) do povo Sangesari.....	6
Figura 2.2: Tensoestruturas projetadas por Frei Otto: (a) <i>Bundesgartenschau</i> na Alemanha; (b) <i>Tanzbrunnen</i> na Alemanha; (c) Exposição Nacional da Suíça; (d) Feira Mundial no Canadá.....	7
Figura 2.3: Complexo Olímpico de Munique, Alemanha.....	8
Figura 2.4: Uso das estruturas de membrana como elemento de fachada: (a) em Dubai, Emirados Árabes; (b) em Leicester, no Reino Unido.....	9
Figura 2.5: Classificação das tensoestruturas em membrana.....	10
Figura 2.6: Esquema de estruturas pneumáticas.....	10
Figura 2.7: Estruturas pneumáticas: (a) Arena Romana de Nîmes, França; (b) Pavilhão alemão da Expo'92 em Sevilha, Espanha; (c) <i>Tokyo Dome</i> , Japão; (d) Cobertura de Campo de Golfe, EUA; (e) Pavilhão de Exposições da Mercedes-Benz, Brasil.....	11
Figura 2.8: Principais tipos de estruturas de membrana tracionada por cabos: (a) parabolóide hiperbólico; (b) catenóide; (c) e (d) superfícies modificadas.....	12
Figura 2.9: Escritório em Munique, Alemanha, com membrana fechada para uso interno para melhorar o conforto térmico.....	13
Figura 2.10: Pavilhão da Venezuela com cobertura retrátil em Hanover, Alemanha.....	14
Figura 2.11: Arranjos típicos dos fios nos tecidos para membranas estruturais: (a) fios sobrepostos; e (b) tecido padrão.....	15
Figura 2.12: Exemplo esquemático de membrana estrutural com suas camadas.....	15
Figura 2.13: Alongamento biaxial típico de membranas.....	18
Figura 2.14: Estruturas de membrana com apoios pontuais: (a) Terminal Haj, Arábia Saudita; (b) Estádio do Rei Fahd, Arábia Saudita; (c) Aeroporto de Denver, EUA; (d) acesso ao Millenium Dome, Inglaterra; e (e) Millenium Dome, Inglaterra.....	19
Figura 2.15: Estruturas de membrana com apoios em arcos: (a) Lindsay Park, Canadá; (b) Laboratório de pesquisa da M&G, Itália; e (c) Myao Li Arena, Taiwan.....	20
Figura 2.16: Opções de estrutura de sustentação para ter maior vão livre interno: (a) Piscina do Complexo Nacional de Esportes em Kuala Lumpur, na Malásia; (b) Arena de Esportes Wolfgang Meyer em Hamburgo, Alemanha.....	20
Figura 2.17: Etapas de projeto de uma estrutura de membrana tracionada com cabos.....	23

Figura 2.18: Modelo cônico de base circular utilizado mostrando deformação: (a) em túnel de vento; (b) na simulação computacional.....	32
Figura 2.19: Teorema da Conservação da Massa: contorno de um tubo de corrente de um fluido	34
Figura 2.20: Aplicação do Teorema de Bernoulli com linhas de escoamento no entorno de um objeto	35
Figura 2.21: Modelo de túnel de vento de estrutura de membrana em forma de parabolóide hiperbólico	38
Figura 2.22: Definição de zonas de coeficientes de pressão externa para estrutura de membrana em forma de parabolóide hiperbólico	39
Figura 2.23: Diagrama do modelo de parabolóide hiperbólico usado para obter os coeficientes de pressão com indicações da direção do vento incidente: 0° , 45° e 90°	39
Figura 2.24: Distribuição de pressões sem vigas de contorno nem paredes: HP, ponto alto; LP, ponto baixo; (a) sobre a cobertura (superfície externa), vento a 0° , $H/A = 0,1$; (b) sobre a cobertura (superfície externa), vento a 0° , $H/A = 0,5$; (c) sob a cobertura (superfície interna), vento a 0° , $H/A = 0,5$; (d) sobre a cobertura (superfície externa), vento a 90° , $H/A = 0,5$	40
Figura 2.25: Distribuição de pressões: HP, ponto alto; LP, ponto baixo; (a) sob a cobertura (superfície interna), sem vigas de contorno nem paredes, vento a 90° , $H/A = 0,5$; (b) sobre a cobertura (superfície externa), com vigas de contorno e paredes, vento a 0° , $H/A = 0,5$; (c) sobre a cobertura (superfície externa), com vigas de contorno e paredes, vento a 45° , $H/A = 0,5$; (d) sobre a cobertura (superfície externa), com vigas de contorno e paredes, vento a 90° , $H/A = 0,5$	41
Figura 2.26: Modelo de túnel de vento e definição de zonas de coeficientes de pressão para estrutura de membrana cônica.	42
Figura 2.27: Arranjo para ensaio em túnel de vento de tensoestrutura com 4 picos sendo que apenas no modelo escuro são feitas medições de pressão.	43
Figura 2.28: Diagramas com áreas utilizadas para calcular a média dos coeficientes de pressão: (a) por face; (b) por zona sem fechamento lateral; (c) por zona com fechamento lateral.....	43
Figura 2.29: Exemplo de estrutura de membrana no Brasil: Restaurante Barra Vento, Salvador.....	49
Figura 2.30: Auditório Araújo Viana na inauguração da tensoestrutura, Porto Alegre.....	49
Figura 2.31: Auditório Araújo Viana em 2005, Porto Alegre.....	50

Figura 3.1: Vista externa do túnel de vento Prof. Joaquim Blessmann.	57
Figura 3.2: Circuito aerodinâmico do túnel de vento Professor Joaquim Blessmann.	58
Figura 3.3: Características de perfis verticais de velocidades médias: (a) terreno com obstáculos grandes e irregulares, como o centro das grandes cidades, $z_g = 520$ m, $p =$ $0,40$; (b) terreno uniforme coberto com obstáculos de 10 a 15m de altura, como cidades pequenas, subúrbios, matas e cerrados, $z_g = 400$ m, $p = 0,28$; (c) terreno aberto e plano, como campo aberto com poucas árvores, costas, praias e desertos, $z_g = 270$ m, $p = 0,16$	59
Figura 3.4: Alguns dispositivos de geração das diferentes camadas limites do túnel de vento Prof. Joaquim Blessmann: (a) grelha; (b) $p = 0,11$; (c) $p = 0,23$; (d) $p = 0,34$	61
Figura 3.5: Modelo da tensoestrutura R0305 montado dentro do túnel de vento para medição de pressões externas.	62
Figura 3.6: Características do vento deslizante e turbulento simulado com expoente $p = 0,11$: (a) Perfil de velocidades médias; (b) Intensidade da componente longitudinal da turbulência; (c) Macroescala da componente longitudinal da turbulência.....	63
Figura 3.7: Definição dos regimes de escoamento para cilindros circulares bidimensionais ..	68
Figura 3.8: Malha plana de elementos finitos triangulares de três nós na área da membrana e de elementos lineares de dois nós no contorno dos cabos.....	73
Figura 3.9: Esquema de geração de modelos numéricos de tensoestruturas.....	76
Figura 3.10: Exemplos de pares de medidas [mm] em escala 1/75 obtidos do modelo numérico tridimensional R0215 no AutoCAD para construção do molde e peça com encaixe na curvatura.....	78
Figura 3.11: Distribuição e numeração das tomadas de pressão em modelos de um pico sem cone – R0215, R0260, R0305, R0345, R0390, R0435 e R0475 – 54 tomadas de pressão	80
Figura 3.12: Distribuição e numeração das tomadas de pressão no modelo de um pico com cone – R0305c – 58 tomadas de pressão	80
Figura 3.13: Distribuição e numeração das tomadas de pressão no modelo de dois picos – R0305d – 108 tomadas de pressão	81
Figura 3.14: Distribuição e numeração das tomadas de pressão no modelo de três picos – R0305t – 162 tomadas de pressão	82
Figura 3.15: Ângulos de incidência do vento em modelos de um pico (a) sem cone – R0215, R0260, R0305, R0345, R0390, R0435, R0475; e (b) com cone – R0305c.....	84
Figura 3.16: Ângulos de incidência do vento no modelo de dois picos – R305d.	84

Figura 3.17: Ângulos de incidência do vento no modelo de três picos – R305t.	85
Figura 4.1: c_p^* média resultante do modelo R0215. Ângulo de incidência do vento: (a) 0°; (b) 15°; (c) 30°; (d) 45°.....	87
Figura 4.2: Coeficientes de pressão do modelo R0215: (a) máxima externa; (b) mínima externa; e o ângulo de incidência do vento em que ocorreram.....	88
Figura 4.3: Vista superior: linhas isobáricas dos coeficientes de pressão média resultante (c_p^*) do modelo R0215 para os ângulos de incidência do vento de 0°, 15°, 30° e 45°	91
Figura 4.4: Vista superior: linhas isobáricas dos coeficientes de pressão média resultante (c_p^*) do modelo R0260 para os ângulos de incidência do vento de 0° e 15°	91
Figura 4.5: Vista superior: linhas isobáricas dos coeficientes de pressão média resultante (c_p^*) do modelo R0260 para os ângulos de incidência do vento de 30° e 45°	92
Figura 4.6: Vista superior: linhas isobáricas dos coeficientes de pressão média resultante (c_p^*) do modelo R0305 para os ângulos de incidência do vento de 0°, 15°, 30° e 45°	92
Figura 4.7: Vista superior: linhas isobáricas dos coeficientes de pressão média resultante (c_p^*) do modelo R0305c para os ângulos de incidência do vento de 0°, 15°, 30° e 45°.....	93
Figura 4.8: Vista superior: linhas isobáricas dos coeficientes de pressão média resultante (c_p^*) do modelo R0345 para os ângulos de incidência do vento de 0° e 15°	93
Figura 4.9: Vista superior: linhas isobáricas dos coeficientes de pressão média resultante (c_p^*) do modelo R0345 para os ângulos de incidência do vento de 30° e 45°	94
Figura 4.10: Vista superior: linhas isobáricas dos coeficientes de pressão média resultante (c_p^*) do modelo R0390 para os ângulos de incidência do vento de 0°, 15°, 30° e 45°.....	94
Figura 4.11: Vista superior: linhas isobáricas dos coeficientes de pressão média resultante (c_p^*) do modelo R0435 para os ângulos de incidência do vento de 0°, 15°, 30° e 45°.....	95
Figura 4.12: Vista superior: linhas isobáricas dos coeficientes de pressão média resultante (c_p^*) do modelo R0475 para os ângulos de incidência do vento de 0° e 15°.....	95
Figura 4.13: Vista superior: linhas isobáricas dos coeficientes de pressão média resultante (c_p^*) do modelo R0475 para os ângulos de incidência do vento de 30° e 45°.....	96
Figura 4.14: Ângulos de incidência do vento considerados para elaboração dos gráficos com linhas isobáricas do modelo de dois picos.....	96
Figura 4.15: Ângulos de incidência do vento considerados para elaboração dos gráficos com linhas isobáricas do modelo de três picos.....	97
Figura 4.16: Vista superior: linhas isobáricas dos coeficientes de pressão média resultante (c_p) do modelo R0305d para os ângulos de incidência do vento de 0° e 15°	97

Figura 4.17: Vista superior: linhas isobáricas dos coeficientes de pressão média resultante (c_p) do modelo R0305d para os ângulos de incidência do vento de 30°, 45°, 60° e 75°	98
Figura 4.18: Vista superior: linhas isobáricas dos coeficientes de pressão média resultante (c_p) do modelo R0305d para o ângulo de incidência do vento de 90°	99
Figura 4.19: Vista superior: linhas isobáricas dos coeficientes de pressão média resultante (c_p) do modelo R0305t para os ângulos de incidência do vento de 0° e 15°	99
Figura 4.20: Vista superior: linhas isobáricas dos coeficientes de pressão média resultante (c_p) do modelo R0305t para os ângulos de incidência do vento de 30°, 45°, 60° e 75°	100
Figura 4.21: Vista superior: linhas isobáricas dos coeficientes de pressão média resultante (c_p) do modelo R0305t para o ângulo de incidência do vento de 90°	101
Figura 4.22: Comparação dos valores de c_p^* média resultante para o ângulo de incidência do vento = 0° para os modelos de um pico sem cone de fechamento no topo.	102
Figura 4.23: Comparação dos valores de c_p^* média resultante para o ângulo de incidência do vento = 15° para os modelos de um pico sem cone de fechamento no topo.....	103
Figura 4.24: Comparação dos valores de c_p^* média resultante para o ângulo de incidência do vento = 30° para os modelos de um pico sem cone de fechamento no topo.....	104
Figura 4.25: Comparação dos valores de c_p^* média resultante para o ângulo de incidência do vento = 45° para os modelos de um pico sem cone de fechamento no topo.....	105
Figura 4.26: Comparação dos valores de c_p^* média resultante entre os modelos R0305 e R0305c para o ângulo de incidência do vento = 0°	106
Figura 4.27: Comparação dos valores de c_p^* média resultante entre os modelos R0305 e R0305c para o ângulo de incidência do vento = 15°	107
Figura 4.28: Comparação dos valores de c_p^* média resultante entre os modelos R0305 e R0305c para o ângulo de incidência do vento = 30°	108
Figura 4.29: Comparação dos valores de c_p^* média resultante entre os modelos R0305 e R0305c para o ângulo de incidência do vento = 45°	109
Figura 4.30: Localização das zonas	112
Figura 4.31: Resultado do modelo R0305 do LightsGiD no AutoCAD: (a) vento a 0°; (b) vento a 15°; (c) vento a 30°; (d) vento a 45°	115
Figura 4.32: Resultado do modelo R0305 do LightsGiD no AutoCAD: (a) sobrepressão de 0,7355 kN/m ² ; (b) sucção de 0,7355 kN/m ²	116
Figura 4.33: Tensão principal 1 nos elementos da membrana [kPa] do modelo R0305: (a) vento a 0°; (b) vento a 15°	116

Figura 4.34: Tensão principal 1 nos elementos da membrana [kPa] do modelo R0305: (a) vento a 30°; (b) vento a 45°; (c) sobrepressão de 0,7355 kN/m ² ; (d) sucção de 0,7355 kN/m ²	117
Figura 4.35: Tensão principal 2 nos elementos da membrana [kPa] do modelo R0305: (a) vento a 0°; (b) vento a 15°; (c) vento a 30°; (d) vento a 45°	118
Figura 4.36: Tensão principal 2 nos elementos da membrana [kPa] do modelo R0305: (a) sobrepressão de 0,7355 kN/m ² ; (b) sucção de 0,7355 kN/m ²	119
Figura 4.37: Força atuando nos cabos de borda [kN] do modelo R0305: (a) vento a 0°; (b) vento a 15°	119
Figura 4.38: Força atuando nos cabos de borda [kN] do modelo R0305: (a) vento a 30°; (b) vento a 45°; (c) sobrepressão de 0,7355 kN/m ² ; (d) sucção de 0,7355 kN/m ²	120

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1: Classificação de estruturas de membrana tracionadas por cabos	13
Tabela 2.2: Valores de c_{pe} para estrutura em forma de parabolóide hiperbólico	39
Tabela 2.3: Valores de c_{pe} para estrutura cônica	42
Tabela 2.4: Valores de coeficiente de pressão resultante em cobertura de membrana sem fechamento lateral com 1 pico	44
Tabela 2.5: Valores de coeficiente de pressão resultante em cobertura de membrana com fechamento lateral com 1 pico	44
Tabela 2.6: Valores de fatores de redução para coberturas de membrana com múltiplos picos	44
Tabela 3.1: Velocidade média do escoamento no topo dos modelos ensaiados durante a medição das pressões externas.....	64
Tabela 3.2: Velocidade média do escoamento no topo dos modelos ensaiados durante a medição das pressões internas.	65
Tabela 3.3: Valores do número de Reynolds nos ensaios realizados.	69
Tabela 3.4: Razão altura/diâmetro e ângulo de inclinação da membrana dos modelos	72
Tabela 3.5: Deslocamentos verticais impostos no LightsGiD para os nós do anel central dos modelos.....	74
Tabela 3.6: Visualização dos modelos no AutoCAD e dentro do túnel de vento	77
Tabela 3.7: Altura da membrana de cada modelo na escala escolhida para construção.....	78
Tabela 4.1: Valores limites de c_p * média resultante dos modelos de um pico.....	89
Tabela 4.2: Valores limites de c_p média resultante dos modelos de dois e três picos: ângulo de incidência do vento de 0° a 45°	90
Tabela 4.3: Valores limites de c_p média resultante dos modelos de dois e três picos: ângulo de incidência do vento de 60° a 90°	90
Tabela 4.4: Pressão dinâmica no topo das coberturas e parâmetros necessários para o seu cálculo.....	112
Tabela 4.5: Valores máximos de sucção e sobrepessão em cada modelo e ângulo de incidência do vento em que ocorreram.....	113
Tabela 4.6: Quantidade de elementos triangulares da membrana com forças estáticas resultantes em módulo menores do que 1 kN.....	113

Tabela 4.7: Quantidade de elementos triangulares da membrana com forças estáticas resultantes em módulo menores do que 0,5 kN.....	114
Tabela A.1: Propriedades das membranas	130
Tabela B.1: c_p * média resultante para o ângulo de incidência do vento = 0°	135
Tabela B.2: c_p * média resultante para o ângulo de incidência do vento = 15°.....	136
Tabela B.3: c_p * média resultante para o ângulo de incidência do vento = 30°.....	138
Tabela B.4: c_p * média resultante para o ângulo de incidência do vento = 45°.....	139
Tabela B.5: c_p * média resultante do modelo R0305c	141
Tabela C.1: c_p média resultante do modelo de dois picos - R0305d	143
Tabela C.2: c_p média resultante do modelo de três picos - R0305t	145

LISTA DE SÍMBOLOS

LETRAS ROMANAS MAIÚSCULAS:

A	área da seção plana
C_a	coeficiente de arrasto
D	dimensão característica
F	integral das forças do vento nas áreas elementares
F_r	fator de rajada
I	intensidade da componente longitudinal da turbulência
L	macroescala da componente longitudinal da turbulência
P	pressão estática
P_{atm}	pressão atmosférica
Re	número de Reynolds
S_1	fator topográfico
S_2	fator que considera a influência da rugosidade do terreno, das dimensões da edificação e de sua altura sobre o terreno
S_3	fator baseado em conceitos probabilísticos
T	temperatura do ar
V	velocidade média do escoamento
V_k	velocidade característica do vento no topo da construção
V_0	velocidade básica do vento adequada ao local onde a estrutura será construída
V_{ref}	velocidade média em uma altura de referência
$V(z)$	velocidade média na altura z

LETRAS ROMANAS MINÚSCULAS:

b	parâmetro meteorológico usado na determinação de S_2
k_o	relação entre a pressão dinâmica de um determinado ponto do túnel e a variação da pressão entre os anéis piezométricos
c_p^*	coeficiente de pressão média resultante
c_p	coeficiente de pressão total, resultante ou simplesmente coeficiente de pressão
c_{pe}	coeficiente de pressão externa (ou na face superior da cobertura)
c_{pi}	coeficiente de pressão interna (ou na face inferior da cobertura)

g	aceleração da gravidade
p	expoente da curva de potência caracterizado pelo tipo de terreno
q	pressão dinâmica de referência
z	cota do ponto considerado, geralmente altura da construção acima do nível geral do terreno
z_{ref}	cota do eixo longitudinal do túnel.

LETRAS GREGAS MAIÚSCULAS:

ΔA	área parcial, correspondente a uma pequena região da superfície da cobertura, a qual se pode considerar como plana com pressão constante
ΔP_a	variação de pressão entre os dois anéis piezométricos do convergente
Δp_e	pressão estática efetiva média no ponto em estudo na face superior (ou externa) da cobertura
Δp_i	pressão estática efetiva média no ponto em estudo na face inferior (ou interna) da cobertura

LETRAS GREGAS MINÚSCULAS:

ρ	massa específica do ar
ν	viscosidade cinemática do fluido

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	1
1.1 OBJETIVO	3
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
2.1 BREVE HISTÓRICO SOBRE AS ESTRUTURAS DE MEMBRANA	4
2.2 PRINCIPAL CLASSIFICAÇÃO DAS TENSOESTRUTURAS EM MEMBRANA	9
2.2.1 Estruturas pneumáticas.....	10
2.2.2 Estruturas de membrana tracionadas por cabos e esticadores.....	11
2.3 MATERIAIS UTILIZADOS EM TENSOESTRUTURAS.....	14
2.4 CARACTERÍSTICAS DAS TENSOESTRUTURAS	21
2.5 ETAPAS DO PROJETO EM TENSOESTRUTURAS.....	23
2.5.1 Busca da forma	24
2.5.2 Projeto de cortes.....	24
2.5.3 Análise estrutural.....	26
2.5.3.1 Carregamentos externos em tensoestruturas	27
2.5.3.1.1 Pré-tracionamento	28
2.5.3.1.2 Peso próprio	29
2.5.3.1.3 Neve	29
2.5.3.1.4 Temperatura.....	29
2.5.3.1.5 Carregamento sísmico	30
2.5.3.1.6 Carregamento devido à ação do vento	30
2.5.3.1.6.1 Breve fundamentação teórica.....	33
2.5.3.1.6.2 Valores de coeficientes de pressão para formas simples de tensoestruturas	36
2.5.3.1.7 Combinações de carga.....	45
2.5.4 Modelagem física.....	46
2.6 RECOMENDAÇÕES GERAIS DE PROJETO.....	47
2.7 UTILIZAÇÃO DAS ESTRUTURAS DE MEMBRANA	48
2.8 MANUTENÇÃO DE TENSOESTRUTURAS	50
2.8.1 Limpeza	51
2.8.2 Corrosão	52
2.8.3 Drenagem da água	52
2.8.4 Pré-tracionamento e retracionamento	53
2.8.5 Conserto	54

2.8.6 Substituição	55
3 ENSAIOS EM TÚNEL DE VENTO	56
3.1 O TÚNEL DE VENTO PROF. JOAQUIM BLESSMANN	56
3.2 SIMULAÇÃO DO VENTO NATURAL E DETERMINAÇÃO DA VELOCIDADE.....	58
3.3 CONDIÇÕES DE SEMELHANÇA	65
3.3.1 Número de Reynolds.....	66
3.4 INVESTIGAÇÃO EXPERIMENTAL COM MODELOS REDUZIDOS.....	69
3.4.1 Modelos estáticos.....	71
3.4.2 Ensaios com modelos estáticos e processamento de dados	83
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	86
5 CONCLUSÕES.....	121
6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	123
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	124
ANEXO A – PROPRIEDADES DAS MEMBRANAS	130
APÊNDICE A – DVD	134
APÊNDICE B – TABELAS DE C_p^* MÉDIA RESULTANTE DOS MODELOS DE UM PICO.....	135
APÊNDICE C – TABELAS DE C_p MÉDIA RESULTANTE DOS MODELOS DE DOIS E TRÊS PICOS	143

1 INTRODUÇÃO

A utilização de estruturas executadas com mastros metálicos, cabos de alta resistência e tecido sintético experimentou um crescimento bastante significativo nas últimas décadas. Edificações para as mais variadas funções foram construídas com essa tecnologia.

Embora com algumas dificuldades técnicas ainda não superadas, esse tipo estrutural apresenta vantagens importantes, dentre as quais se destacam: vencimento de grandes vãos; baixo peso próprio; facilidade de fabricação e montagem; facilidade de transporte para outro local; uso do tecido sintético como elemento estrutural e de vedação.

Da pesquisa bibliográfica realizada, é fácil depreender-se que não se tem ainda estabelecida uma metodologia preponderante para o cálculo (análise e dimensionamento) dessas estruturas, como mostrado na citação abaixo do ano de 2004, que continua válida atualmente.

Não existe um corpo europeu oficial de informações para fornecer material aprovado, com fundamentos verificados cientificamente e métodos de cálculo comumente aceitos. Algumas normas e regulamentos nacionais existem, mas são incompletos, válidos apenas em situações muito específicas e são diferentes dependendo do país. A norma *Eurocode 1*, nas partes 2.3 e 2.4, onde fala de carregamentos de neve e vento não considera as formas complexas de dupla curvatura das tensoestruturas. A DIN 4134 *Tragluftbauten*, norma alemã, fornece apenas um mínimo de orientação para estruturas infláveis. Já a DIN 4112 *Fliegende Bauten*, inclui estruturas de membrana temporárias, mas sem muitos detalhes. O *Bureau Veritas* francês trabalhou na elaboração de um grupo de recomendações para tensoestruturas permanentes publicadas em *Annales du bâtiment et des travaux publics*. A norma europeia CEN/TC152/WG2 nº 70 sobre segurança de tendas está em elaboração. Ela especificará os requisitos mínimos para garantir a segurança de tendas móveis, temporariamente instaladas. As estruturas tensionadas merecem uma investigação melhor coordenada para as normas necessárias. Foram publicados guias de projeto em outros lugares do mundo como o da Associação de Estruturas de Membrana do Japão e da Sociedade Americana de Engenheiros Civis (ASCE). Uma vez que uma norma é publicada, a indústria se torna mais respeitável e a confiança dos clientes aumenta. Isso deve levar a um maior número de negócios para construtores e projetistas da área. (FORSTER; MOLLAERT, 2004, p.19)

O grupo de pesquisadores liderados por Forster e Mollaert (2004) identificou diversos temas que são prioritários para a pesquisa em tensoestruturas:

- Desenvolvimento de ferramentas para medição e testes de membranas;
- Necessidade de investigação do desempenho a longo prazo dos materiais utilizados em estruturas de membrana;
- Melhoria da durabilidade do material;
- Melhoria da resistência à tração;
- Determinação precisa das propriedades térmicas, acústicas e de iluminação dos materiais;
- Monitoramento detalhado e modelagem melhorada para prever o ambiente interno dos espaços fechados por tensoestruturas;
- Determinação de cargas de vento em estruturas de membrana.

A falta de dados disponíveis de carga da ação do vento para coberturas em membrana pode levar à utilização de coeficientes de pressão incorretos.

Para melhorar a precisão dos dados que estão sendo usados como carregamento de vento é necessário disponibilizar mais informações, especialmente para os projetos menores em que testes em túnel de vento não são economicamente viáveis e não há tempo hábil para sua realização. Para atingir esta meta, várias séries de testes em túnel de vento devem ser feitas com configurações típicas, metodologia clara e divulgação de resultados.

1.1 OBJETIVO

O objetivo desta tese de doutorado é contribuir para o estado da arte em tensoestruturas, especificamente no que se refere à ação estática do vento sobre algumas estruturas cônicas de coberturas.

Sete modelos rígidos de estruturas de membrana cônicas com um pico sem cone de fechamento no topo, um modelo com um pico e cone de fechamento no topo, um modelo com dois picos e outro com três picos foram ensaiados no túnel de vento do Laboratório de Aerodinâmica das Construções da Universidade Federal do Rio Grande do Sul – LAC/UFRGS.

A partir dos dados destes ensaios foram calculados os coeficientes de pressões interna, externa e resultante exercidas pelo vento para cada modelo e a força estática resultante. Com estes valores foram obtidos os carregamentos para uma tensoestrutura de um pico no programa LightsGiD com visualização de gráficos nos programas AutoCAD e GiD, e o resultado foi comparado com valores de carga utilizados por algumas empresas que não realizam testes em túnel de vento antes da construção de seus projetos de coberturas com membrana.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 BREVE HISTÓRICO SOBRE AS ESTRUTURAS DE MEMBRANA

As tendas, associadas à construção arquitetônica mais primitiva e natural, acompanharam a história da evolução do ser humano e continuam a ter um papel significativo atualmente. As suas origens remontam aos primeiros tempos do homem, tendo ficado patentes graças aos vestígios encontrados datados de 40 mil anos naquilo que hoje se conhece como Ucrânia, numa época em que os homens utilizaram ossos de mamute e peles de animais, que elaboravam de forma rudimentar para se protegerem do clima e das agressões externas, transformando o tecido no primeiro recurso para obter abrigo fabricado pelo homem (BAHAMÓN, 2004).

A construção rápida das tendas, que tradicionalmente se realizava com elementos naturais, assim como a sua fácil desmontagem ou transporte, relacionaram este tipo de arquitetura com as culturas nômades. Embora se continue a ligar a arquitetura têxtil às montagens efêmeras, móveis ou leves, a evolução nas técnicas de construção, nos tipos de tecidos e nas fibras utilizadas nas últimas décadas gerou as mais diversas aplicações em projetos contemporâneos de arquitetura e de design de interiores (BAHAMÓN, 2004).

As estruturas tensionadas apresentam dinamismo visual, leveza, abertura, ritmo, harmonia e elegância. Remetem ao futuro com sua geometria arrojada e para muitas pessoas trazem memórias relacionadas às tendas da infância ou de culturas indígenas, nômades e outras.

Tendas, toldos e guarda-chuvas apresentam características comuns, pois protegem das influências do clima e são feitos de modo similar: uma combinação de estrutura rígida ou em forma de teia com áreas de tecido. Estes elementos são usados pelos seres humanos desde os tempos antes de Cristo até hoje.

No oeste da Sibéria, o povo Nganasan vive em tendas nômades com cobertura de pele de rena, com diâmetro de até 9 m (Fig. 2.1: (a)). O povo Yakut, siberianos que cuidam de gado, vivem em tendas fixas de 6 m de diâmetro cobertas com cortiça (Fig. 2.1: (b)). As tendas cônicas dos índios norte-americanos são conhecidas por sua facilidade de montagem, desmontagem e transporte, apresentam diâmetros variáveis e são cobertas com pele de bisão (Fig. 2.1: (c)). Os mongóis utilizam tendas conhecidas como yurts geralmente com 5 m de diâmetro e cobertas com lã (Fig. 2.1: (d)). Adaptadas perfeitamente aos recursos disponíveis e à vida no deserto, a tenda negra é bastante usada na Arábia e norte da África. Este tipo é erguido com pouca madeira e uma cobertura feita principalmente de pêlo de bode, mas também são encontradas partes de lã, algodão e pêlo de camelo. Como apresenta cor escura, a tenda negra proporciona sombra e a trama aberta permite o escape do ar quente (Fig. 2.1: (e)). No Norte do Irã, o povo Sangesari mora em tendas parecidas com as tendas negras, mas com maior flexibilidade de distribuição de espaço para proteger do frio e do vento (Fig. 2.1: (f)) (KOCH; HABERMANN, 2004).

Houve pouco desenvolvimento das tendas entre o tempo dos Romanos e o século XIX, em parte por causa da carência de demanda, e principalmente devido à carência de avanços na manufatura de cabos, tecidos e conexões resistentes. Porém, depois da Revolução Industrial houve uma demanda por tendas grandes e por materiais de grande resistência, com produção em massa e relativamente barata (BORGES FILHO, 2006).

A estrutura pneumática que inaugurou a era moderna das estruturas de membrana no mundo ocidental foi projetada e executada por Walter Bird em 1946 na construção de uma

proteção para uma antena de radar nos Estados Unidos. Com o sucesso dessas estruturas, ele abriu uma empresa especializada em tensoestruturas em 1956 que atua até hoje, a Birdair.

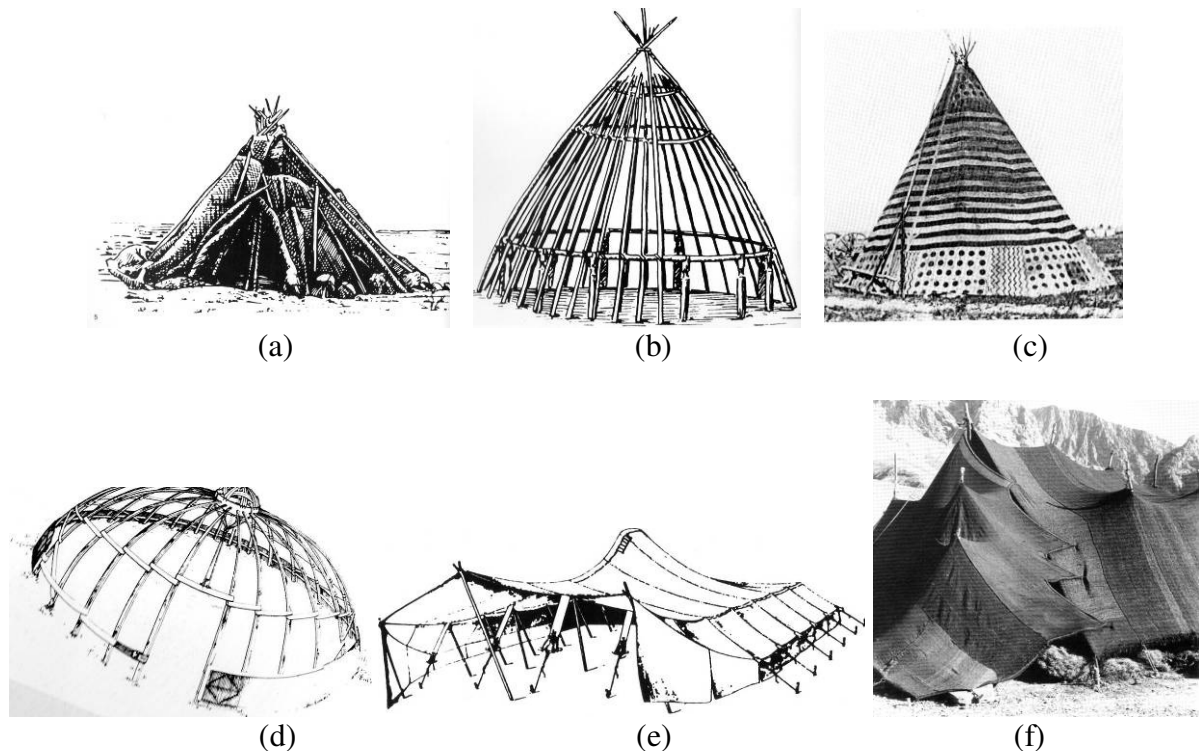
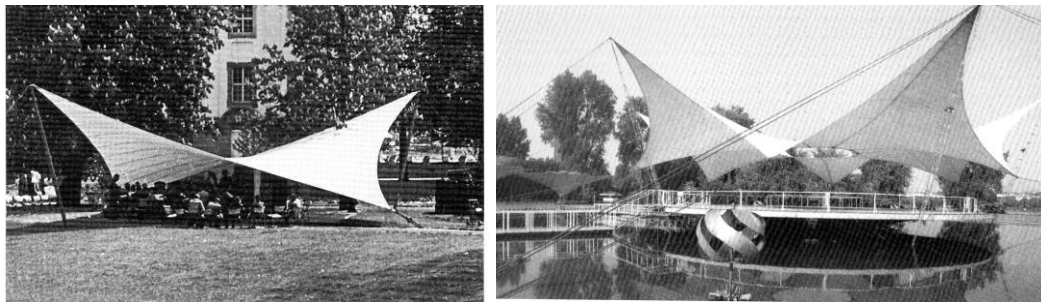


Figura 2.1: Tipos de tenda¹: (a) do povo Nganasan; (b) do povo Yakut; (c) dos índios norte-americanos; (d) dos mongóis; (e) dos nômades do deserto; (f) do povo Sangesari.

Um dos primeiros trabalhos executados de outro pioneiro, Frei Otto, um especialista alemão em estruturas tracionadas, foi uma área para um pavilhão de música no *Bundgartenschau* em Kassel, Alemanha, (Fig. 2.2: (a)), construído em 1955 em parceria com Peter Stromeyer. A superfície da cobertura é de mínima área e é tracionada em todos os lados (KOCH; HABERMANN, 2004).

Em 1957, Frei Otto construiu o *Tanzbrunnen* em Colônia, Alemanha, (Fig. 2.2: (b)). Também utilizou as tensoestruturas na Exposição Nacional da Suíça em 1964 (Fig. 2.2: (c)) e na Feira Mundial em Montreal, Canadá, em 1967 (Fig. 2.2: (d)) (KOCH; HABERMANN, 2004).

¹ KOCH; HABERMANN, 2004.

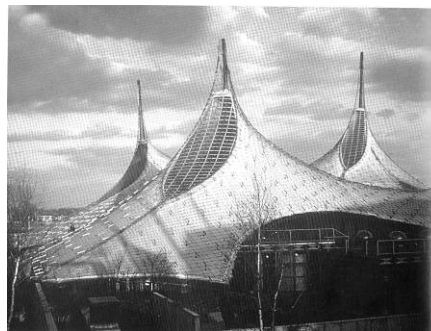


(a)

(b)



(c)



(d)

Figura 2.2: Tensoestruturas projetadas por Frei Otto¹: (a) *Bundesgartenschau* na Alemanha; (b) *Tanzbrunnen* na Alemanha; (c) Exposição Nacional da Suíça; (d) Feira Mundial no Canadá.

Nesta época as coberturas retráteis estavam sendo desenvolvidas. A tensoestrutura retrátil construída sobre as ruínas do mosteiro de Bad Hersfeld, na Alemanha, para que o espaço pudesse ser utilizado para apresentações de teatro, ópera e música, foi concluída em 1967 e apenas 25 anos depois precisou que a membrana fosse renovada. No mesmo ano, Roger Tailibert, auxiliado por Frei Otto, construiu a estrutura de membrana retrátil sobre a piscina da Boulevard Carnot em Paris, com 1800 m² de área coberta, permitindo o uso no verão e no inverno.

¹ KOCH; HABERMANN, 2004.

Inspirados pela estrutura de membrana da Feira Mundial de Montreal, os arquitetos Günther Behnisch, Auer, Büxel, Tränker e Weber ganharam o concurso para as construções do Complexo Olímpico de Munique para os jogos de 1972 (Fig. 2.3). Frei Otto se envolveu como consultor deste projeto e nesta fase, a possibilidade de utilizar o computador e outras tecnologias acelerou bastante o processo de cálculo e detalhamento. Os engenheiros que participaram deste projeto foram Leonhardt e Argyris.



Figura 2.3: Complexo Olímpico de Munique, Alemanha.¹

A partir do sucesso destas tensoestruturas, esse tipo estrutural ganhou espaço em diversas cidades ao redor do mundo para usos variados, como aeroportos, cobertura de complexos esportivos e até mesmo como elemento de fachada como no hotel Burj al Arab (Fig. 2.4: (a)) e no Centro Nacional de Ciências (Fig. 2.4 (b)).

¹ Fotos da autora, em 16/01/2005.



Figura 2.4: Uso das estruturas de membrana como elemento de fachada¹: (a) em Dubai, Emirados Árabes; (b) em Leicester, no Reino Unido.

2.2 PRINCIPAL CLASSIFICAÇÃO DAS TENSOESTRUTURAS EM MEMBRANA

Segundo Lewis (1998), a tensoestrutura em membrana é uma das categorias de um amplo grupo de estruturas não-convencionais chamadas tensoestruturas leves (Fig. 2.5), que além da estrutura de membrana ainda inclui as redes de cabos tracionados e os sistemas cabos-treliça. A membrana estrutural é o principal elemento que distingue as tensoestruturas em membrana das demais. Para um desempenho satisfatório, como colocam Haber e Abel (1982), essas estruturas precisam ser projetadas de maneira que mesmo quando não se considere qualquer carregamento atuante, toda a membrana esteja submetida a um estado de tensão de tração. Esse estado de tensão, chamado “pré-tracionamento”, é um dos pontos fundamentais do projeto das tensoestruturas em membrana. Ele exerce influência direta sobre a forma da estrutura, sua durabilidade e a amplitude de seus deslocamentos quando carregada.

Os principais elementos de aplicação do pré-tracionamento à membrana desse tipo de tensoestruturas são: cabos tensores e pressão de ar. Quando o principal elemento de

¹ Fotos obtidas do site: www.hightexworld.com/projects/project-type/facades. Acesso em 03/08/2010.

tracionamento da membrana é o cabo tensor, a estrutura é chamada estrutura de membrana tracionada por cabos. Da mesma forma, quando o tracionamento da membrana se dá por pressão de ar, a estrutura é classificada como estrutura pneumática (Figs. 2.6 e 2.7) (LEWIS, 1998; OLIVEIRA, M. 2001).

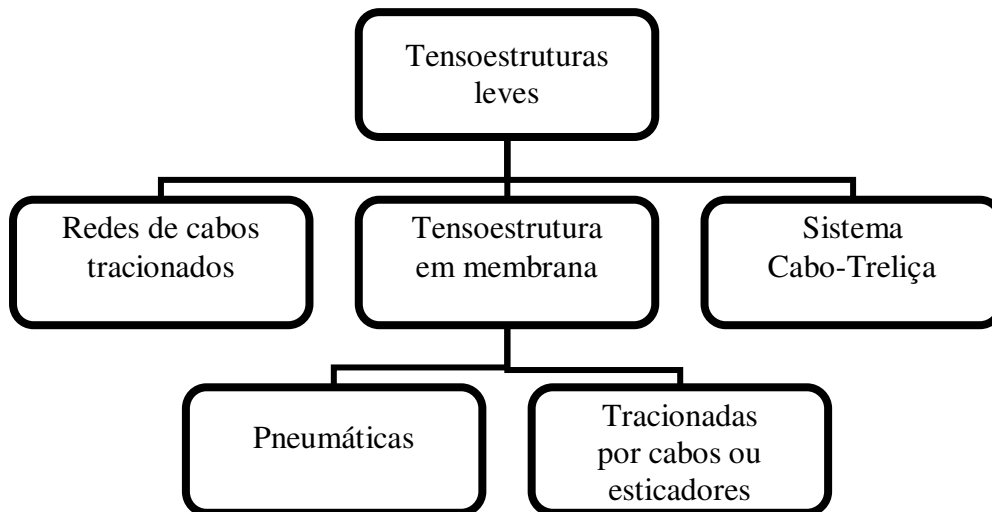


Figura 2.5: Classificação das tensoestruturas em membrana.

2.2.1 Estruturas pneumáticas

As estruturas pneumáticas são recomendadas quando superfícies sinclásticas, com curvaturas de mesmo sinal, são desejadas. Nesse caso, a pressão do ar funciona como um carregamento transversal que permite a geração de formas convexas como balões ou esferas (FIGUEROLA, 2004).



Figura 2.6: Esquema de estruturas pneumáticas.¹

¹ PAULETTI, 2003.



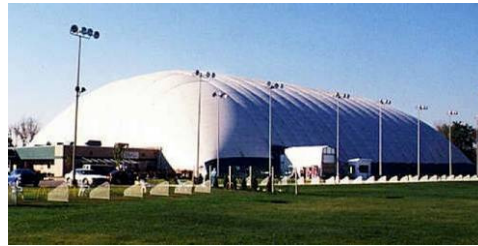
(a)



(b)



(c)



(d)



(e)

Figura 2.7: Estruturas pneumáticas: (a) Arena Romana de Nîmes, França¹; (b) Pavilhão alemão da Expo'92 em Sevilha, Espanha²; (c) *Tokyo Dome*, Japão¹; (d) Cobertura de Campo de Golfe, EUA¹; (e) Pavilhão de Exposições da Mercedes-Benz, Brasil³.

2.2.2 Estruturas de membrana tracionadas por cabos e esticadores

Entre as estruturas de membrana tracionada por cabos, o principal aspecto que assegura a estabilidade da membrana é a superfície de dupla curvatura oposta ou anticlástica.

¹ OLIVEIRA, M. 2001.

² PAULETTI, 2003.

³ Foto obtida do site: www.pistelli.com. Acesso em 20/10/2006.

Segundo Vandenberg (1996), existem duas famílias consideradas “formas puras” com superfície de dupla curvatura oposta e curvatura média nula, os parabolóides hiperbólicos, (Fig. 2.8: (a)), e os catenóides, (Fig. 2.8: (b)). Quando essas superfícies correspondem à superfície de mínima área para um dado contorno, são chamadas superfícies de mínima área. Essas são formas ideais que proporcionam uma distribuição uniforme de tensão, sem cisalhamento, por toda a membrana. Os modelos produzidos com filme de sabão têm a interessante propriedade de sempre assumirem a forma de mínima área. As formas dos parabolóides hiperbólicos e catenóides podem ser modificadas com a introdução de picos agudos, picos abaulados (Fig. 2.8: (c)) e cristas (Fig. 2.8: (d)) (BORGES FILHO, 2006).

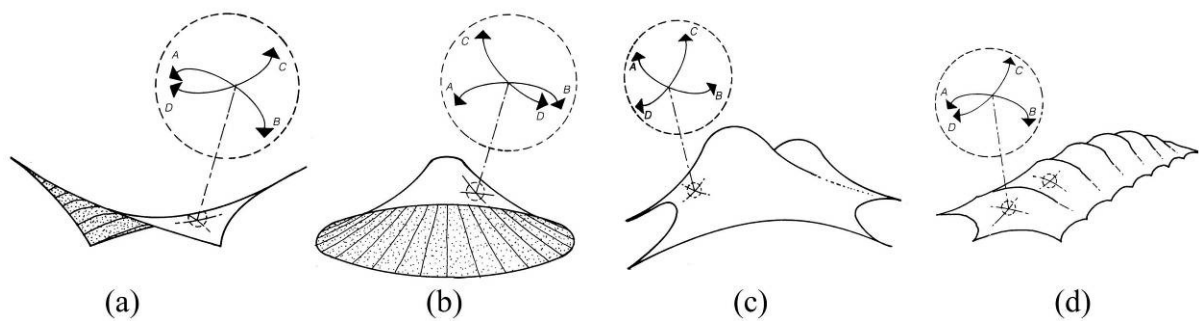


Figura 2.8: Principais tipos de estruturas de membrana tracionada por cabos¹: (a) parabolóide hiperbólico; (b) catenóide; (c) e (d) superfícies modificadas.

Forster e Mollaert (2004) classificam as estruturas de membrana tracionada por cabos de acordo com a configuração da cobertura e o seu uso (Tabela 2.1).

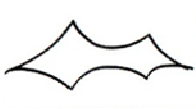

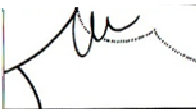






As tensoestruturas abertas para coberturas protegem do sol e da chuva ao mesmo tempo em que dão a sensação de ar livre. Já aquelas abertas para uso interno são elementos decorativos, para dar sombra em locais específicos de edifícios que tem teto ou fachada transparente, ou para tratamento acústico e as abertas anexas a um edifício existente criam espaços privados ou parcialmente públicos.

¹ Modificado de VANDENBERG, 1996.

As estruturas de membrana fechadas para cobertura protegem das variações do tempo (vento, chuva, sol) enquanto criam um espaço interno com variações de temperatura menos severas. Se forem usadas várias camadas de membranas, o isolamento térmico e acústico melhora e a transmissão de luz diminui. As fechadas para uso interno acrescentam uma segunda camada que pode ser a solução para melhoria de conforto térmico, acústico ou para estética (Fig. 2.9). As membranas fechadas e anexas formam extensões de espaços com menor exigência de controle de temperatura e com a vantagem da iluminação natural difusa.

O uso de tensoestruturas retráteis busca flexibilidade no uso do espaço, regulagem da entrada de luz e adaptação às oscilações climáticas (Fig. 2.10).

Tabela 2.1: Classificação de estruturas de membrana tracionadas por cabos¹

	Aberta	Fechada	Retrátil
Para cobertura			
Para uso interno			
Anexa a um edifício existente			

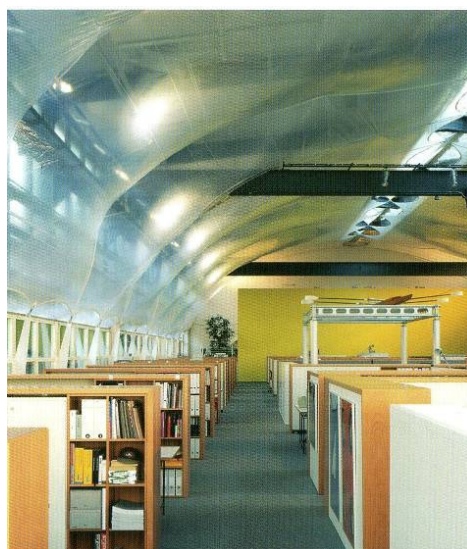


Figura 2.9: Escritório em Munique, Alemanha, com membrana fechada para uso interno para melhorar o conforto térmico.¹

¹ FORSTER; MOLLAERT, 2004.



Figura 2.10: Pavilhão da Venezuela com cobertura retrátil em Hanover, Alemanha¹.

2.3 MATERIAIS UTILIZADOS EM TENSOESTRUTURAS

Os componentes básicos de tensoestruturas são as membranas (mantas sintéticas), as cordoalhas de aço, as estruturas de suporte e os elementos de ancoragem e fundação.

Os materiais utilizados em membranas para uso arquitetônico geralmente são compostos por tecido revestido com resina polimérica. A resistência destes tecidos é determinada principalmente pela capacidade resistente dos fios. Tecidos tramados, laminados e filmes são variações deste conceito geral.

A membrana consiste em várias camadas combinadas com o tecido: revestimento principal, revestimento exterior e tratamento da superfície para impressão (Figs. 2.11 e 2.12).

Quando tecidos não revestidos são usados externamente, apresentam uma vida útil bastante curta. Forster e Mollaert (2004) destacam as seguintes vantagens decorrentes da utilização do revestimento principal nos tecidos:

- Protege os fios contra diversos fatores agressivos (raios UV, abrasão e outros);
- Torna a membrana à prova de umidade atmosférica e chuva;

¹ Fotos obtidas dos sites: www.humbert-online.de/html/eng/pic_exp.htm e <http://www.panoramio.com/photo/10093366>. Acesso em 05/08/2010.

- Estabiliza a geometria do tecido;
- Permite uniões por solda aquecida.

O revestimento principal é protegido por uma fina camada de revestimento exterior gerada quimicamente. O revestimento exterior é específico de acordo com a natureza química dos materiais e permite costurar e soldar peças de tecido (e imprimir quando necessário) através da compatibilidade dos componentes.

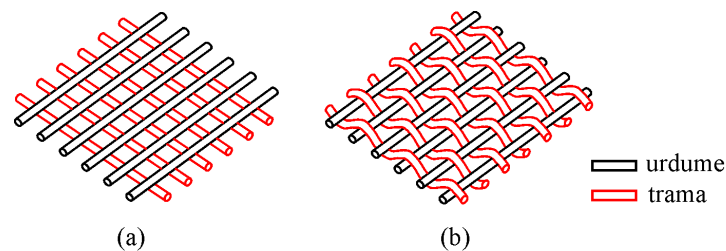


Figura 2.11: Arranjos típicos dos fios nos tecidos para membranas estruturais¹: (a) fios sobrepostos; e (b) tecido padrão.

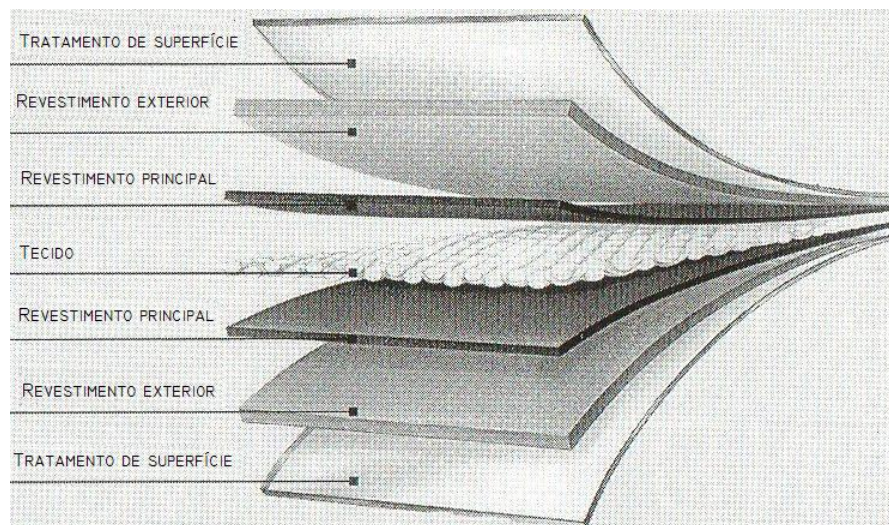


Figura 2.12: Exemplo esquemático de membrana estrutural com suas camadas.²

Os dois materiais mais comumente utilizados em membranas estruturais são: tecido de poliéster revestido com PVC (cloreto de polivinila) e tecido de fibra de vidro revestido com PTFE (politetrafluoretileno). Entre estes dois, o tecido de poliéster revestido com PVC é

¹ BORGES FILHO, 2006.

² Adaptado de FORSTER; MOLLAERT, 2004.

utilizado com mais frequência devido a questões relativas ao custo benefício, desempenho e durabilidade.

Outros materiais em uso são: tecido de fibra de vidro revestido de silicone, tecido e revestimento de PTFE, filme de ETFE (etileno tetrafluoretileno). Fios fabricados a partir de outros elementos podem ser utilizados como aramida (poliamida aromática) e LCP (polímero de cristal líquido feito de poliéster aromático).

Os revestimentos externos são feitos com base em materiais poliméricos como: acrílico, PVDF (fluoreto de polivinilideno) ou PVF (fluoreto de polivinila) para tecidos de poliéster com revestimento principal de PVC, e FEP (fluoretilenopropileno) para tecidos de fibra de vidro com revestimento principal de PTFE.

Existem muitos tipos de tecidos que podem ser utilizados na construção das tensoestruturas. A escolha varia de acordo com a demanda, mas segundo Koch e Habermann (2004), 90% dos projetos executados até hoje utilizam um dos três materiais a seguir: PTFE, PVC e ETFE. Isso ocorre porque estes materiais têm sido utilizados desde a metade do século passado e por isso já foram testados e provaram seu desempenho.

A escolha do tipo de membrana deve levar em consideração características tais como resistência mecânica, permeabilidade, resistência ao fogo, peso próprio, durabilidade, isolamento térmico e translucidez. Como o custo é fortemente influenciado pela durabilidade, geralmente projetos temporários são confeccionados com membrana de tecido poliéster revestido com PVC e projetos permanentes mais requintados com membrana constituída por fibras de vidro revestidas com PTFE ou silicone (OLIVEIRA, M. 2001). Para avaliação do comportamento das membranas a longo prazo é importante incluir na análise a relaxação por fluência e as mudanças de temperatura do local onde será construída a tensoestrutura. (KOCH; HABERMANN, 2004).

As membranas compostas de tecido de poliéster revestidas com PVC são auto-retardantes em caso de incêndio, mas costumam descolorir com a idade, pois os plastificantes migram para a superfície e aumentam a retenção de sujeira. Tecidos de fibra de vidro revestidos com PTFE ou PVDF têm maior vida útil, são incombustíveis e apresentam baixo coeficiente de adesão, o que faz com que sejam autolimpantes. Estes também são mais resistentes a agressões químicas, além de apresentarem uma estabilidade de cor muito superior (KOCH; HABERMANN, 2004).

Algumas características específicas de membranas estruturais que não podem ser esquecidas durante o processo de escolha do material são: deterioração e diminuição considerável da resistência das mesmas com o tempo de uso, a exposição à radiação ultravioleta e a absorção de umidade. Esses dois últimos problemas citados podem ser minimizados dependendo do tipo de revestimento externo aplicado.

Diversas propriedades dos materiais que são relevantes para o projeto de estruturas de membrana estão listadas na tabela do Anexo A, dentre estas, as propriedades de isolamento térmico de produtos arquitetônicos de membrana são geralmente descritas usando o conceito de transmitância térmica, ou valor-U. Esse conceito é largamente utilizado na indústria da construção para definir a taxa de transmissão de calor através de construções. A transmitância térmica expressa a quantidade de energia transferida pela combinação de coeficientes de transferência das duas superfícies e conduzida através do material como o resultado da diferença de 1°C entre as temperaturas do ar dos dois lados da membrana. Esse valor é expresso em W/m^2K .

O valor-U de uma construção depende de:

- A resistência térmica do núcleo, que é definida pela condutividade térmica do material e pela espessura do núcleo,

- As resistências térmicas das superfícies externa e interna, que dependem das trocas de calor por radiação e convecção que ocorrem nas superfícies do material.

O conhecimento da relação tensão-deformação é muito importante em todas as etapas de projeto de tensoestruturas, mas sua determinação pode ser difícil em virtude do comportamento não-linear, ortotrópico e muitas vezes inelástico que as membranas estruturais apresentam. As relações tensão-deformação na direção do urdume e da trama são significativamente diferentes (Fig. 2.13). Além disso, em geral, existe grande diferença entre o comportamento da membrana no primeiro carregamento e nos carregamentos subsequentes (BORGES FILHO, 2006).

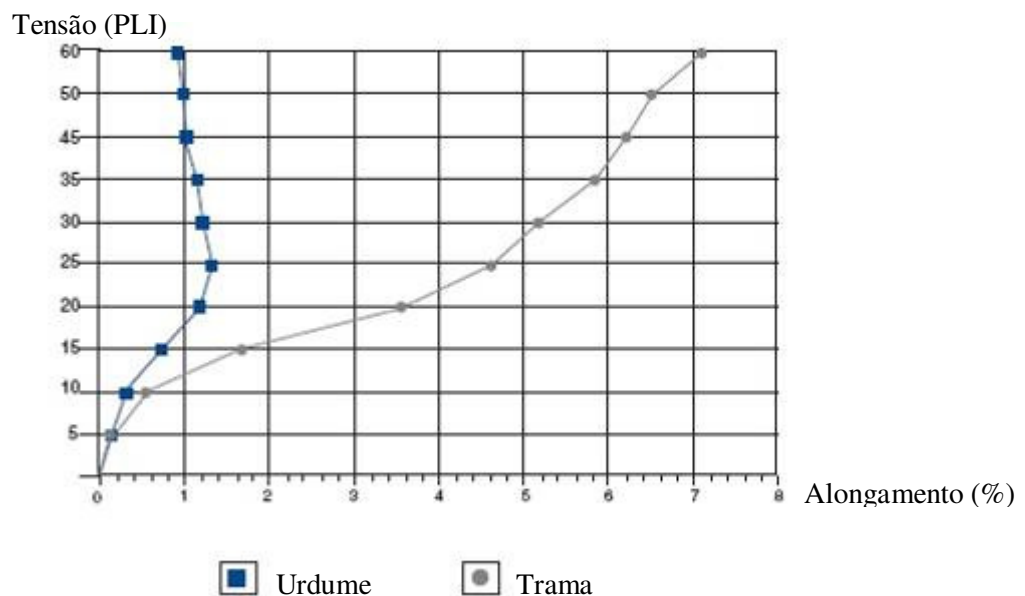


Figura 2.13: Alongamento biaxial típico de membranas.¹

Alvim e Pauletti (2004) realizaram vários experimentos uniaxiais e biaxiais para avaliar as propriedades mecânicas de tecidos estruturais. Os resultados dos testes foram valores de resistência, considerados como os valores da carga de ruptura medida durante os ensaios, no mínimo 30% inferiores aos informados pelos fabricantes dos tecidos.

¹ Modificado de www.birdair.com. Acesso em 15/04/2005.

Aberturas e clarabóias em estruturas de membrana permitem a iluminação natural do interior. O perímetro destas regiões deve ser reforçado e os contornos típicos são em forma de olho, gota ou anel, pois quinas vivas não funcionam bem nestes casos. Tanto os contornos de aberturas e clarabóias quanto a borda externa podem ser compostos de elementos rígidos como vigas, ou flexíveis como cabos de aço ou cintos de membranas.

A estrutura de sustentação das membranas tensionadas pode ser de madeira ou ligas metálicas como aço e alumínio, com apoios pontuais de mastros internos, externos, na borda ou suspensos (Fig. 2.14) ou ainda em arcos, combinando picos e vales (Fig. 2.15). Nos vales é importante considerar como será feita a drenagem e em locais onde neva, se a geometria facilitará o acúmulo de neve.

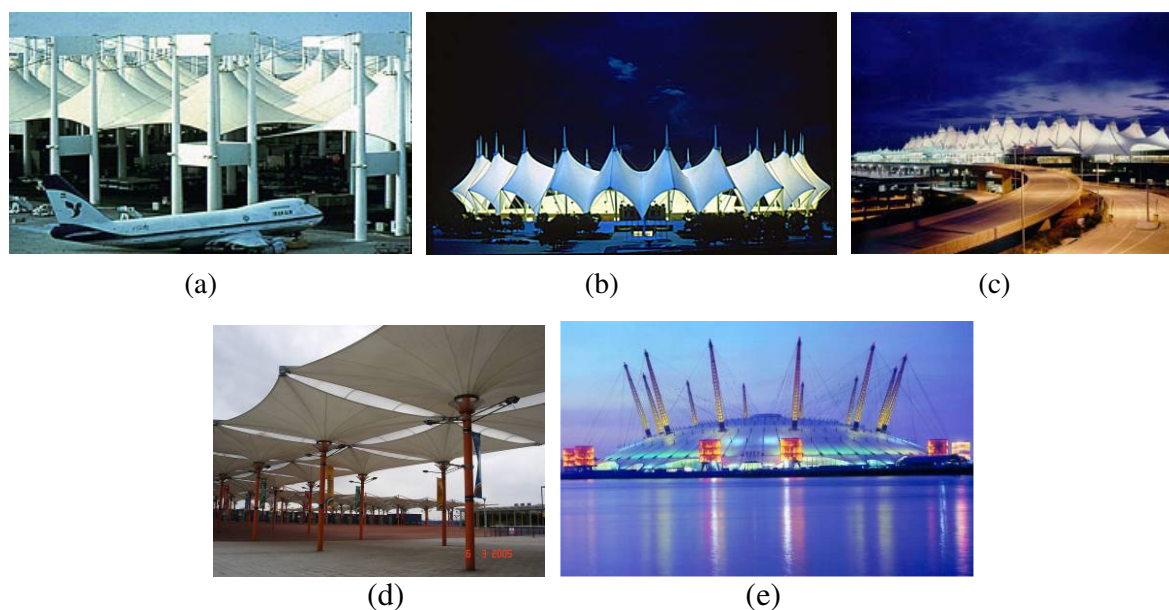


Figura 2.14: Estruturas de membrana com apoios pontuais: (a) Terminal Haj, Arábia Saudita¹; (b) Estádio do Rei Fahd, Arábia Saudita¹; (c) Aeroporto de Denver, EUA²; (d) acesso ao Millennium Dome, Inglaterra³; e (e) Millennium Dome, Inglaterra⁴.

¹ Foto obtida do site: www.geigerengineers.com. Acesso em 16/01/2004.

² Foto obtida do site: www.birdair.com/birdair/about/tension/index.html. Acesso em 16/01/2004.

³ Foto da autora, em 06/03/2005.

⁴ Foto obtida do site: <http://www.millennium-dome.com/>. Acesso em 10/05/2005.

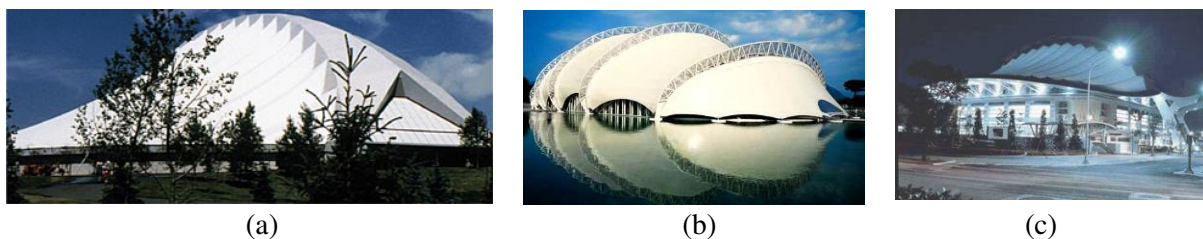


Figura 2.15: Estruturas de membrana com apoios em arcos: (a) Lindsay Park, Canadá¹; (b) Laboratório de pesquisa da M&G, Itália²; e (c) Myao Li Arena, Taiwan¹.

Em arranjos estruturais com suportes primários pontuais, mastros ou pilares intermediários são geralmente indesejáveis em espaços com grandes vãos. Para contornar esta questão é comum adotar uma das seguintes soluções: um mastro externo (Fig 2.16 (a)) ou a colocação de mastros internos suspensos, suportados por cabos ou barras metálicas (Fig 2.16 (b)).



Figura 2.16: Opções de estrutura de sustentação para ter maior vão livre interno³: (a) Piscina do Complexo Nacional de Esportes em Kuala Lumpur, na Malásia; (b) Arena de Esportes Wolfgang Meyer em Hamburgo, Alemanha.

Os arranjos estruturais, via de regra, consistem em reticulados espaciais em que as barras ficam sujeitas exclusivamente a esforços axiais de compressão. Essa configuração garante alta eficiência estrutural, uma vez que as barras são solicitadas da forma que permite o melhor aproveitamento da capacidade resistente do material.

¹ Fotos obtidas do site: www.geigerengineers.com. Acesso em 16/01/2004..

² Foto obtida do site e modificada:

<http://www.upc.es/ca1/cat/recerca/tensilestruc/webdetalles/esquina/Cablecontinuo/pagina2.htm>. Acesso em 24/04/2004.

³ KOCH; HABERMANN, 2004.

As barras que compõem a estrutura em geral possuem seção transversal tubular. Essa forma garante boa rigidez com pouca quantidade de material, resultando em estruturas leves e muito resistentes (BORGES FILHO, 2006).

No caso de estruturas metálicas, o alumínio apresenta alta resistência à corrosão, menor peso que o aço, porém resistência mecânica inferior. O aço é a alternativa mais interessante quando se necessita de alta resistência mecânica.

2.4 CARACTERÍSTICAS DAS TENSOESTRUTURAS

- **Facilidade de desmontar:** Apesar de existirem várias estruturas permanentes deste tipo, as desmontáveis já possuem uma fatia do mercado. Os investidores têm percebido a importância de se deslocar até onde o público está, seja por questões geográficas ou por questões sazonais. Principalmente as construções para entretenimento têm adotado esta opção e seus proprietários têm percebido seus benefícios, pois elas atraem o público com um diferencial, uma imagem arquitetônica de grande beleza. Implícitos na possibilidade de desmontar se encontram conceitos importantíssimos atualmente como flexibilidade e reúso. Além de utilizar em eventos temporários e turnês, podem ser construídas rapidamente em caso de catástrofes e emergências, quando muitos abrigos são necessários.
- **Evocação simbólica:** Existem tensoestruturas que remetem às tendas utilizadas no deserto ou formas arquitetônicas islâmicas, como também velas de navios,

ou montanhas. Ao mesmo tempo em que se integram com o ambiente, podem ser um marco arquitetônico.

- **Iluminação:** O espaço coberto por membranas tensionadas transmite uma iluminação natural difusa graças à translucidez do material. A iluminação interior noturna é possível e eficiente por causa da alta refletividade da superfície.
- **Energia:** O impacto energético de uma tensoestrutura depende da relação entre a economia de energia devido à iluminação natural diurna e os maiores gastos com aquecimento em regiões onde ele se faz necessário. A avaliação dos gastos com energia deve incluir iluminação, aquecimento e resfriamento, além dos custos com os equipamentos.
- **Vencimento de grandes vãos:** Pelos materiais e sistema estrutural utilizado as tensoestruturas são capazes de vencer vãos maiores que qualquer outro tipo de sistema construtivo convencional.
- **Baixo peso:** Apresentam peso de duas ordens de grandeza menor do que o de estruturas em concreto armado e uma ordem de grandeza menor que estruturas convencionais de aço.
- **Segurança:** São particularmente estáveis em casos de cargas horizontais como terremotos. Em caso de colapso, podem provocar menos danos por apresentarem menos massa do que estruturas convencionais.
- **Relação custo/benefício:** Por serem fruto de uma tecnologia sofisticada, as estruturas de membrana tensionadas normalmente possuem custos elevados em relação a construções convencionais. Porém, atualmente a relação custo/benefício tem imperado, e levando-se em conta que estas estruturas podem vencer grandes vãos, ser totalmente dobradas, desmontadas e

transportadas de acordo com a necessidade; elas são vantajosas para determinados casos.

2.5 ETAPAS DO PROJETO EM TENSOESTRUTURAS

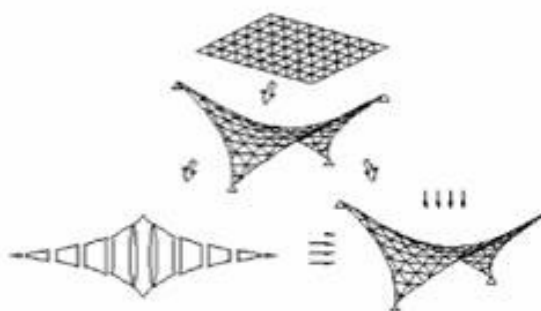
É ponto pacífico entre pesquisadores que o projeto de tensoestruturas em membrana envolve três etapas distintas:

- Busca da forma;
- Projeto de cortes; e
- Análise estrutural.

Intenção
Arquitetônica



Projeto e
Análise



Solução de
Projeto



Figura 2.17: Etapas de projeto de uma estrutura de membrana tracionada com cabos.¹

¹ Modificada de PAULETTI, 2003.

2.5.1 Busca da forma

Nas tensoestruturas em membrana as características arquitetônicas determinam apenas as linhas gerais da forma, enquanto as exigências para a eficiência estrutural definem a forma final.

Atendendo às restrições de projeto, uma configuração de equilíbrio para a membrana e o correspondente estado de tensão inicial são determinados. Para que a estrutura seja estável, ela deve apresentar curvatura anticlástica, ou seja, os centros dos raios de curvatura das duas direções principais devem estar em lados opostos da membrana.

A escolha de uma forma adequada pode trazer várias vantagens: melhor distribuição dos esforços na membrana, diminuição do esforço de protensão e até redução no gasto com tecido. Se a forma não for cuidadosamente modelada, podem aparecer enrugamentos no tecido que alteram a distribuição de esforços e podem diminuir a vida útil da estrutura.

2.5.2 Projeto de cortes

A superfície espacial é dividida em recortes planos correspondentes, com largura e comprimento limitados pelas medidas das peças de membrana estrutural comercializada e pela impossibilidade de obter uma planificação perfeita da maioria das superfícies utilizadas. Geralmente as membranas são produzidas em rolos com largura de 2 a 5 metros. Na definição das dimensões dos recortes, considera-se o efeito da relaxação do estado de tensão inicial da membrana.

Se a estrutura apresentar curvatura simples, a planificação é uma tarefa relativamente fácil, visto que a forma final é resultante da combinação de várias superfícies de curvatura simples. Mas as tensoestruturas em membrana não costumam atender esses requisitos. Como elas geralmente apresentam dupla curvatura, a planificação exata é impossível, tornando-se necessária a adoção de aproximações.

A definição das peças de corte pode ser abordada como um problema em que devem ser minimizados: a diferença entre a estrutura aproximada e a real, o gasto de tecido e o gasto na emenda por costura ou solda. Nesse processo, é necessário considerar as restrições devido à largura máxima da tira do tecido, que é função das dimensões dos rolos, e o alongamento diferenciado na direção das fibras do urdume e da trama. Além de buscar o melhor aproveitamento do material, e de atender questões de carregamento, a união entre as partes pode ser feita de maneira que valorize a forma da estrutura e sua dupla curvatura.

Após a definição das peças de corte é necessário refazer a análise de tensões para levar em conta os efeitos ortotrópicos da membrana. Com os resultados dessa análise são feitos ajustes nos padrões de corte para melhorar a distribuição de tensões e obter a forma mais próxima daquela desejada inicialmente.

É importante observar que o posicionamento e a direção das emendas de uma superfície de membrana nunca são arbitrários ou simplesmente uma questão de gosto, exceto nas estruturas com carregamentos muito baixos.

As emendas são uma indicação da direção dos fios da urdidura e podem ser feitas através de costura, solda ou adesivos. Como na maioria dos tecidos a direção da urdidura é mais forte do que a da trama, a urdidura deve ser colocada de forma que absorva os maiores esforços por questões de economia. A direção pode ser diferente onde cargas de vento são significativamente maiores do que as geradas pela neve (FORSTER; MOLLAERT, 2004).

Quando a união dos painéis de membrana é feita por costura, método utilizado geralmente em tecidos sem revestimento, caso seja para uma cobertura que exija total impermeabilidade, a costura deve ser impregnada ou coberta com material que lhe confira esta propriedade.

A solda já garante a impermeabilidade e é a técnica mais comum utilizada em membranas estruturais. Se a cobertura das fibras do tecido for de PTFE, é usada solda por aquecimento. Se for poliéster, é usada solda de alta frequência. As membranas com revestimento de silicone são unidas com adesivos, e as com revestimento de elastômeros pelo processo de vulcanização.

2.5.3 Análise estrutural

Com a membrana obtida da montagem dos recortes planos, incluindo-se as estruturas de suporte, realiza-se a análise estrutural considerando-se as devidas combinações de carregamento incluindo o peso próprio, pré-tracionamento, cargas acidentais, cargas de vento e de neve.

Para obter resultados confiáveis de carregamentos dinâmicos de vento em tensoestruturas é necessário realizar testes em túnel de vento, visto que nelas não se aplica nenhum padrão disponível em normas técnicas e a modelagem numérica é muito complexa.

Ao aplicar uma força externa à membrana, ocorrerá uma deflexão, mudando ligeiramente a forma e o raio de curvatura. A tensão em uma direção principal resistirá à carga aplicada, enquanto a tensão na direção perpendicular ajudará o sistema a manter a estabilidade.

Uma vez conhecidos deslocamentos e tensões, devem ser feitas verificações que comprovem a estabilidade estrutural. Atenção especial também deve ser dada para evitar o aparecimento de tensões compressivas na membrana.

Para resolver possíveis problemas de tensões pode-se aumentar ou diminuir a protensão aplicada aos cabos de borda, buscar uma membrana com outras características mecânicas ou mudar a forma da estrutura.

A análise dos elementos de sustentação da cobertura também é necessária para permitir o dimensionamento e detalhamento de toda a estrutura.

2.5.3.1 Carregamentos externos em tensoestruturas

Pela própria natureza das estruturas leves, a razão entre a carga aplicada e o peso próprio é muitas vezes maior do que para estruturas convencionais. Por isso, o carregamento de estruturas de membrana exige uma análise cuidadosa, tanto em termos de intensidade quanto de distribuição. As normas são escritas para formas e comportamentos de edifícios padrões, tornando sua aplicação às tensoestruturas bastante difícil. Por esse motivo, devem ser gastos mais tempo e esforço na definição das combinações de carregamentos. Devido ao baixo peso próprio e à forma curva das estruturas de membrana, o vento gera forças de sucção significativas. Isso leva em geral a forças maiores em cada elemento do que para outros tipos de carregamentos, com exceção de estruturas de membrana localizadas em regiões com uma carga de neve muito alta (FORSTER; MOLLAERT, 2004).

2.5.3.1.1 Pré-tracionamento

O nível de pré-tracionamento em uma superfície de membrana afeta todos os elementos da estrutura de suporte (mastros, pórticos, cabos, etc.). O pré-tracionamento é uma parte inerente do seu funcionamento estrutural. Os níveis de pré-tracionamento são escolhidos como resultado do processo de busca da forma, e devem ser atingidos e mantidos durante a montagem e a vida da estrutura. Estas forças devem ser incluídas em todas as combinações de cargas.

Para estruturas de membrana com tecido de poliéster revestido de PVC, uma “regra de ouro” é que o pré-tracionamento não deve ser inferior a 1,3% da capacidade média de tração do material tanto na direção da urdidura quanto da trama. Este valor pode ser aplicado para satisfazer a exigência mínima de pré-tracionamento de estruturas de membrana permanentes construídas com este tipo de tecido (FORSTER; MOLLAERT, 2004).

Os valores de pré-tracionamento para estruturas de membrana com tecido de fibra de vidro e revestimento de PTFE costumam ser mais altos, pois o material é mais rígido. O pré-tracionamento não deve ser inferior a 2,0 kN/m. A membrana mais rígida existente hoje confeccionada com este material é pré-tracionada geralmente com 5,0 kN/m (e para superfícies muito planas os valores chegam a 10 kN/m). A “regra de ouro” é que o pré-tracionamento não deve ser inferior a 2,5%, nem superior a 6% da capacidade média de tração do material tanto na direção da urdidura quanto da trama (FORSTER; MOLLAERT, 2004).

2.5.3.1.2 Peso próprio

O peso próprio das membranas está geralmente entre 7 e 20 N/m². Dados mais precisos devem ser obtidos com os fabricantes.

2.5.3.1.3 Neve

A carga de neve deve ser obtida de normas. Para estruturas de grandes vãos é recomendado que a carga mínima de neve seja obtida de dados disponíveis nos escritórios locais de meteorologia.

Em áreas em que não há neve no inverno, uma carga nominal uniformemente distribuída de 0,3 kN/m² deve ser considerada. Esse valor pode não ser utilizado no caso de estruturas com vãos superiores a 50 m por exigirem uma pesquisa estatística detalhada das cargas impostas pela chuva, folhas que caem das árvores, areia, sujeira, etc (FORSTER; MOLLAERT, 2004).

2.5.3.1.4 Temperatura

Os efeitos da temperatura no comportamento estrutural geral e na análise de carregamento são geralmente menos significantes nas estruturas de membrana do que nas

construções rígidas. A mudança de temperatura se manifesta em uma variação relativamente pequena dos níveis de pré-tracionamento. Já nas redes de cabos de aço pré-tracionadas, os efeitos de temperatura são mais importantes.

2.5.3.1.5 Carregamento sísmico

Em geral, cargas sísmicas não são um problema para as estruturas de membrana por terem um peso próprio bastante baixo e pelo fato da membrana ser flexível. Por isso, não sofrem muito com as forças geradas pela ação sísmica. Caso parte da estrutura seja composta por elementos de grande massa, então o carregamento sísmico deve ser incluído, pois a tensoestrutura estará sujeita às acelerações provocadas por eventuais ações deste tipo.

2.5.3.1.6 Carregamento devido à ação do vento

Vento, especialmente quando gera sucções externas e sobrepressões internas, é geralmente o caso crítico para a membrana e os cabos nas tensoestruturas. Em geral é considerado como um carregamento estático, definido por uma pressão dinâmica multiplicada pelo coeficiente de pressão (c_p). Também é considerado que a membrana sofre apenas pequenas mudanças na geometria, de forma que as variações dos coeficientes de pressão sejam baixas o suficiente para serem ignoradas. Essa abordagem não é apropriada se o formato da membrana é suscetível a grandes deflexões.

Um teste em túnel de vento com modelo mais complexo, do tipo aeroelástico, para pesquisar os efeitos dinâmicos é o adequado para estruturas de grandes vãos ou com formas irregulares para diminuir o superdimensionamento e melhorar a segurança. Esse teste incorpora a possibilidade da superfície do modelo se deformar de maneira similar àquela da estrutura em tamanho real. O custo de um ensaio em túnel de vento pode ser facilmente justificado, pois é menor do que os gastos com uma estrutura superdimensionada por falta de dados precisos e reduz a possibilidade de ocorrência de acidentes devido ao dimensionamento inadequado. Apesar disso, estes modelos são muito complexos para serem construídos e nem sempre fornecem respostas confiáveis.

Alterações no projeto podem mudar a forma geral da membrana. Por isso, o modelo para túnel de vento não deve ser construído muito cedo, para que represente o melhor possível a forma final.

A indústria tem se empenhado em prever carregamentos de vento em estruturas usando dinâmica dos fluidos computacional (CFD), mas por enquanto a aplicabilidade dos resultados de cargas de vento (valores de c_p) em estruturas é restrita, por ser precisa apenas em alguns casos.

Infelizmente está se mostrando claramente que estes estudos computacionais também exigem muito tempo, pois a formulação de um modelo que descreva a interação fluido-estrutura da forma mais realista possível e a necessidade dos problemas serem tratados em três dimensões faz com que a modelagem computacional exija hoje um período comparável ao tempo necessário para ensaios em túnel de vento. Isso provavelmente mudará no futuro, como apontam os estudos de Glück *et al.* (2001), Wu *et al.* (2008) e Michalski *et al.* (2009).

Mesmo com todas as dificuldades citadas, Rank *et al.* (2004) descreve um caso de sucesso em que um modelo cônico de base circular apresentou resultados similares para as deformações da membrana em túnel de vento e na modelagem computacional (Fig. 2.18).

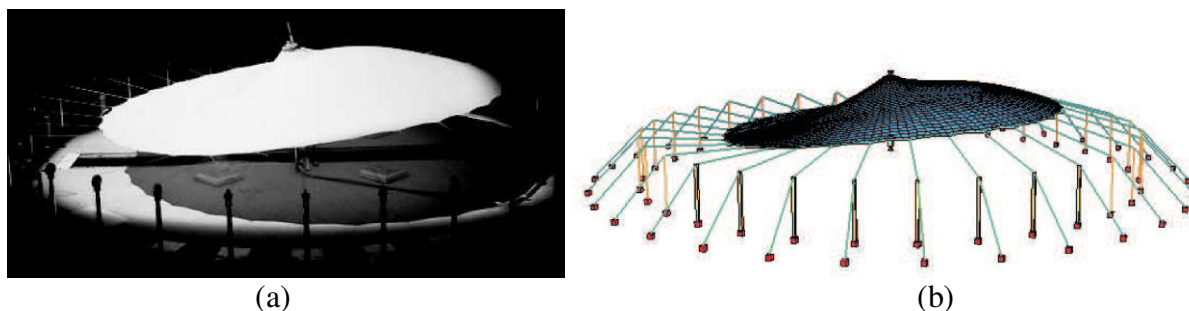


Figura 2.18: Modelo cônico de base circular utilizado mostrando deformação: (a) em túnel de vento; (b) na simulação computacional¹.

Estruturas de membrana são elementos de uma única camada com carga de vento aplicada com frequência nas duas faces simultaneamente. Os valores da soma dos efeitos dos coeficientes de pressão interna e externa são usados para aplicação no modelo em análise. As pressões devem ser aplicadas normalmente à superfície.

As tensoestruturas que são anexas a edifícios se comportam de maneira diferente das coberturas abertas, pois apenas um lado do tecido é exposto diretamente à pressão dinâmica do vento. Apesar disso, a pressão interna também deve ser considerada. Isso será significativo quando existirem grandes aberturas na parede ou no teto. Conseqüentemente, são esperados valores altos de coeficientes de pressão.

A forma descrita nas normas existentes geralmente não coincidirá com a forma escolhida para a estrutura de membrana, mesmo que ela seja pequena e com formato simples. Por isso quando forem utilizadas estas fontes, suposições conservadoras devem ser feitas para as várias possibilidades de configurações de coeficientes de pressão.

Pauletti e Brasil (2005) utilizaram para o dimensionamento do Memorial dos Povos de Belém do Pará, uma tensoestrutura com formato aproximado de parabolóide hiperbólico, valores de pressão provocada pela ação do vento obtidos por analogia com aqueles fornecidos pela NBR 6123 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1988) para telhados de duas águas.

¹ Modificado de RANK *et al.*, 2004.

Testes em túnel de vento devem ser feitos para obter os valores de c_p quando:

- A forma da construção é muito diferente daquelas descritas nas normas e disponíveis na literatura e por isso não é possível fazer uma estimativa confiável dos valores de c_p ; ou
- Uma suposição conservadora gera uma estrutura complexa e muito cara para ser construída.

2.5.3.1.6.1 Breve fundamentação teórica

O vento, do ponto de vista do escoamento de ar no entorno de uma edificação, pode ser considerado um fluido incompressível até velocidades da ordem de 300 km/h, o que abrange todos os casos de análise de sua ação em edificações, sob a ótica da engenharia estrutural (PITTA, 2001).

Em um fluido ideal, a ação sobre as diversas superfícies de um objeto nele mergulhado se dá por intermédio de forças perpendiculares a cada superfície. Se estiverem sob as mesmas condições manométricas, apresentarão a mesma pressão normal nas faces do objeto, com orientação relativa a cada face. Assim sendo, a pressão em um ponto é representada por um escalar, enquanto a velocidade do fluido é representada por um vetor.

Um fluido em movimento deve satisfazer a equação da continuidade: em um determinado intervalo de tempo, a massa de fluido que entra em um certo volume é igual à massa que sai somada à variação de massa contida no elemento. Com base no Teorema da Conservação da Massa mostrado na figura 2.19, em que A é a área da seção plana, V é a

velocidade média do fluido, ρ é a sua massa específica e admitindo a hipótese da incompressibilidade do ar, pode-se escrever (PITTA, 2001; GONÇALVES *et al.*, 2007):

$$\rho_1 A_1 V_1 = \rho_2 A_2 V_2$$

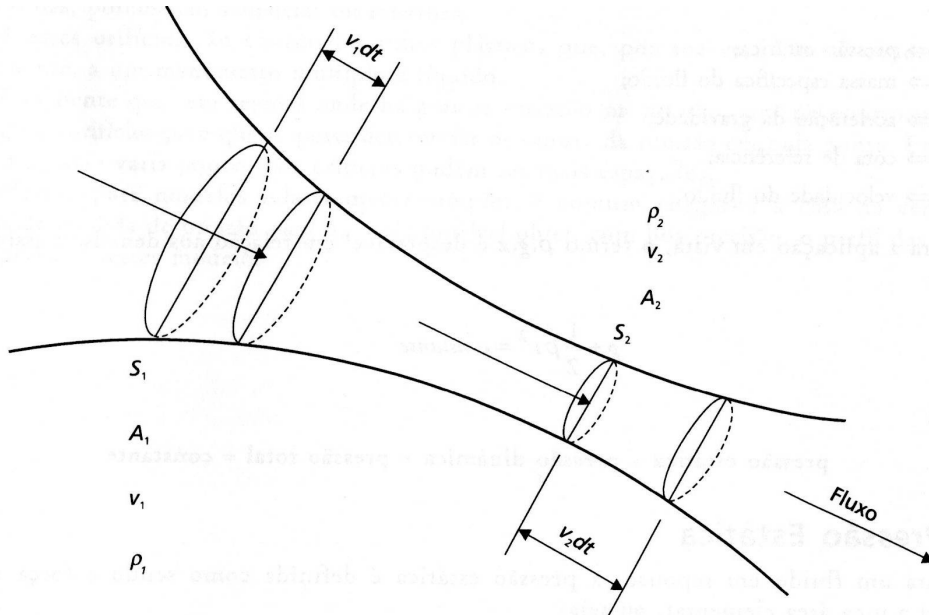


Figura 2.19: Teorema da Conservação da Massa: contorno de um tubo de corrente de um fluido¹

Como o fluido está sendo considerado como incompressível, $\rho_1 = \rho_2 = \rho$, a equação é reescrita de forma simplificada:

$$A_1 V_1 = A_2 V_2$$

Dessa expressão, deduz-se que, se a velocidade do fluido aumenta, as linhas de escoamento se aproximam, se a velocidade diminui, as linhas se afastam.

Para um fluido incompressível e um escoamento em regime permanente, pode-se dizer que a soma das pressões cinética, estática e de posição resulta constante, de acordo com o Teorema de Bernoulli ou Teorema de Conservação da Energia:

$$\frac{1}{2} \rho V^2 + P + \rho g z = \text{constante}$$

¹ PITTA, 2001.

Na equação acima, P é a pressão estática, V a velocidade, g é a aceleração da gravidade, ρ a massa específica do ar e z a cota do ponto considerado. Este teorema é válido para uma mesma linha de escoamento se o escoamento é rotacional, e entre dois pontos se o escoamento é irrotacional.

No caso da ação do vento em edificações é possível desprezar a pressão ou carga de posição (ρgz), o que permite então dizer que a soma da pressão dinâmica com a pressão estática será constante (KOLOUSEK *et al.*, 1984):

$$\frac{1}{2} \rho V^2 + P = \text{constante}$$

Aplicando-se o Teorema de Bernoulli às condições de pressão dos pontos (1) e (2) da figura 2.20, temos:

$$\frac{1}{2} \rho V_1^2 + P_1 = \frac{1}{2} \rho V_2^2 + P_2$$

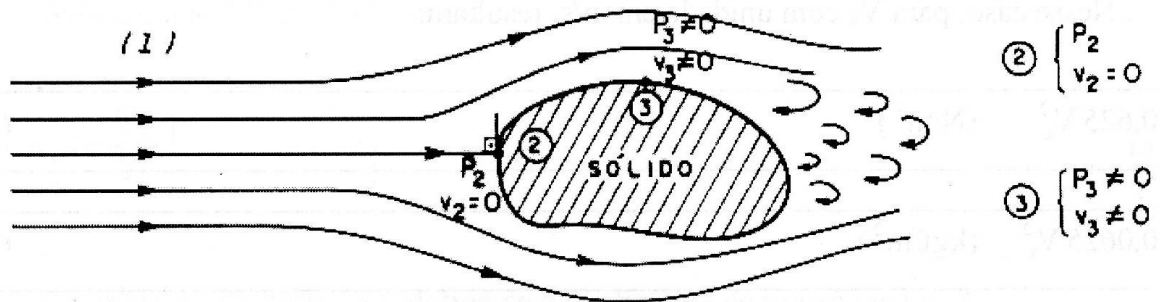


Figura 2.20: Aplicação do Teorema de Bernoulli com linhas de escoamento no entorno de um objeto¹

Como o ponto (2) tem a particularidade da velocidade nula, é denominado de ponto de estagnação. Substituindo $V_2 = 0$ e isolando as parcelas referentes à pressão estática, obtém-se:

$$P_2 - P_1 = \frac{1}{2} \rho V_1^2 \rightarrow \Delta P = \frac{1}{2} \rho V_1^2 = q$$

¹ GONÇALVES *et al.*, 2007.

Define-se, assim, o parâmetro q , denominado pressão de obstrução ou pressão dinâmica de referência, que é a pressão obtida num dado ponto onde só existe pressão estática, sendo este ponto particularmente interessante nas aplicações de engenharia civil.

2.5.3.1.6.2 Valores de coeficientes de pressão para formas simples de tensoestruturas

Para a determinação do coeficiente de pressão, aplica-se o Teorema de Bernoulli entre os pontos (1) e (3) da figura 2.20. Permanecendo válida a hipótese de pressão de posição desprezível, tem-se:

$$\frac{1}{2}\rho V_1^2 + P_1 = \frac{1}{2}\rho V_3^2 + P_3$$

Reorganizando a equação acima e considerando a diferença de pressão estática entre os pontos (1) e (3) como $\Delta P = P_3 - P_1$, obtém-se:

$$\Delta P = P_3 - P_1 = \frac{1}{2}\rho V_1^2 - \frac{1}{2}\rho V_3^2 = \frac{1}{2}\rho V_1^2 \left(1 - \frac{V_3^2}{V_1^2}\right) = q \left(1 - \frac{V_3^2}{V_1^2}\right)$$

Define-se, assim, o coeficiente de pressão:

$$c_p = \left(1 - \frac{V_3^2}{V_1^2}\right) = \frac{\Delta P}{q}$$

Os coeficientes de pressão são coeficientes adimensionais obtidos da razão entre a pressão efetiva provocada pelo vento em uma pequena área sobre a superfície de um corpo e a pressão dinâmica do vento:

$$c_{pe} = \frac{\Delta p_e}{q}$$

$$c_{pi} = \frac{\Delta p_i}{q}$$

$$c_p = c_{pe} - c_{pi}$$

onde:

$$q = \frac{1}{2} \rho V^2$$

c_{pe} – coeficiente de pressão externa (ou na face superior da cobertura);

c_{pi} – coeficiente de pressão interna (ou na face inferior da cobertura);

c_p – coeficiente de pressão total, resultante ou simplesmente coeficiente de pressão;

Δp_e – pressão estática efetiva média no ponto em estudo na face superior (ou externa) da cobertura;

Δp_i – pressão estática efetiva média no ponto em estudo na face inferior (ou interna) da cobertura;

q – pressão dinâmica de referência;

ρ – massa específica do ar;

V – velocidade média do escoamento.

Os valores positivos dos coeficientes de pressão interna e externa correspondem a sobrepressões e os valores negativos a sucções. Valores positivos para c_p indicam uma pressão efetiva com o sentido de uma sobrepressão externa e os valores negativos indicam uma pressão efetiva com o sentido de uma sucção externa (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1988).

A publicação de valores de coeficientes de pressão de tensoestruturas é bastante escassa. As normas não apresentam formatos compatíveis e os artigos geralmente tratam de estudos para construção de formas bastante específicas, aplicáveis apenas ao caso tratado, como em diversos ensaios realizados no túnel de vento do Laboratório de Aerodinâmica das

Construções da Universidade Federal do Rio Grande do Sul para atender demandas de empresas brasileiras e de países vizinhos e no estudo feito por Kazakevitch (1998) da estrutura de membrana de um hangar de aeroporto em Riga, na Letônia.

As formas consideradas simples em tensoestruturas são parabolóides hiperbólicos e cones (catenóides). Forster e Mollaert (2004) e Buchholdt (1998) apresentam resultados de estudos para coberturas em forma de parabolóide hiperbólico sob ação do vento. Dados de coeficientes de pressão para formatos cônicos são encontrados em Forster e Mollaert (2004) com base circular e em Burton e Gosling (2004) com base quadrada, conforme detalhes apresentados a seguir.

Valores de coeficientes de pressão externa (Tab. 2.2) para uma tensoestrutura com formato de parabolóide hiperbólico com laterais fechadas (Figs. 2.21 e 2.22) e razão entre a dimensão diagonal e a distância vertical entre os pontos altos e baixos de 4,7 foram obtidos por Forster e Mollaert (2004).

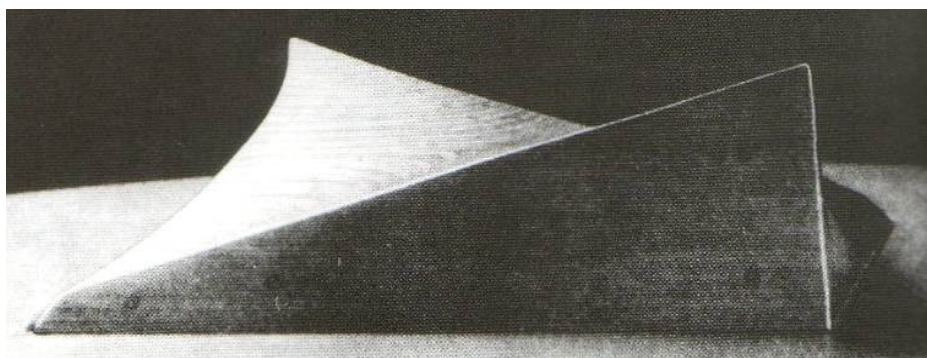


Figura 2.21: Modelo de túnel de vento de estrutura de membrana em forma de parabolóide hiperbólico¹

¹ FORSTER; MOLLAERT, 2004.

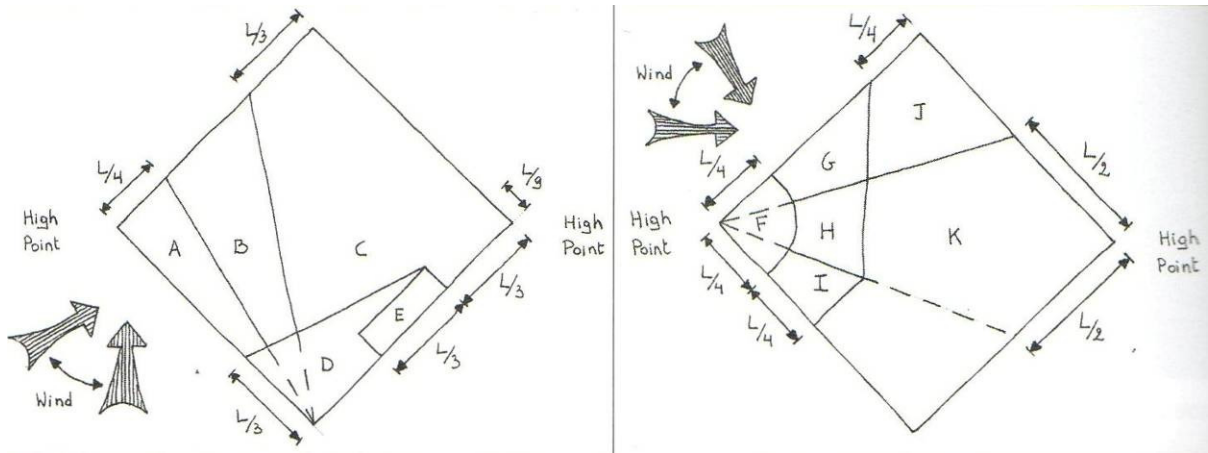


Figura 2.22: Definição de zonas de coeficientes de pressão externa para estrutura de membrana em forma de parabolóide hiperbólico¹

Tabela 2.2: Valores de c_{pe} para estrutura em forma de parabolóide hiperbólico¹

Valores de c_{pe}	Zonas										
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
Positivo	0,0	0,0	0,3	0,3	0,3	0,0	0,0	0,2	0,0	0,0	0,2
Negativo	-1,45	-0,90	-0,65	-0,70	-1,20	-1,80	-1,20	-0,90	-1,20	-0,65	-0,65

Buchholdt (1998) apresenta alguns diagramas com a distribuição de coeficientes de pressão para um parabolóide hiperbólico com $H/A = 0,1$ e $0,5$ (Fig. 2.23), com e sem fechamentos laterais (Figs. 2.24 e 2.25).

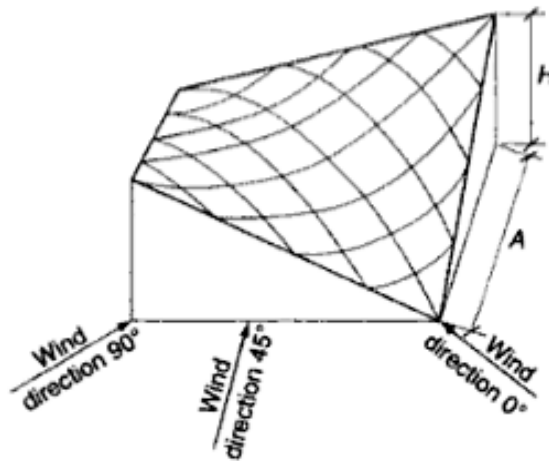


Figura 2.23: Diagrama do modelo de parabolóide hiperbólico usado para obter os coeficientes de pressão com indicações da direção do vento incidente: 0° , 45° e 90° ²

¹ FORSTER; MOLLAERT, 2004.

² BUCHHOLDT, 1998.

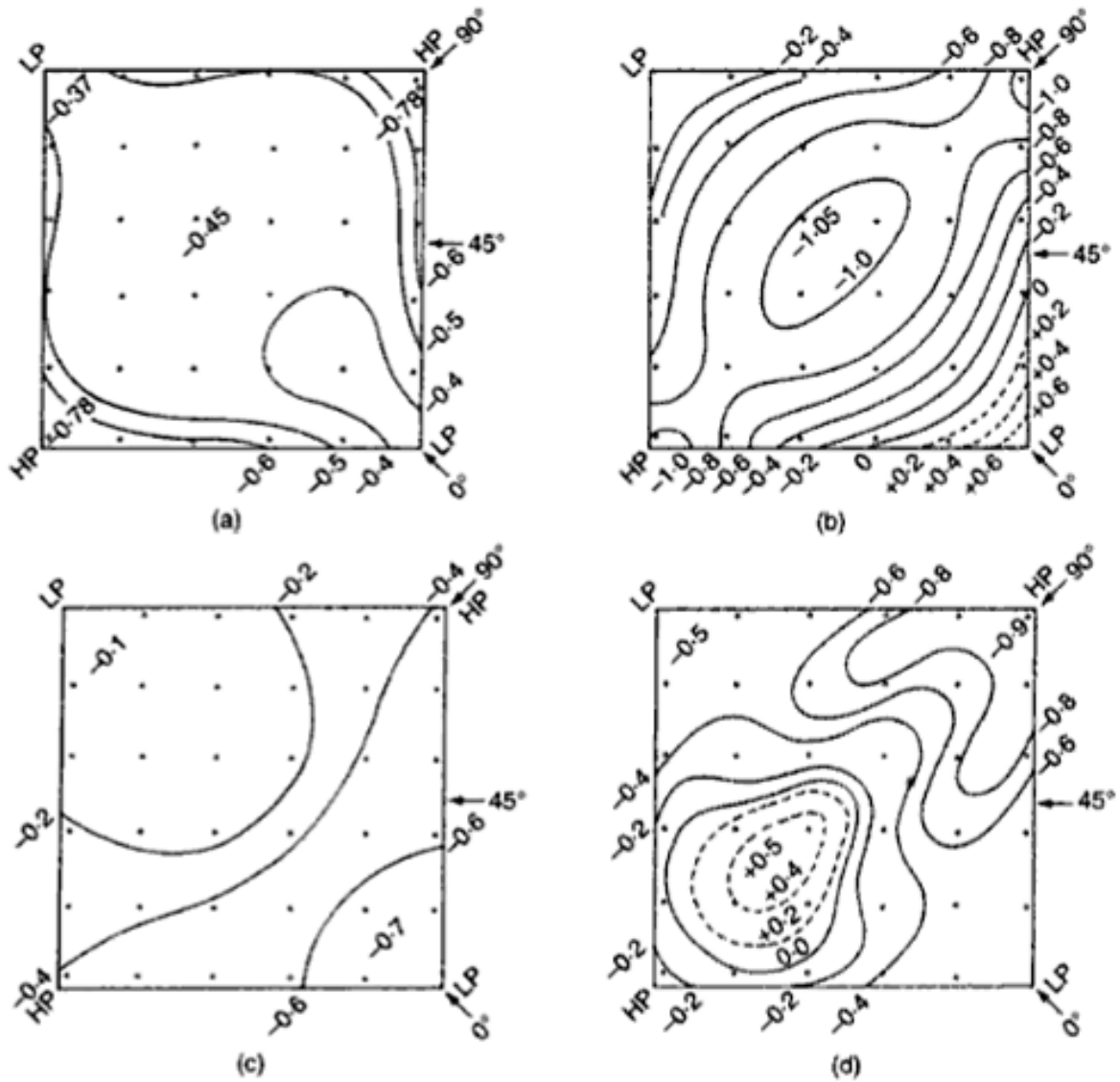


Figura 2.24: Distribuição de pressões sem vigas de contorno nem paredes¹: HP, ponto alto; LP, ponto baixo; (a) sobre a cobertura (superfície externa), vento a 0°, $H/A = 0,1$; (b) sobre a cobertura (superfície externa), vento a 0°, $H/A = 0,5$; (c) sob a cobertura (superfície interna), vento a 0°, $H/A = 0,5$; (d) sobre a cobertura (superfície externa), vento a 90°, $H/A = 0,5$.

¹ BUCHHOLDT, 1998.

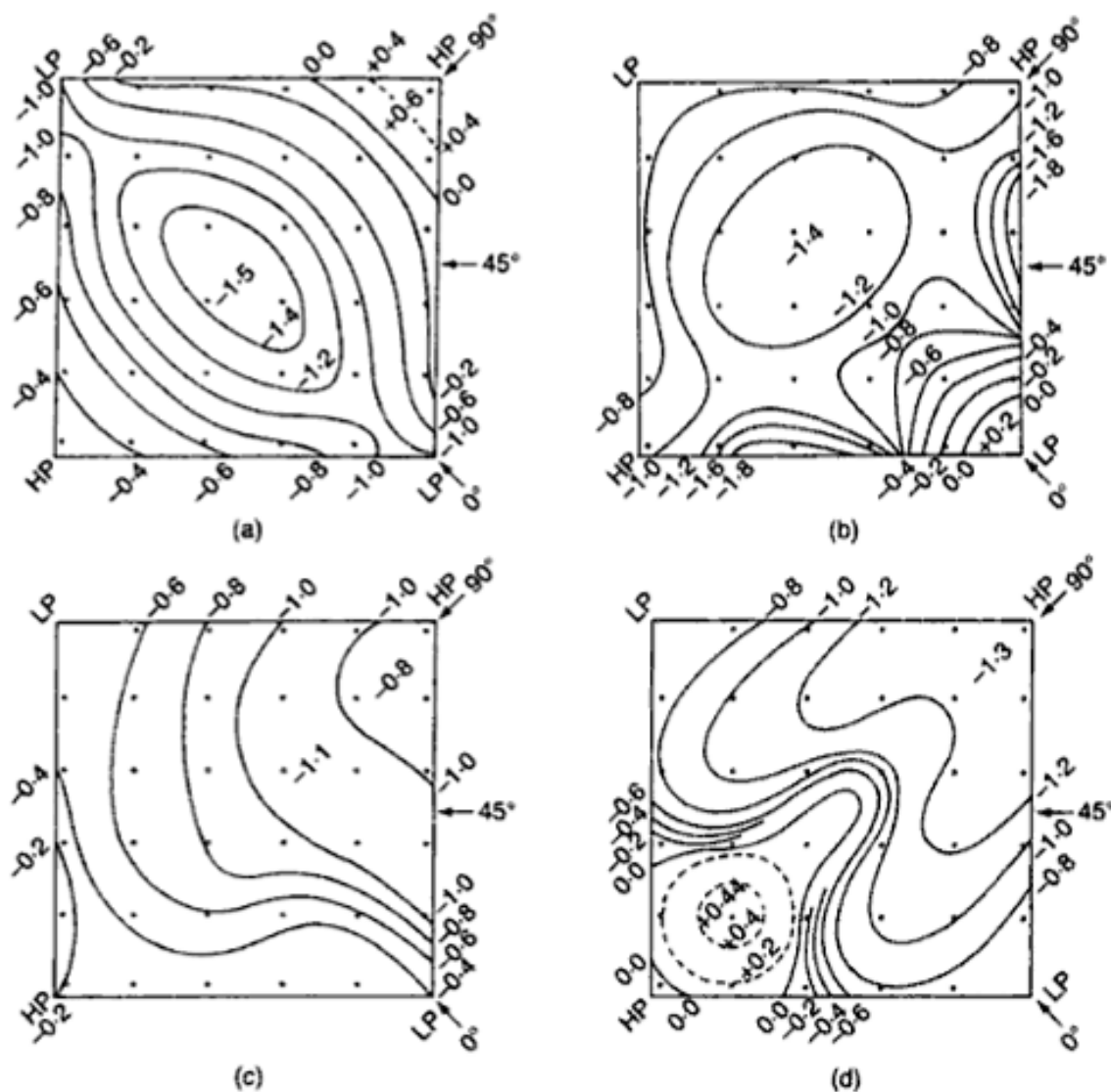


Figura 2.25: Distribuição de pressões¹: HP, ponto alto; LP, ponto baixo; (a) sob a cobertura (superfície interna), sem vigas de contorno em paredes, vento a 90°, $H/A = 0,5$; (b) sobre a cobertura (superfície externa), com vigas de contorno e paredes, vento a 0°, $H/A = 0,5$; (c) sobre a cobertura (superfície externa), com vigas de contorno e paredes, vento a 45°, $H/A = 0,5$; (d) sobre a cobertura (superfície externa), com vigas de contorno e paredes, vento a 90°, $H/A = 0,5$.

Os valores de c_{pe} dados por Forster e Mollaert (2004) na tabela 2.3 são uma média para as zonas definidas na figura 2.26 para uma tensoestrutura cônica. Estes devem ser utilizados para o projeto da membrana e da estrutura de suporte, mas não para painéis de revestimento nem para ripas individuais, que sofrerão cargas locais maiores do que descritas na norma.

¹ BUCHHOLDT, 1998.

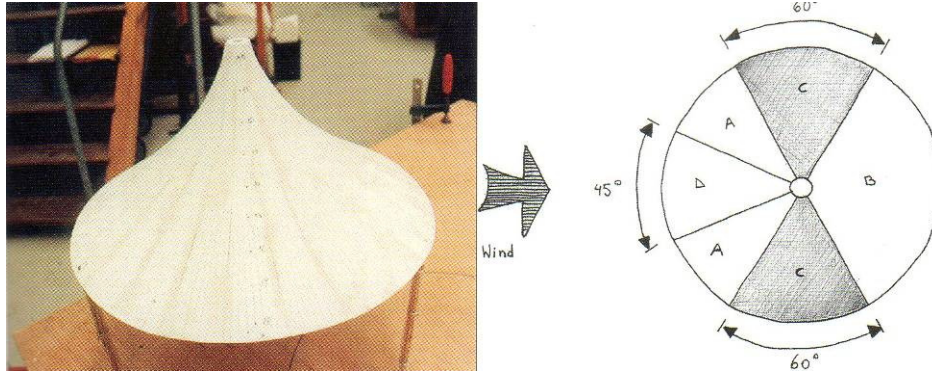


Figura 2.26: Modelo de túnel de vento e definição de zonas de coeficientes de pressão para estrutura de membrana cônica¹.

Os parâmetros da forma da estrutura cônica são:

- O ângulo de inclinação da membrana;
- Com e sem fechamento lateral.

O ângulo de inclinação da membrana é baseado no ângulo de elevação entre a horizontal e uma linha reta desenhada a partir do perímetro externo até o topo. Devido à natureza côncava da superfície externa, o ângulo com que a membrana chega próximo do perímetro será menor do que este que está sendo usado como parâmetro. Pelo mesmo motivo, o ângulo que o tecido faz com a horizontal perto do topo da estrutura será maior do que o ângulo de referência.

Tabela 2.3: Valores de c_{pe} para estrutura cônica¹

	Ângulo de inclinação da membrana com a horizontal	Zonas			
		A	B	C	D
Estrutura sem fechamento lateral	40°	-0,15	-0,6	-1,0	+0,4/-0,2
Estrutura com fechamento lateral	40°	-0,41	-0,7	-1,0	+0,75/-0,6

Burton e Gosling (2004) realizaram testes em túnel de vento com uma estrutura de membrana cônica de base quadrada de 14 x 14 cm e 4,5 cm de altura, com 88 tomadas de

¹ FORSTER; MOLLAERT, 2004.

pressão externa e 32 de pressão interna, com uma volta completa de medições a cada 30°, e também com arranjos para gerar coberturas de membrana com múltiplos picos (Fig. 2.27). Os valores obtidos pelas tomadas individuais foram usados para calcular médias por área da superfície da cobertura (Fig. 2.28).

Os resultados das medições foram comparados com valores fornecidos pelas normas britânicas e européias para telhados de uma, duas e quatro águas para mostrar como os dados que constam nas normas atuais não são aplicáveis a estruturas de membrana.

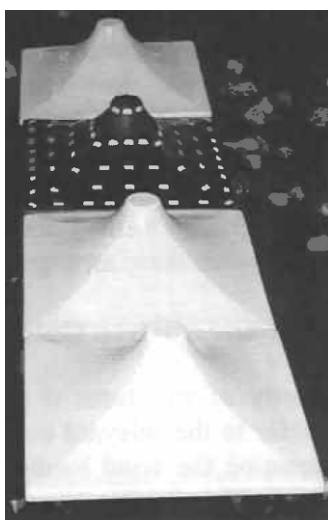


Figura 2.27: Arranjo para ensaio em túnel de vento de tensoestrutura com 4 picos sendo que apenas no modelo escuro são feitas medições de pressão¹.

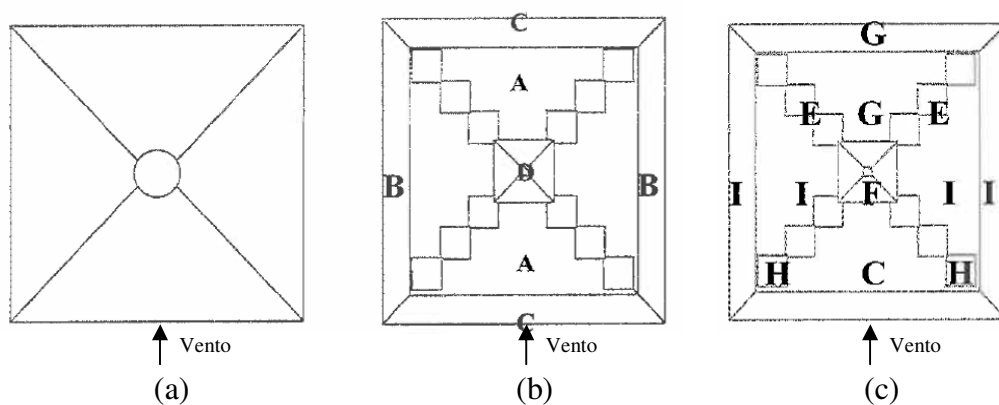


Figura 2.28: Diagramas com áreas utilizadas para calcular a média dos coeficientes de pressão¹: (a) por face; (b) por zona sem fechamento lateral; (c) por zona com fechamento lateral.

¹ Adaptado de BURTON; GOSLING, 2004.

A partir dos dados mostrados nas tabelas 2.4 e 2.5 fica claro como os detalhes são perdidos quando se trabalha com o cálculo dos coeficientes de pressão fazendo média por áreas em vez de se trabalhar com os valores das tomadas individuais atribuídos a pequenas regiões de influência. Dentre os coeficientes de pressão resultante fornecidos pelos autores e mostrados na tabela 2.5 há uma incoerência nos valores de c_p mínimo, pois se o menor valor medido em uma tomada individual durante o ensaio foi de -1,74, não é razoável que o cálculo da média dos valores de várias tomadas em determinada zona resulte em -1,80.

Tabela 2.4: Valores de coeficiente de pressão resultante em cobertura de membrana sem fechamento lateral com 1 pico¹

c_p resultante	Médio por face (Fig. 2.28 (a))	Médio por zona (Fig. 2.28 (b))	Por tomada individual
c_p mínimo	-0,36	-0,87	-1,41
c_p máximo	+0,31	+0,66	+1,75

Tabela 2.5: Valores de coeficiente de pressão resultante em cobertura de membrana com fechamento lateral com 1 pico¹

c_p resultante	Médio por face (Fig. 2.28 (a))	Médio por zona (Fig. 2.28 (c))	Por tomada individual
c_p mínimo	-0,37	-1,80	-1,74
c_p máximo	-0,21	-0,18	+0,93

Os resultados das coberturas de membrana com múltiplos picos são apresentados na forma de fatores de redução (Tab. 2.6). Estes fatores demonstram que a carga de vento na cobertura diminui dependendo da posição do pico no arranjo, quando comparada aos valores com a estrutura de um pico. Os autores não explicam o motivo dos valores apresentados como fatores de redução máximos para 2º, 3º e demais picos serem menores do que os mínimos.

Tabela 2.6: Valores de fatores de redução para coberturas de membrana com múltiplos picos¹

Fatores de redução	Máximo	Mínimo
1º pico	1,00	0,85
2º pico	0,82	0,85
3º pico e demais	0,82	0,85

¹ Adaptado de BURTON; GOSLING, 2004.

Segundo Forster e Mollaert (2004), o comportamento do vento e com isso os valores de c_p não variarão muito com pequenas mudanças no tamanho da estrutura. Os valores dados são válidos para estruturas com dimensões de base de 10 a 100 m, tanto para o parabolóide hiperbólico quanto para o cone. Burton e Gosling (2004) afirmam que pequenas mudanças podem alterar bastante o padrão de carregamento de uma cobertura de membrana e que essa é uma questão que dificulta a generalização de resultados. As afirmações divergentes destes autores mostram que não há consenso sobre até que ponto modificações na geometria da estrutura comprometem a generalização dos resultados obtidos para carregamentos devido à ação do vento.

2.5.3.1.7 Combinações de carga

Para levar em consideração as grandes deflexões das estruturas de membrana, a análise inicial deve ser feita com as cargas sem coeficientes de segurança. É muito importante que os resultados de uma combinação de cargas sejam encontrados pela adição de cargas e posterior análise, e não pela análise de cada carga separadamente seguida de adição (FORSTER; MOLLAERT, 2004). As cargas de pré-tracionamento e peso próprio devem ser incluídas em todas as combinações de carga.

Exemplos de combinações de carregamento:

- Peso próprio + pré-tracionamento
- Peso próprio + pré-tracionamento + neve
- Peso próprio + pré-tracionamento + vento
- Peso próprio + pré-tracionamento + vento + neve

2.5.4 Modelagem física

Antes de computadores poderosos serem acessíveis, o projeto de estruturas de membrana tensionadas tinha que ser feito usando modelos físicos (exceto em raros casos com soluções analíticas). Apesar da única desvantagem do método de modelagem física ser a precisão limitada que era obtida, ele apresenta uma grande vantagem que é o desenvolvimento de um entendimento intuitivo pelo projetista.

Dois métodos de modelagem física para busca da forma podem ser encontrados. Um deles é obtido com a formação de uma película de sabão entre limites de arame ou corda. É claro que esse método apresenta um tempo de vida curto. Apesar disso, se boas fotografias forem tiradas, podem ser obtidos diversos dados geométricos. Uma das principais limitações da modelagem com película de sabão é que essa película deve estar sempre tensionada, o que nem sempre oferece a melhor solução em várias situações práticas de projeto.

Outra opção é construir modelos usando membranas ou tecidos elásticos, com os quais é possível ter um maior controle sobre a curvatura da superfície. Dependendo da natureza do projeto e do material utilizado, várias técnicas podem ser usadas para atingir objetivos específicos. Por exemplo, quando membranas plásticas são utilizadas, pode-se aplicar calor localmente para aumentar a dupla curvatura. Se for utilizado tecido de meias de *nylon*, o modelo pode adquirir rigidez com a aplicação de resina epóxi. No passado, parte da popularidade deste tipo de modelagem se devia à possibilidade de obter dados para a etapa de corte do tecido a partir do modelo construído (BORGES FILHO, 2006; OLIVEIRA, M. 2001; OLIVEIRA, V. 2003; FORSTER; MOLLAERT, 2004).

2.6 RECOMENDAÇÕES GERAIS DE PROJETO

Os projetistas de estruturas de membrana se preocupam inicialmente com 3 fatores: forma, níveis de pré-tensionamento e deformação da membrana quando aplicada a carga. É realizada a busca de uma forma que não mude de anticlástica para sinclástica nem com a pior combinação de carga, pois caso ocorra, poderá haver acúmulo de sujeira, água ou neve. Isso vale para estruturas de membrana tensionada, não vale para as pneumáticas. Dependendo do projeto, incluem as questões de conforto térmico e luminoso na área coberta.

A localização geográfica tem uma importância grande na determinação dos tipos e magnitudes das cargas que uma cobertura fixa não retrátil deve suportar. Durante o projeto, devem ser previstos os métodos de levantamento da estrutura e eventuais detalhes temporários necessários para a operação até que a membrana atinja sua configuração final.

No caso de estruturas com dupla-curvatura oposta, à medida que cresce o carregamento, a tração aumenta em uma das direções principais e diminui na outra até que não haja mais tração e que a membrana fique folgada. Geralmente, é indesejável que se perca a tração em uma área significativa sob a ação de qualquer combinação de carregamento. Quando surgem regiões com folga, podem ocorrer enrugamentos ou a formação de bolsa, que, além de esteticamente indesejáveis, contribuem para fatores deletérios como: a retenção de água ou neve; e a propensão a rápidos movimentos como o drapejamento sob a ação do vento. Assim, o pré-tracionamento é prescrito de maneira que não ocorram regiões com folga na membrana quando a estrutura é submetida aos carregamentos (SHAEFFER *et al.*, 1996).

2.7 UTILIZAÇÃO DAS ESTRUTURAS DE MEMBRANA

Várias utilizações têm sido dadas às coberturas de membrana tensionadas como:

- Sombreamento e proteção de grandes espaços abertos ao ar livre;
- Cobertura de estádios esportivos e piscinas;
- Abrigos para entradas ou passeios;
- Galpões fabris e de depósito;
- Abrigos temporários e de curta duração, necessários em alguns eventos ou desmontáveis, usados parte do ano e depois armazenados no restante, como galpões para armazenagem de picos de estoque e pavilhões de exposições;
- Construções permanentes de grande porte como aeroportos, estações e hangares;
- Decorações internas de lojas e shoppings.

A falta de cultura técnica, a dependência de materiais importados (membranas sintéticas, determinados cabos e elementos de ancoragem) e os conceitos equivocados sobre durabilidade são barreiras para a utilização da tensoestrutura no Brasil.

Poucos profissionais brasileiros conhecem todas as possibilidades oferecidas por esse sistema construtivo, e o número de especialistas em projetos e cálculos é menor ainda, o que mostra um mercado de trabalho com bom potencial de crescimento.

A boa durabilidade é consequência de avanços tecnológicos, que melhoraram a qualidade das membranas, tornando seu uso próprio para estruturas permanentes, segundo as normas internacionais, tendo em vista que não há normas técnicas brasileiras específicas para tensoestruturas.

A opção pela tensoestrutura depende do que o arquiteto deseja em determinado projeto, nos aspectos plásticos, de dimensão de vãos, de luminosidade interna ou mesmo em projetos de interiores, e a exemplo do que acontece na Europa, no Japão e nos Estados Unidos, o consenso é conceber seu uso como alternativa para construções permanentes.

Em várias cidades do Brasil têm sido construídas tensoestruturas para os mais diversos fins (Figs. 2.29 e 2.30). No entanto, um problema que também existe em relação às estruturas convencionais de concreto e aço é a falta de manutenção e inspeção periódica, como pode ser observado comparando as figuras 2.30 e 2.31.



Figura 2.29: Exemplo de estrutura de membrana no Brasil: Restaurante Barra Vento, Salvador¹.



Figura 2.30: Auditório Araújo Viana na inauguração da tensoestrutura, Porto Alegre².

¹ Fotos da autora, em 21/05/2005.

² OLIVEIRA, V. 2003.

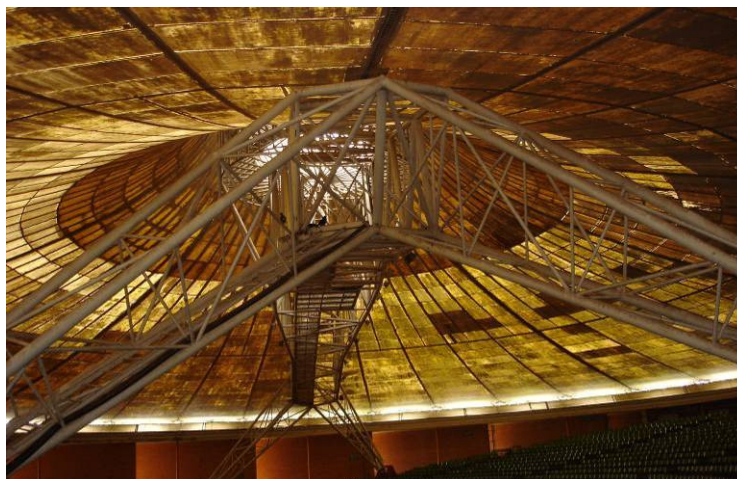


Figura 2.31: Auditório Araújo Viana em 2005, Porto Alegre¹.

2.8 MANUTENÇÃO DE TENSOESTRUTURAS

O nível de manutenção exigido por uma tensoestrutura depende de uma série de fatores como: projeto, função, expectativas estéticas, materiais, local onde foi construída, entre outros. A combinação destes fatores pode levar a uma estrutura “quase livre de manutenção” ou a uma estrutura “que exige manutenção regular”. O desenvolvimento do conceito e forma de manutenção deve ser integrado ao projeto para atender os requisitos do cliente. Uma inspeção visual anual, além de inspeções após condições climáticas extremas são recomendadas como o mínimo que deve ser feito. As exigências típicas de manutenção são descritas nos próximos seis tópicos, de acordo com Forster e Mollaert (2004).

¹ Foto da autora, em 23/07/2005.

2.8.1 Limpeza

A acumulação de sujeira depende das condições do meio ambiente no local da construção, do material do tecido e do formato da membrana. Do ponto de vista técnico, uma estrutura de membrana não precisa necessariamente ser limpa. Para a maioria dos materiais utilizados, a limpeza não aumenta sua vida útil, e uma limpeza inadequada pode inclusive reduzi-la. Os seguintes fatores afetam a retenção de sujeira e devem ser considerados na fase de projeto e escolha de material:

- Intensidade e frequência de chuvas locais;
- Poluição do ar;
- Proximidade de árvores que perdem as folhas ou liberam pólen;
- Fezes de aves (especialmente de pombos e gaivotas);
- Inclinação da membrana (áreas com baixa inclinação devem ser evitadas porque a água pode não ser drenada completamente e após a evaporação deixar sujeira);
- Características repelentes à sujeira dos revestimentos dos tecidos;
- Impregnação química dos fios antes da etapa de tecelagem e revestimento.

Para permitir a limpeza, o acesso à cobertura e a existência de pontos de fixação de cabos de segurança devem ser incluídos no projeto. A limpeza deve ser feita seguindo rigorosamente o manual do fabricante que deve ser entregue ao cliente.

A limpeza deve ser feita de forma que o revestimento externo, geralmente PVDF ou FEP, não seja danificado. Consequentemente, produtos abrasivos, solventes fortes, escovas duras e água pressurizada devem ser sempre evitados.

2.8.2 Corrosão

A escolha dos materiais de proteção à corrosão deve ser feita de acordo com as condições do meio ambiente local. A estrutura deve ser regularmente inspecionada nos pilares, cabos (especialmente onde termina e é preso), presilhas e conexões parafusadas. Onde a corrosão for detectada, deve-se retirar e submeter a tratamentos superficiais anticorrosivos. Conexões parafusadas corroídas devem ser substituídas.

2.8.3 Drenagem da água

Existe o risco de acúmulo de água em áreas da membrana com baixa inclinação da superfície, visto que sempre ocorre uma deflexão quando o tecido está sob carga. Tensoestruturas devem ser monitoradas após chuvas fortes ou nevascas para evitar que haja acumulação em determinados pontos. Se ocorrer, a neve ou a água devem ser removidas imediatamente.

Este acúmulo pode levar ao rompimento do tecido se a chuva ou a neve continuarem caindo, conseqüentemente a área sob a cobertura deverá ser imediatamente fechada para o público e medidas para prevenção deste problema deverão ser tomadas.

Se a cobertura possuir calhas para drenagem, estas devem ser mantidas sem folhas ou qualquer outro objeto que possa bloquear a vazão. Inspeção visual e limpeza regular são recomendadas.

2.8.4 Pré-tracionamento e retracionamento

As tensoestruturas têm sua estabilidade estrutural garantida pela manutenção do pré-tracionamento do tecido. O nível de tensão influencia a deflexão da membrana sob carga, caso seja muito baixo o tecido pode se mover muito sob ação do vento.

Como os tecidos tendem a sofrer relaxação e fluência sob carga constante, o pré-tracionamento mudará durante a vida útil da estrutura. As características específicas do material que será usado em uma estrutura são determinadas por ensaios biaxiais cujos resultados são utilizados na etapa de projeto. As opções durante esta etapa são: considerar a relaxação e a fluência da membrana durante todo horizonte de projeto e com isso aplicar um pré-tracionamento maior na fase de montagem da estrutura; ou aplicar retracionamento depois de determinados períodos de tempo.

O engenheiro responsável pelo projeto da estrutura deve determinar qual deve ser o nível de tensão depois de um certo período de tempo para que seja possível realizar um acompanhamento da tensoestrutura já construída. Também deve ser definido com que frequência e de que maneira a tensão será medida.

O conceito de manutenção deve definir qual o valor limite da tensão que exige um retracionamento. O retracionamento do tecido só é possível quando os detalhes do projeto incluem ajustes como: tensores para alterar o comprimento dos cabos ou seções telescópicas nos mastros. Várias estruturas são projetadas para manter o valor mínimo de pré-tracionamento ao longo de toda sua vida útil, pois com frequência o retracionamento não é possível. Nestes casos, cuidados especiais devem ser tomados nos testes biaxiais e na compensação do tecido calculada na geração dos padrões de corte.

2.8.5 Conserto

Tecidos com revestimento podem ser consertados no local quando ocorrem pequenos danos. Estes podem ocorrer durante a montagem, por vandalismo ou acidente. Os materiais devem ser vistoriados regularmente para verificar danos ao tecido ou ao revestimento. Se o rasgo ou furo for de até 5 cm de comprimento, pode ser arrumado com pedaços soldados diretamente na parte externa da membrana. Os remendos devem ter sempre os cantos arredondados e a área onde serão aplicados deve ser limpa para garantir que não terá poeira nem gordura. Este tipo de trabalho deve ser feito por uma equipe experiente.

Como os revestimentos de PVC se tornam frágeis devido à radiação UV, a aplicação de remendos se torna mais difícil e menos estável em coberturas de membrana mais antigas. Alguns fabricantes recomendam que pequenos remendos sejam colados.

Tecidos com revestimento de PTFE são soldados seguindo um ciclo prescrito de aquecimento e resfriamento. Os remendos devem ser sempre aplicados com filme adicional de FEP ou PFA entre eles e a cobertura existente.

O fabricante deve fornecer uma pequena quantidade do material original ao cliente para que haja disponibilidade quando for necessário realizar qualquer reparo. A membrana deve ser guardada enrolada em local seco e escuro.

2.8.6 Substituição

A substituição do tecido é facilitada se os desenhos *as built* da estrutura forem mantidos durante toda sua vida útil. Apesar disso, testes de compensação devem ser feitos com o novo tecido que será utilizado. Novos padrões de corte podem ser necessários se a largura do rolo de membrana original não existir mais. Dependendo das diferenças medidas entre a estrutura construída e os desenhos, pode ser preciso realizar um novo processo de busca da forma.

Antes da substituição da membrana, todos os outros componentes da estrutura como mastros, cabos, braçadeiras, parafusos e porcas devem ser vistoriados para definir se serão reutilizados ou trocados. Todas as partes de aço que forem reutilizadas devem ser inspecionadas em busca de pontos de corrosão, que devem ser removidos e sobre eles aplicada proteção adequada. Elementos muito corroídos ou cabos danificados devem ser substituídos completamente.

É recomendável que a estrutura seja desmontada algum tempo antes da chegada da nova membrana para que os procedimentos acima descritos sejam realizados criteriosamente.

3 ENSAIOS EM TÚNEL DE VENTO

Diversos túneis foram construídos ou adaptados por laboratórios com a finalidade de aplicação na construção civil. Para estudar os efeitos do vento, tem-se utilizado os túneis para fins aeronáuticos ou os que simulam a camada limite atmosférica.

Os túneis aerodinâmicos para fins aeronáuticos geram ventos uniformes de muito baixa turbulência e de velocidades mais altas do que os túneis de vento aplicados à construção civil (BLESSMANN, 1990). Também são túneis muito curtos para desenvolverem boas simulações de camada limite (LOREDO-SOUZA *et al.*, 2004).

Os ensaios desta tese foram realizados em um túnel de vento do tipo que simula a camada limite atmosférica, o túnel de vento Prof. Joaquim Blessmann do Laboratório de Aerodinâmica das Construções - LAC, localizado na Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS.

3.1 O TÚNEL DE VENTO PROF. JOAQUIM BLESSMANN

O túnel de vento Prof. Joaquim Blessmann, mostrado na figura 3.1, está em operação desde 1977. Trata-se de um túnel de vento de circuito fechado, projetado especificamente para ensaios estáticos e dinâmicos de modelos de construções civis. Este túnel permite a simulação das principais características de ventos naturais, ou seja, simula a camada limite atmosférica. Sua seção de altas velocidades tem relação comprimento/altura da câmara principal de ensaios superior a 10, e dimensões de 1,30 m x 0,90 m x 9,32 m (largura x altura x comprimento). A

velocidade máxima do escoamento de ar nesta câmara com vento uniforme e suave, sem modelos é de 45 m/s, com número de Reynolds de $2,6 \times 10^6$. As hélices do ventilador são acionadas por um motor elétrico de 100 HP e a velocidade do escoamento é controlada através de um inversor de frequências (BLESSMANN, 1982, 1990).



Figura 3.1: Vista externa do túnel de vento Prof. Joaquim Blessmann¹.

Atualmente o túnel de vento dispõe de quatro mesas giratórias para a realização de ensaios estáticos e dinâmicos:

- Mesa I: ensaios do tipo aeronáutico no piso do túnel, em camada limite de pequena espessura e escoamento de baixa turbulência; ensaios para a indústria da construção civil com geradores de turbulência na câmara de simuladores. Na mesa I, o modelo pode ser colocado tanto na vertical como na horizontal;
- Mesa II: ensaios do tipo aeronáutico no eixo do túnel, ensaios para a indústria da construção civil com blocos colocados no piso ou geradores de turbulência na câmara de simuladores, ou ainda com jatos transversais;
- Mesa III: esta mesa possui grande rigidez e foi construída especificamente para estudos dinâmicos em estruturas de grande alteamento, tais como torres, chaminés e mastros.

¹ NÚÑEZ, 2008.

- Mesa IV: utilizada para ensaios de modelos que necessitam ser reproduzidos em maior escala, ensaios para baixas velocidades do vento (BLESSMANN, 1990).

A localização destas mesas e outras características físicas do túnel de vento podem ser vistas na figura 3.2. Todos os ensaios realizados para esta tese foram feitos na mesa M-II.

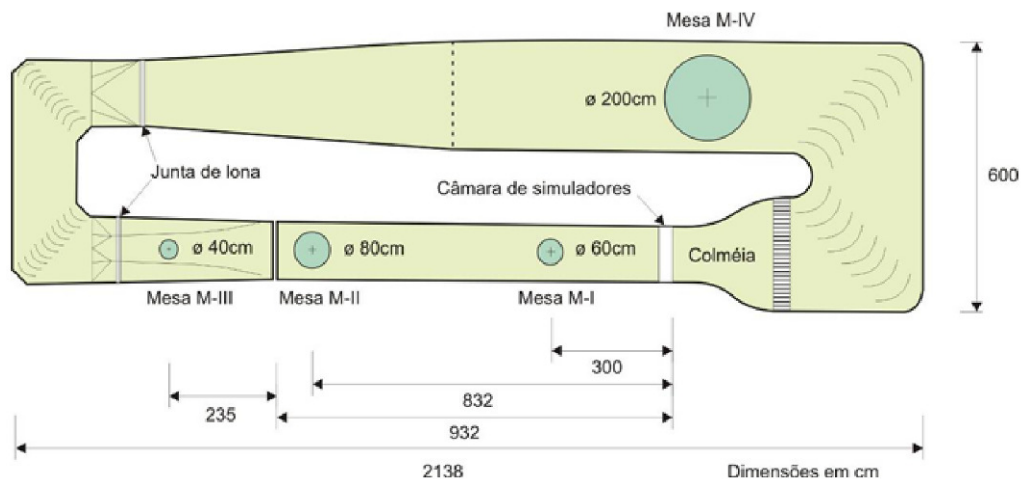


Figura 3.2: Circuito aerodinâmico do túnel de vento Professor Joaquim Blessmann¹.

3.2 SIMULAÇÃO DO VENTO NATURAL E DETERMINAÇÃO DA VELOCIDADE

A simulação correta das principais características do vento natural em túneis de vento é requisito básico para aplicações em engenharia civil, sem a qual os resultados obtidos podem se afastar consideravelmente da realidade.

O perfil que mostra a variação vertical das velocidades médias do vento é expresso, aproximadamente, por uma lei de potência:

$$\frac{V(z)}{V_{ref}} = \left(\frac{z}{z_{ref}} \right)^p$$

¹ MACHADO, 2008.

onde:

$V(z)$ – velocidade média na altura z ;

V_{ref} – velocidade média em uma altura de referência;

z_{ref} – cota do eixo longitudinal do túnel. No túnel de vento Joaquim Blessmann, $z_{ref} = 450\text{mm}$;

p – expoente da curva de potência caracterizado pelo tipo de terreno.

As características reais dos perfis verticais de velocidades médias na camada limite atmosférica para diferentes tipos de terrenos podem ser vistas na figura 3.3.

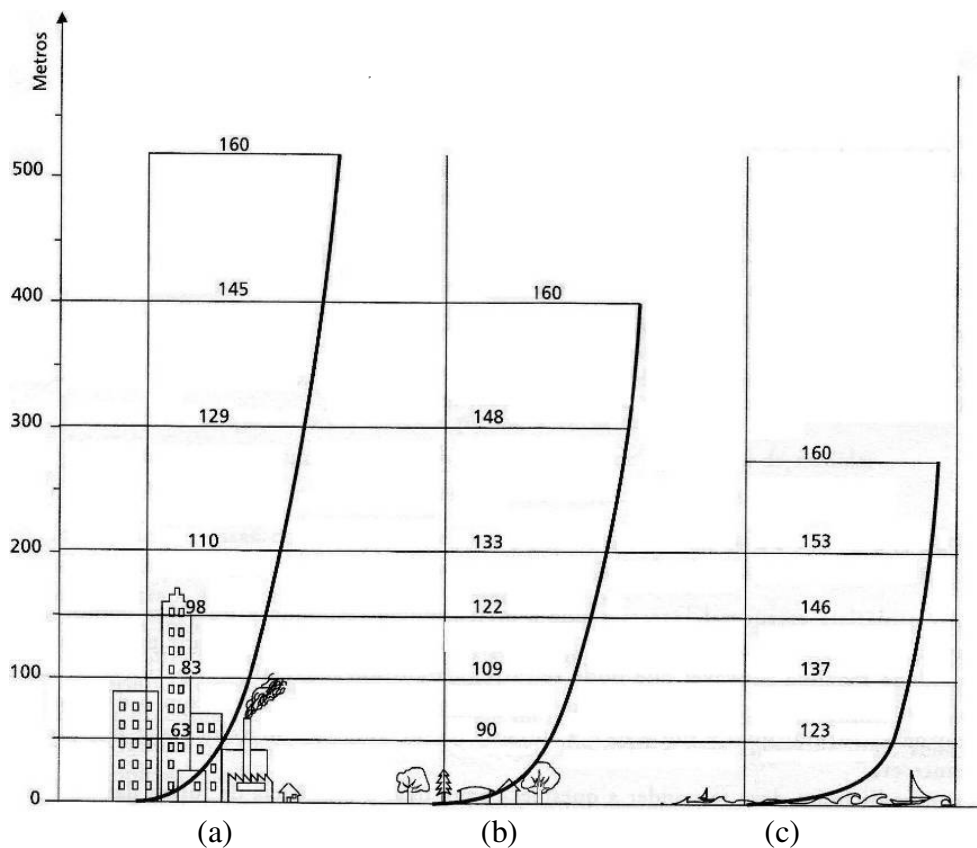


Figura 3.3: Características de perfis verticais de velocidades médias¹: (a) terreno com obstáculos grandes e irregulares, como o centro das grandes cidades, $z_g = 520\text{ m}$, $p = 0,40$; (b) terreno uniforme coberto com obstáculos de 10 a 15m de altura, como cidades pequenas, subúrbios, matas e cerrados, $z_g = 400\text{ m}$, $p = 0,28$; (c) terreno aberto e plano, como campo aberto com poucas árvores, costas, praias e desertos, $z_g = 270\text{ m}$, $p = 0,16$.

De acordo com Loredou-Souza *et al.* (2004), dentre as diversas técnicas desenvolvidas para a simulação da camada limite atmosférica em túneis de vento, duas mantêm-se em

¹ PITTA, 2001.

utilização e desenvolvimento: simulação da camada limite atmosférica através de métodos passivos ou ativos.

A simulação da camada limite atmosférica através de métodos passivos reproduz as características do vento através da combinação adequada de dispositivos de simulação, basicamente compostos por obstáculos colocados em uma gaveta no início da câmara de ensaios (barreira e dispositivos de mistura) e blocos disseminados no piso da seção principal de ensaios. Estes blocos representam a rugosidade da superfície terrestre real, enquanto que a barreira tem a finalidade de estabelecer um déficit de quantidade de movimento e os elementos de mistura complementam o desenvolvimento da camada limite. De acordo com Blessmann (1990), a técnica de aplicação de materiais no piso corresponde à principal fonte de turbulência em baixa altitude. Todos os dispositivos mencionados têm em comum o fato de utilizarem obstáculos para reproduzir uma ou mais características da camada limite atmosférica. Portanto eles causam um efeito de bloqueio, com uma conseqüente perda de velocidade do escoamento (NÚÑEZ, 2008).

Outra possibilidade existente de reprodução da estrutura do vento natural utiliza métodos ativos através de jatos de ar lançados perpendicularmente ao vento gerado no túnel, a partir do seu piso. Uma vantagem oferecida por esta técnica é que não há diminuição da velocidade média da corrente de ar, como acontece com obstáculos sólidos; pelo contrário, há um aumento desta velocidade, em virtude da quantidade de movimento adicionada à corrente longitudinal de ar pelos jatos transversais (NÚÑEZ, 2008).

Nas simulações no túnel de vento Prof. Joaquim Blessmann, usualmente apenas a parte mais baixa da camada limite atmosférica é simulada. São mostradas na figura 3.4 algumas combinações típicas de elementos.

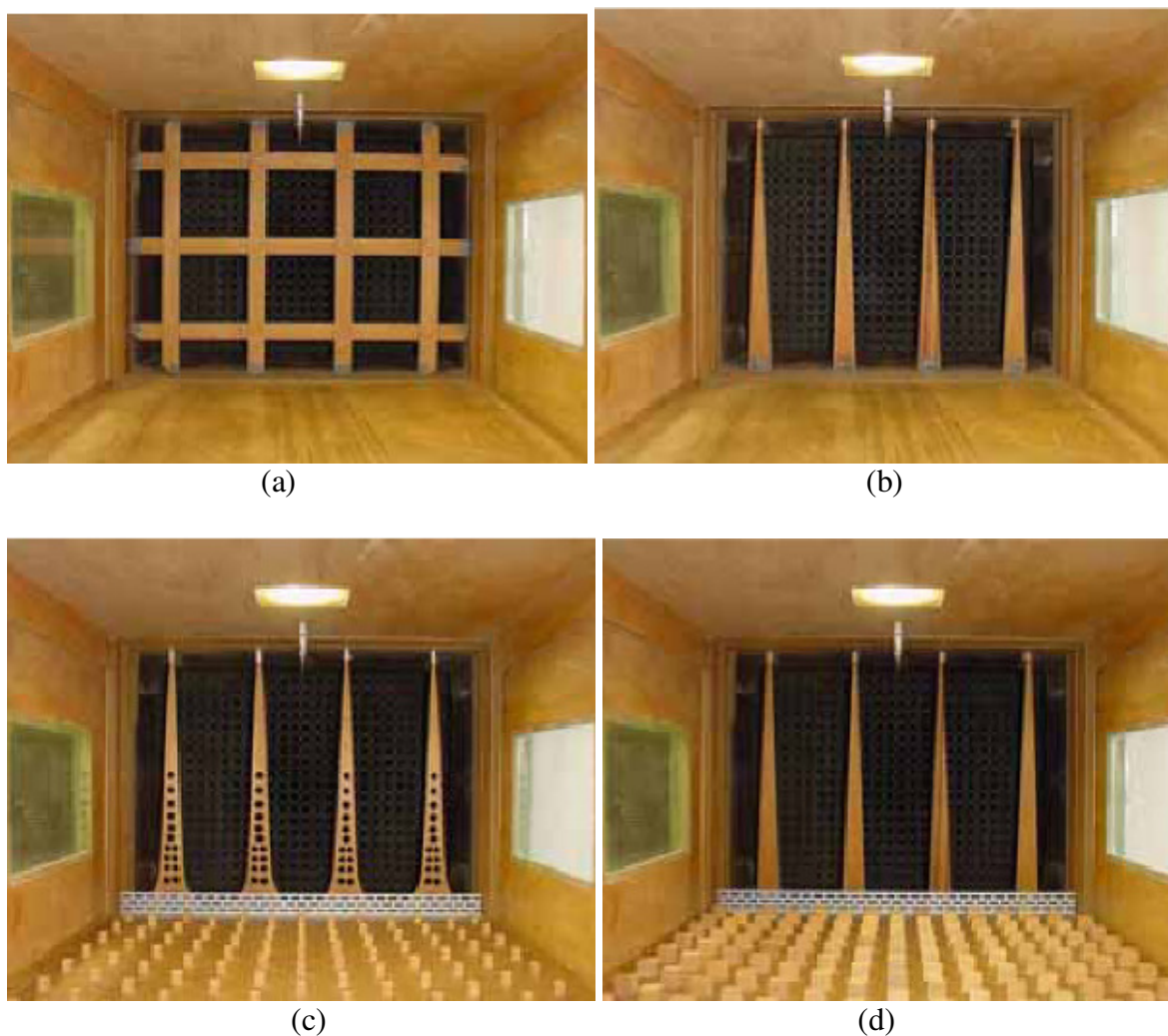


Figura 3.4: Alguns dispositivos de geração das diferentes camadas limites do túnel de vento Prof. Joaquim Blessmann¹: (a) grelha; (b) $p = 0,11$; (c) $p = 0,23$; (d) $p = 0,34$

Na mesa M-II do túnel de vento Prof. Joaquim Blessmann são simulados os ventos deslizantes e turbulentos com perfis potenciais de velocidades médias cujo expoente de potência varia de $p = 0,11$ a $p = 0,34$.

Os experimentos para este trabalho foram realizados com os elementos mostrados na figura 3.4 (b), com $p = 0,11$, como pode ser visto no fundo da figura 3.5, com o modelo da tensoestrutura R0305 montada dentro do túnel de vento para medição das pressões externas.

¹ LOREDO-SOUZA *et al.*, 2004.



Figura 3.5: Modelo da tensoestrutura R0305 montado dentro do túnel de vento para medição de pressões externas.

As principais características dos ventos deslizantes e turbulentos simulados, com $p = 0,11$, podem ser vistas na figura 3.6: perfil vertical das velocidades médias com pontos experimentais e curva potencial teórica, em percentagem da velocidade média no eixo longitudinal do túnel, intensidade (I) e macroescala (L) da componente longitudinal da turbulência.

A velocidade do vento no túnel pode ser determinada através do diferencial de pressão, ΔP_a , obtido da leitura de dois anéis piezométricos situados na entrada da seção de trabalho. As leituras podem ser feitas com a utilização de um micromanômetro à água tipo Betz, por um multimanômetro e por transdutores de pressão (Manoair ou Scanivalve – sistema de aquisição de dados de pressão). Neste trabalho utilizou-se o Scanivalve e o Manoair para a medição dos valores de ΔP_a .

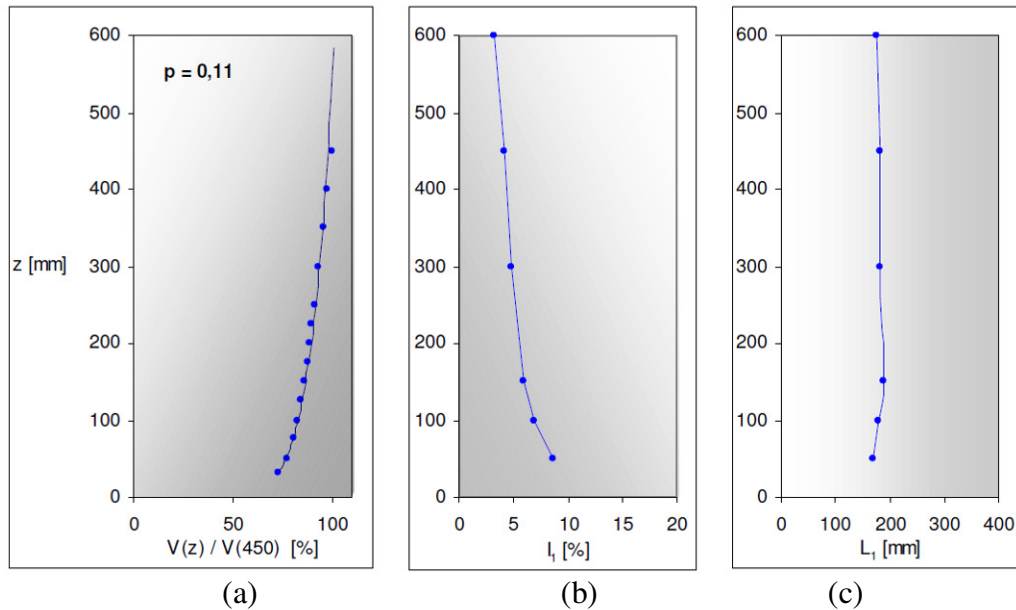


Figura 3.6: Características do vento deslizante e turbulento simulado com expoente $p = 0,11$ ¹:
 (a) Perfil de velocidades médias; (b) Intensidade da componente longitudinal da turbulência;
 (c) Macroescala da componente longitudinal da turbulência.

São determinados coeficientes k_o , que relacionam a pressão dinâmica ao longe q , em um determinado local do túnel e a diferença de pressão entre os anéis piezométricos do convergente do túnel. Para o cálculo da velocidade do escoamento ou pressão dinâmica em qualquer ponto do escoamento, basta fazer a leitura da pressão de referência no ponto da seção desejado.

A velocidade média do escoamento é dada por:

$$V = \sqrt{\frac{2q}{\rho}}$$

onde:

$$q = k_o \cdot \Delta P_a$$

$$\rho = 0,0474 \cdot \frac{P_{atm}}{T}$$

¹ MAKOWSKI, 2004.

substituindo, temos:

$$V = \sqrt{\frac{2 \cdot k_0 \cdot \Delta P_a \cdot T}{0,0474 \cdot P_{atm}}}$$

V – velocidade média do escoamento [m/s];

q – pressão dinâmica de referência [N/m²];

ρ – massa específica do ar [kg/m³];

T – temperatura do ar [K];

P_{atm} – pressão atmosférica [mmHg];

ΔP_a – variação de pressão entre os dois anéis piezométricos do convergente [mmH₂O];

k_o – relação entre a pressão dinâmica de um determinado ponto do túnel e a variação da pressão entre os anéis piezométricos.

Os parâmetros necessários para obter a velocidade média do escoamento no topo dos modelos de tensoestruturas ensaiados e os valores da velocidade calculada podem ser vistos nas tabelas 3.1 e 3.2 .

Tabela 3.1: Velocidade média do escoamento no topo dos modelos ensaiados durante a medição das pressões externas.

Nome do modelo	k_0	ΔP_a [mmH ₂ O]	T [K]	P_{atm} [mmHg]	V [m/s]
R0215	0,68840	7,4	296,5	768	9,11
R0260	0,69908	7,4	296,4	768	9,18
R0305	0,71096	7,4	295,9	764	9,27
R0345	0,71744	7,3	293,9	769	9,19
R0390	0,72500	7,4	293,6	768	9,30
R0435	0,72824	7,3	291,3	767	9,23
R0475	0,74012	7,4	294,1	765	9,42
R0305c	0,71096	7,4	296,0	764	9,27
R0305d	0,71096	7,3	292,9	766	9,15
R0305t	0,71096	7,3	292,2	765	9,14

Tabela 3.2: Velocidade média do escoamento no topo dos modelos ensaiados durante a medição das pressões internas.

Nome do modelo	k_0	ΔP_a [mmH ₂ O]	T [K]	P_{atm} [mmHg]	V [m/s]
R0215	0,68840	7,1	298,9	766	8,97
R0260	0,69908	7,1	298,5	766	9,03
R0305	0,71096	6,9	298,3	766	8,98
R0345	0,71744	6,9	296,1	767	8,98
R0390	0,72500	6,8	296,2	767	8,96
R0435	0,72824	6,9	296,2	768	9,04
R0475	0,74012	7,1	296,6	768	9,25
R0305c	0,71096	7,1	297,7	766	9,10
R0305d	0,71096	6,9	297,9	765	8,98
R0305t	0,71096	6,9	298,1	765	8,98

3.3 CONDIÇÕES DE SEMELHANÇA

Semelhança em um sentido geral é a indicação de uma relação conhecida entre dois fenômenos. Na mecânica dos fluidos, esta é usualmente a relação entre o escoamento em escala natural e outro em escala reduzida, mas com contornos geometricamente semelhantes. (MACHADO, 2008)

É fundamental que o modelo e o protótipo apresentem correspondência no comportamento de ambos. É necessário que sejam satisfeitas as seguintes condições de semelhança (BLESSMANN, 1990):

- Semelhança geométrica: corpos que possuem contornos de geometria análoga, com formas semelhantes, posicionados da mesma maneira em relação ao escoamento, com semelhança de detalhes e rugosidade;

- Semelhança cinemática: distribuição de velocidades e turbilhonamento análogos. Dois escoamentos que possuem linhas de corrente geometricamente semelhantes;
- Semelhança dinâmica: as forças sobre dois pontos correspondentes do escoamento possuem uma relação constante, como o número de Reynolds, por exemplo.

Nos experimentos realizados no túnel de vento com as tensoestruturas cônicas, as condições de semelhança geométrica e cinemática foram atendidas e a semelhança dinâmica foi parcialmente satisfeita, conforme apresentação a seguir.

3.3.1 Número de Reynolds

O número de Reynolds (Re) estabelece uma relação entre as forças de inércia e as forças de viscosidade presentes no escoamento. Na maioria dos casos a semelhança do número de Reynolds não é possível de ser garantida devido a limitações dos túneis de vento, ou seja, a incapacidade de atingir altas velocidades sem que o escoamento se torne compressível. Como a viscosidade cinemática do ar não varia muito durante os ensaios (escoamento incompressível) e também em condições reais, a única forma de compensar as pequenas dimensões do modelo é aumentar a velocidade do vento. Essas elevadas velocidades do vento geralmente se encontram fora da gama de velocidades possíveis de serem atingidas pela maioria dos túneis de vento. Em determinados casos, mesmo que os túneis de vento fossem capazes de disponibilizar as velocidades necessárias para a manutenção do número de

Reynolds desejado, problemas de compressibilidade do escoamento certamente ocorreriam (NÚÑEZ, 2008).

Normalmente as forças de viscosidade são menores e menos importantes quando comparadas às forças de inércia do fluido. A consequência dessa distorção na semelhança de Reynolds deve ser cuidadosamente examinada durante a interpretação dos resultados.

$$Re = \frac{V.D}{\nu}$$

Onde:

V – velocidade média do escoamento [m/s];

D – dimensão característica [m];

ν – viscosidade cinemática do fluido [m²/s].

Sabe-se que a forma do escoamento em torno de superfícies curvas é extremamente dependente do número de Reynolds devido à mudança do ponto de separação do escoamento de acordo com a velocidade do vento. Seus efeitos são mais marcantes em estruturas formadas por superfícies curvas lisas.

No caso de corpos com arestas vivas bem definidas, o escoamento separa nestas arestas não alterando significativamente sua posição em função da velocidade do vento, sendo, portanto menos sensível à influência do número de Reynolds.

Devido à ausência de dados disponíveis sobre o comportamento do escoamento de acordo com a variação do número de Reynolds para estruturas cônicas de membrana, optou-se por utilizar como referência o escoamento em torno de cilindros circulares para definir o regime de escoamento a ser utilizado nos ensaios.

Nos cilindros circulares, as características físicas do escoamento mudam continuamente com o valor de Re . Entretanto, para Re maiores do que 10^4 , é possível distinguir alguns intervalos, regimes, onde as características do escoamento podem ser

consideradas constantes. Estes regimes estão definidos na figura 3.7, segundo terminologia adotada por Ribeiro (1989) e sugerida anteriormente por Farell e Blessmann (1983) (NÚÑEZ, 2001).

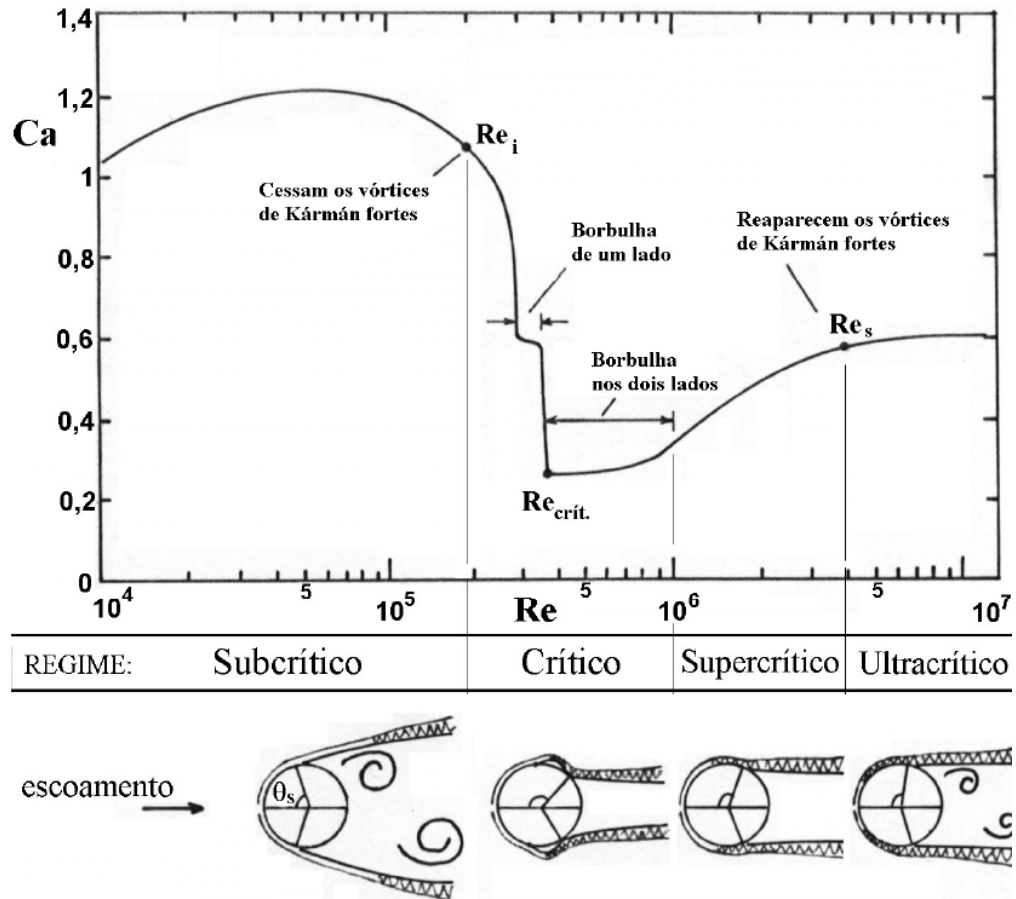


Figura 3.7: Definição dos regimes de escoamento para cilindros circulares bidimensionais¹

Optou-se pelo regime subcrítico, com o escoamento uniforme e suave em torno de cilindros bidimensionais nominalmente lisos e escoamento na camada limite sempre laminar. Neste intervalo, o desprendimento de vórtices é extremamente regular e ordenado (vórtices de Kármán fortes) e a esteira larga origina um coeficiente de arrasto (Ca) elevado. A maioria dos parâmetros aerodinâmicos tende a permanecer constante (NÚÑEZ, 2001).

Para o cálculo do número de Reynolds de cada ensaio, conforme mostrado na tabela 3.3, foi considerada como dimensão característica o diâmetro da base da membrana.

¹ Adaptado de RIBEIRO, 1989.

Tabela 3.3: Valores do número de Reynolds nos ensaios realizados

Nome do modelo	<i>Re</i>	
	Ensaio para medição de pressão externa	Ensaio para medição de pressão interna
R0215	117181	114452
R0260	118090	115414
R0305	119501	114778
R0345	119246	115652
R0390	120831	115395
R0435	120833	116424
R0475	122220	118978
R0305c	119481	116547
R0305d	119142	114930
R0305t	119297	114892

Os ensaios desta tese foram realizados em escoamento de baixa turbulência, com número de Reynolds subcrítico, com a cobertura do modelo dotada de superfície lisa. Essa configuração corresponde aos ventos que ocorrem com maior frequência. Não foi possível atingir o regime ultracrítico devido à relação entre o tamanho do modelo e as velocidades do túnel de vento.

3.4 INVESTIGAÇÃO EXPERIMENTAL COM MODELOS REDUZIDOS

A determinação das características do escoamento em torno de estruturas em túnel de vento se faz necessária quando não se tem estudos teóricos suficientes para se prever o comportamento destas. Podem ser usados modelos em escala natural ou modelos em escala reduzida, sendo estes últimos os mais comuns.

De acordo com Loredou-Souza e Rocha (2011), o LAC/UFRGS dispõe de quatro técnicas para estudos teórico-experimentais de tensoestruturas submetidas às ações estáticas e dinâmicas do vento:

- Medição de pressões instantâneas: método mais tradicional, que utiliza modelos rígidos para a medição das pressões flutuantes na superfície externa ou interna do modelo, permitindo a medição da estrutura de correlação do campo de pressões. É aplicável a estruturas sem resposta ressonante à ação dinâmica do vento (análise estática) ou como carregamento inicial para determinar a rigidez e a massa da estrutura com conseqüente obtenção das suas características dinâmicas.
- Decomposição ortogonal própria: técnica possível quando tem-se o registro simultâneo de pressões flutuantes sobre a superfície do modelo. Assim como o método de medição de pressões instantâneas, é aplicável a estruturas sem resposta ressonante à ação dinâmica do vento (análise estática). É vantajoso quando a estrutura responde de forma sensível à correlação espacial do carregamento e permite a determinação de média e desvio padrão de qualquer parâmetro de resposta, como deslocamentos, reações, tensões e outros.
- Integração de pressões em alta frequência: técnica que utiliza um modelo rígido e também necessita do registro simultâneo de pressões flutuantes sobre a superfície do modelo. É aplicável a estruturas que apresentam resposta ressonante à ação dinâmica do vento, mas para as quais pode-se desprezar os efeitos de interação fluido-estrutura. Permite a determinação da resposta dinâmica por meio da solução teórica das equações de equilíbrio, geralmente por superposição modal.

- Modelagem aeroelástica: método que utiliza um modelo flexível construído com similaridade quanto às propriedades dinâmicas como massa, rigidez, modos e frequências naturais de vibração livre. É aplicável quando a estrutura apresenta resposta ressonante à ação dinâmica do vento e que se espera um certo grau de interação fluido-estrutura. A instrumentação é feita com acelerômetros ou extensômetros elétricos, que permitem a medição direta da resposta dinâmica. É a técnica mais dispendiosa em termos de tempo e custos de execução.

Todos os modelos desta tese foram ensaiados utilizando o método de medição de pressões instantâneas.

3.4.1 Modelos estáticos

Foram construídos sete modelos rígidos de tensoestruturas de apenas um pico com diferentes razões altura/diâmetro. Um destes modelos, o R0305, foi ensaiado com e sem um cone de fechamento no topo. Também foram construídos um modelo com dois picos alinhados e um com três picos alinhados, ambos obtidos com a junção de modelos de um pico R0305.

Os modelos são denominados de acordo com a relação altura/diâmetro, conforme mostrado na tabela 3.4. O ângulo de inclinação da membrana, outro parâmetro usado como referência na literatura, é baseado no ângulo de elevação entre a horizontal e uma linha reta desenhada a partir do perímetro externo até o topo da membrana.

A escolha das relações altura/diâmetro dos modelos foi feita a partir de valores obtidos de desenhos, fotos, croquis e projetos de tensoestruturas cônicas de um ou mais picos encontrados em Armijos (2008), Bahamón (2004), Berger (2005), Drew (2008), Forster e Mollaert (2004), Koch e Habermann (2004), Kronenburg (2008), Harris e Li (1996), Huntington (2003), Nerdinger (2005), Shock (1997) e em páginas da rede mundial de computadores relacionadas ao tema encontradas com a ferramenta de busca *Google* utilizando como parâmetro “estrutura de tecido”, “estrutura tensionada”, “cobertura tensionada”, “cobertura em membrana”, “tensoestrutura”, “estrutura leve”, “cobertura de tecido”, “arquitetura leve”, “arquitetura de tecido” e outras expressões semelhantes em português, inglês, espanhol, italiano e alemão.

Tabela 3.4: Razão altura/diâmetro e ângulo de inclinação da membrana dos modelos

Nome do modelo	Razão altura/diâmetro	Ângulo de inclinação da membrana com a horizontal
R0215	0,215	14,0°
R0260	0,260	16,7°
R0305	0,305	19,4°
R0345	0,345	21,7°
R0390	0,390	24,3°
R0435	0,435	26,7°
R0475	0,475	28,8°
R0305c	0,305 – com cone	19,4°
R0305d	0,305 – com dois picos	19,4°
R0305t	0,305 – com três picos	19,4°

Após a definição das razões altura/diâmetro, foi desenhado no AutoCAD o contorno da membrana que será utilizada para gerar os modelos numéricos tridimensionais que servirão de base para a construção dos modelos rígidos para o túnel de vento. A membrana está contida em um plano, com 9 m de diâmetro externo e 1,5 m de diâmetro do anel interno. Este contorno foi importado para o programa GiD (RIBÓ *et al*, 2006a, 2006b), onde gerou-se uma malha plana com 746 nós que formam 1294 elementos finitos triangulares de três nós para a área da membrana e 198 elementos lineares de dois nós para o contorno dos cabos (Fig. 3.8).

Os dados desta malha fornecidos pelo GiD são exportados para um arquivo de texto e utilizados no programa GiDLights (SILVA, 2006) para a geração de um dos arquivos de entrada do programa LightsGiD.

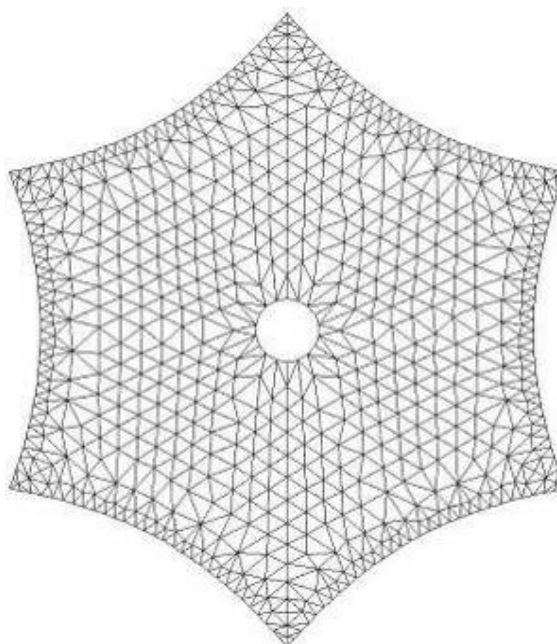


Figura 3.8: Malha plana de elementos finitos triangulares de três nós na área da membrana e de elementos lineares de dois nós no contorno dos cabos.

O programa LightsGiD é uma versão feita por Silva (2006) do programa Lights, desenvolvido por Arcaro (2006b), que inclui a possibilidade de visualização dos resultados calculados pelo Lights no módulo de pós-processamento do programa GiD.

O programa Lights, e consequentemente o programa LightsGiD, permite o projeto e a análise de tensoestruturas através do método dos elementos finitos, incluindo a membrana, os cabos e elementos estruturais de suporte.

A configuração de equilíbrio estável da estrutura é obtida minimizando-se a energia potencial total com o método Quasi-Newton, visto que esse método não exige a resolução do sistema típico de equações de equilíbrio. Assim, não é necessário derivar a matriz de rigidez e não importa se a estrutura que está sendo analisada é um mecanismo, caso que ocorre com frequência em tensoestruturas (Arcaro, 2005, 2006a, 2006b).

Três arquivos com dados de entrada são necessários para o LightsGiD:

- *structure.txt*, gerado pelo GiDLights, com informações da estrutura como coordenadas iniciais e deslocamentos a serem impostos aos nós das malhas, conectividade dos elementos de cabo, membrana e da estrutura de suporte, dados de vínculos (graus de liberdade) e molas. A modelagem numérica foi feita apenas considerando elementos de cabo e membrana. Os deslocamentos impostos para todos os modelos nos seis nós das extremidades da membrana foram de 3 m para cima (eixo z no sentido positivo) e 3 m radialmente para fora. Os nós que formam o anel central foram deslocados apenas para cima (eixo z no sentido positivo) de acordo a razão altura/diâmetro do modelo (Tab. 3.5). O diâmetro final da base de todos os modelos gerados é de 15 m, o diâmetro do anel central foi mantido com 1,5 m e os pilares laterais tem 3 m de altura.

Tabela 3.5: Deslocamentos verticais impostos no LightsGiD para os nós do anel central dos modelos

Nome do modelo	Deslocamento vertical do anel central [m]
R0215	6,25
R0260	6,90
R0305	7,55
R0345	8,20
R0390	8,85
R0435	9,50
R0475	10,15
R0305c	7,55
R0305d	7,55
R0305t	7,55

- *material.txt* com propriedades dos materiais utilizados nos cabos, membranas e elementos de suporte. Os dados dos cabos de borda foram obtidos do primeiro exemplo do programa Lights, para o cabo número 1, dentro do arquivo de entrada *material.txt* (ARCARO, 2006b), sendo o módulo de Young: $1,568 \times 10^8$ kPa; peso/unidade de comprimento: $7,994154 \times 10^{-3}$ kN/m; área da seção

transversal: $9,627400 \times 10^{-5} \text{ m}^2$; e a carga última: 118,6878 kN. Os parâmetros de entrada de dados da membrana foram obtidos de uma empresa de projeto de tensoestruturas, com módulo de elasticidade * espessura: 700 kN/m; coeficiente de Poisson: 0,20; peso/unidade de área: 0,00883 kN/m²; e carga última: 200 kN/m.

- *loading.txt* com as cargas aplicadas. Para que a forma dos modelos se aproximasse mais daqueles colecionados para escolha das razões altura/diâmetro, foram aplicados dois carregamentos: um encurtamento de 0,03 m nos elementos dos cabos de borda e uma força por unidade de área nos elementos de membrana na direção z com sentido negativo de 200 kPa.

Os arquivos de saída do programa LightsGiD são:

- *autocad.scr* é um arquivo tipo *script* que contém uma sequência de comandos que são executados automaticamente pelo AutoCAD para criar os desenhos dos cabos, membranas e elementos de suporte nas condições iniciais e após o processamento. Os desenhos feitos no AutoCAD foram utilizados para obter os dados necessários da geometria para construção dos modelos.
- *cable.txt* apresenta os valores das forças atuantes nos cabos para as cargas que tiverem sido impostas.
- *coordinate.txt* com as coordenadas dos nós dos elementos após a aplicação dos deslocamentos e cargas.
- *displacement.txt* apresenta os valores dos deslocamentos dos nós da configuração inicial para a posição com as cargas e deslocamentos aplicados.
- *frame.txt* com forças e momentos nos nós dos elementos da estrutura de suporte.

- *membrane.txt* apresenta os valores das tensões principais 1 e 2 (valores máximo e mínimo das tensões nas direções principais) nos elementos de membrana.
- *reaction.txt* com os valores das forças e momentos nos pontos de apoio da estrutura.
- *results.post.msh* e *results.post.res* são arquivos necessários para visualização das tensões, forças e deslocamentos nos elementos de cabo, membrana e estrutura de suporte no módulo de pós-processamento do programa GiD.
- *spring.txt* apresenta os valores das forças nas molas.

Esta metodologia de obtenção da forma das tensoestruturas, cujo esquema pode ser visto na figura 3.9, foi desenvolvida por Silva (2006).

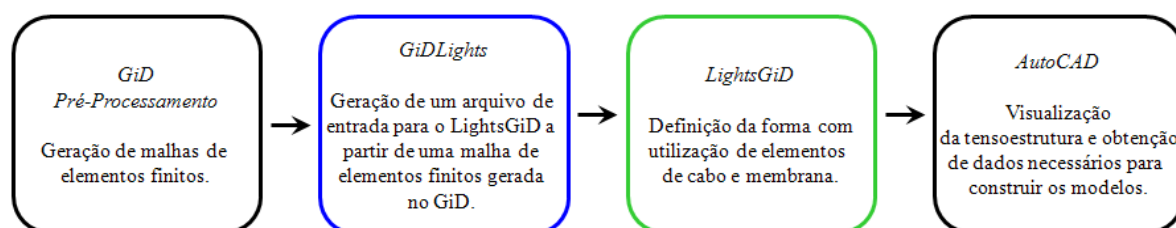


Figura 3.9: Esquema de geração de modelos numéricos de tensoestruturas¹.

Todos os modelos foram feitos em escala geométrica 1/75, a fim de permitir uma boa compatibilização dos requisitos necessários para a simulação das características do vento natural e atendimento das condições de semelhança. Nessa escala, o diâmetro da base de todos os modelos é de 20 cm e os pilares laterais metálicos têm 4 cm de altura. Vistas laterais geradas no AutoCAD e fotografias dos modelos montados no túnel de vento para medição de pressões externas e internas podem ser vistas na tabela 3.6. A altura da membrana de cada modelo é mostrada na tabela 3.7.

¹ Adaptado de SILVA, 2006.

Tabela 3.6: Visualização dos modelos no AutoCAD e dentro do túnel de vento.


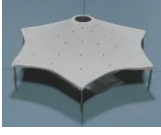




















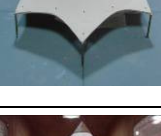
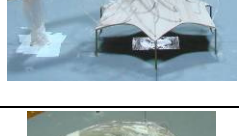
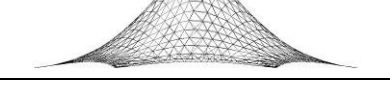





Nome do modelo	Vista lateral gerada pelo LightsGiD no AutoCAD	Foto do modelo montado para medição de pressão externa	Foto do modelo montado para medição de pressão interna
R0215			
R0260			
R0305			
R0345			
R0390			
R0435			
R0475			
R0305c			
R0305d			
R0305t			

Tabela 3.7: Altura da membrana de cada modelo na escala escolhida para construção.

Nome do modelo	Altura da membrana - do topo do pilar ao topo do modelo [cm]
R0215	4,3
R0260	5,2
R0305	6,1
R0345	6,9
R0390	7,8
R0435	8,7
R0475	9,5
R0305c	6,1 / altura do cone = 2 cm
R0305d	6,1
R0305t	6,1

Vários pares de medidas foram obtidos dos modelos numéricos tridimensionais desenhados no AutoCAD para orientar a construção do molde em madeira. Alguns pares de medidas já na escala de construção do modelo são mostrados na figura 3.10. A partir de um paralelepípedo de madeira, com o auxílio de um torno e ferramentas de marcenaria, os moldes para cada modelo foram feitos com contorno circular nas partes superior e inferior. Durante a obtenção do molde no formato adequado foi retirada uma peça estreita com encaixe na curvatura (Fig. 3.10) para auxiliar posteriormente na moldagem com gesso.

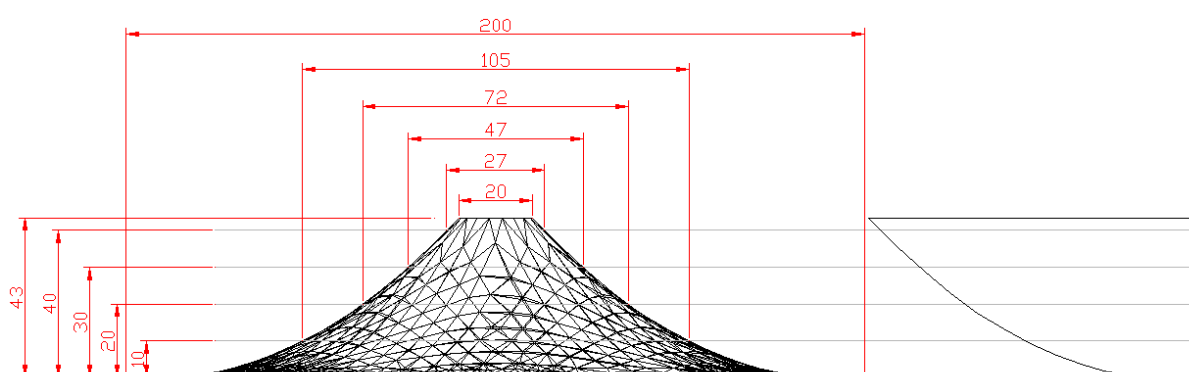


Figura 3.10: Exemplos de pares de medidas [mm] em escala 1/75 obtidos do modelo numérico tridimensional R0215 no AutoCAD para construção do molde e peça com encaixe na curvatura.

Para construção do modelo a ser ensaiado, o molde de madeira foi coberto de graxa para facilitar a desmoldagem e por cima com uma mistura de gesso e água. Em seguida ele foi encaixado em uma mesa giratória com a peça com encaixe na curvatura fixa a 2 mm do

molde. Este foi girado até que a peça terminasse de retirar todo o excesso da mistura de gesso, para que o modelo ficasse com 2 mm de espessura. O material foi colocado para secar a temperatura ambiente e depois a parte de gesso, que é o modelo, foi desencaixada. Alguns modelos tiveram que ser moldados mais de uma vez devido à dificuldade de desmoldar.

Nesta etapa os modelos apresentavam o perímetro da borda inferior circular. Para dar o formato correto com os recortes, foram feitas marcações da curvatura das bordas inferiores com dados extraídos do AutoCAD e então o gesso era cortado com lâmina de serra e dado acabamento com lixa.

A marcação das tomadas de pressão estática dispostas ao longo de uma mesma geratriz em diversos níveis foi feita a partir da experiência da equipe do LAC e os furos foram feitos com broca para encaixe dos tubos de PVC com diâmetro interno de 1,5 mm. Estas mangueiras plásticas foram numeradas de acordo com o que foi estabelecido para as tomadas de pressão do modelo (Figs. 3.11 a 3.14) e ligadas, através de conectores, a transdutores elétricos de pressão.

Na mesa redonda que encaixa no túnel de vento para a realização dos ensaios foram fixados com cola instantânea os pilares metálicos e nestes, a cobertura em gesso. Para cada modelo ensaiado, a cobertura era trocada.

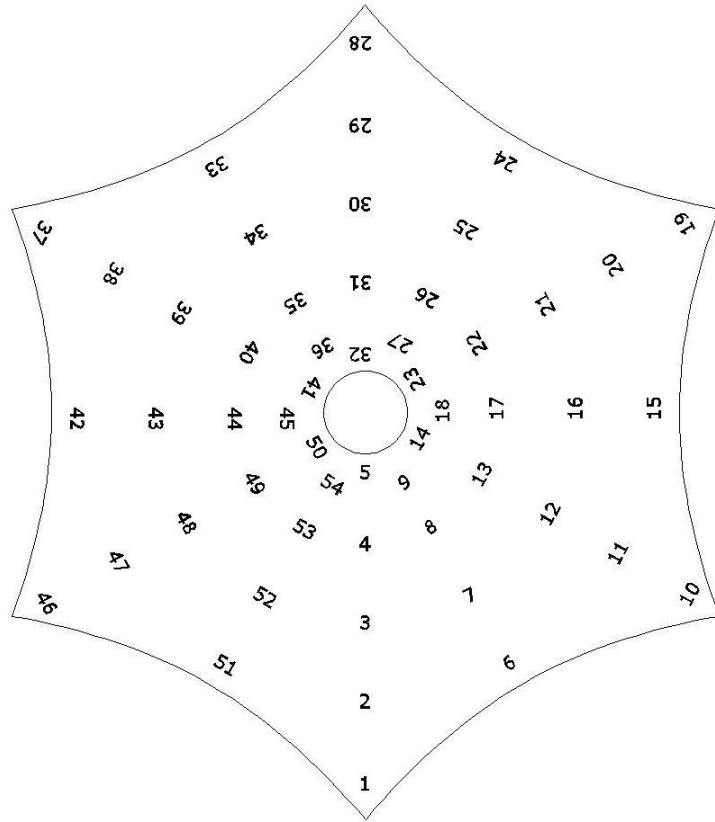


Figura 3.11: Distribuição e numeração das tomadas de pressão em modelos de um pico sem cone – R0215, R0260, R0305, R0345, R0390, R0435 e R0475 – 54 tomadas de pressão.

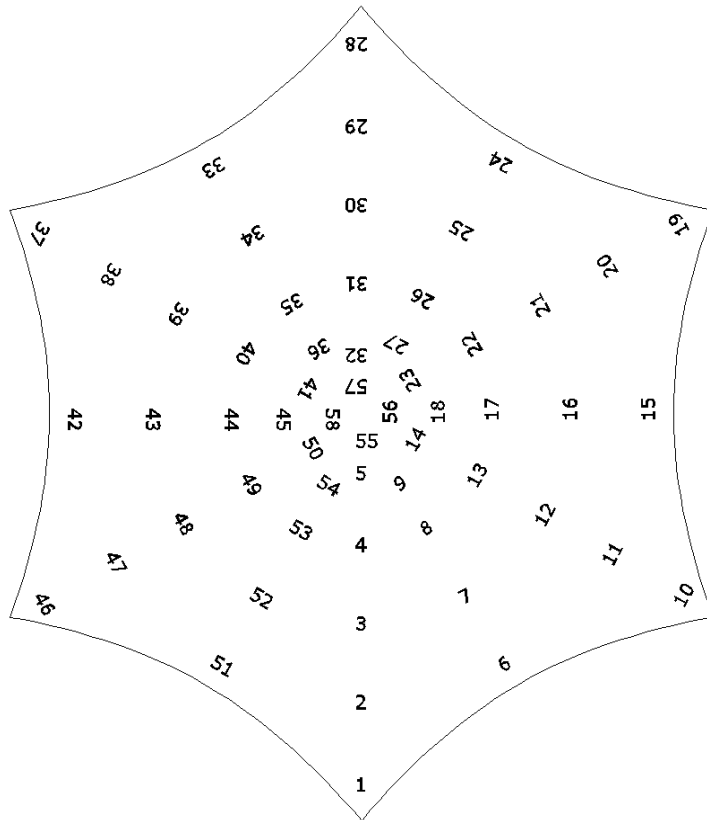


Figura 3.12: Distribuição e numeração das tomadas de pressão no modelo de um pico com cone – R0305c – 58 tomadas de pressão.

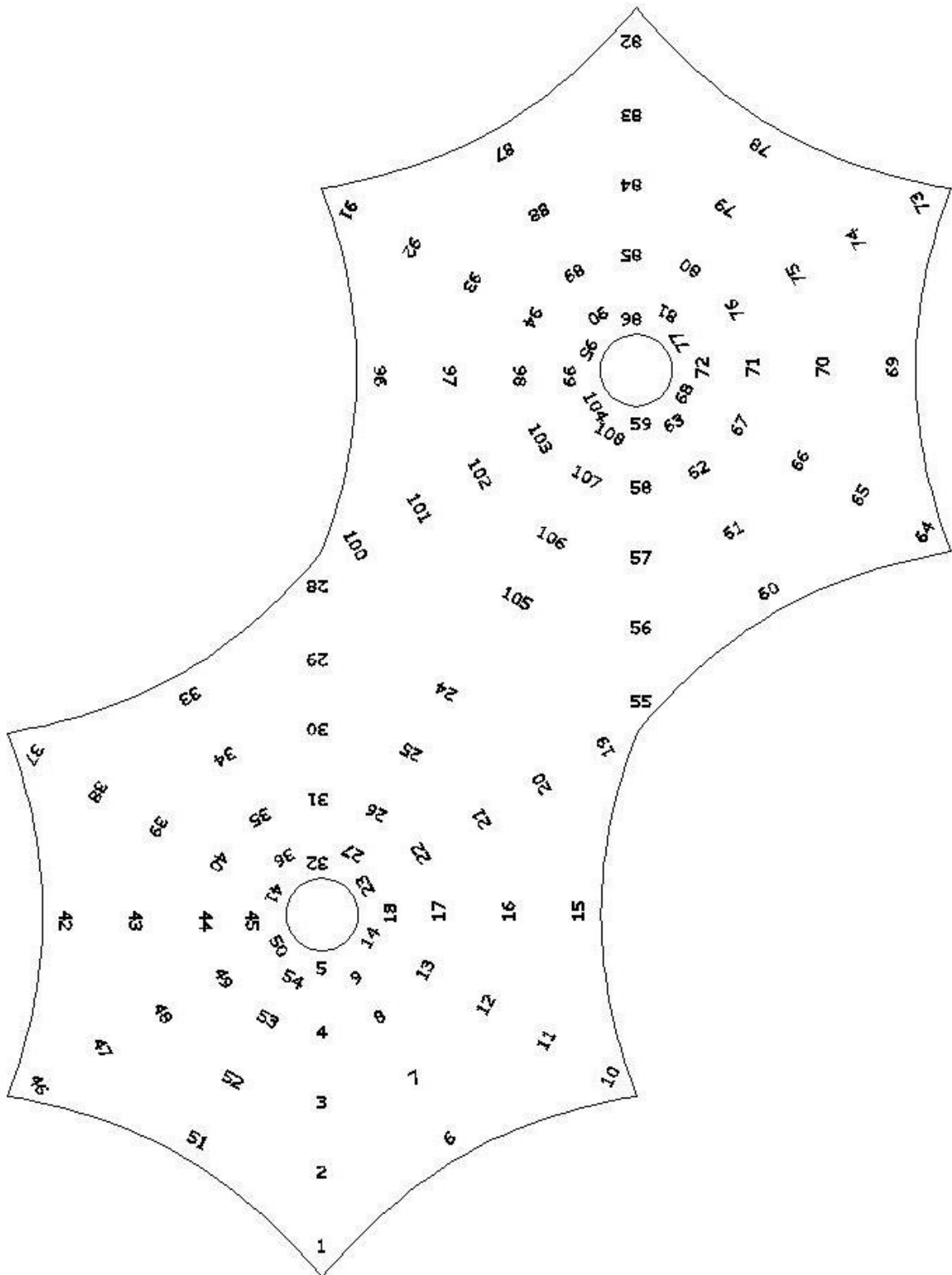


Figura 3.13: Distribuição e numeração das tomadas de pressão no modelo de dois picos – R0305d – 108 tomadas de pressão.

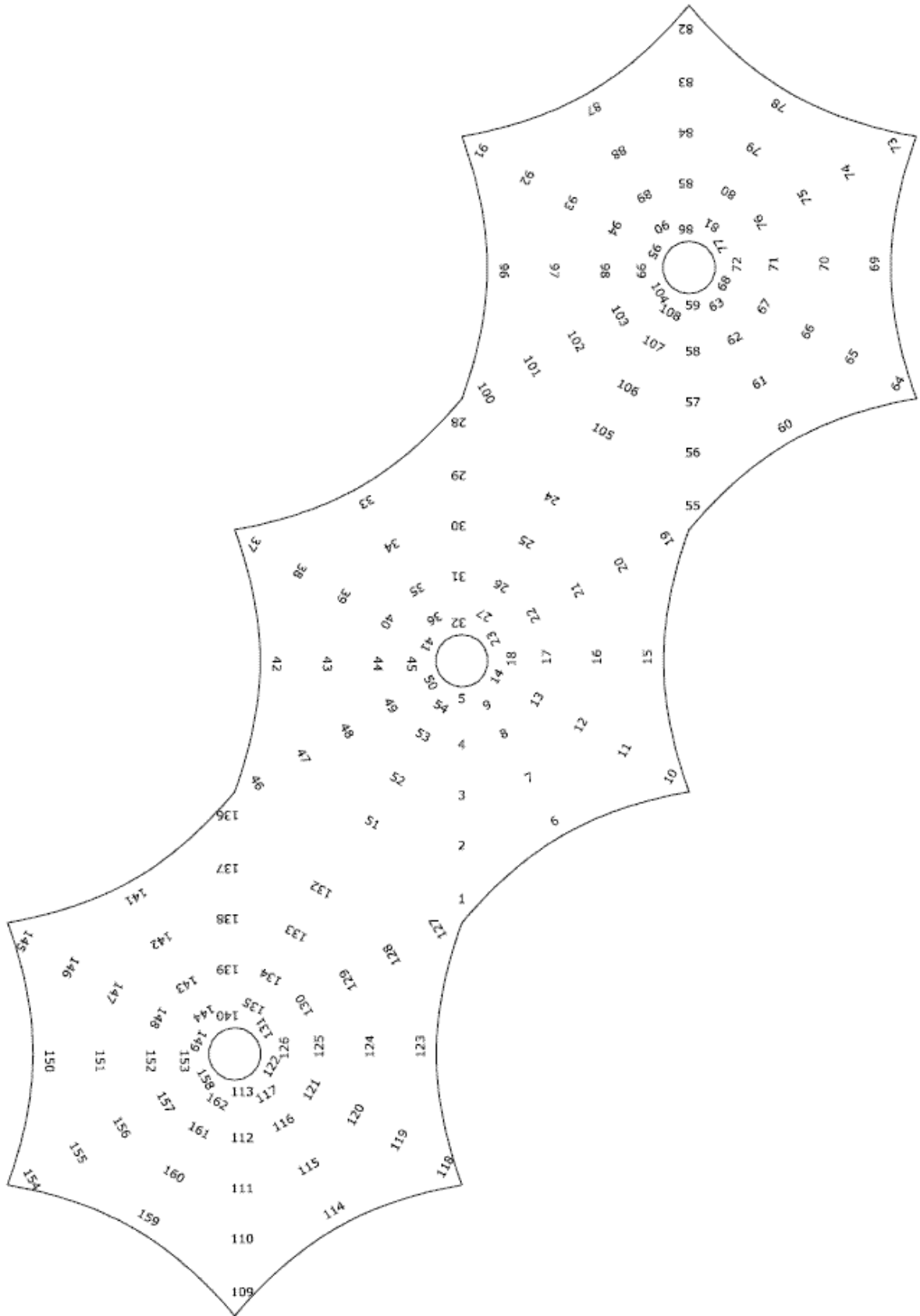


Figura 3.14: Distribuição e numeração das tomadas de pressão no modelo de três picos – R0305t – 162 tomadas de pressão.

3.4.2 Ensaios com modelos estáticos e processamento de dados

Os ensaios foram realizados variando-se o ângulo de incidência do vento, mostrado nas figuras 3.15 a 3.17, entre 0° e 180° , com a realização de leituras de pressões a cada 15° tanto para o caso de medição de pressões externas quanto internas.

Inicialmente foram feitos os ensaios para medição das pressões externas dos modelos R0215, R0260, R0345, R0390, R0435 e R0475. O último modelo ensaiado foi o R0305 para que fosse possível aproveitar a montagem de um pico para acrescentar o cone (R0305c) e depois de retirar o cone, acrescentar mais um pico em uma extremidade (R0305d) e outro pico na outra extremidade (R0305t). A mesma sequência de ensaios foi realizada para medição das pressões internas com os mesmos modelos das coberturas, apenas invertendo o encaixe das mangueiras plásticas nas tomadas de pressão.

As leituras dos valores das pressões instantâneas foram feitas por transdutores de pressão do sistema de aquisição de dados de pressão Scanivalve, que realiza milhares de leituras do valor da pressão para cada ângulo e armazena-os em arquivos. Estes arquivos com os valores de pressão são processados por uma rotina programada em Matlab elaborada pela equipe do LAC e em seguida são organizados em uma planilha com os valores de pressão média, mínima, máxima e valores rms, em mmH₂O. Nesta mesma planilha são registrados também os dados de temperatura, pressão atmosférica e variação de pressão entre os dois anéis piezométricos do convergente. Com estes dados são calculados os coeficientes de pressão média, mínima, máxima e valores rms.

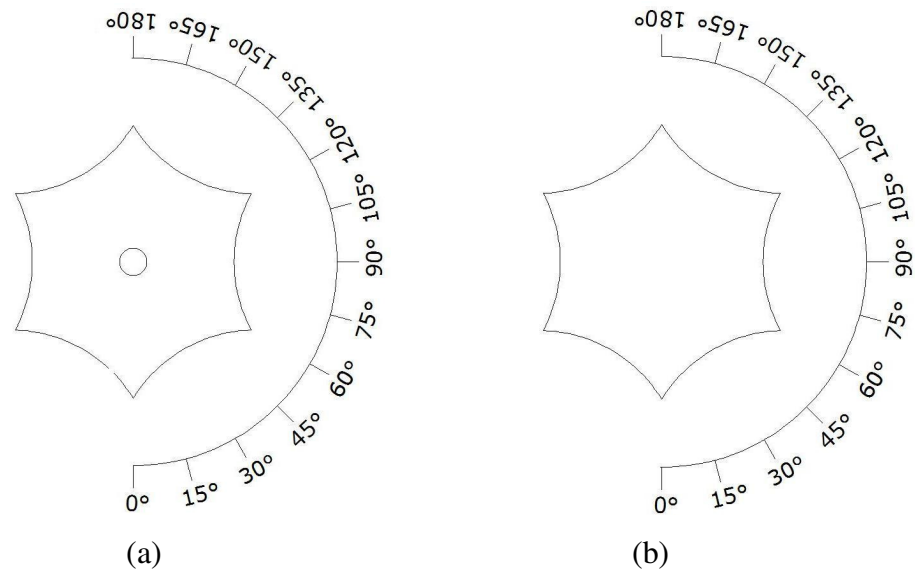


Figura 3.15: Ângulos de incidência do vento em modelos de um pico (a) sem cone – R0215, R0260, R0305, R0345, R0390, R0435, R0475; e (b) com cone – R0305c.

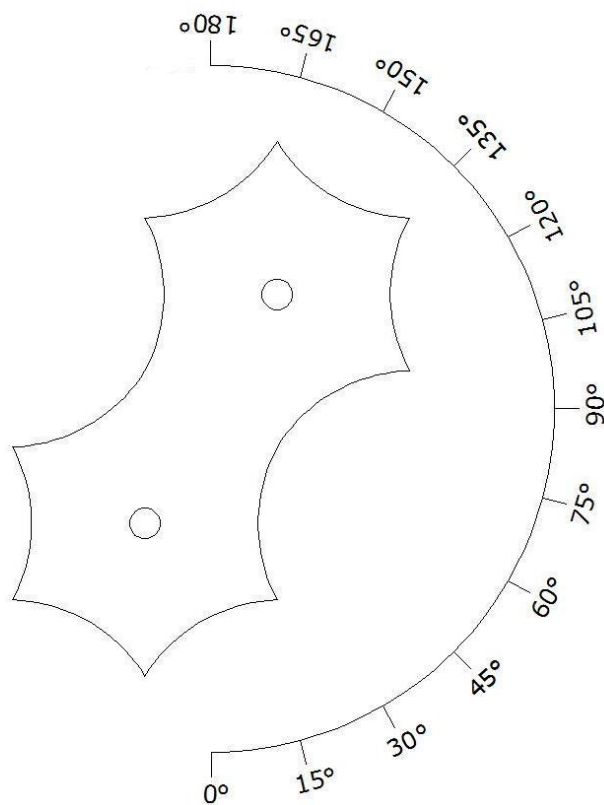


Figura 3.16: Ângulos de incidência do vento no modelo de dois picos – R305d.

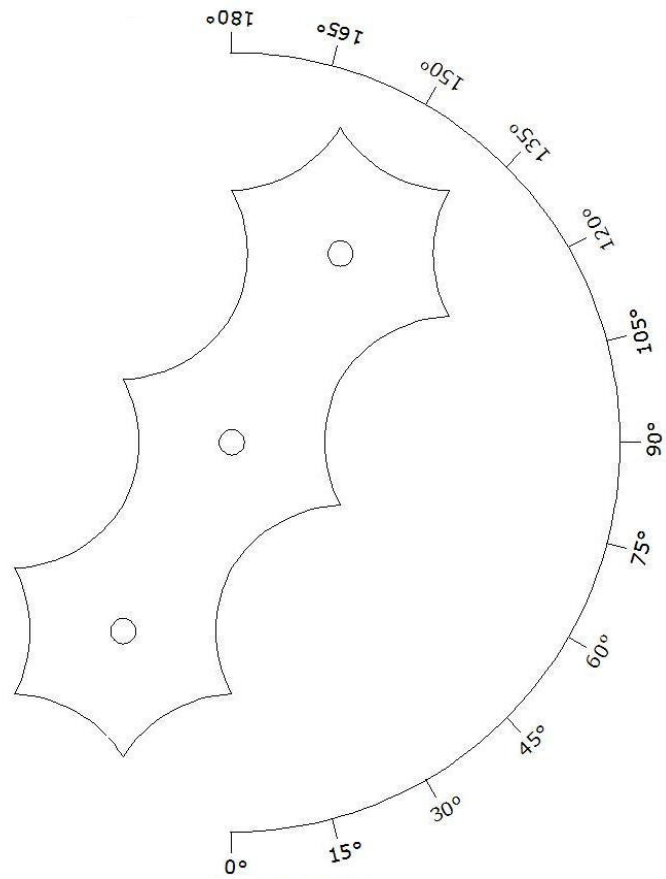


Figura 3.17: Ângulos de incidência do vento no modelo de três picos – R305t.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

As tabelas e os gráficos dos coeficientes de pressão interna, externa e resultante com os valores máximos, mínimos, médios e rms obtidos dos ensaios em túnel de vento com medições a cada 15°, girando as tensoestruturas de 0° a 180° para os modelos R0215, R0260, R0305, R0345, R0390, R0435, R0475, R0305c, R0305d e R0305t estão disponíveis no DVD inserido no apêndice A.

Como os modelos de pico único são simétricos, com um padrão de geometria que se repete a cada 60° e as medições realizadas nos ensaios foram de 0° a 180°, foram calculados os valores de c_p^* média resultante, mostrados nas tabelas do apêndice B, para os ângulos de incidência do vento de 0°, 15°, 30° e 45° considerando os coeficientes de pressão média resultante obtidos nos experimentos da seguinte forma:

$$c_p^* \text{ da tomada 1 a } 0^\circ = \frac{c_p \text{ da tomada 1 a } 0^\circ + c_p \text{ da tomada 10 a } 60^\circ + c_p \text{ da tomada 19 a } 120^\circ}{3}$$

$$c_p^* \text{ da tomada 2 a } 0^\circ = \frac{c_p \text{ da tomada 2 a } 0^\circ + c_p \text{ da tomada 11 a } 60^\circ + c_p \text{ da tomada 20 a } 120^\circ}{3}$$

e assim sucessivamente.

Gráficos com a distribuição das pressões em escala de cores com os valores dos coeficientes na localização de cada tomada de pressão, conforme mostrado na figura 4.1 para o modelo R0215, foram feitos para todos os modelos e todos os ângulos ensaiados com os coeficientes de pressão média interna, média externa, média resultante e c_p^* média resultante. Para os coeficientes de pressão máxima interna, máxima externa, mínima interna e mínima externa, foram elaborados gráficos com os valores limites alcançados em cada tomada de pressão juntamente com um símbolo que mostra qual o ângulo de incidência do vento em que

aquele valor foi atingido (Fig. 4.2). Este material está disponível no DVD colocado no apêndice A.

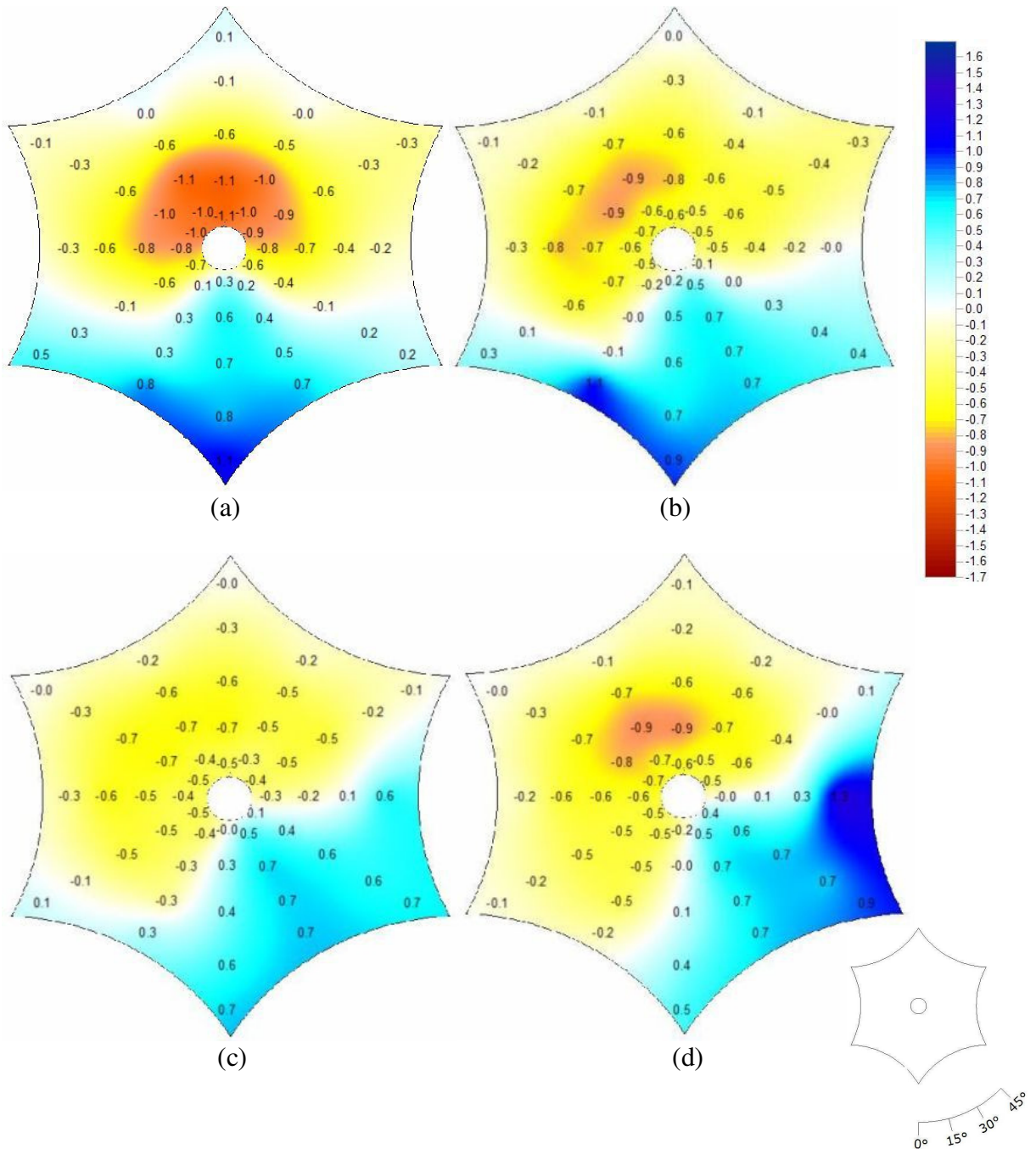


Figura 4.1: c_p^* média resultante do modelo R0215. Ângulo de incidência do vento: (a) 0°; (b) 15°; (c) 30°; (d) 45°.

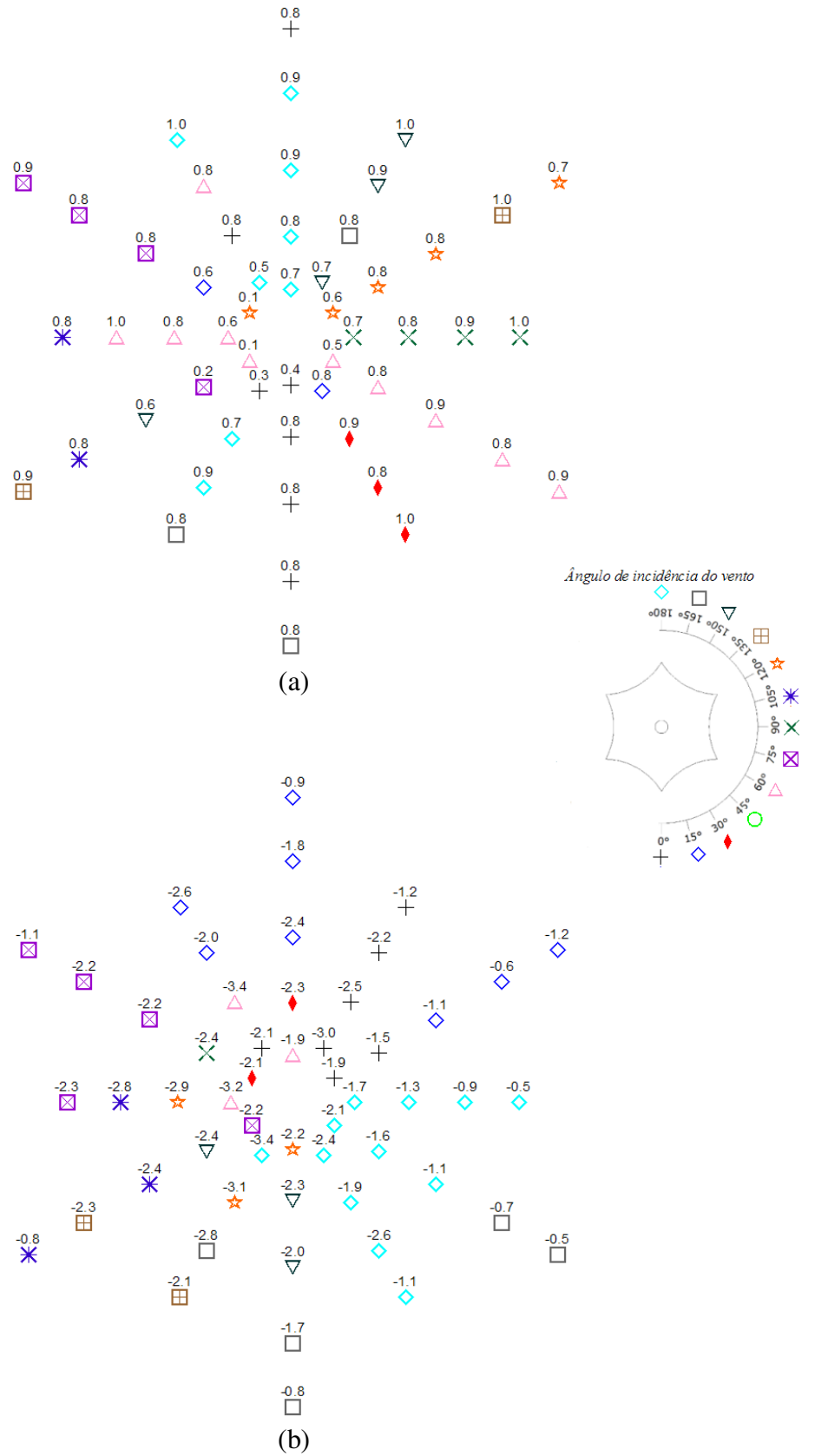


Figura 4.2: Coeficientes de pressão do modelo R0215: (a) máxima externa; (b) mínima externa; e o ângulo de incidência do vento em que ocorreram.

Com o objetivo de facilitar a utilização dos resultados obtidos por projetistas, optou-se por apresentá-los de maneira semelhante àquela do anexo A da NBR 6123 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1988), com os valores limites dos coeficientes de pressão média resultante a serem utilizados nas tabelas 4.1 a 4.3 e com gráficos de linhas isobáricas de c_p^* média resultante de todos os modelos de 1 pico (Figs. 4.3 a 4.13) e de c_p média resultante para os modelos de dois e três picos (Figs. 4.16 a 4.21), considerando para estes últimos apenas metade dos ângulos de incidência do vento ensaiados (Figs. 4.14 e 4.15). Todos os valores dos coeficientes de pressão utilizados para os gráficos de linhas isobáricas estão disponíveis nos apêndices B e C.

Buscou-se resumir os resultados dos ensaios com os modelos de dois e três picos, R0305d e R0305t, com o cálculo de fatores de redução, como apresentado por Burton e Gosling (2004), mas não foi possível devido à grande variabilidade dos valores dos coeficientes de pressão obtidos. Nestes modelos, observou-se, em geral, um aumento da sobrepressão e uma redução da sucção nos picos localizados a sotavento (Tabs. 4.2 e 4.3 e Figs. 4.16 a 4.21).

Tabela 4.1: Valores limites de c_p^* média resultante dos modelos de um pico .

Modelo	Ângulo de incidência do vento							
	0°		15°		30°		45°	
	Sobre- pressão	Sucção	Sobre- pressão	Sucção	Sobre- pressão	Sucção	Sobre- pressão	Sucção
R0215	1,08	-1,13	1,06	-0,87	0,74	-0,70	1,35	-0,91
R0260	0,93	-1,09	0,72	-0,92	0,72	-0,76	1,01	-0,87
R0305	0,91	-0,86	0,72	-0,80	0,79	-0,66	0,81	-0,81
R0345	0,99	-0,67	0,82	-0,72	0,89	-0,72	0,84	-0,73
R0390	1,03	-0,67	0,94	-0,65	1,00	-0,68	0,94	-0,68
R0435	1,06	-0,70	0,90	-0,66	0,91	-0,75	0,89	-0,68
R0475	0,99	-0,71	0,95	-0,69	1,05	-0,73	0,99	-0,68
R0305c	0,82	-0,76	0,76	-0,78	0,78	-0,62	0,84	-0,77

Tabela 4.2: Valores limites de c_p média resultante dos modelos de dois e três picos: ângulo de incidência do vento de 0° a 45°

Modelo		Ângulo de incidência do vento							
		0°		15°		30°		45°	
		Sobre- pressão	Sucção	Sobre- pressão	Sucção	Sobre- pressão	Sucção	Sobre- pressão	Sucção
R0305d	Pico de barlavento	0,72	-0,88	0,84	-1,02	0,70	-1,05	0,83	-1,05
	Pico de sotavento	0,86	-0,87	0,93	-0,98	0,85	-0,90	0,76	-0,92
R0305t	Pico de barlavento	0,70	-0,88	0,80	-0,84	1,06	-1,07	0,72	-1,09
	Pico do meio	0,62	-0,71	0,82	-0,83	0,68	-0,86	0,74	-0,93
	Pico de sotavento	0,77	-0,97	0,82	-1,00	0,71	-0,83	0,80	-0,74

Tabela 4.3: Valores limites de c_p média resultante dos modelos de dois e três picos: ângulo de incidência do vento de 60° a 90°

Modelo		Ângulo de incidência do vento					
		60°		75°		90°	
		Sobre- pressão	Sucção	Sobre- pressão	Sucção	Sobre- pressão	Sucção
R0305d	Pico de barlavento	0,65	-0,77	0,77	-0,98	0,74	-0,95
	Pico de sotavento	0,83	-0,76	0,85	-0,93	0,89	-1,15
R0305t	Pico de barlavento	0,58	-0,93	0,68	-1,01	0,67	-1,01
	Pico do meio	0,61	-0,85	0,71	-1,03	0,72	-1,31
	Pico de sotavento	0,87	-0,75	0,85	-1,02	0,84	-0,93

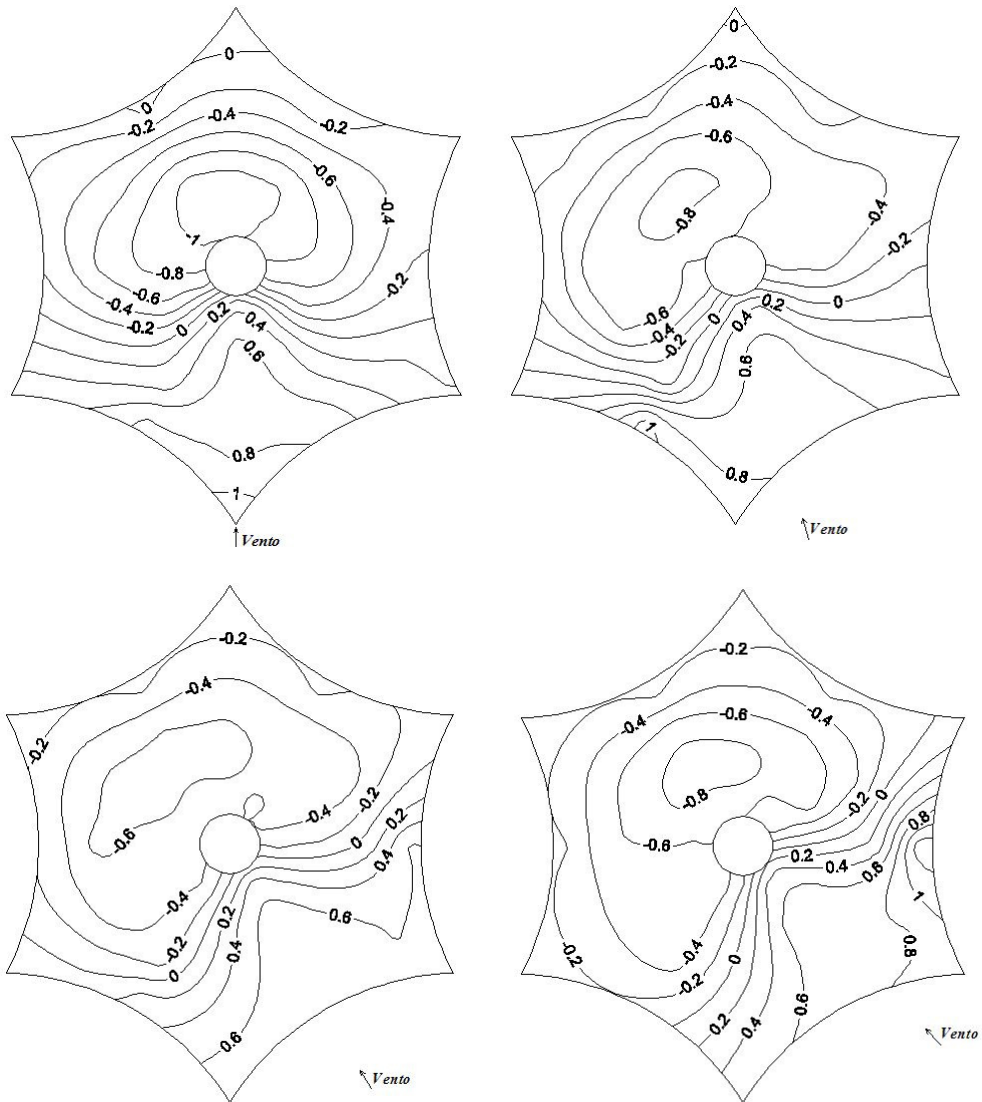


Figura 4.3: Vista superior: linhas isobáricas dos coeficientes de pressão média resultante (c_p^*) do modelo R0215 para os ângulos de incidência do vento de 0°, 15°, 30° e 45°.

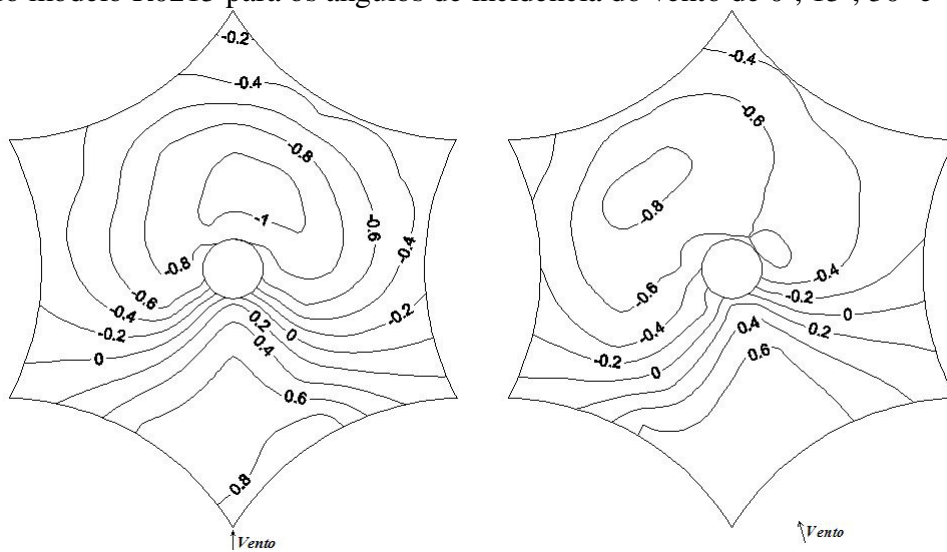


Figura 4.4: Vista superior: linhas isobáricas dos coeficientes de pressão média resultante (c_p^*) do modelo R0260 para os ângulos de incidência do vento de 0° e 15°.

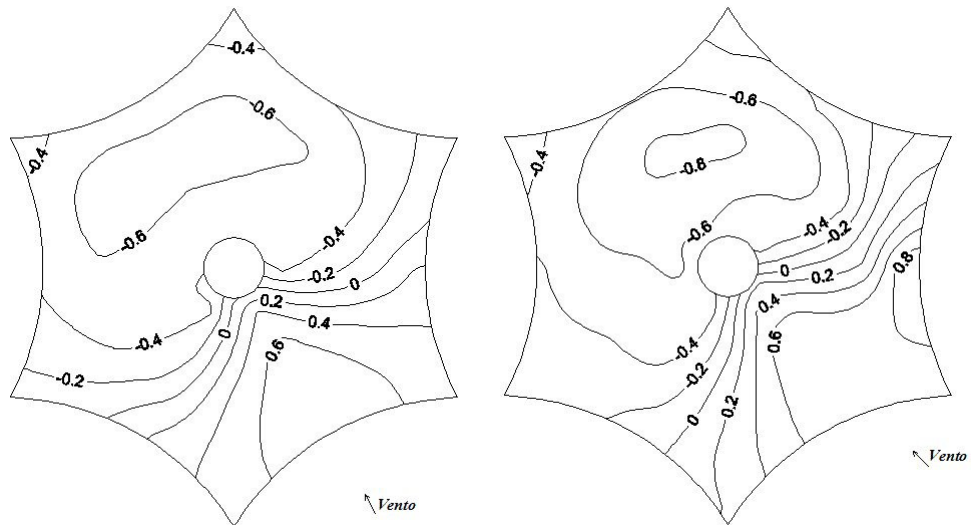


Figura 4.5: Vista superior: linhas isobáricas dos coeficientes de pressão média resultante (c_p^*) do modelo R0260 para os ângulos de incidência do vento de 30° e 45°.

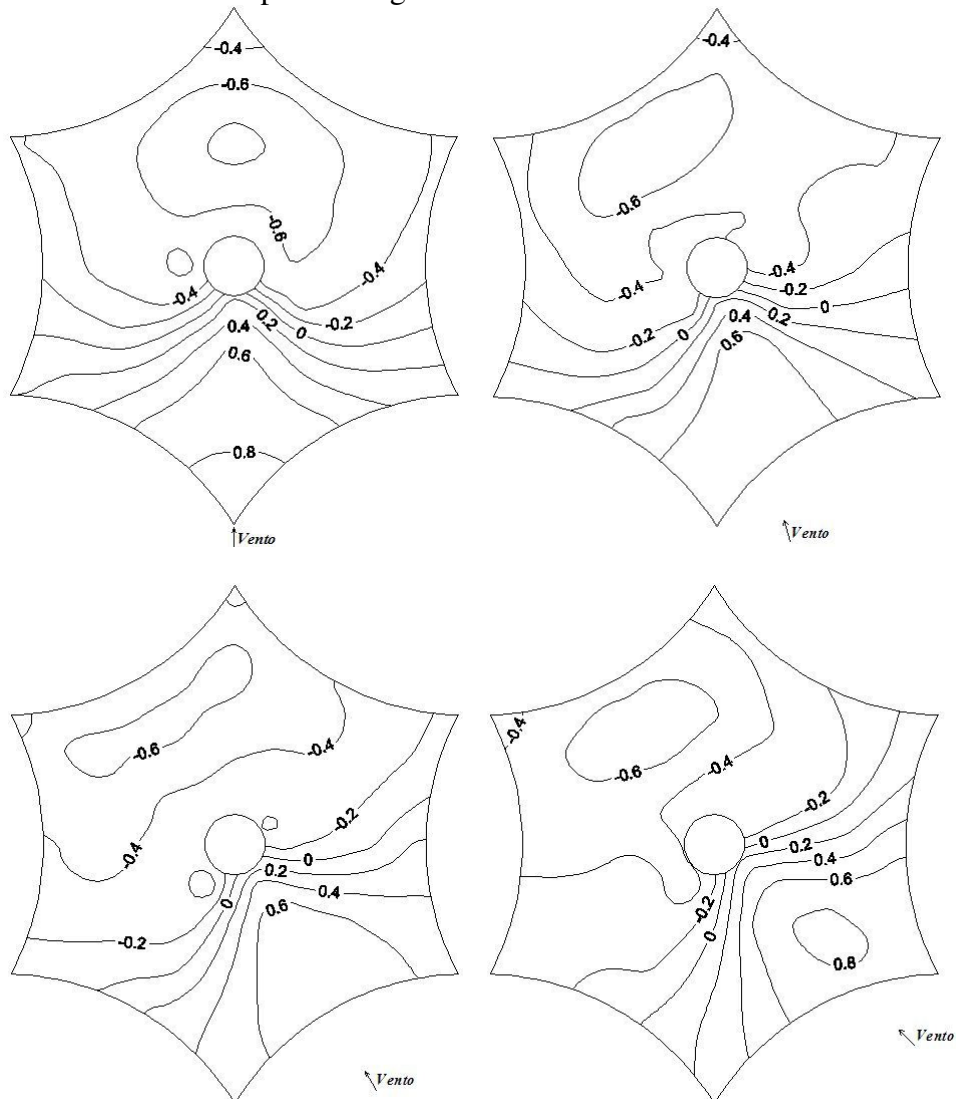


Figura 4.6: Vista superior: linhas isobáricas dos coeficientes de pressão média resultante (c_p^*) do modelo R0305 para os ângulos de incidência do vento de 0°, 15°, 30° e 45°.

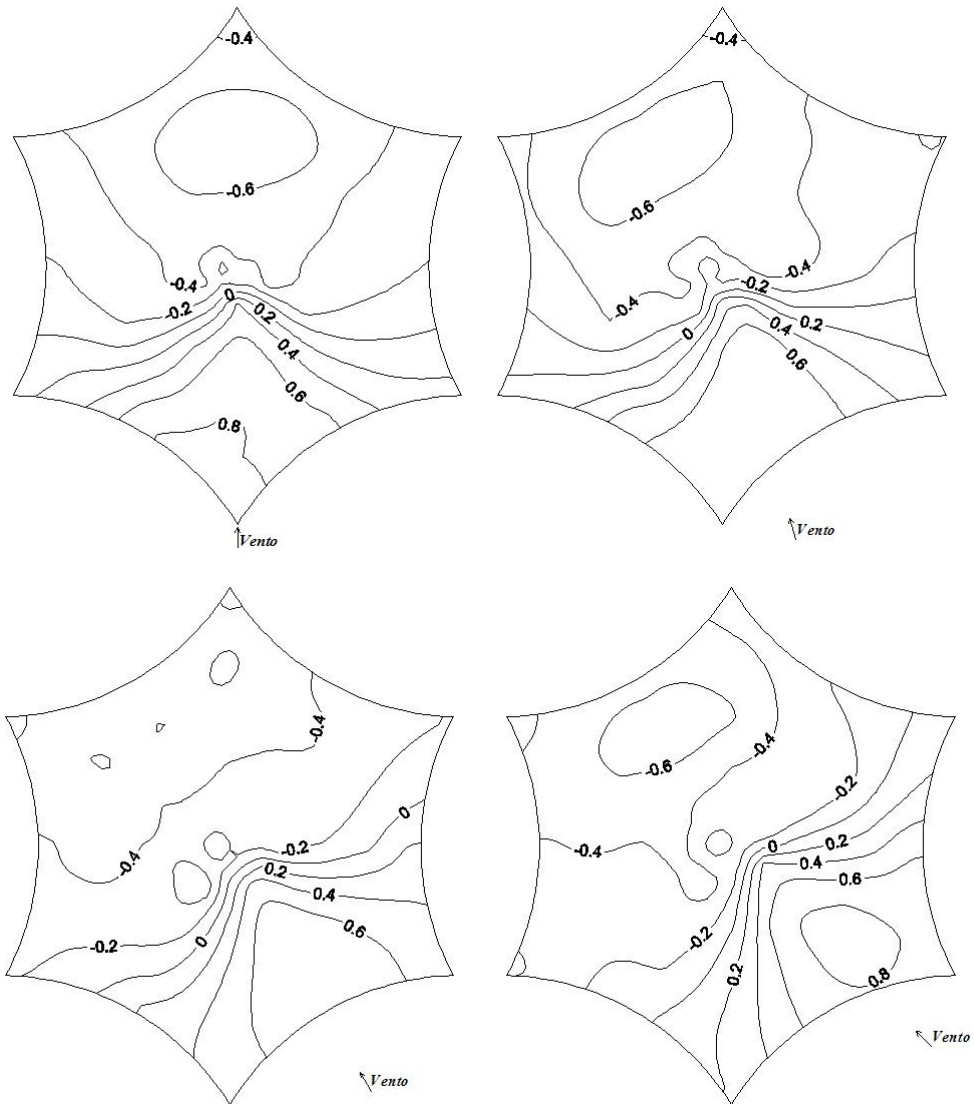


Figura 4.7: Vista superior: linhas isobáricas dos coeficientes de pressão média resultante (c_p^*) do modelo R0305c para os ângulos de incidência do vento de 0°, 15°, 30° e 45°.

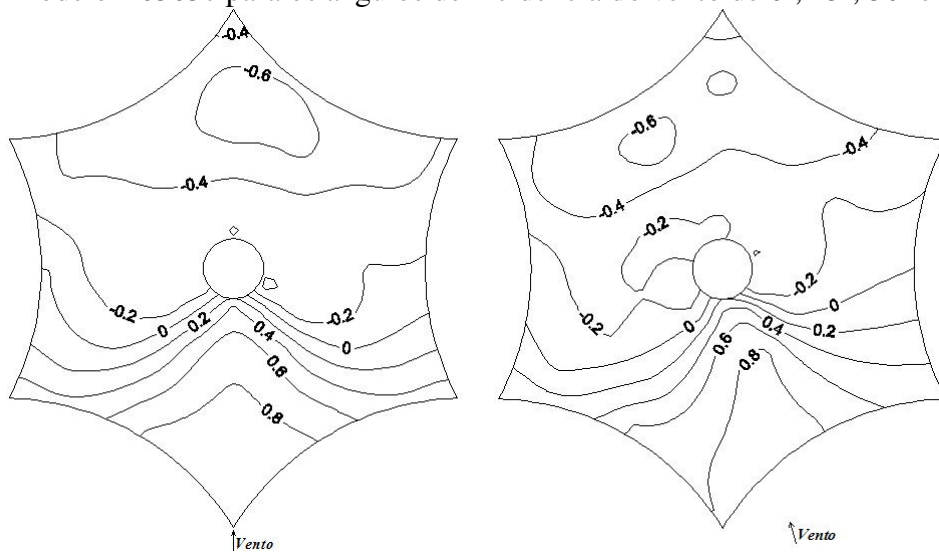


Figura 4.8: Vista superior: linhas isobáricas dos coeficientes de pressão média resultante (c_p^*) do modelo R0345 para os ângulos de incidência do vento de 0° e 15°.

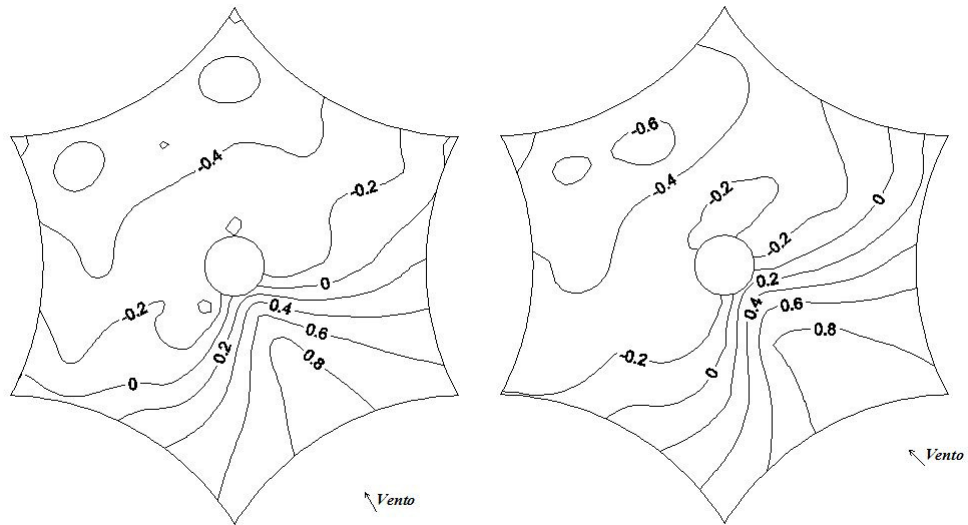


Figura 4.9: Vista superior: linhas isobáricas dos coeficientes de pressão média resultante (c_p^*) do modelo R0345 para os ângulos de incidência do vento de 30° e 45°.

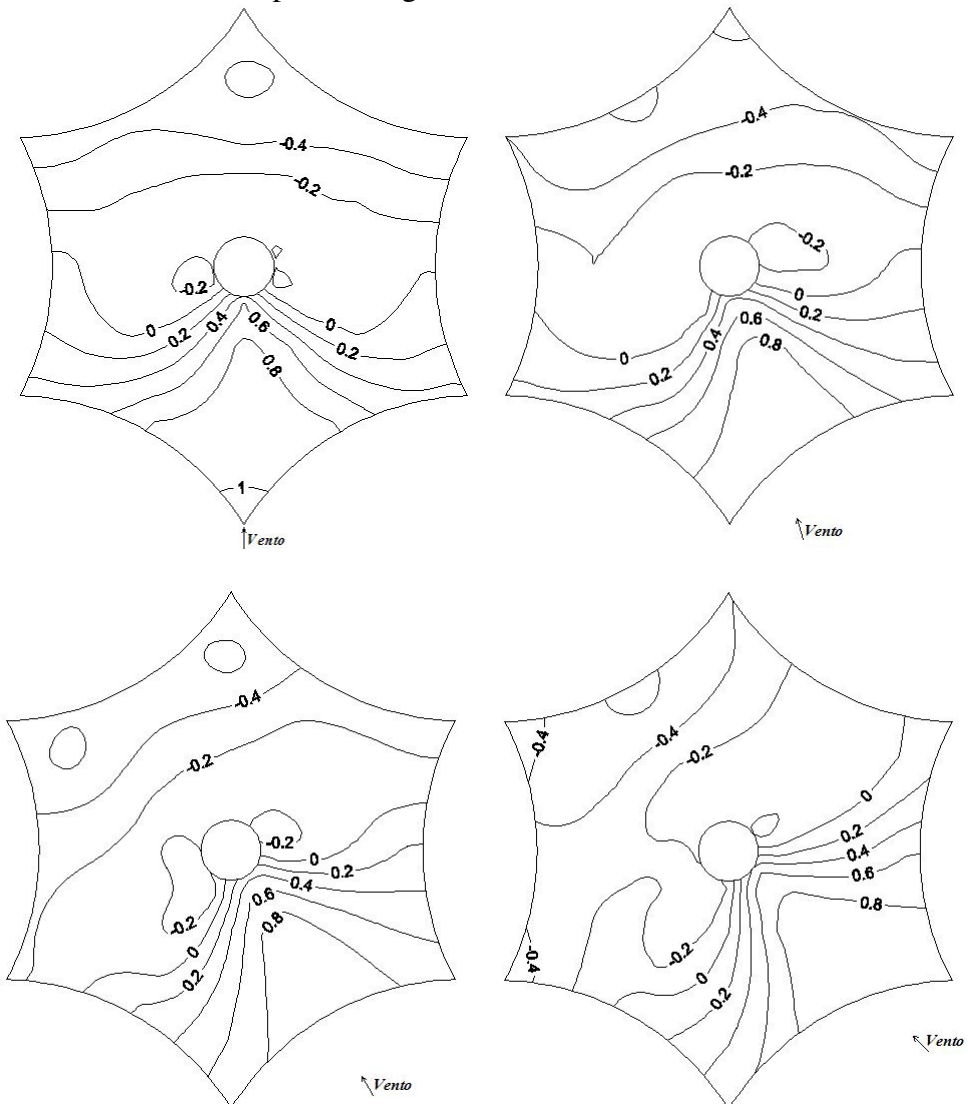


Figura 4.10: Vista superior: linhas isobáricas dos coeficientes de pressão média resultante (c_p^*) do modelo R0390 para os ângulos de incidência do vento de 0°, 15°, 30° e 45°.

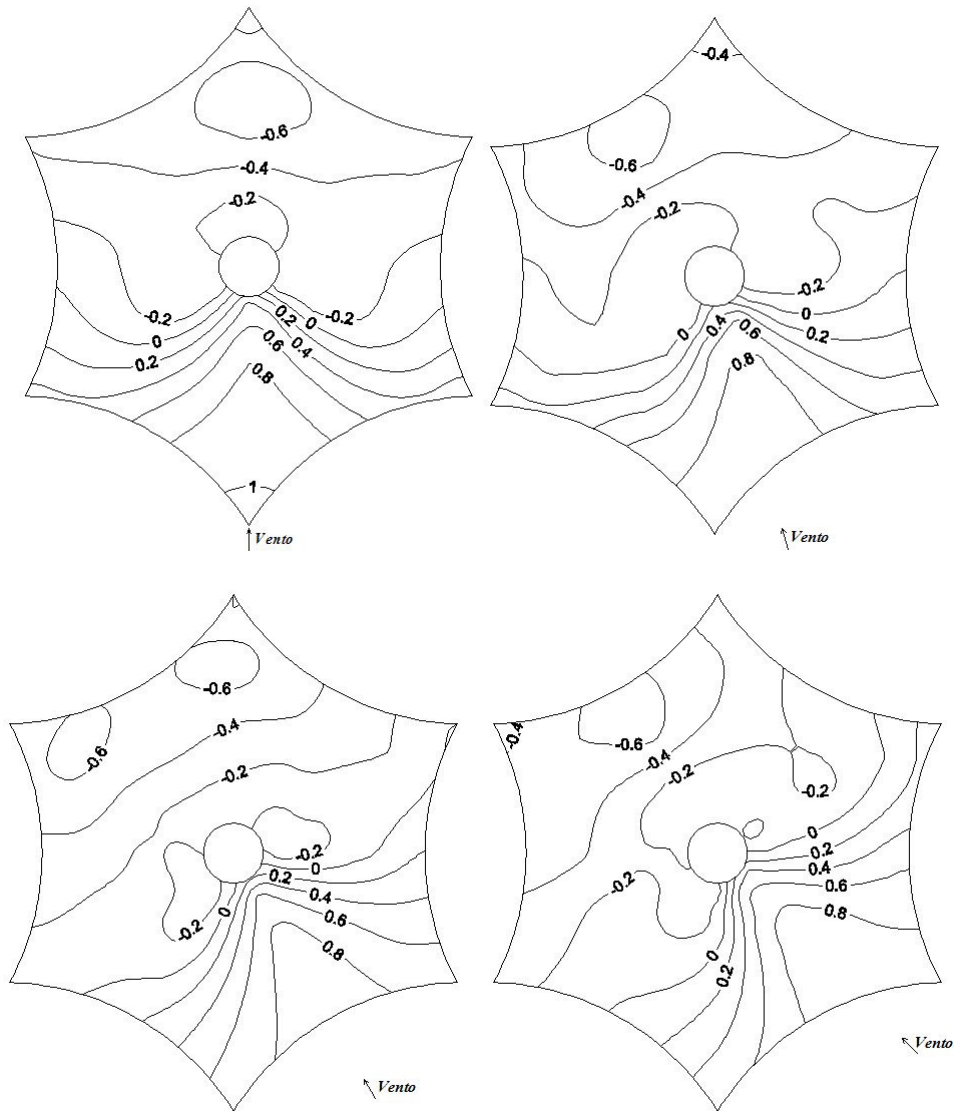


Figura 4.11: Vista superior: linhas isobáricas dos coeficientes de pressão média resultante (c_p^*) do modelo R0435 para os ângulos de incidência do vento de 0°, 15°, 30° e 45°.

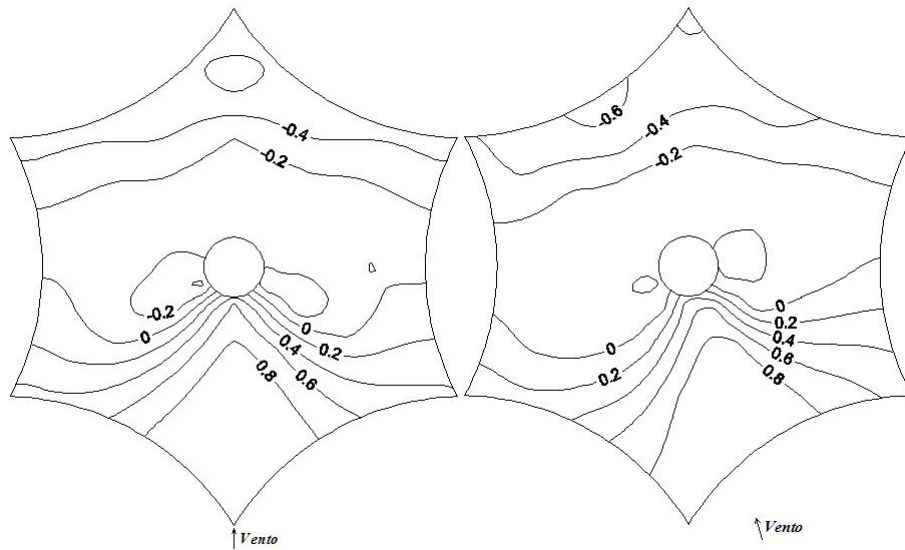


Figura 4.12: Vista superior: linhas isobáricas dos coeficientes de pressão média resultante (c_p^*) do modelo R0475 para os ângulos de incidência do vento de 0° e 15°.

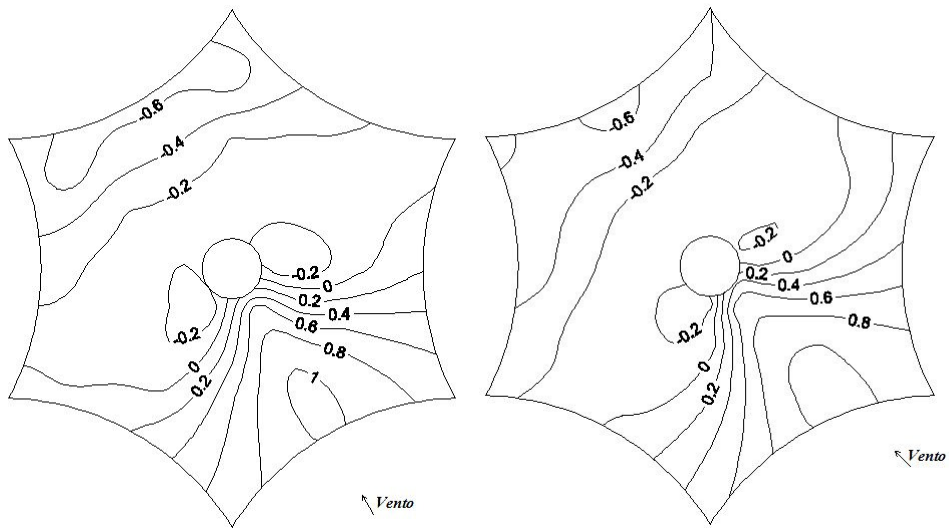


Figura 4.13: Vista superior: linhas isobáricas dos coeficientes de pressão média resultante (c_p^*) do modelo R0475 para os ângulos de incidência do vento de 30° e 45°.

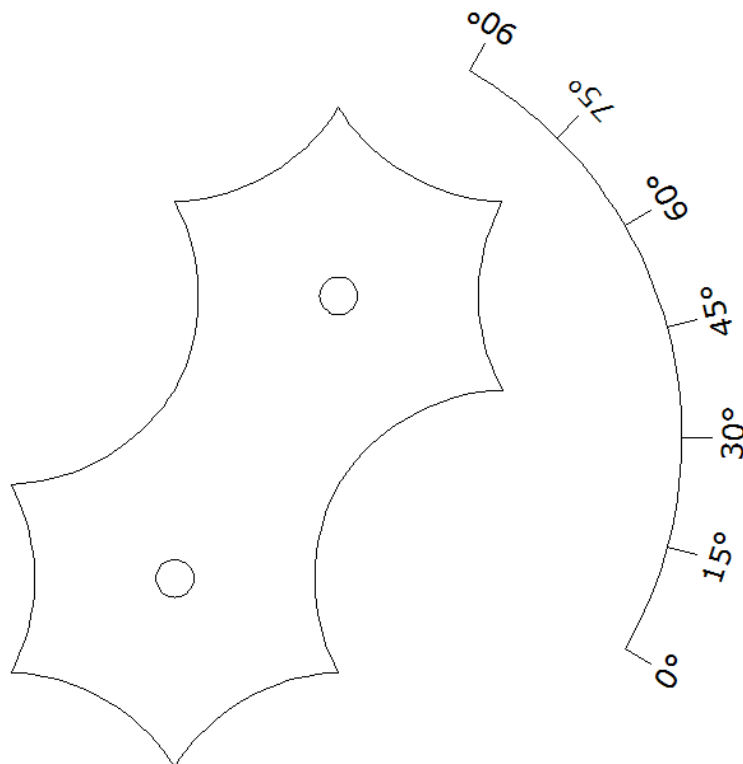


Figura 4.14: Ângulos de incidência do vento considerados para elaboração dos gráficos com linhas isobáricas do modelo de dois picos.

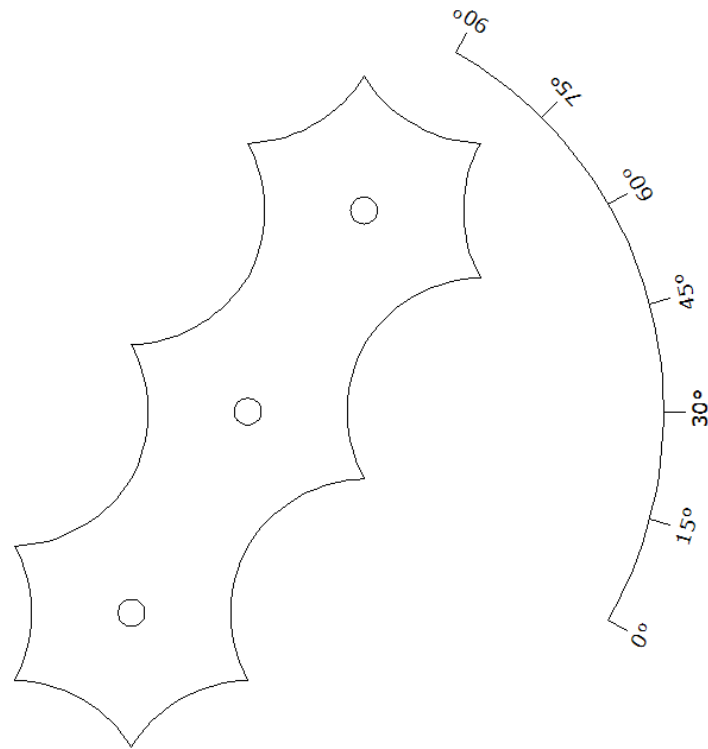


Figura 4.15: Ângulos de incidência do vento considerados para elaboração dos gráficos com linhas isobáricas do modelo de três picos.

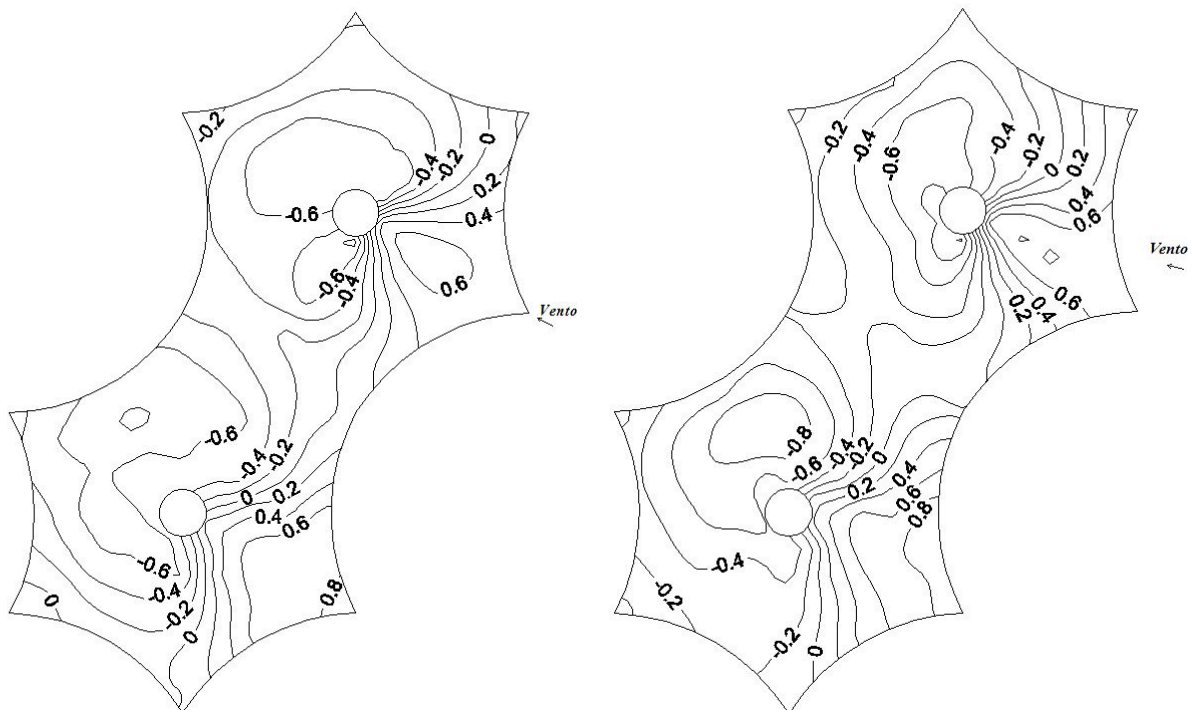


Figura 4.16: Vista superior: linhas isobáricas dos coeficientes de pressão média resultante (c_p) do modelo R0305d para os ângulos de incidência do vento de 0° e 15°.

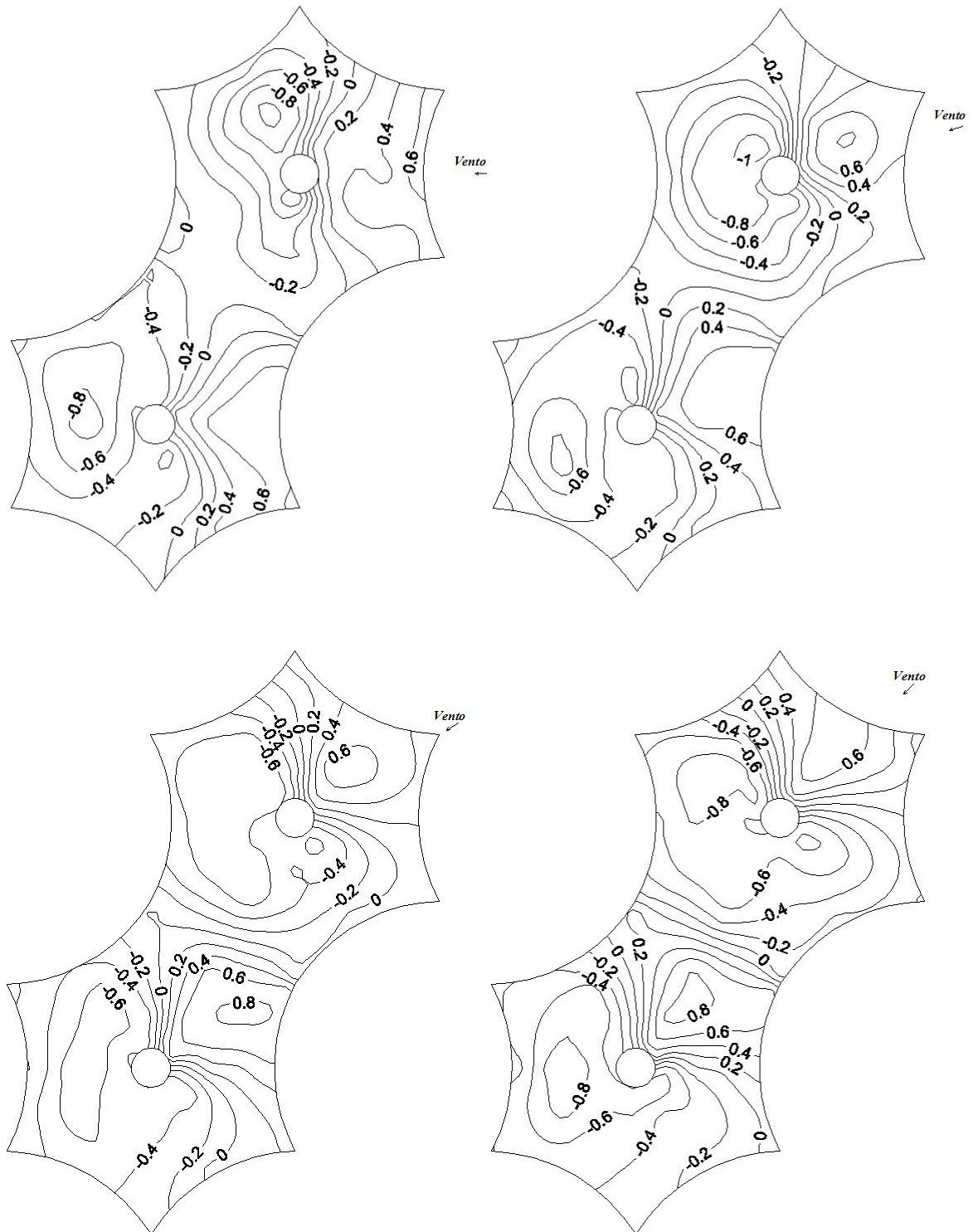


Figura 4.17: Vista superior: linhas isobáricas dos coeficientes de pressão média resultante (c_p) do modelo R0305d para os ângulos de incidência do vento de 30°, 45°, 60° e 75°.

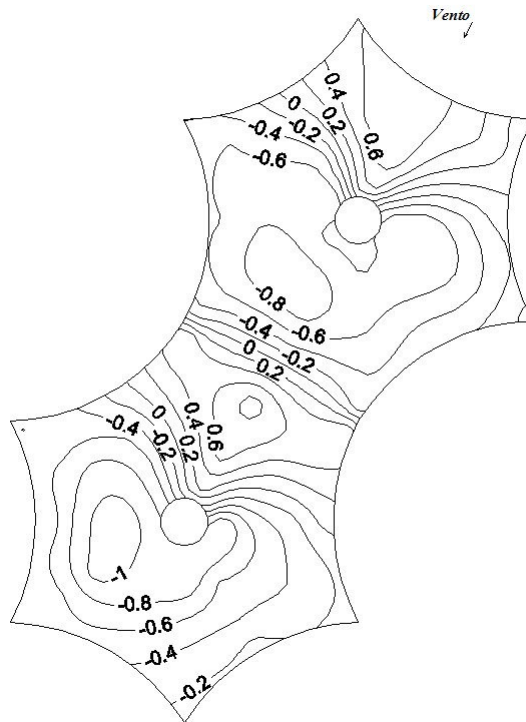


Figura 4.18: Vista superior: linhas isobáricas dos coeficientes de pressão média resultante (c_p) do modelo R0305d para o ângulo de incidência do vento de 90° .

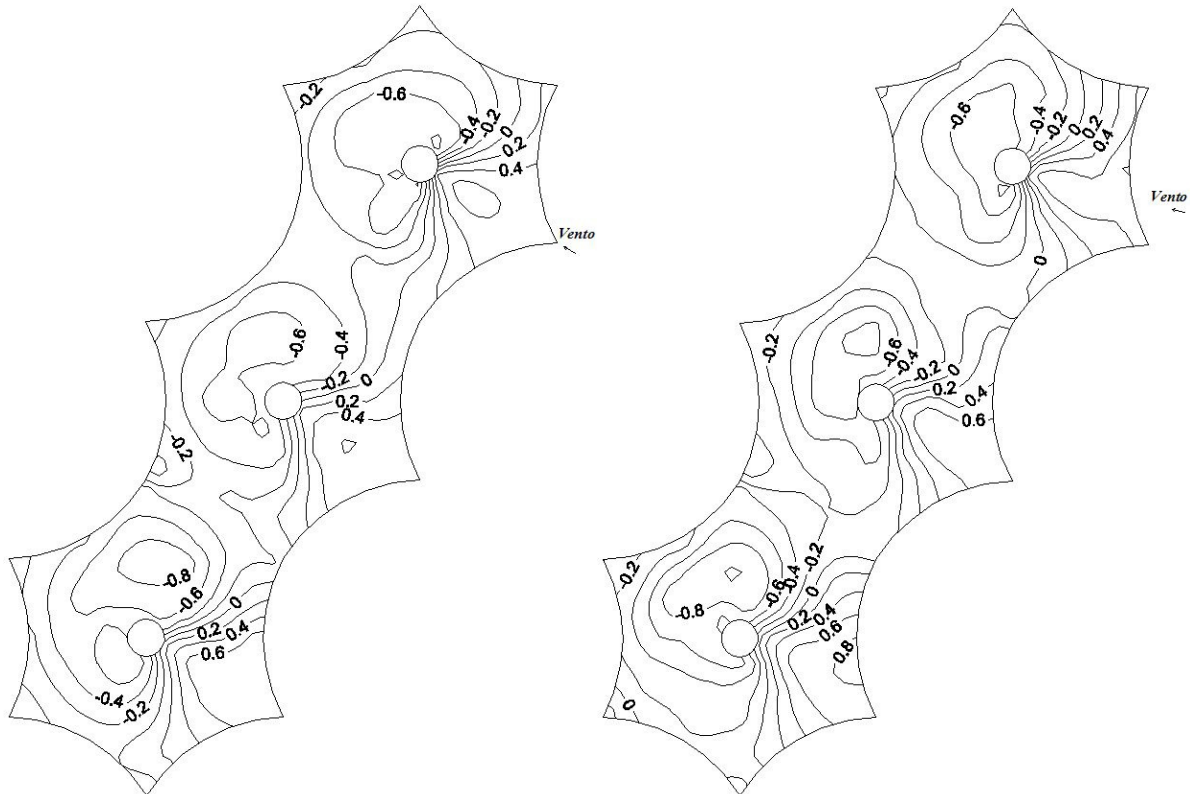


Figura 4.19: Vista superior: linhas isobáricas dos coeficientes de pressão média resultante (c_p) do modelo R0305t para os ângulos de incidência do vento de 0° e 15° .



Figura 4.20: Vista superior: linhas isobáricas dos coeficientes de pressão média resultante (c_p) do modelo R0305t para os ângulos de incidência do vento de 30°, 45°, 60° e 75°.

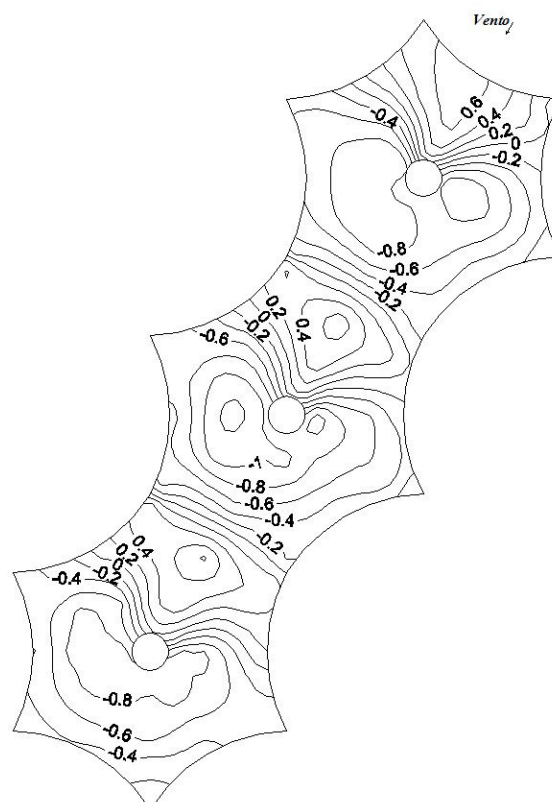


Figura 4.21: Vista superior: linhas isobáricas dos coeficientes de pressão média resultante (c_p) do modelo R0305t para o ângulo de incidência do vento de 90° .

Para comparar os valores de c_p^* média resultante dos modelos R0215, R0260, R0305, R0345, R0390, R0435 e R0475, foram feitos os gráficos mostrados nas figuras 4.22 a 4.25. Em todas as figuras observa-se que os valores são bastante próximos nas tomadas submetidas à sobrepressão (valores positivos). Já as tomadas submetidas à sucção (valores negativos) apresentam resultados mais dispersos, especialmente com o ângulo de incidência do vento de 0° (Fig. 4.22).

Nas figuras 4.26 a 4.29 são mostrados os gráficos para comparação entre os valores de c_p^* média resultante do modelo R0305c e do modelo R0305 sem cone. Apenas no gráfico para o ângulo de incidência do vento de 0° (Fig. 4.26) os valores dos modelos R0305 e R0305c aparecem mais afastados. Nas figuras 4.27 a 4.29, os dados obtidos para cada tomada estão bem próximos, indicando que o cone de fechamento no topo não altera significativamente o escoamento em torno da estrutura para os ângulos de incidência do vento de 15° , 30° e 45° .

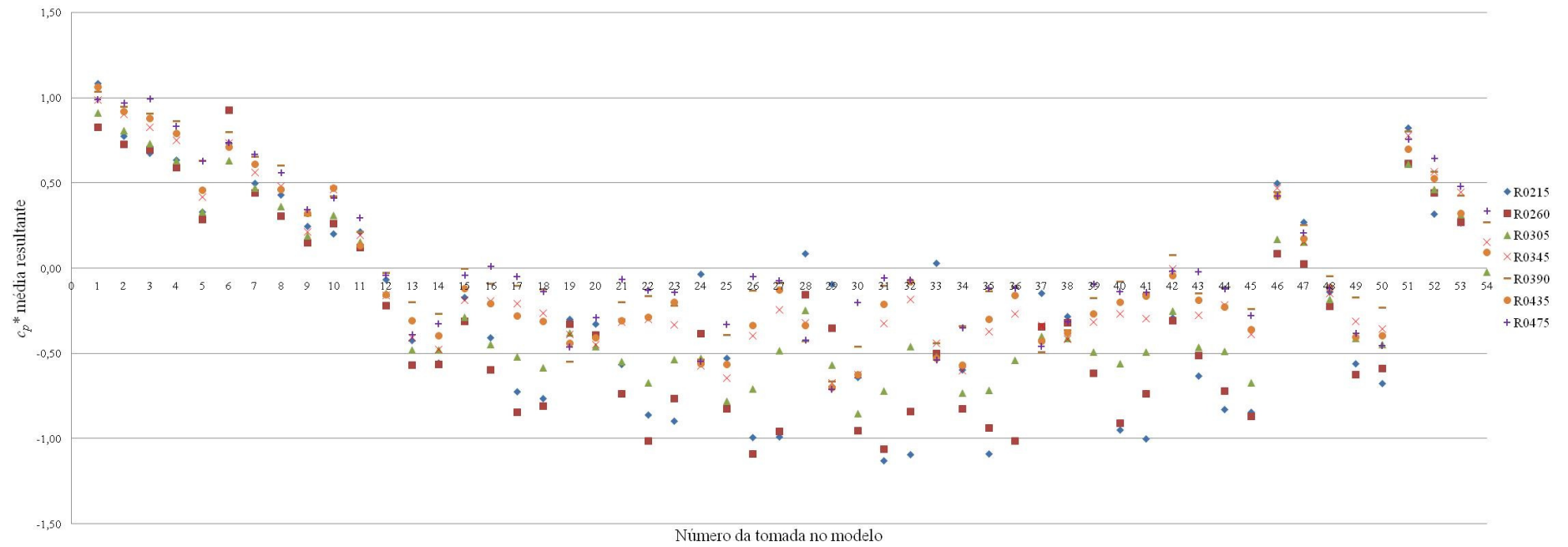


Figura 4.22: Comparação dos valores de c_p^* média resultante para o ângulo de incidência do vento = 0° para os modelos de um pico sem cone de fechamento no topo.

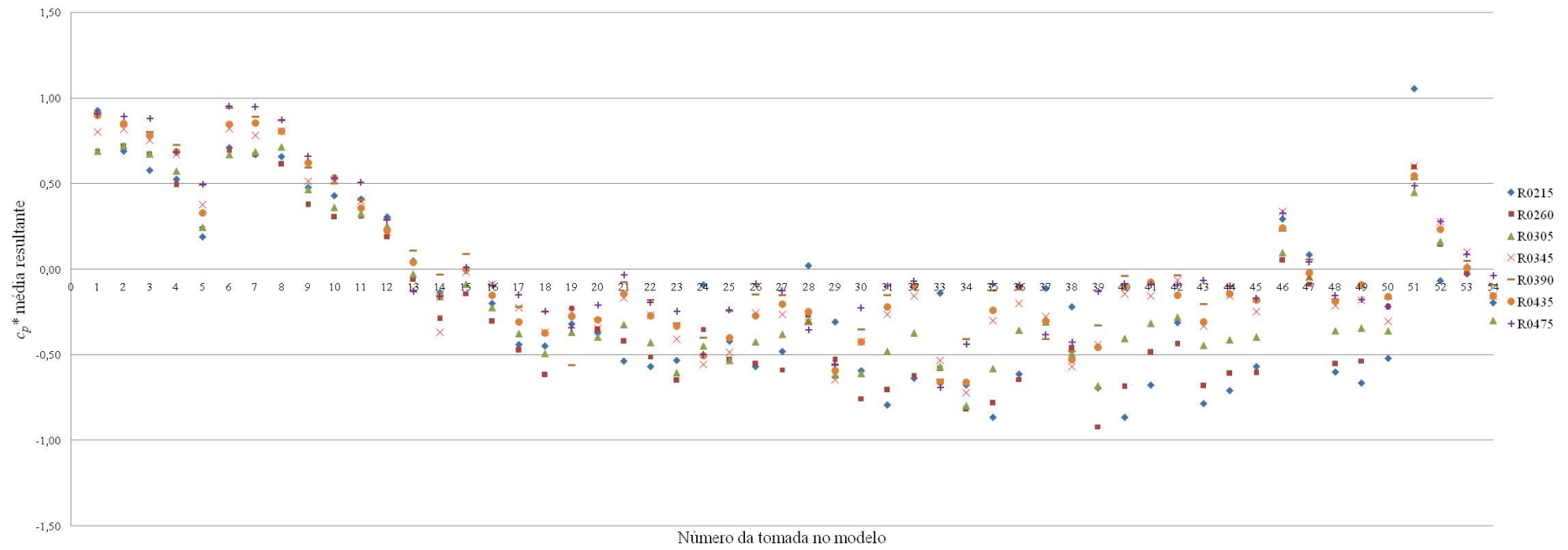


Figura 4.23: Comparação dos valores de c_p^* média resultante para o ângulo de incidência do vento = 15° para os modelos de um pico sem cone de fechamento no topo.

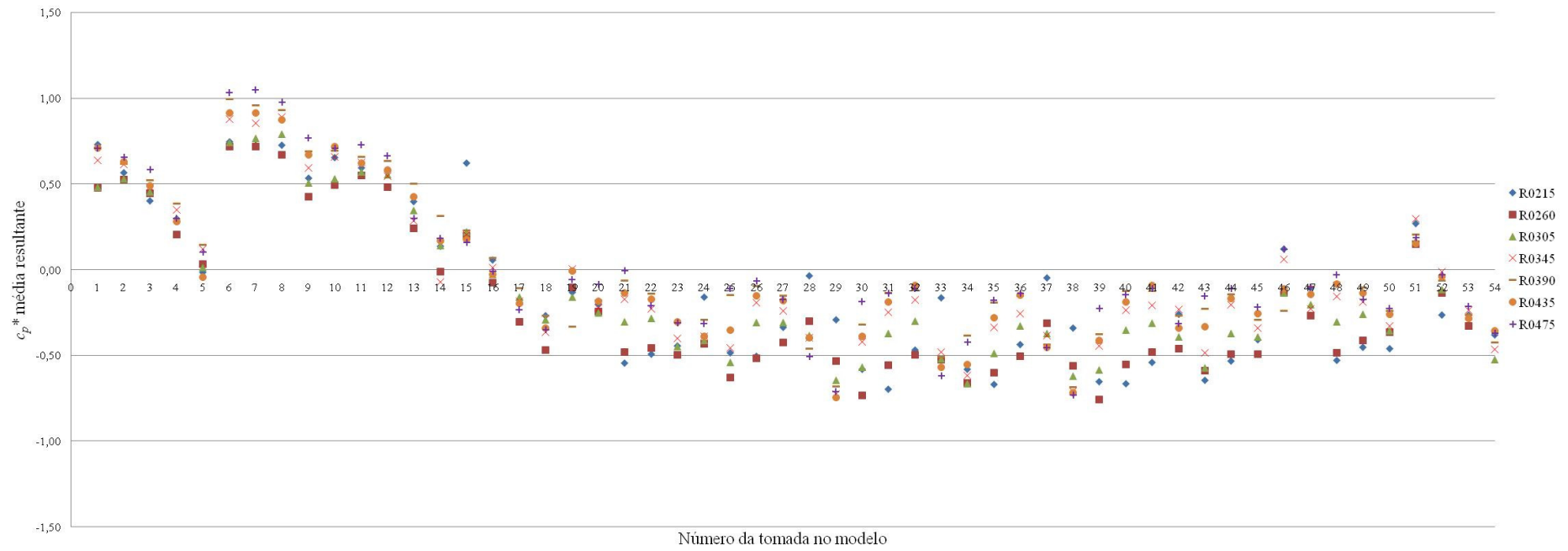


Figura 4.24: Comparação dos valores de c_p^* média resultante para o ângulo de incidência do vento = 30° para os modelos de um pico sem cone de fechamento no topo.

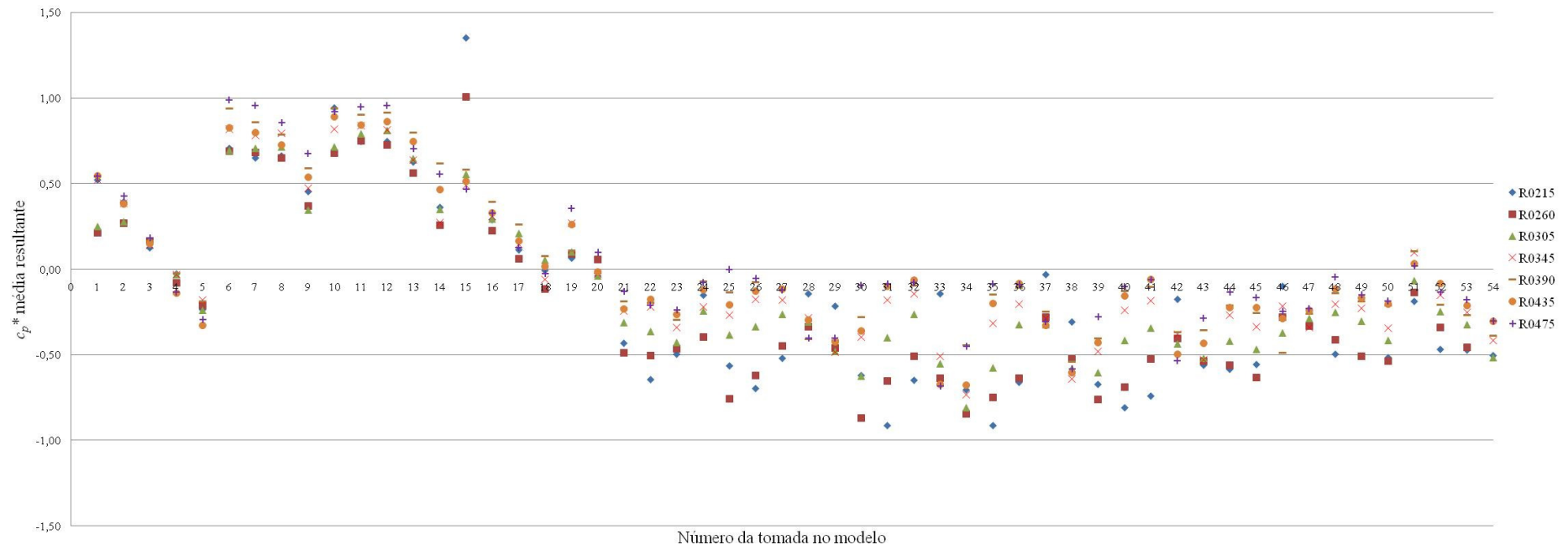


Figura 4.25: Comparação dos valores de c_p^* média resultante para o ângulo de incidência do vento = 45° para os modelos de um pico sem cone de fechamento no topo.

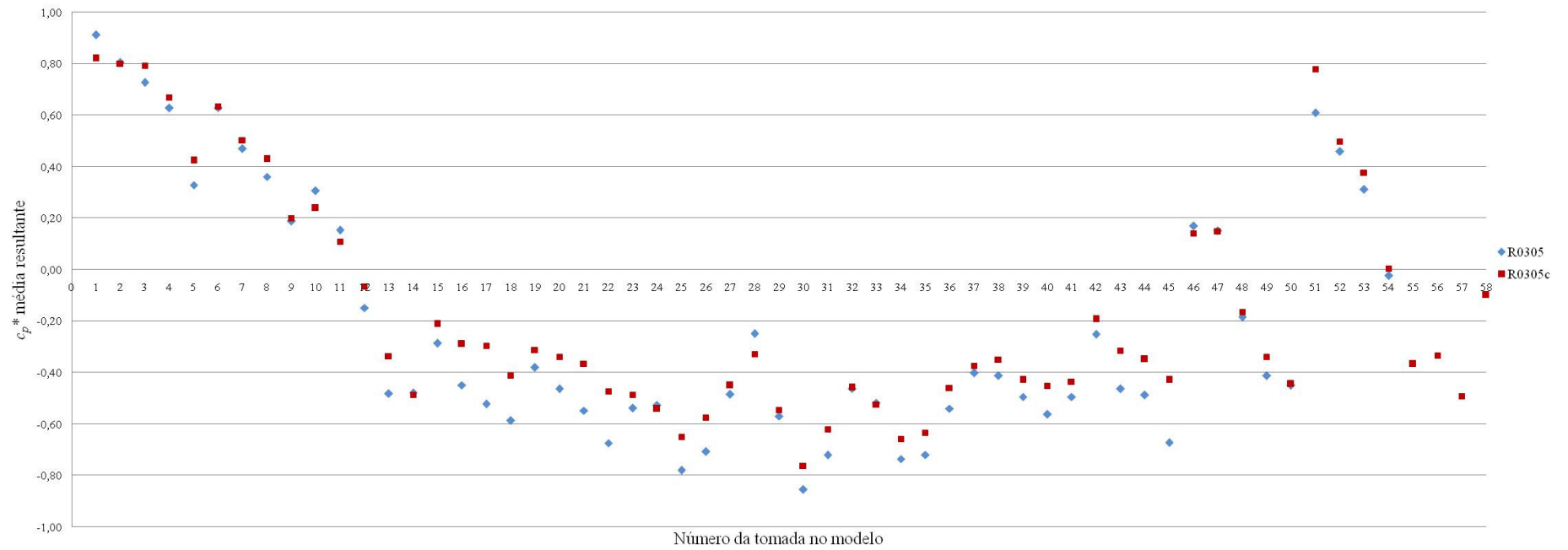


Figura 4.26: Comparação dos valores de c_p^* média resultante entre os modelos R0305 e R0305c para o ângulo de incidência do vento = 0°

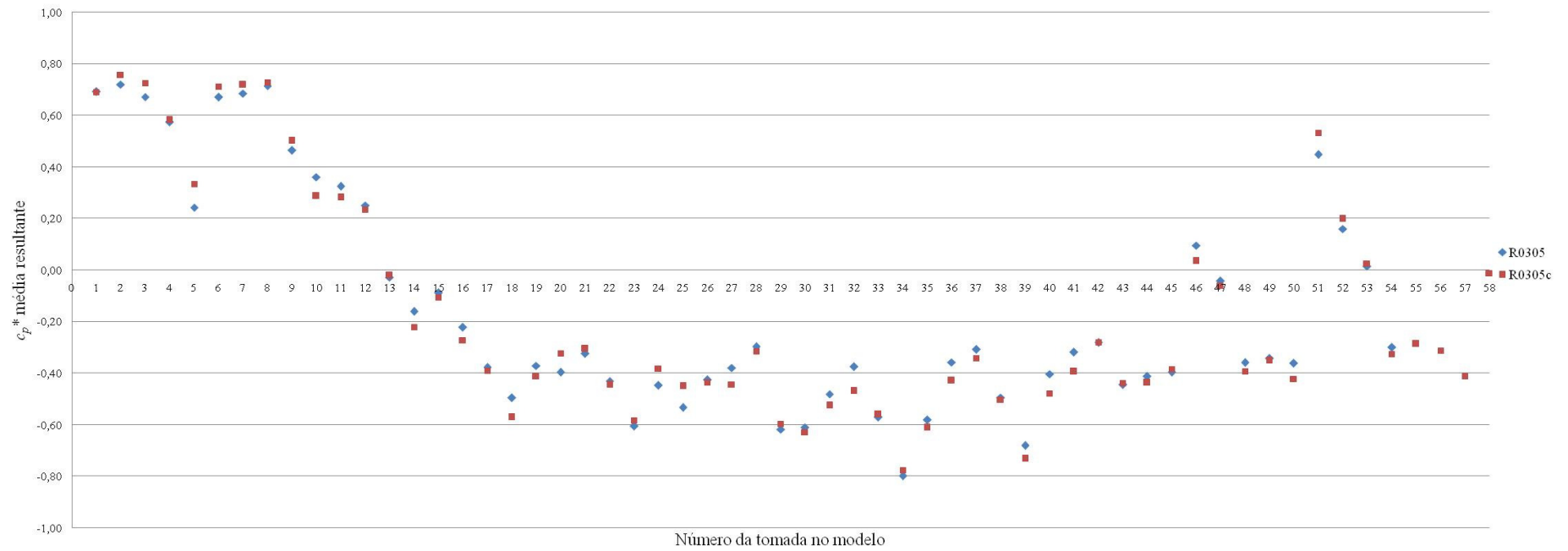


Figura 4.27: Comparação dos valores de c_p^* média resultante entre os modelos R0305 e R0305c para o ângulo de incidência do vento = 15°

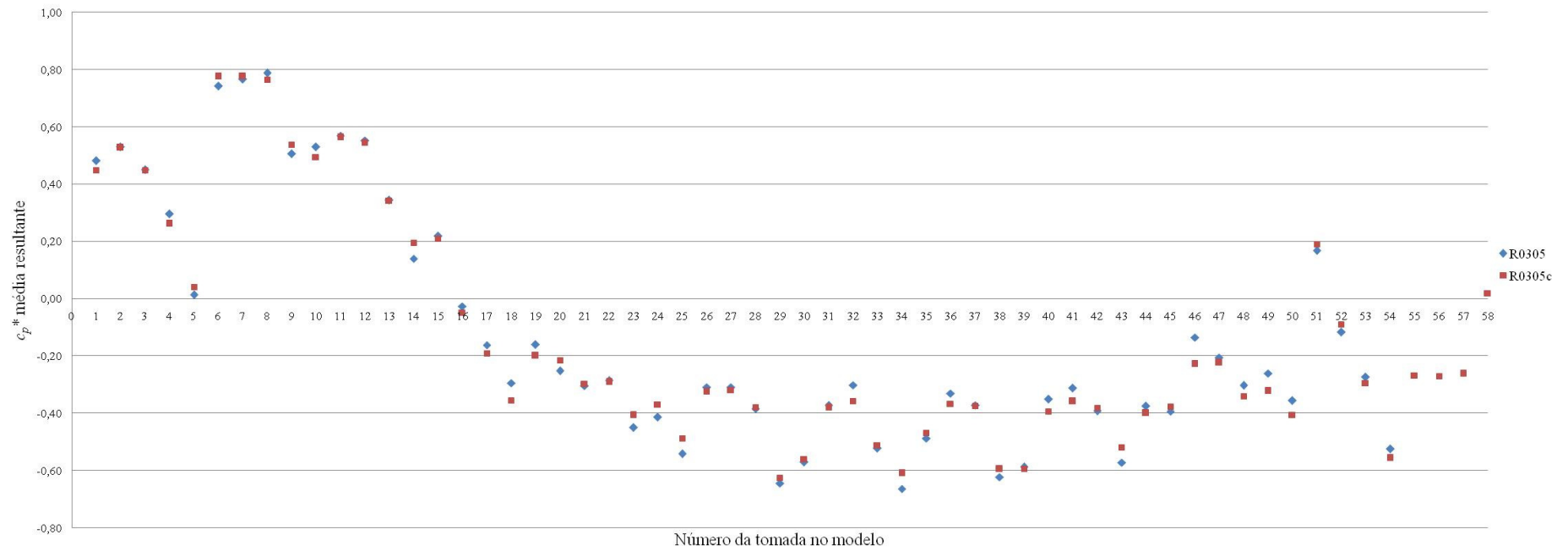


Figura 4.28: Comparação dos valores de c_p^* média resultante entre os modelos R0305 e R0305c para o ângulo de incidência do vento = 30°

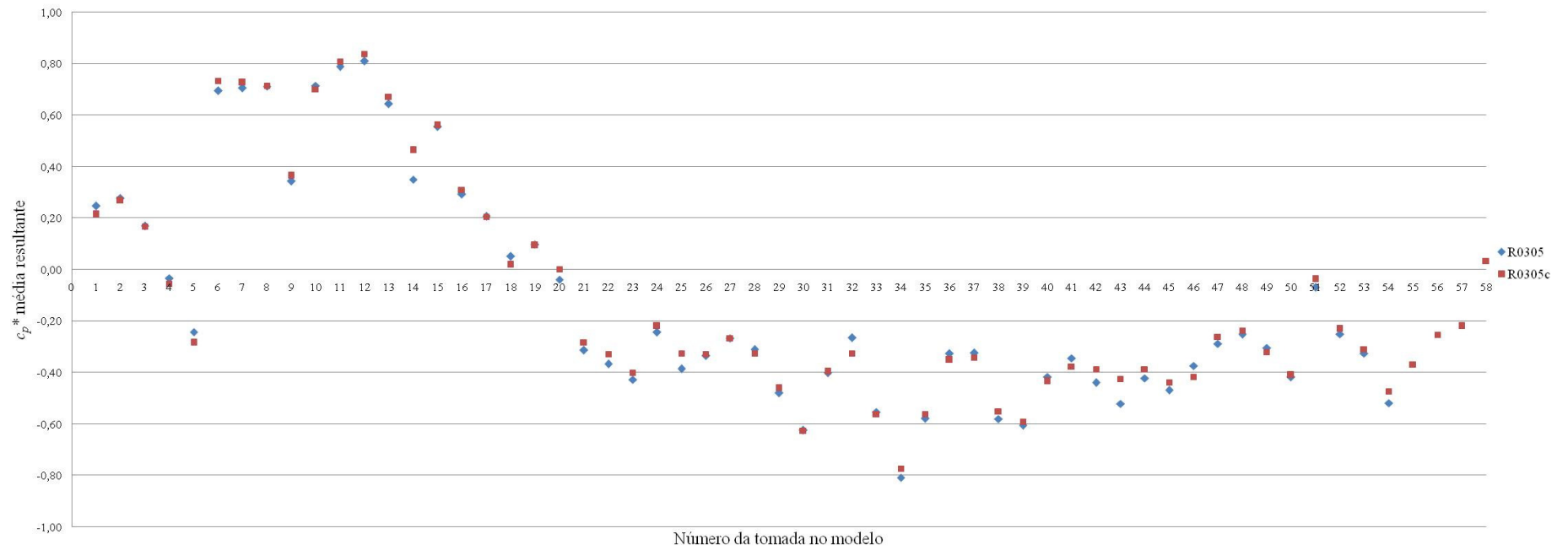


Figura 4.29: Comparação dos valores de c_p^* média resultante entre os modelos R0305 e R0305c para o ângulo de incidência do vento = 45°

As forças estáticas resultantes que atuam sobre as coberturas devido à ação do vento foram calculadas de acordo com a norma brasileira NBR 6123 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1988):

$$F = c_p^* \cdot q \cdot \Delta A$$

$$q = 0,000613 \cdot V_k^2$$

$$V_k = V_0 \cdot S_1 \cdot S_2 \cdot S_3$$

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

sendo:

F – integral das forças do vento nas áreas elementares, em cada ponto da cobertura esta força age perpendicularmente à superfície [kN];

c_p^* – coeficiente de pressão média resultante;

q – pressão dinâmica no topo da cobertura [kN/m²];

ΔA – área parcial, correspondente a uma pequena região da superfície da cobertura, a qual se pode considerar como plana com pressão constante (isto é, um mesmo valor de c_p^*) [m²];

V_k – velocidade característica do vento no topo da construção [m/s];

V_0 – velocidade básica do vento adequada ao local onde a estrutura será construída [m/s];

S_1 – fator topográfico;

S_2 – fator que considera a influência da rugosidade do terreno, das dimensões da edificação e de sua altura sobre o terreno;

S_3 – fator baseado em conceitos probabilísticos;

b – parâmetro meteorológico usado na determinação de S_2 ;

F_r – fator de rajada;

z – altura da construção acima do nível geral do terreno;

p – expoente da curva de potência caracterizado pelo tipo de terreno.

Os parâmetros necessários para o cálculo das forças foram obtidos da NBR 6123 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1988) considerando que as tensoestruturas serão construídas em Brasília-DF às margens do lago para realização de eventos de grande público:

$V_0 = 35$ m/s para uma estrutura a ser construída no Distrito Federal;

$S_1 = 1,0$ para terreno plano ou fracamente acidentado;

$p = 0,10$; $b = 0,94$ e $F_r = 1,00$ de acordo com a tabela 1 da NBR 6123 para classe A (maior dimensão horizontal ou vertical não excede 20 m) e categoria III (terrenos planos ou ondulados com obstáculos, tais como sebes e muros, poucos quebra-ventos de árvores, edificações baixas e esparsas);

z , S_2 , V_k e q – valores mostrados na tabela 4.4;

$S_3 = 1,0$ para grupo 2: edificações para hotéis e residências, para comércio e indústria com alto fator de ocupação;

ΔA – valores calculados com uma rotina programada em Ada95 que utiliza as coordenadas dos nós dos elementos triangulares da membrana.

c_p^* – valores mostrados nas tabelas B.1 a B.4 atribuídos às zonas da figura 4.30. A numeração das zonas é a mesma das tomadas. Foram testadas algumas opções de aglutinação de tomadas para obtenção de coeficientes de forma e simplificação do carregamento aplicado, mas observou-se que o resultado não representa bem a realidade porque o agrupamento de tomadas em grandes zonas é aplicável apenas em situações de baixo gradiente de pressões.

Tabela 4.4: Pressão dinâmica no topo das coberturas e parâmetros necessários para o seu cálculo.

Nome do modelo	Altura do terreno até o topo da membrana – z [m]	Fator S_2	V_k [m/s]	q [kN/m ²]
R0215	6,23	0,90	31,38	0,603504
R0260	6,90	0,91	31,70	0,616059
R0305	7,58	0,91	32,00	0,627666
R0345	8,18	0,92	32,24	0,637309
R0390	8,85	0,93	32,50	0,647502
R0435	9,53	0,94	32,74	0,657091
R0475	10,13	0,94	32,94	0,665168

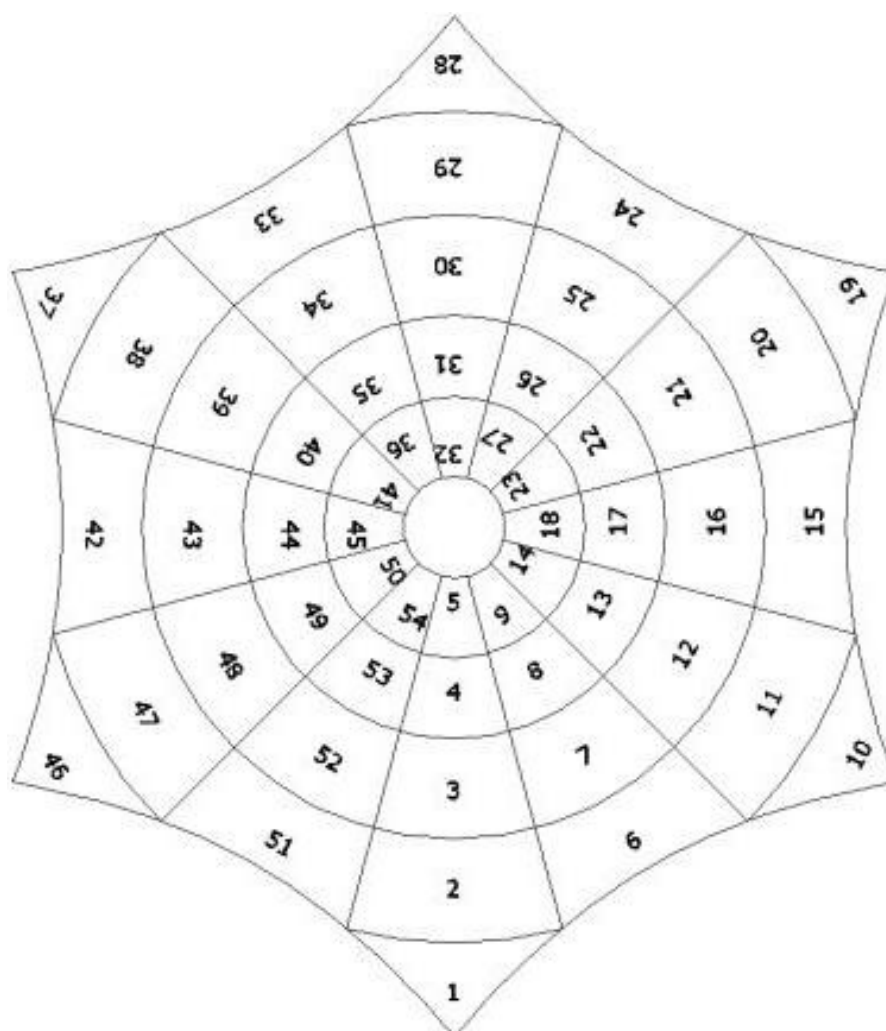


Figura 4.30: Localização das zonas

Os valores máximos de sucção e sobrepressão (Tab. 4.5) calculados ocorreram com maior frequência com os ângulos de incidência do vento de 30° e 0°. Dos 1294 elementos triangulares que compõem a membrana, mais de 88% está submetido a forças estáticas resultantes em módulo menores do que 1 kN (Tab. 4.6) e mais de 59% a forças em módulo menores do que 0,5 kN (Tab. 4.7). Isso mostra que a maior parte da superfície dos modelos ensaiados não está sujeita a picos severos de sucção ou sobrepressão.

Tabela 4.5: Valores máximos de sucção e sobrepressão em cada modelo e ângulo de incidência do vento em que ocorreram.

Modelo	Sucção máxima		Sobrepressão máxima	
	Força estática resultante (kN)	Ângulo de incidência do vento	Força estática resultante (kN)	Ângulo de incidência do vento
R0215	-2,62	0°	3,21	45°
R0260	-2,68	0°	1,52	0°
R0305	-1,96	0°	1,52	30°
R0345	-1,53	0°	1,91	30°
R0390	-1,55	30°	2,50	30°
R0435	-1,75	30°	2,59	30°
R0475	-1,99	0°	3,35	30°

Tabela 4.6: Quantidade de elementos triangulares da membrana com forças estáticas resultantes em módulo menores do que 1 kN

Modelo	Ângulo de incidência do vento			
	0°	15°	30°	45°
R0215	92,3%	95,5%	97,7%	93,4%
R0260	90,6%	95,7%	97,4%	95,1%
R0305	94,9%	95,9%	96,5%	96,1%
R0345	96,4%	95,1%	94,6%	95,4%
R0390	92,8%	94,0%	93,2%	90,6%
R0435	91,6%	92,3%	92,7%	90,8%
R0475	89,2%	89,8%	91,9%	88,9%

Tabela 4.7: Quantidade de elementos triangulares da membrana com forças estáticas resultantes em módulo menores do que 0,5 kN

Modelo	Ângulo de incidência do vento			
	0°	15°	30°	45°
R0215	66,3%	68,6%	73,4%	67,2%
R0260	60,7%	62,5%	70,7%	63,4%
R0305	59,4%	69,0%	70,6%	71,7%
R0345	69,0%	74,6%	72,6%	74,8%
R0390	73,3%	77,4%	75,6%	76,2%
R0435	66,8%	68,7%	70,4%	72,8%
R0475	69,9%	74,0%	73,1%	74,3%

Com os valores da pressão estática resultante do modelo R0305 para os ângulos de incidência do vento de 0°, 15°, 30° e 45°, foram obtidos os carregamentos para aplicação na tensoestrutura de um pico no programa LightsGiD com visualização de gráficos nos programas AutoCAD e GiD.

Para comparar com os resultados do túnel de vento, o mesmo procedimento foi realizado com valores de carga utilizados por algumas empresas que não realizam ensaios antes da construção de seus projetos de coberturas com membrana. Foram aplicados dois carregamentos distribuídos ortogonais à superfície dos elementos de membrana de 0,7355 kN/m² com sentidos opostos para simular os carregamentos de sucção e sobrepressão na membrana (SILVA, 2006).

Conforme orientação de Forster e Mollaert (2004), para análise inicial, as cargas foram aplicadas sem coeficientes de segurança. A combinação de carga utilizada inclui peso próprio, pré-tracionamento e vento. O pré-tracionamento de $1,5 \times 10^5$ kN foi aplicado apenas nas extremidades dos cabos da borda inferior, que gera uma tensão máxima na membrana, para os carregamentos aplicados obtidos dos ensaios, próxima do limite recomendado de 6% da sua capacidade de tração. Os dados dos cabos de borda foram obtidos do primeiro exemplo do programa Lights, para o cabo número 4, dentro do arquivo de entrada *material.txt* (ARCARO, 2006b), sendo o módulo de Young: $1,568 \times 10^8$ kPa; peso/unidade de comprimento:

$1,508710 \times 10^{-2}$ kN/m; área da seção transversal: $1,817580 \times 10^{-4}$ m²; e a carga última: 216,188 kN. Os dados da membrana são os mesmos utilizados na seção 3.4.1 desta tese.

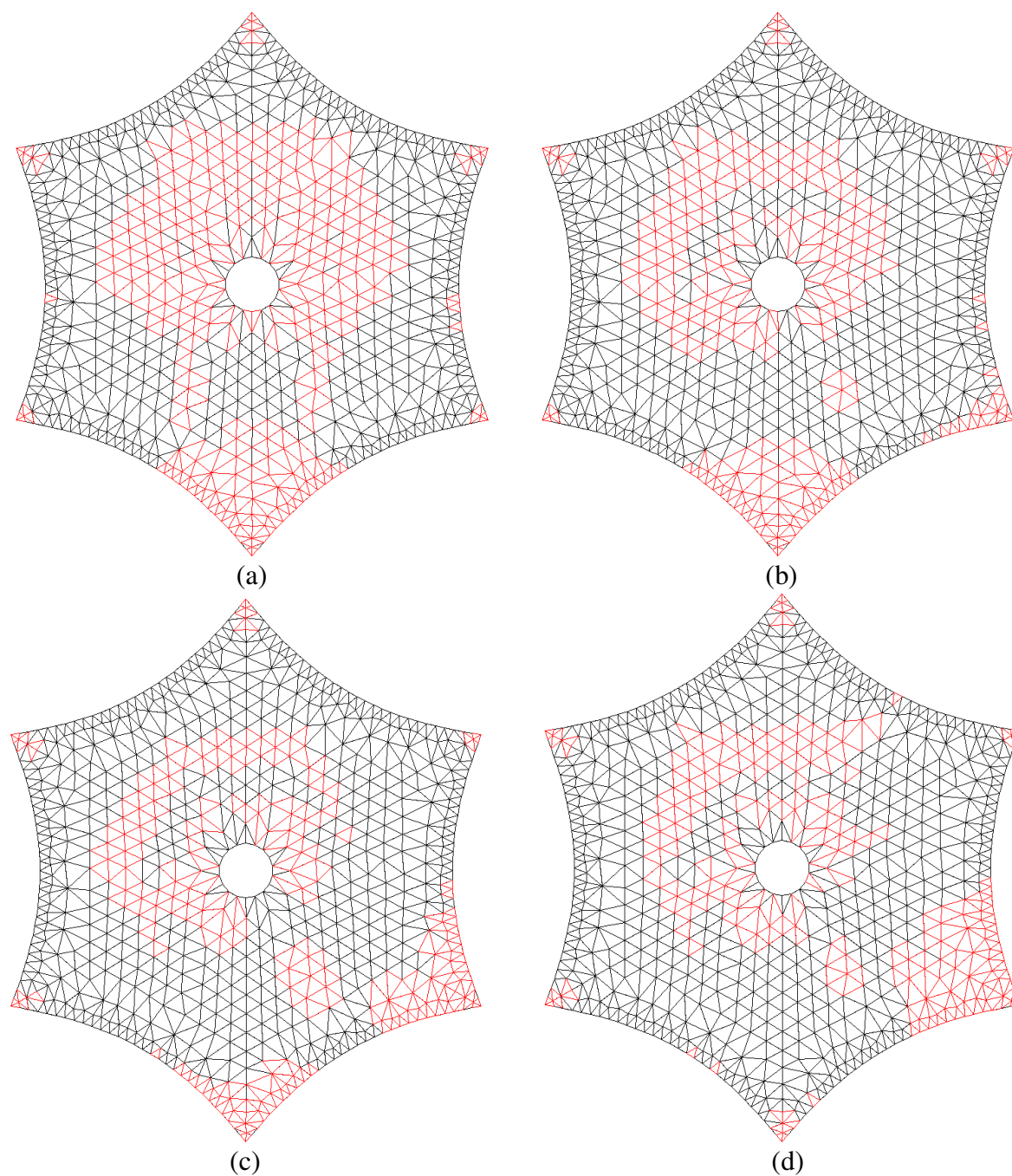


Figura 4.31: Resultado do modelo R0305 do LightsGiD no AutoCAD: (a) vento a 0°; (b) vento a 15°; (c) vento a 30°; (d) vento a 45°.

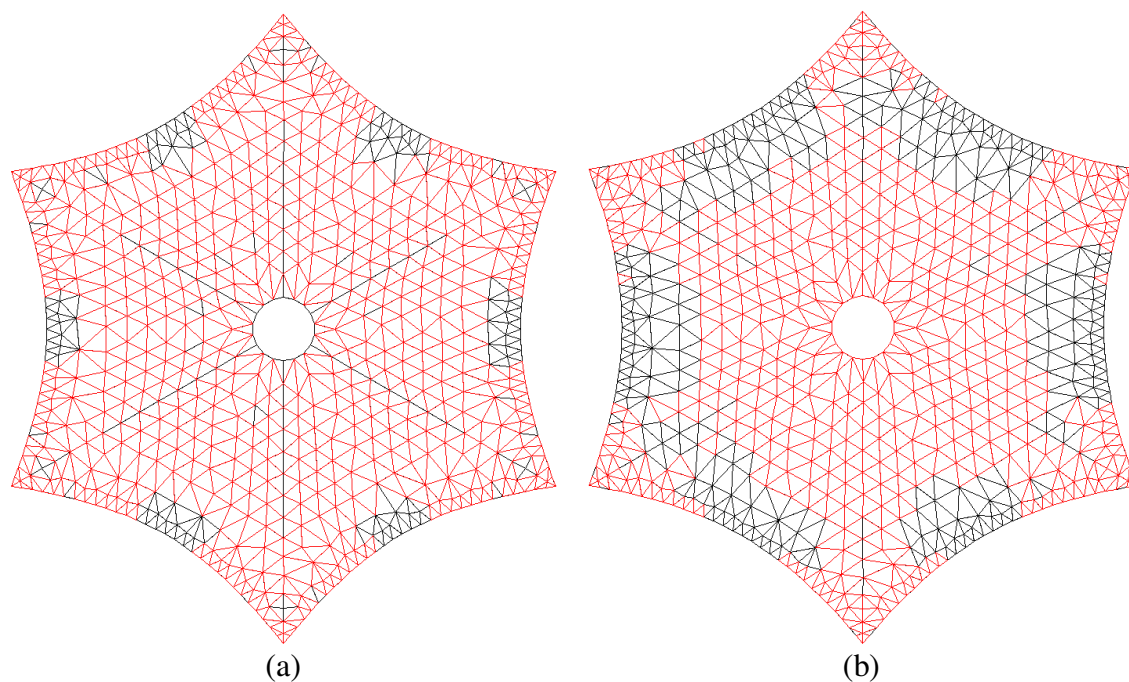


Figura 4.32: Resultado do modelo R0305 do LightsGiD no AutoCAD: (a) sobrepressão de $0,7355 \text{ kN/m}^2$; (b) sucção de $0,7355 \text{ kN/m}^2$.

As partes da cobertura que se apresentam em vermelho (Figs. 4.31 e 4.32) são aquelas submetidas à compressão em ao menos uma das direções principais, ou seja, estão sujeitas a enrugamento da membrana. As outras regiões estão sob esforço de tração nas duas direções principais, condição desejável neste tipo de estrutura.

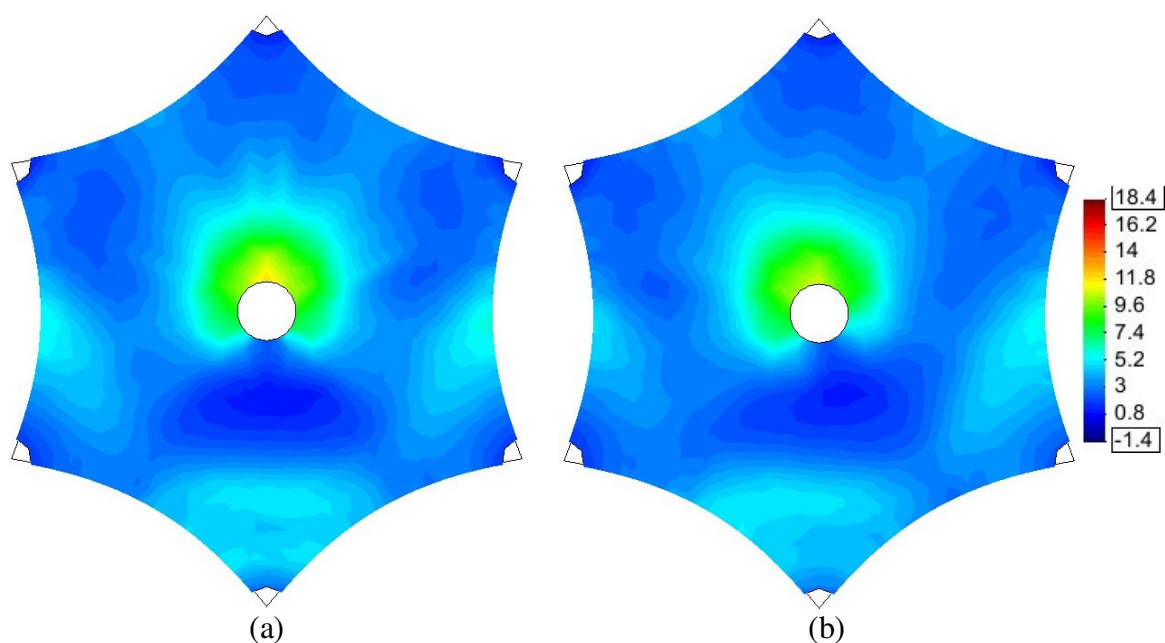


Figura 4.33: Tensão principal 1 nos elementos da membrana [kPa] do modelo R0305: (a) vento a 0° ; (b) vento a 15° .

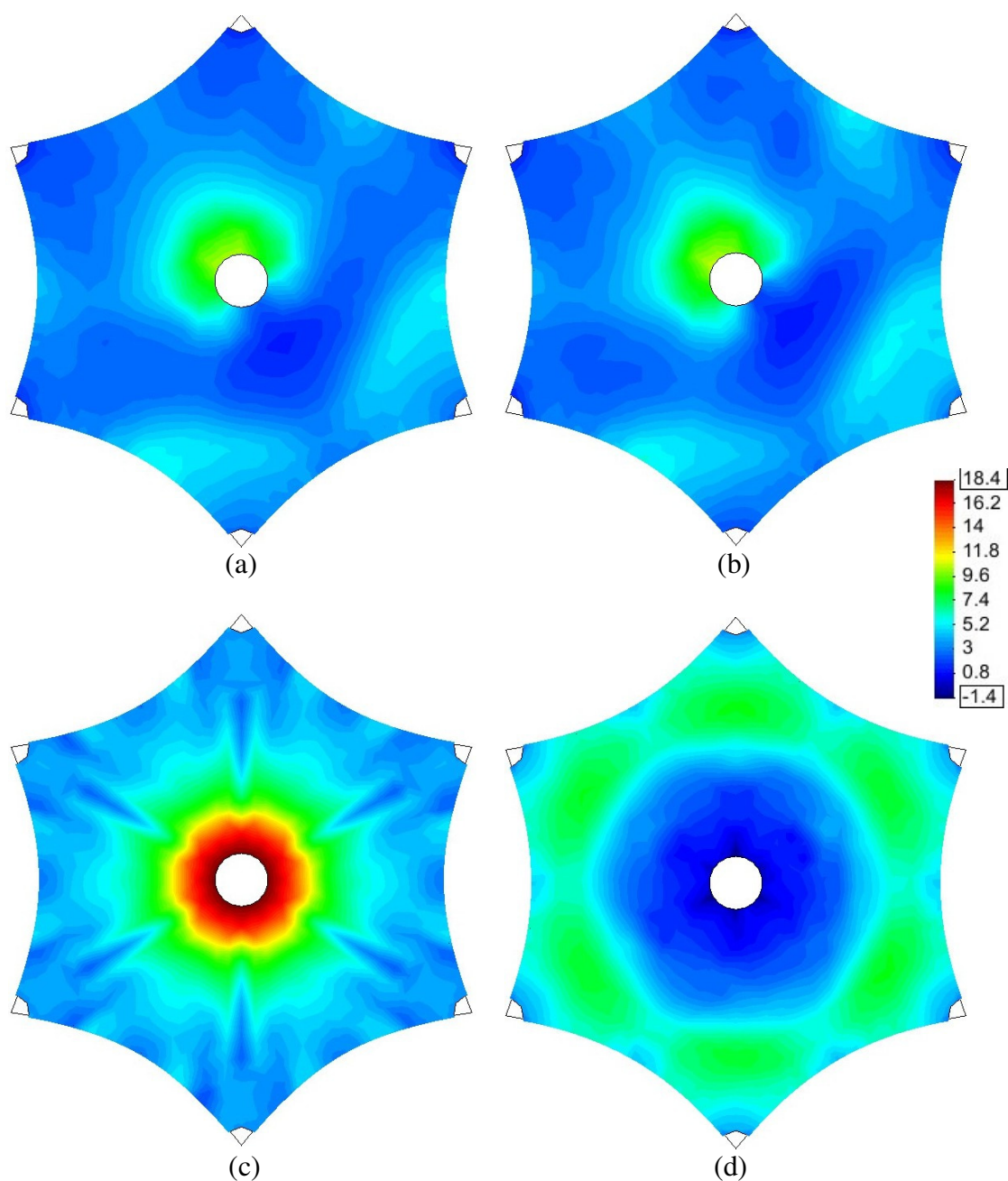


Figura 4.34: Tensão principal 1 nos elementos da membrana [kPa] do modelo R0305: (a) vento a 30°; (b) vento a 45°; (c) sobrepressão de 0,7355 kN/m²; (d) sucção de 0,7355 kN/m².

As tensões principais da tensoestrutura com a aplicação dos carregamentos obtidos nos ensaios (Figs. 4.33; 4.34: (a) e (b); 4.35) apresentam na maior parte da superfície valores inferiores aos resultados obtidos com o carregamento distribuído (Figs. 4.34: (c) e (d); 4.36).

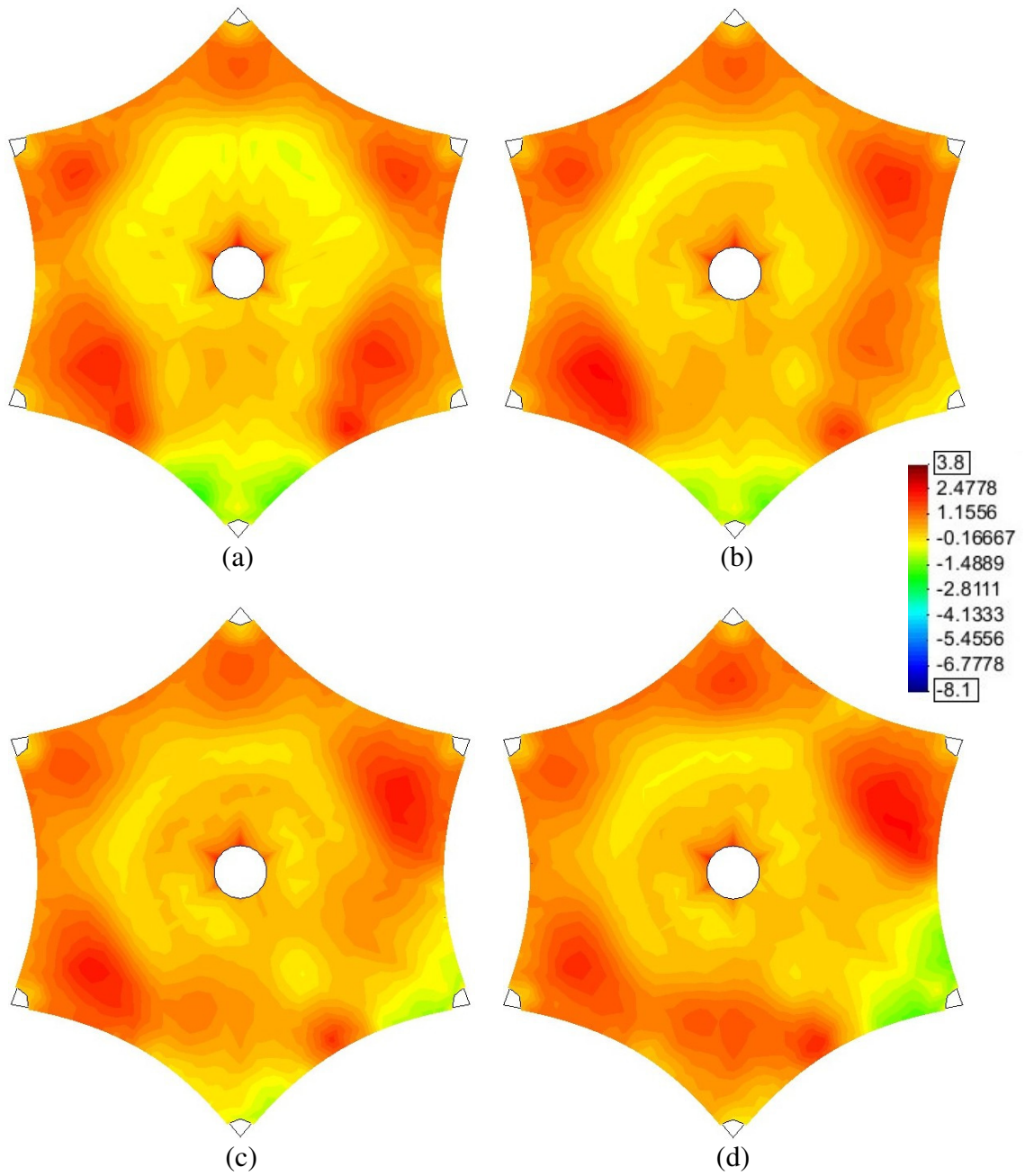


Figura 4.35: Tensão principal 2 nos elementos da membrana [kPa] do modelo R0305: (a) vento a 0°; (b) vento a 15°; (c) vento a 30°; (d) vento a 45°.

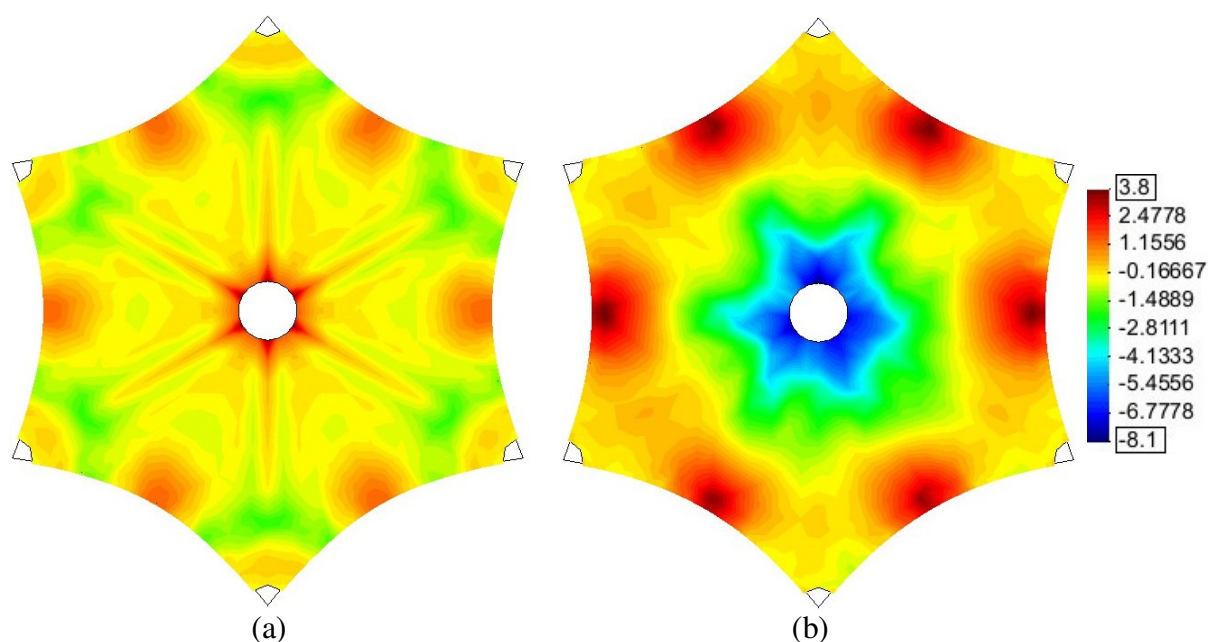


Figura 4.36: Tensão principal 2 nos elementos da membrana [kPa] do modelo R0305: (a) sobrepressão de $0,7355 \text{ kN/m}^2$; (b) sucção de $0,7355 \text{ kN/m}^2$.

As forças atuantes nos cabos de borda com a aplicação dos carregamentos obtidos nos ensaios (Fig. 4.37; 4.38: (a) e (b)) apresentam valores inferiores ao resultado obtido com o carregamento distribuído que simula sucção (Fig. 4.38: (d)).

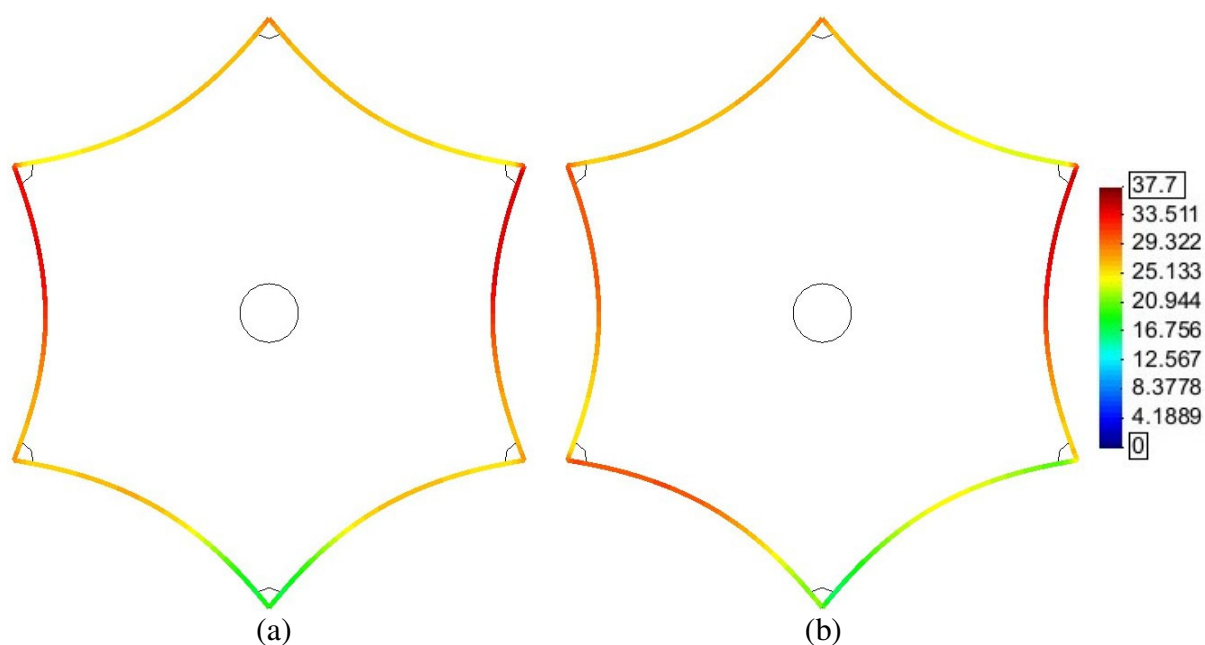


Figura 4.37: Força atuando nos cabos de borda [kN] do modelo R0305: (a) vento a 0° ; (b) vento a 15° .

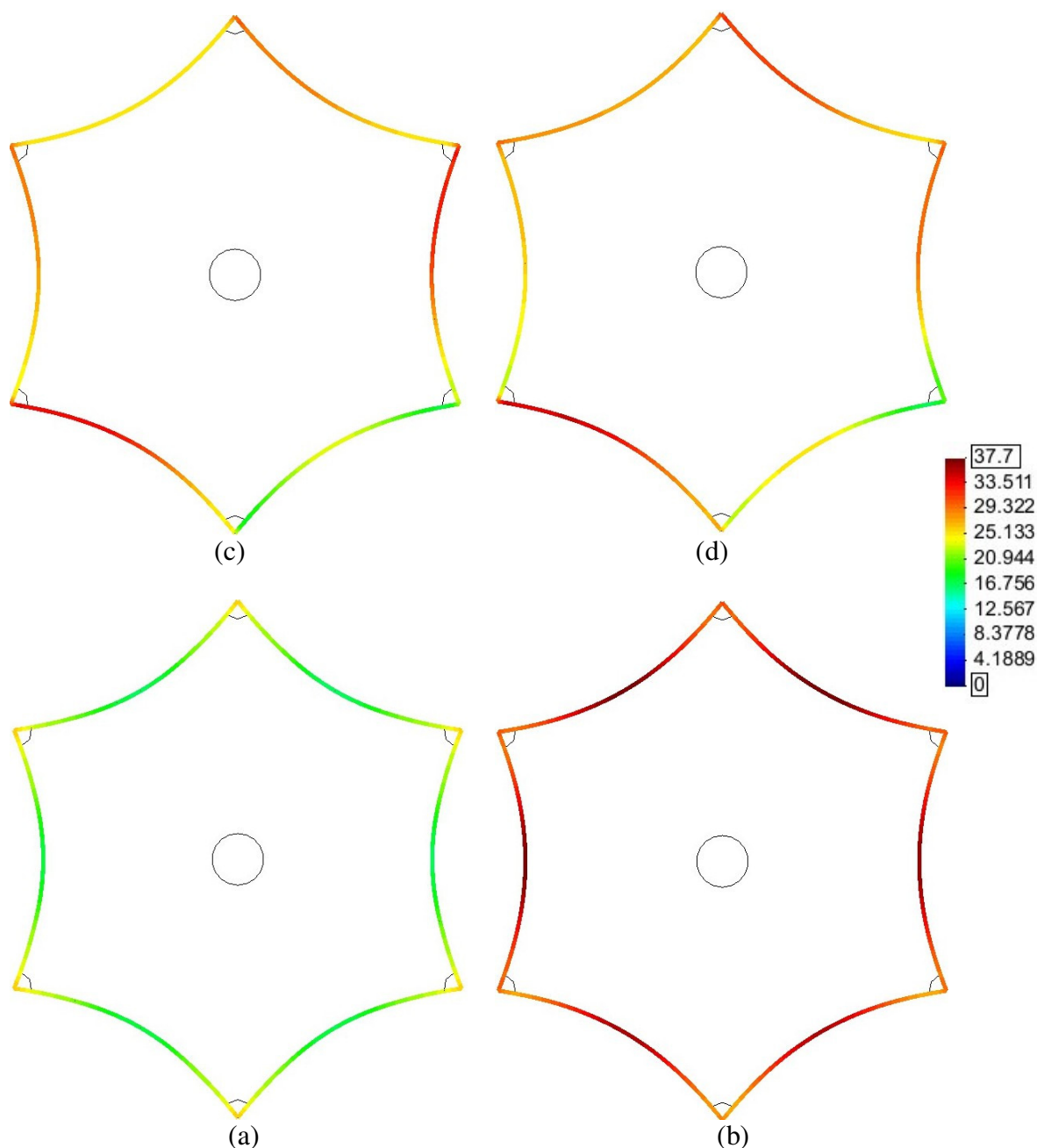


Figura 4.38: Força atuando nos cabos de borda [kN] do modelo R0305: (a) vento a 30°; (b) vento a 45°; (c) sobrepressão de 0,7355 kN/m²; (d) sucção de 0,7355 kN/m².

A utilização dos valores de carregamento distribuído que algumas empresas aplicam quando não realizam testes em túnel de vento pode levar a um superdimensionamento da membrana, cabos de borda, e como consequência, de mastros e fundações. Apesar das simulações em túnel de vento apresentarem certas limitações e os efeitos dinâmicos não estarem sendo considerados, o uso de coeficientes adequados é essencial para que haja menos risco de acidentes provocados pela ação do vento.

5 CONCLUSÕES

Os coeficientes de pressão interna, externa e resultante para os modelos de tensoestruturas cônicas de um pico sem (R0215, R0260, R0305, R0345, R0390, R0435 e R0475) e com cone de fechamento no topo (R0305c), de dois (R0305d) e três picos (R0305t) foram obtidos a partir dos ensaios dos modelos em túnel de vento. Com estes dados foram calculadas as forças estáticas que devem ser utilizadas no cálculo e dimensionamento destas estruturas.

Observou-se que os valores máximos de sucção e sobrepressão calculados ocorreram com maior frequência com os ângulos de incidência do vento de 30° e 0° e que a maior parte da superfície dos modelos ensaiados não está sujeita a picos severos de sucção ou sobrepressão.

Foram testadas algumas opções de aglutinação de tomadas para obtenção de coeficientes de forma e simplificação do carregamento aplicado, mas observou-se que o resultado não representa bem a realidade porque o agrupamento de tomadas em grandes zonas é aplicável apenas em situações de baixo gradiente de pressões.

Buscou-se resumir os resultados dos ensaios com os modelos de dois e três picos com o cálculo de fatores de redução, mas não foi possível devido à grande variabilidade dos valores dos coeficientes de pressão obtidos. Nestes modelos, observou-se, em geral, um aumento da sobrepressão e uma redução da sucção nos picos localizados a sotavento.

Os carregamentos obtidos dos experimentos foram aplicados em uma tensoestrutura de um pico (R0305) no programa LightsGiD com visualização de gráficos nos programas AutoCAD e GiD, e o resultado foi comparado com valores de carga utilizados por algumas

empresas que não realizam testes em túnel de vento antes da construção de seus projetos de coberturas com membrana.

As tensões principais na membrana e as forças nos cabos de borda com a aplicação dos carregamentos obtidos nos ensaios apresentam, em geral, valores inferiores aos resultados obtidos com as cargas distribuídas utilizadas quando não são realizados experimentos.

A aplicação na maioria dos casos de coeficientes de pressão incorretos nos projetos faz com que os riscos de acidentes provocados pela ação do vento sejam maiores.

Para melhorar a precisão dos dados que estão sendo usados como carregamento de vento em tensoestruturas é necessário disponibilizar mais informações, especialmente para os projetos menores em que testes em túnel de vento não são economicamente viáveis e não há tempo hábil para sua realização. Para atingir esta meta, mais séries de testes em túnel de vento devem ser feitas com configurações típicas, metodologia clara e divulgação de resultados. Uma vez que existam dados suficientes publicados, estes poderiam ser utilizados para a elaboração de normas específicas com orientações para projeto, construção e manutenção de estruturas de membrana.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Alguns temas para futuros trabalhos de pesquisa em tensoestruturas:

- Determinação do padrão de corte da membrana buscando uma distribuição mais uniforme de tensões e uma redução nas perdas do tecido;
- Efeitos das costuras na distribuição de tensões na membrana após a montagem da estrutura;
- Experimentos em túnel de vento com outros modelos de tensoestruturas para avaliar os esforços provocados pelo vento;
- Modelagem do carregamento gerado pela ação do vento em tensoestruturas com dinâmica dos fluidos computacional (CFD);
- Desenvolvimento de ferramentas e realização de experimentos com diferentes membranas para determinar suas características, como tensões de ruptura, módulo de Elasticidade, coeficiente de Poisson, desempenho acústico, durabilidade, resistência ao fogo, propriedades térmicas e de iluminação, entre outras.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVIM, R. A. A.; PAULETTI, R. M. O. *Avaliação experimental de propriedades mecânicas dos tecidos estruturais*, 2004. Disponível em: <http://www.lmc.ep.usp.br/people/pauletti/Publicacoes.html>. Acesso em: 01 fev. 2011.

ARCARO, V. F. *A Simple Procedure for Analysis of Cable Network Structures*. Campinas, 2005. Disponível em: < <http://www.arcaro.org/tension>>. Acesso em: 25 mar. 2005.

ARCARO, V. F. *A Simple Procedure for Shape Finding and Analysis of Fabric Structures*. Campinas, 2006. Disponível em: < <http://www.arcaro.org/tension>>. Acesso em: 15 set. 2006.

ARCARO, V. F. *Lights User's Manual*. Campinas, 2006. Disponível em: < <http://www.arcaro.org/tension>>. Acesso em: 15 set. 2006.

ARMIJOS, S.J. *Fabric Architecture: Creative Resources for Shade, Signage and Shelter*. Londres: W. W. Norton & Co., 2008. 272p. ISBN 978-0-393-73236-8

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 6023*: informação e documentação: referências: elaboração. Rio de Janeiro, 2002.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 6024*: informação e documentação: numeração progressiva das seções de um documento escrito: apresentação. Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 6027*: informação e documentação: sumário: apresentação. Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 6028*: informação e documentação: resumo: apresentação. Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 6123*: forças devidas ao vento em edificações. Rio de Janeiro, 1988.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 10520*: apresentação de citações em documentos. Rio de Janeiro, 1992.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 14724: informação e documentação: trabalhos acadêmicos: apresentação*. Rio de Janeiro, 2002.

BAHAMÓN, A. *Arquitetura Efémera Textil*. Lisboa: Dinalivro, 2004. 175p. ISBN 972-576-348-3

BERGER, H. *Light Structures – Structures of Light: The Art and Engineering of Tensile Architecture*. Bloomington: AuthorHouse, 2005. 248p. ISBN 1-4208-5267-1

BLESSMANN, J. *Aerodinâmica das construções*. Porto Alegre: Ed. da UFRGS, 1990. 263p.

BLESSMANN, J. The Boundary Layer Wind Tunnel of UFRGS. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Amsterdam, v. 10, p. 231-248, 1982.

BORGES FILHO, J. P. *Projeto de Tensoestruturas em Membrana com Aplicação de Programação Não-Linear*. Brasília, Tese (Doutorado), PECC-UnB. 2006.

BUCHHOLDT, H. A. *An introduction to cable roof structures*. Cambridge: Thomas Telford, 1998. 304p. ISBN 0727726242

BURTON, J.; GOSLING, P. D. Wind loading pressure coefficients on a conic shaped fabric roof – experimental methods. *Journal of the International Association for Shell and Spatial Structures*, v. 45, n. 146, p. 183-189, 2004.

DREW, P. *New Tent Architecture*. Londres: Thames & Hudson, 2008. 208p. ISBN 0-500-34243-1

FARELL, C.; BLESSMANN, J. On critical flow around smooth circular cylinders. *Journal of Fluid Mechanics*, v. 136, p.375-391, 1983.

FIGUEROLA, V. *Alta costura*. Disponível em:
<http://www.piniweb.com/revistas/au/indez.asp?MATE6_COD=16706>. Acesso em: 10 fev. 2004.

FORSTER, B.; MOLLAERT, M. *European Design Guide for Tensile Surface Structures*. Bruxelas: TensiNet, 2004. 354p. ISBN 90-8086-871-X

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*, v. 89, p. 1351-1368, 2001.

GONÇALVES, R. M.; MUNAIAR NETO, J.; SALES, J. J.; MALITE, M. *Ação do vento nas edificações: teoria e exemplos*. São Paulo: EESC-USP, 2007. 138p. ISBN 978-85-85205-76-8

HABER, R. B.; ABEL, J. F. Initial equilibrium solution methods for cable reinforced membranes. Part I – Formulations. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, v. 30, p. 263-284, 1982.

HARRIS, J. B.; LI, K. P-K. *Masted Structures in Architecture*. Oxford: Architectural Press, 1996. ISBN 0 7506 1282 7.

HUNTINGTON, C.G. *The tensioned fabric roof*. Reston: ASCE Publications, 2003. 213p. ISBN 0-7844-0428-3

KAZAKEVITCH, M. The aerodynamics of a hangar membrane roof. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, v. 77&78, p. 157-169, 1998.

KOCH, K.M.; HABERMANN, K. J. *Membrane Structures: Innovative Building with Film and Fabric*. Munique: Prestel Verlag, 2004. 264p. ISBN 3-7913-3049-7

KOLOUSEK, V.; PIRNER, M.; FISCHER, O.; NAPRSTEK, J. *Wind effects on civil engineering structures*. Amsterdam: Elsevier, 1984. 571p. ISBN 0-444-99636-2

KRONENBURG, R. *Portable Architecture: Design and Technology*. Berlim: Birkhäuser Verlag, 2008. 160p. ISBN 978-3-7643-8324-4

LEWIS, W. J. Lightweight tension membranes – an overview, *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*, v. 126. n. 4, p.171-181, 1998.

LOREDO-SOUZA, A. M.; SCHETTINI, E. B. C.; PALUCH, M.J. *Simulação da camada limite atmosférica em túnel de vento*. In: Sergio Viçosa Möler; Jorge Hugo Silvestrini. *Turbulência*.: ABCM, 2004. v. 4, p. 137-163.

LOREDO-SOUZA, A. M.; ROCHA, M. M. *Técnicas disponíveis no LAC/UFRGS para estudos teórico-experimentais de tensoestruturas submetidas às ações estáticas e dinâmicas do vento*. In: SIMPOSIO LATINOAMERICANO DE TENSOESTRUTURAS, IV, 2011, Montevidéu. Apresentação em mesa redonda.

MACHADO, D. S. M., *Caracterização aerodinâmica de cabos de pontes estaiadas submetidos à ação combinada de chuva e vento*. Porto Alegre, Dissertação (Mestrado), PPGE-UFRGS. 2008.

MAKOWSKI, D. G., *Ação do vento em coberturas isoladas*. Porto Alegre, Dissertação (Mestrado), PPGE-UFRGS. 2004.

MICHALSKI, A.; HAUG, E.; BRADATSCH, J.; BLETZINGER, K.-U. Virtual design methodology for lightweight structures – Aerodynamic response of membrane structures. *International Journal of Space Structures*, v. 24, n. 4, p. 211-221, 2009.

NERDINGER, W. *Frei Otto – Das Gesamtwerk: Leicht bauen – Natürlich gestalten*. Basel: Birkhäuser Architecture, 2005. 392 p. ISBN 978-3-7643-7233-0

NÚÑEZ, G. J. Z., *Determinação experimental e teórica da resposta transversal à ação do vento de uma torre de telecomunicações de concreto armado*. Porto Alegre, Dissertação (Mestrado), PPGE-UFRGS. 2001.

NÚÑEZ, G. J. Z., *Investigação experimental do efeito de interferência de tabuleiros paralelos de pontes em túnel de vento frente ao desprendimento de vórtices*. Porto Alegre, Tese (Doutorado), PPGE-UFRGS. 2008.

OLIVEIRA, M. B. *Estudo das estruturas de membrana: uma abordagem integrada do sistema construtivo, do processo de projetar e dos métodos de análise*. São Carlos, Tese (Doutorado), Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. 2001.

OLIVEIRA, V. M. B. *Análise e projeto de tenso-estruturas têxteis para coberturas*. Rio de Janeiro, Tese (Doutorado) – COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro: 2003.

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.; BRASIL, R. M. L. R. F. *Structural analysis and construction of the membrane roof of the “Memorial dos Povos de Belém do Pará”*, 2005. Disponível em: <http://www.lmc.ep.usp.br/people/pauletti/Publicacoes.html>. Acesso em: 01 fev. 2011.

PITTA, J. A. A. *Ações devidas ao vento em edificações*. São Carlos: Ed. EDFSCar, 2001. 47p.

RANK, E.; HALFMANN, A.; SCHOLZ, D.; GLÜCK, M.; BREUER, M.; DURST, F.; KAISER, U.; BERGMANN, D.; WAGNER, S. *Wind loads on lightweight structures: Numerical simulation and wind tunnel tests*, 2004. Disponível em: http://www.inf.bv.tum.de/papers/uploads/paper_426.pdf. Acesso em: 15 jun. 2008.

RIBEIRO, J. L. D. *Efeitos da rugosidade superficial sobre as pressões médias e flutuantes em cilindros circulares fixos em fluxo bidimensional*. Porto Alegre, Tese (Doutorado), PPGEC-UFRGS. 1989.

RIBÓ, R. et al. *GiD The Personal Pre and Postprocessor: Reference Manual*. Barcelona, 2006. Version 8. Disponível em: <<http://www.gidhome.com>>. Acesso em 17 jul. 2006. ISBN 84-95999-95-1

RIBÓ, R. et al. *GiD The Personal Pre and Postprocessor: User Manual*. Barcelona, 2006. Version 8. Disponível em: <<http://www.gidhome.com>>. Acesso em 17 jul. 2006. ISBN 84-95999-94-3

SHAEFFER, R. E. et al. *Tensioned fabric structures: a practical introduction*. 1. ed. Preparado pelo Task Committee on Tensioned Fabric Structures do Technical Committee on Special Structures do Technical Administrative Committee on Metals of Structural Division of American Society of Civil Engineers (ASCE). 1996. ISBN 0-7844-0156-X.

SHOCK, H.-J. *Soft Shells: Design and Technology of Tensile Architecture*. Basel: Birkhäuser Verlag, 1997. 176p. ISBN 3-7643-5450-X

SILVA, C. A. B. *Modelo computacional para análise da tensoestrutura de cobertura do Centro Comunitário da Universidade de Brasília*. Brasília, Dissertação (Mestrado), PECC-UnB. 2006.

VANDENBERG, M. *Soft canopies*. Singapura: Academy Editions, 1996. ISBN 1-85490-440-X.

WU, Y.; SUN, X.; SHEN, S. Computation of wind-structure interaction on tension structures. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, v. 96, p. 2019-2032, 2008.

ANEXO A – PROPRIEDADES DAS MEMBRANAS

Tabela A.1: Propriedades das membranas¹

Identificação	Categoria	Material	Uso em coberturas, fachadas e divisão de ambientes
1	Tecido com revestimento	Tecido de poliéster com revestimento de PVC	permanente + móvel, interno + externo
2	Tecido com revestimento	Tecido de fibra de vidro com revestimento de PTFE	permanente, interno + externo
3	Tecido com revestimento	Tecido de fibra de vidro com revestimento de silicone	permanente, interno + externo
4	Tecido fino entrelaçado laminado	Tecido de malha laminado com filme de PTFE	permanente, interno + externo
5	Folha delgada	Filme de PVC	temporário externamente, permanente internamente
6	Folha delgada	Filme de fluoropolímero (ETFE)	permanente, interno + externo
7	Tecido sem revestimento	Malha de aço inoxidável	permanente, interno + externo
8	Tecido sem revestimento	Tecido de poliéster	permanente + móvel, interno
9	Tecido com revestimento	Tecido de fibra de vidro com revestimento de fluoropolímero	permanente internamente
10	Tecido com ou sem revestimento	Tecido de PTFE com ou sem revestimento	permanente + móvel, interno + externo
11	Tecido com ou sem revestimento	Tecido monofio fluoropolímero com ou sem revestimento	permanente + móvel, interno + externo
12	Tecido de malha com revestimento	Tecido de malha com revestimento de PVC	permanente + móvel, interno + externo
13	Tecido de malha sem revestimento	Tecido de malha de vidro impregnado com PTFE	permanente, interno + externo

¹ KOCH; HABERMANN, 2004.

Tabela A.1: Propriedades das membranas (cont.)¹

Identificação	Propriedades especiais	Impermeabilidade	Resistência ao fogo	Resistência à radiação UV	Durabilidade
		+ = sim	++ = não combustível	++ = excelente	
		o = não	+ = pouco inflamável	+ = bom	(anos)
1	material padrão com uma grande variedade de aplicações	+	+	+	15 - 20
2	material padrão de alta qualidade, a fabricação exige especialidade técnica	+	++	++	> 25
3	tendência de sujar com facilidade quando usado externamente	+	++	++	> 20
4	boa relação de resistência a tração e translucidez	+	++	++	> 25
5	pode ser usado permanentemente apenas em áreas internas	+	o	+	15 - 20 (ambiente interno)
6	material padrão de alta qualidade, usado principalmente em construções pneumáticas. Graças a alta translucência UV, capacidade autolimpante e economia é uma alternativa aos materiais de construção rígidos transparentes	+	++	++	> 25
7	produção especial, permite que o ar atravesse, à prova de ladrão	o	++	++	> 50
8	tecido leve e acústico para arquitetura de interiores. Fator alpha de absorção de som w = 0,5 a 0,65	o	+	+	10 - 20
9	tecido acústico com baixo fator e < 0,4 para arquitetura de interiores. Fator alpha de absorção de som w = 0,5 a 0,65	o	++	++	15 - 20
10	qualidade muito alta. Usado especialmente para membranas dobráveis e projetos de alta imagem	+ (com revest.)	++	++	> 25
11	qualidade muito alta. Usado especialmente para projetos específicos de iluminação	+ (com revest.)	++	++	> 25
12	material padrão com uma grande variedade de aplicações, sombra	o	+	+	10 - 15
13	diferentes aberturas e dimensões da malha são possíveis	o	++	++	> 25

¹ KOCH; HABERMANN, 2004.

Tabela A.1: Propriedades das membranas (cont.)¹

Identificação	Translucidez	Reflexão da luz	Cores	Propriedade autolimpante	Resistência a produtos químicos	Peso
				++ = excelente		
	(%)	(%)		+ = bom	++ = excelente	(kg/m ²)
1	0 a 25	50 a 70	padrão branco, grande variedade de cores sob encomenda	+	+	0,6 a 1,65
2	4 a 22	65 a 75	padrão branco, pequena variedade de cores sob encomenda	++	++	0,4 a 1,6
3	10 a 20	50 a 70	padrão branco, pequena variedade de cores sob encomenda	o	++	0,4 a 1,6
4	35 a 65	10 a 20	padrão branco	++	++	0,7 a 1,2
5	até 90	até 60	padrão branco e outros	o	+	0,2 a 2,0
6	até 96	até 60	transparente, branco sob encomenda, pode receber impressão	++	++	0,05 a 2,0
7	até 95		natural, possível pintar um lado após a instalação	+	++	3 a 12
8	30 a 35	60 a 70	padrão branco, pode ser colorida e receber impressão	o	+	0,4
9	10	59	prata metálico	+	++	0,3
10	15 a 40	50 a 70	padrão branco, pequena variedade de cores sob encomenda	++	++	0,3 a 0,8
11	até 90	até 50	transparente, branco	++	++	0,3 a 0,6
12	> 20	20 a 40	padrão branco, grande variedade de cores sob encomenda	+	+	0,5 a 1,0
13	até 95		padrão branco, pequena variedade de cores sob encomenda	++	++	0,3 a 0,8

¹ KOCH; HABERMANN, 2004.

Tabela A.1: Propriedades das membranas (cont.)¹

Identificação	Resistência à tração	Adequação para membranas dobráveis	Possibilidade de reciclagem	Variação de temperatura recomendada para uso arquitetônico
		++ = excelente	++ = excelente	
		+ = bom	+ = bom	
	(N/5cm)	o = não se aplica	o = neutro	(°C)
1	2.000 a 10.000	+	+	-30 a +70
2	1.000 a 8.000	o	o	qualquer temp.
3	1.000 a 5.000	o	o	qualquer temp.
4	2.500 a 5.000	o	o	qualquer temp.
5	300 a 2.000	o	+	+5 a +40
6	300 a 600	o	++	qualquer temp.
7	2.000 a 30.000	o	++	qualquer temp.
8	4.000	+	+	-30 a +70
9	3.250	o	o	qualquer temp.
10	2.000 a 5.000	++	++	qualquer temp.
11	400 a 1.000	+	++	qualquer temp.
12	1.500 a 5.000	+	+	-30 a +70
13	450 a 5.000	o	o	qualquer temp.

¹ KOCH; HABERMANN, 2004.

APÊNDICE A – DVD

Este DVD contém os arquivos com as tabelas e os gráficos dos coeficientes de pressão interna, externa e resultante com os valores máximos, mínimos, médios e rms obtidos dos ensaios em túnel de vento com medições a cada 15°, girando a tensoestrutura de 0° a 180° para os modelos R0215, R0260, R0305, R0305c, R0305d, R0305t, R0345, R0390, R0435 e R0475.

**APÊNDICE B – TABELAS DE c_p * MÉDIA RESULTANTE DOS MODELOS DE UM
PICO**

Tabela B.1: c_p * média resultante para o ângulo de incidência do vento = 0°

Número da tomada	R0215	R0260	R0305	R0345	R0390	R0435	R0475
1	1,08	0,83	0,91	0,99	1,03	1,06	0,99
2	0,77	0,73	0,80	0,90	0,94	0,92	0,97
3	0,67	0,69	0,73	0,82	0,90	0,88	0,99
4	0,63	0,59	0,63	0,75	0,86	0,79	0,83
5	0,33	0,29	0,33	0,42	0,63	0,46	0,63
6	0,73	0,93	0,63	0,73	0,80	0,71	0,74
7	0,50	0,44	0,47	0,56	0,65	0,61	0,67
8	0,43	0,30	0,36	0,48	0,60	0,46	0,56
9	0,25	0,15	0,19	0,21	0,31	0,32	0,34
10	0,20	0,26	0,31	0,46	0,42	0,47	0,41
11	0,21	0,12	0,15	0,19	0,21	0,13	0,29
12	-0,07	-0,22	-0,15	-0,16	-0,03	-0,16	-0,04
13	-0,42	-0,57	-0,48	-0,41	-0,20	-0,31	-0,39
14	-0,55	-0,57	-0,48	-0,48	-0,27	-0,39	-0,32
15	-0,17	-0,31	-0,29	-0,19	0,00	-0,12	-0,04
16	-0,41	-0,60	-0,45	-0,19	-0,09	-0,21	0,01
17	-0,72	-0,84	-0,52	-0,21	-0,10	-0,28	-0,05
18	-0,77	-0,81	-0,59	-0,26	-0,12	-0,31	-0,14
19	-0,30	-0,33	-0,38	-0,39	-0,55	-0,44	-0,46
20	-0,33	-0,39	-0,46	-0,45	-0,41	-0,41	-0,29
21	-0,57	-0,74	-0,55	-0,32	-0,20	-0,31	-0,07
22	-0,86	-1,01	-0,67	-0,30	-0,16	-0,29	-0,13
23	-0,90	-0,76	-0,54	-0,33	-0,22	-0,20	-0,14
24	-0,04	-0,38	-0,53	-0,57	-0,53	-0,56	-0,55
25	-0,53	-0,82	-0,78	-0,64	-0,39	-0,57	-0,33
26	-0,99	-1,09	-0,71	-0,40	-0,13	-0,34	-0,05
27	-0,99	-0,96	-0,48	-0,24	-0,09	-0,13	-0,08
28	0,08	-0,15	-0,25	-0,32	-0,43	-0,34	-0,42
29	-0,10	-0,35	-0,57	-0,67	-0,67	-0,70	-0,71
30	-0,64	-0,95	-0,86	-0,62	-0,46	-0,62	-0,20
31	-1,13	-1,06	-0,72	-0,32	-0,11	-0,21	-0,06
32	-1,09	-0,84	-0,46	-0,18	-0,08	-0,08	-0,07
33	0,03	-0,50	-0,52	-0,44	-0,44	-0,53	-0,54
34	-0,60	-0,83	-0,73	-0,60	-0,34	-0,57	-0,35
35	-1,09	-0,94	-0,72	-0,37	-0,14	-0,30	-0,12
36	-1,01	-1,02	-0,54	-0,27	-0,11	-0,16	-0,12
37	-0,15	-0,35	-0,40	-0,34	-0,49	-0,43	-0,46

Tabela B.1: c_p^* média resultante para o ângulo de incidência do vento = 0° (cont.)

Número da tomada	R0215	R0260	R0305	R0345	R0390	R0435	R0475
38	-0,28	-0,32	-0,41	-0,42	-0,36	-0,38	-0,31
39	-0,62	-0,62	-0,49	-0,32	-0,17	-0,27	-0,09
40	-0,95	-0,91	-0,56	-0,27	-0,08	-0,20	-0,14
41	-1,00	-0,74	-0,49	-0,30	-0,15	-0,16	-0,14
42	-0,29	-0,31	-0,25	-0,01	0,08	-0,05	-0,02
43	-0,63	-0,51	-0,46	-0,28	-0,15	-0,19	-0,02
44	-0,83	-0,72	-0,49	-0,22	-0,12	-0,23	-0,12
45	-0,84	-0,87	-0,67	-0,39	-0,24	-0,36	-0,28
46	0,50	0,09	0,17	0,47	0,45	0,42	0,42
47	0,27	0,02	0,15	0,15	0,25	0,17	0,21
48	-0,14	-0,22	-0,19	-0,15	-0,05	-0,11	-0,12
49	-0,56	-0,62	-0,41	-0,31	-0,17	-0,40	-0,38
50	-0,68	-0,59	-0,45	-0,36	-0,23	-0,40	-0,45
51	0,82	0,61	0,61	0,78	0,80	0,70	0,76
52	0,32	0,44	0,46	0,57	0,57	0,53	0,64
53	0,27	0,27	0,31	0,44	0,42	0,32	0,48
54	0,09	0,09	-0,02	0,15	0,27	0,09	0,33

Tabela B.2: c_p^* média resultante para o ângulo de incidência do vento = 15°

Número da tomada	R0215	R0260	R0305	R0345	R0390	R0435	R0475
1	0,93	0,69	0,69	0,80	0,91	0,90	0,91
2	0,69	0,72	0,72	0,82	0,84	0,85	0,89
3	0,58	0,67	0,67	0,75	0,80	0,78	0,88
4	0,53	0,49	0,57	0,67	0,73	0,68	0,68
5	0,19	0,24	0,24	0,38	0,49	0,33	0,49
6	0,71	0,69	0,67	0,82	0,94	0,85	0,95
7	0,67	0,67	0,69	0,78	0,89	0,85	0,95
8	0,66	0,61	0,72	0,80	0,87	0,80	0,87
9	0,48	0,38	0,46	0,51	0,59	0,62	0,66
10	0,43	0,30	0,36	0,52	0,50	0,53	0,53
11	0,41	0,31	0,33	0,40	0,41	0,36	0,51
12	0,30	0,19	0,25	0,22	0,29	0,23	0,29
13	0,05	-0,06	-0,03	-0,12	0,11	0,04	-0,13
14	-0,14	-0,29	-0,16	-0,37	-0,03	-0,16	-0,16
15	-0,01	-0,14	-0,09	-0,02	0,09	0,00	0,01
16	-0,20	-0,30	-0,22	-0,09	-0,10	-0,15	-0,09
17	-0,44	-0,47	-0,38	-0,22	-0,22	-0,31	-0,15

Tabela B.2: c_p * média resultante para o ângulo de incidência do vento = 15° (cont.)

Número da tomada	R0215	R0260	R0305	R0345	R0390	R0435	R0475
18	-0,45	-0,62	-0,49	-0,37	-0,25	-0,37	-0,25
19	-0,32	-0,23	-0,37	-0,25	-0,56	-0,28	-0,34
20	-0,37	-0,35	-0,40	-0,34	-0,29	-0,30	-0,21
21	-0,54	-0,42	-0,32	-0,17	-0,07	-0,14	-0,03
22	-0,57	-0,51	-0,43	-0,27	-0,18	-0,27	-0,19
23	-0,53	-0,65	-0,61	-0,41	-0,32	-0,33	-0,25
24	-0,09	-0,35	-0,45	-0,56	-0,40	-0,51	-0,50
25	-0,42	-0,53	-0,53	-0,49	-0,24	-0,40	-0,24
26	-0,57	-0,55	-0,43	-0,26	-0,15	-0,27	-0,09
27	-0,48	-0,59	-0,38	-0,26	-0,15	-0,21	-0,13
28	0,02	-0,27	-0,30	-0,31	-0,32	-0,25	-0,35
29	-0,31	-0,53	-0,62	-0,64	-0,56	-0,59	-0,56
30	-0,59	-0,76	-0,61	-0,43	-0,35	-0,43	-0,23
31	-0,79	-0,71	-0,48	-0,26	-0,15	-0,22	-0,10
32	-0,64	-0,62	-0,37	-0,16	-0,10	-0,10	-0,07
33	-0,14	-0,58	-0,57	-0,53	-0,65	-0,66	-0,69
34	-0,68	-0,82	-0,80	-0,72	-0,41	-0,66	-0,44
35	-0,86	-0,78	-0,58	-0,30	-0,12	-0,24	-0,09
36	-0,61	-0,64	-0,36	-0,20	-0,10	-0,10	-0,09
37	-0,11	-0,30	-0,31	-0,27	-0,41	-0,30	-0,38
38	-0,22	-0,46	-0,49	-0,57	-0,48	-0,53	-0,42
39	-0,69	-0,92	-0,68	-0,44	-0,33	-0,45	-0,13
40	-0,87	-0,69	-0,40	-0,15	-0,04	-0,11	-0,08
41	-0,68	-0,49	-0,32	-0,16	-0,08	-0,07	-0,09
42	-0,31	-0,44	-0,28	-0,06	-0,03	-0,15	-0,09
43	-0,78	-0,68	-0,44	-0,33	-0,20	-0,31	-0,07
44	-0,71	-0,61	-0,41	-0,15	-0,10	-0,14	-0,10
45	-0,57	-0,61	-0,40	-0,25	-0,19	-0,18	-0,17
46	0,29	0,05	0,10	0,34	0,22	0,24	0,32
47	0,08	-0,09	-0,04	-0,05	0,05	-0,02	0,04
48	-0,60	-0,55	-0,36	-0,21	-0,17	-0,19	-0,16
49	-0,67	-0,54	-0,34	-0,18	-0,11	-0,09	-0,18
50	-0,52	-0,22	-0,36	-0,30	-0,17	-0,16	-0,22
51	1,06	0,60	0,45	0,60	0,53	0,55	0,49
52	-0,07	0,15	0,16	0,28	0,23	0,23	0,28
53	-0,03	-0,02	0,02	0,10	0,05	0,01	0,09
54	-0,20	-0,22	-0,30	-0,16	-0,09	-0,16	-0,04

Tabela B.3: c_p^* média resultante para o ângulo de incidência do vento = 30°

Número da tomada	R0215	R0260	R0305	R0345	R0390	R0435	R0475
1	0,73	0,48	0,48	0,64	0,71	0,71	0,71
2	0,57	0,52	0,53	0,61	0,62	0,63	0,66
3	0,40	0,45	0,45	0,48	0,52	0,49	0,58
4	0,30	0,20	0,30	0,35	0,39	0,28	0,30
5	-0,02	0,03	0,01	0,12	0,15	-0,04	0,10
6	0,74	0,72	0,74	0,88	1,00	0,91	1,03
7	0,72	0,72	0,77	0,85	0,96	0,91	1,05
8	0,73	0,67	0,79	0,89	0,93	0,87	0,98
9	0,53	0,42	0,51	0,59	0,69	0,67	0,77
10	0,65	0,49	0,53	0,66	0,69	0,72	0,71
11	0,60	0,55	0,57	0,63	0,66	0,62	0,73
12	0,57	0,48	0,55	0,54	0,63	0,58	0,66
13	0,40	0,24	0,34	0,28	0,50	0,42	0,30
14	0,14	-0,01	0,14	-0,07	0,31	0,17	0,18
15	0,62	0,20	0,22	0,21	0,23	0,18	0,16
16	0,05	-0,08	-0,03	0,01	0,07	-0,03	-0,01
17	-0,18	-0,30	-0,16	-0,18	-0,11	-0,20	-0,23
18	-0,27	-0,47	-0,29	-0,37	-0,27	-0,34	-0,35
19	-0,13	-0,10	-0,16	0,00	-0,33	-0,01	-0,06
20	-0,20	-0,25	-0,25	-0,22	-0,18	-0,18	-0,08
21	-0,55	-0,48	-0,30	-0,17	-0,06	-0,14	0,00
22	-0,49	-0,45	-0,28	-0,23	-0,14	-0,17	-0,21
23	-0,44	-0,50	-0,45	-0,40	-0,31	-0,30	-0,31
24	-0,16	-0,43	-0,41	-0,39	-0,29	-0,39	-0,31
25	-0,48	-0,63	-0,54	-0,46	-0,15	-0,35	-0,11
26	-0,51	-0,52	-0,31	-0,19	-0,10	-0,15	-0,07
27	-0,34	-0,42	-0,31	-0,24	-0,15	-0,18	-0,17
28	-0,04	-0,30	-0,38	-0,40	-0,46	-0,40	-0,51
29	-0,29	-0,53	-0,64	-0,72	-0,68	-0,75	-0,71
30	-0,58	-0,73	-0,57	-0,42	-0,32	-0,39	-0,19
31	-0,70	-0,56	-0,37	-0,25	-0,13	-0,19	-0,14
32	-0,47	-0,50	-0,30	-0,18	-0,12	-0,09	-0,11
33	-0,16	-0,52	-0,52	-0,48	-0,51	-0,57	-0,62
34	-0,58	-0,66	-0,66	-0,62	-0,39	-0,55	-0,42
35	-0,67	-0,60	-0,49	-0,33	-0,19	-0,28	-0,18
36	-0,44	-0,51	-0,33	-0,26	-0,15	-0,15	-0,14
37	-0,05	-0,31	-0,37	-0,38	-0,44	-0,45	-0,45
38	-0,34	-0,56	-0,62	-0,71	-0,68	-0,72	-0,73
39	-0,65	-0,76	-0,59	-0,45	-0,38	-0,41	-0,23
40	-0,67	-0,55	-0,35	-0,24	-0,12	-0,19	-0,15
41	-0,54	-0,48	-0,31	-0,21	-0,13	-0,09	-0,11

Tabela B.3: c_p * média resultante para o ângulo de incidência do vento = 30° (cont.)

Número da tomada	R0215	R0260	R0305	R0345	R0390	R0435	R0475
42	-0,26	-0,46	-0,39	-0,23	-0,27	-0,34	-0,32
43	-0,65	-0,59	-0,57	-0,49	-0,23	-0,33	-0,15
44	-0,53	-0,49	-0,37	-0,20	-0,15	-0,17	-0,11
45	-0,41	-0,49	-0,39	-0,34	-0,29	-0,26	-0,22
46	0,12	-0,14	-0,13	0,06	-0,24	-0,11	0,12
47	-0,11	-0,27	-0,20	-0,23	-0,10	-0,14	-0,10
48	-0,53	-0,49	-0,30	-0,16	-0,07	-0,09	-0,03
49	-0,45	-0,41	-0,26	-0,19	-0,10	-0,14	-0,17
50	-0,46	-0,36	-0,36	-0,33	-0,24	-0,26	-0,23
51	0,27	0,15	0,17	0,30	0,21	0,15	0,19
52	-0,26	-0,13	-0,12	-0,01	-0,07	-0,04	-0,03
53	-0,27	-0,33	-0,27	-0,23	-0,27	-0,29	-0,21
54	-0,38	-0,46	-0,52	-0,46	-0,43	-0,36	-0,37

Tabela B.4: c_p * média resultante para o ângulo de incidência do vento = 45°

Número da tomada	R0215	R0260	R0305	R0345	R0390	R0435	R0475
1	0,52	0,21	0,25	0,52	0,54	0,55	0,54
2	0,39	0,27	0,28	0,39	0,39	0,38	0,43
3	0,12	0,17	0,17	0,14	0,17	0,15	0,18
4	-0,03	-0,08	-0,03	-0,03	-0,02	-0,14	-0,14
5	-0,24	-0,21	-0,24	-0,18	-0,19	-0,33	-0,30
6	0,71	0,69	0,69	0,82	0,94	0,83	0,99
7	0,65	0,68	0,71	0,78	0,86	0,80	0,96
8	0,66	0,65	0,71	0,79	0,79	0,73	0,86
9	0,45	0,37	0,34	0,47	0,59	0,54	0,68
10	0,94	0,68	0,72	0,82	0,94	0,89	0,92
11	0,74	0,75	0,79	0,84	0,90	0,84	0,95
12	0,74	0,73	0,81	0,81	0,91	0,86	0,96
13	0,62	0,56	0,64	0,64	0,80	0,74	0,71
14	0,36	0,26	0,35	0,27	0,62	0,47	0,55
15	1,35	1,01	0,55	0,49	0,58	0,51	0,47
16	0,29	0,23	0,29	0,31	0,39	0,33	0,33
17	0,11	0,06	0,21	0,14	0,26	0,16	0,13
18	-0,01	-0,12	0,05	-0,06	0,08	0,02	-0,02
19	0,06	0,09	0,10	0,27	0,11	0,26	0,36
20	-0,04	0,06	-0,04	-0,03	-0,02	-0,01	0,10
21	-0,43	-0,49	-0,31	-0,25	-0,19	-0,23	-0,13

Tabela B.4: c_p * média resultante para o ângulo de incidência do vento = 45° (cont.)

Número da tomada	R0215	R0260	R0305	R0345	R0390	R0435	R0475
22	-0,65	-0,50	-0,37	-0,22	-0,20	-0,18	-0,21
23	-0,50	-0,46	-0,43	-0,34	-0,29	-0,27	-0,24
24	-0,15	-0,40	-0,24	-0,22	-0,07	-0,12	-0,08
25	-0,57	-0,76	-0,38	-0,27	-0,14	-0,21	0,00
26	-0,70	-0,62	-0,34	-0,18	-0,07	-0,13	-0,06
27	-0,52	-0,45	-0,27	-0,18	-0,11	-0,12	-0,12
28	-0,14	-0,33	-0,31	-0,28	-0,41	-0,30	-0,40
29	-0,22	-0,46	-0,48	-0,48	-0,42	-0,42	-0,40
30	-0,62	-0,87	-0,62	-0,40	-0,28	-0,36	-0,09
31	-0,91	-0,65	-0,40	-0,18	-0,09	-0,10	-0,08
32	-0,65	-0,51	-0,26	-0,15	-0,10	-0,06	-0,08
33	-0,14	-0,64	-0,55	-0,51	-0,68	-0,67	-0,68
34	-0,70	-0,85	-0,81	-0,73	-0,45	-0,68	-0,45
35	-0,91	-0,75	-0,58	-0,32	-0,15	-0,20	-0,09
36	-0,66	-0,64	-0,33	-0,20	-0,11	-0,08	-0,09
37	-0,03	-0,28	-0,32	-0,29	-0,25	-0,33	-0,31
38	-0,31	-0,53	-0,58	-0,64	-0,54	-0,60	-0,58
39	-0,67	-0,76	-0,61	-0,48	-0,40	-0,43	-0,28
40	-0,81	-0,69	-0,42	-0,24	-0,13	-0,16	-0,10
41	-0,74	-0,52	-0,34	-0,18	-0,10	-0,06	-0,06
42	-0,18	-0,41	-0,44	-0,38	-0,37	-0,50	-0,53
43	-0,56	-0,54	-0,52	-0,53	-0,36	-0,43	-0,29
44	-0,59	-0,56	-0,42	-0,27	-0,21	-0,22	-0,14
45	-0,56	-0,63	-0,47	-0,34	-0,26	-0,22	-0,17
46	-0,10	-0,28	-0,37	-0,22	-0,49	-0,29	-0,25
47	-0,24	-0,33	-0,29	-0,34	-0,26	-0,24	-0,23
48	-0,49	-0,41	-0,25	-0,20	-0,14	-0,12	-0,05
49	-0,51	-0,51	-0,30	-0,23	-0,19	-0,17	-0,15
50	-0,52	-0,54	-0,42	-0,34	-0,21	-0,20	-0,19
51	-0,19	-0,14	-0,07	0,10	0,10	0,03	0,02
52	-0,47	-0,34	-0,25	-0,15	-0,21	-0,08	-0,13
53	-0,47	-0,46	-0,32	-0,25	-0,27	-0,21	-0,18
54	-0,50	-0,57	-0,52	-0,41	-0,39	-0,31	-0,30

Tabela B.5: c_p^* média resultante do modelo R0305c

Número da tomada	0°	15°	30°	45°
1	0,82	0,69	0,45	0,21
2	0,80	0,76	0,53	0,27
3	0,79	0,72	0,45	0,17
4	0,67	0,58	0,26	-0,05
5	0,42	0,33	0,04	-0,28
6	0,63	0,71	0,78	0,73
7	0,50	0,72	0,78	0,73
8	0,43	0,73	0,76	0,71
9	0,20	0,50	0,54	0,36
10	0,24	0,29	0,49	0,70
11	0,11	0,28	0,56	0,81
12	-0,07	0,23	0,54	0,84
13	-0,34	-0,02	0,34	0,67
14	-0,49	-0,22	0,19	0,46
15	-0,21	-0,11	0,21	0,56
16	-0,29	-0,27	-0,05	0,31
17	-0,30	-0,39	-0,19	0,21
18	-0,41	-0,57	-0,35	0,02
19	-0,31	-0,41	-0,20	0,09
20	-0,34	-0,32	-0,21	0,00
21	-0,37	-0,31	-0,30	-0,28
22	-0,47	-0,44	-0,29	-0,33
23	-0,49	-0,58	-0,41	-0,40
24	-0,54	-0,38	-0,37	-0,22
25	-0,65	-0,45	-0,49	-0,33
26	-0,57	-0,43	-0,32	-0,33
27	-0,45	-0,44	-0,32	-0,27
28	-0,33	-0,31	-0,38	-0,33
29	-0,55	-0,60	-0,62	-0,46
30	-0,76	-0,63	-0,56	-0,63
31	-0,62	-0,52	-0,38	-0,40
32	-0,46	-0,47	-0,36	-0,33
33	-0,52	-0,56	-0,51	-0,56
34	-0,66	-0,78	-0,61	-0,77
35	-0,63	-0,61	-0,47	-0,56
36	-0,46	-0,43	-0,37	-0,35
37	-0,37	-0,34	-0,37	-0,34
38	-0,35	-0,50	-0,59	-0,55

Tabela B.5: c_p^* média resultante do modelo R0305c (cont.)

Número da tomada	0°	15°	30°	45°
39	-0,43	-0,73	-0,59	-0,59
40	-0,45	-0,48	-0,39	-0,43
41	-0,44	-0,39	-0,36	-0,38
42	-0,19	-0,28	-0,38	-0,39
43	-0,31	-0,44	-0,52	-0,42
44	-0,35	-0,44	-0,40	-0,39
45	-0,43	-0,38	-0,38	-0,44
46	0,14	0,03	-0,23	-0,42
47	0,15	-0,06	-0,22	-0,26
48	-0,16	-0,39	-0,34	-0,24
49	-0,34	-0,35	-0,32	-0,32
50	-0,44	-0,42	-0,40	-0,41
51	0,78	0,53	0,19	-0,04
52	0,50	0,20	-0,09	-0,23
53	0,38	0,03	-0,29	-0,31
54	0,00	-0,33	-0,56	-0,47
55	-0,37	-0,29	-0,27	-0,37
56	-0,33	-0,31	-0,27	-0,25
57	-0,49	-0,41	-0,26	-0,22
58	-0,10	-0,01	0,02	0,03

**APÊNDICE C – TABELAS DE c_p MÉDIA RESULTANTE DOS MODELOS DE DOIS
E TRÊS PICOS**

Tabela C.1: c_p média resultante do modelo de dois picos - R0305d

Número da tomada	0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°
1	-0,02	-0,15	-0,05	-0,06	-0,29	-0,28	-0,16
2	0,07	-0,14	-0,09	-0,17	-0,27	-0,34	-0,27
3	-0,27	-0,34	-0,21	-0,31	-0,38	-0,42	-0,56
4	-0,60	-0,46	-0,39	-0,34	-0,52	-0,59	-0,96
5	-0,41	-0,45	-0,30	-0,27	-0,40	-0,61	-0,85
6	0,64	0,44	0,40	0,24	0,04	-0,14	-0,16
7	0,46	0,23	-0,04	-0,19	-0,30	-0,36	-0,45
8	0,36	0,13	-0,27	-0,26	-0,32	-0,28	-0,57
9	-0,04	-0,36	-0,48	-0,39	-0,54	-0,68	-0,90
10	0,86	0,89	0,85	0,43	0,23	0,07	-0,07
11	0,73	0,73	0,55	0,34	0,12	-0,15	-0,38
12	0,76	0,73	0,47	0,23	-0,08	-0,30	-0,44
13	0,55	0,52	0,21	-0,07	-0,45	-0,51	-0,72
14	0,34	0,21	-0,03	-0,19	-0,52	-0,66	-0,94
15	0,65	0,93	0,79	0,71	0,57	0,30	0,06
16	0,36	0,56	0,70	0,62	0,37	0,05	-0,30
17	0,39	0,64	0,71	0,65	0,32	-0,03	-0,49
18	0,14	0,36	0,36	0,26	-0,13	-0,57	-0,98
19	0,03	0,26	0,46	0,62	0,71	0,67	0,53
20	0,02	0,31	0,57	0,76	0,83	0,76	0,54
21	-0,33	-0,04	0,47	0,76	0,80	0,68	0,25
22	-0,43	-0,16	0,29	0,60	0,64	0,50	-0,07
23	-0,21	0,09	0,24	0,47	0,51	0,28	-0,26
24	-0,48	-0,27	0,02	0,39	0,62	0,81	0,89
25	-0,70	-0,53	-0,11	0,32	0,61	0,79	0,72
26	-0,41	-0,66	-0,18	0,21	0,60	0,85	0,65
27	-0,48	-0,54	-0,34	0,00	0,38	0,58	0,28
28	-0,54	-0,55	-0,41	-0,23	0,02	0,28	0,60
29	-0,63	-0,55	-0,38	-0,22	-0,06	0,16	0,44
30	-0,78	-0,93	-0,40	-0,39	-0,17	0,04	0,24
31	-0,63	-0,87	-0,53	-0,68	-0,45	-0,09	0,03
32	-0,51	-0,61	-0,59	-0,75	-0,45	-0,13	-0,11
33	-0,65	-0,50	-0,40	-0,38	-0,43	-0,33	-0,18
34	-0,87	-0,98	-0,65	-0,58	-0,71	-0,72	-0,51
35	-0,60	-0,87	-0,57	-0,45	-0,61	-0,66	-0,63
36	-0,45	-0,49	-0,43	-0,53	-0,56	-0,48	-0,56
37	-0,36	-0,17	-0,37	-0,09	-0,18	-0,40	-0,61
38	-0,60	-0,52	-0,63	-0,39	-0,34	-0,46	-0,51

Tabela C.1: c_p média resultante do modelo de dois picos - R0305d (cont.)

Número da tomada	0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°
39	-0,60	-0,77	-0,80	-0,52	-0,60	-0,78	-0,89
40	-0,54	-0,71	-0,66	-0,48	-0,61	-0,64	-0,92
41	-0,45	-0,53	-0,36	-0,33	-0,35	-0,47	-0,77
42	-0,35	-0,37	-0,43	-0,48	-0,21	-0,33	-0,41
43	-0,60	-0,52	-0,80	-0,80	-0,64	-0,87	-0,88
44	-0,69	-0,70	-0,90	-0,71	-0,75	-0,93	-1,15
45	-0,59	-0,67	-0,49	-0,39	-0,48	-0,64	-0,95
46	0,10	0,03	-0,26	-0,13	-0,25	-0,41	-0,47
47	-0,03	-0,19	-0,39	-0,43	-0,43	-0,57	-0,52
48	-0,55	-0,44	-0,66	-0,92	-0,76	-0,89	-1,10
49	-0,63	-0,48	-0,58	-0,48	-0,53	-0,71	-1,01
50	-0,57	-0,63	-0,40	-0,35	-0,46	-0,61	-0,89
51	-0,10	-0,25	-0,28	-0,37	-0,50	-0,47	-0,50
52	-0,35	-0,23	-0,27	-0,53	-0,60	-0,50	-0,73
53	-0,50	-0,23	-0,34	-0,35	-0,41	-0,55	-0,90
54	-0,73	-0,56	-0,35	-0,28	-0,45	-0,66	-0,91
55	0,08	-0,17	-0,20	0,02	0,02	-0,13	-0,34
56	0,13	-0,03	-0,15	0,02	-0,09	-0,23	-0,41
57	-0,28	-0,41	-0,41	-0,46	-0,43	-0,43	-0,68
58	-0,36	-0,56	-0,38	-0,48	-0,35	-0,49	-0,61
59	-0,88	-1,02	-0,94	-0,64	-0,45	-0,61	-0,49
60	0,44	0,21	0,07	0,34	0,10	-0,16	-0,25
61	0,40	0,14	0,11	-0,07	-0,31	-0,46	-0,52
62	0,39	0,19	0,19	-0,23	-0,45	-0,64	-0,70
63	0,08	-0,17	-0,26	-0,74	-0,72	-0,82	-0,59
64	0,52	0,71	0,49	0,33	0,16	-0,01	0,02
65	0,55	0,67	0,33	0,22	0,02	-0,29	-0,33
66	0,72	0,84	0,49	0,14	-0,20	-0,57	-0,68
67	0,72	0,81	0,43	-0,10	-0,49	-0,80	-0,78
68	0,57	0,66	0,12	-0,29	-0,49	-0,78	-0,70
69	0,41	0,61	0,70	0,28	0,22	-0,03	-0,13
70	0,30	0,36	0,33	0,50	0,25	-0,16	-0,43
71	0,25	0,53	0,42	0,60	0,17	-0,33	-0,68
72	0,17	0,54	0,24	0,32	-0,04	-0,52	-0,76
73	0,22	0,60	0,69	0,49	0,29	0,14	0,08
74	-0,04	0,27	0,50	0,47	0,49	0,50	0,37
75	-0,31	-0,10	0,34	0,83	0,64	0,49	0,21
76	-0,65	-0,26	0,32	0,75	0,56	0,33	-0,02
77	-0,79	-0,36	0,11	0,30	0,28	0,06	-0,28
78	-0,29	-0,12	0,04	0,24	0,48	0,71	0,70
79	-0,51	-0,40	-0,01	0,28	0,53	0,68	0,70
80	-0,61	-0,29	0,12	0,49	0,65	0,77	0,74

Tabela C.1: c_p média resultante do modelo de dois picos - R0305d (cont.)

Número da tomada	0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°
81	-0,80	-0,52	0,12	0,00	0,34	0,52	0,48
82	-0,20	-0,26	-0,28	-0,11	0,28	0,52	0,59
83	-0,30	-0,40	-0,35	-0,13	0,04	0,35	0,57
84	-0,49	-0,66	-0,75	-0,22	-0,07	0,19	0,56
85	-0,75	-0,61	-0,81	-0,69	-0,32	0,04	0,32
86	-0,66	-0,68	-0,50	-0,86	-0,39	0,00	0,22
87	-0,24	-0,20	-0,31	-0,31	-0,42	-0,25	0,02
88	-0,65	-0,65	-0,98	-0,63	-0,71	-0,64	-0,23
89	-0,78	-0,71	-1,05	-0,93	-0,67	-0,77	-0,50
90	-0,67	-0,73	-0,83	-1,05	-0,73	-0,75	-0,51
91	-0,03	0,02	-0,05	-0,24	-0,47	-0,54	-0,43
92	-0,40	-0,20	-0,21	-0,39	-0,64	-0,74	-0,61
93	-0,75	-0,55	-0,65	-0,78	-0,74	-0,98	-0,64
94	-0,70	-0,71	-0,66	-1,00	-0,70	-0,77	-0,72
95	-0,67	-0,88	-0,78	-0,98	-0,67	-0,83	-0,82
96	-0,43	-0,21	-0,02	-0,27	-0,55	-0,60	-0,59
97	-0,60	-0,35	-0,23	-0,85	-0,75	-0,83	-0,77
98	-0,60	-0,56	-0,40	-0,98	-0,65	-0,73	-0,76
99	-0,62	-0,81	-0,62	-0,91	-0,58	-0,57	-0,65
100	-0,24	-0,04	0,06	0,03	-0,11	-0,22	-0,32
101	-0,37	-0,18	-0,03	-0,25	-0,51	-0,54	-0,62
102	-0,45	-0,27	-0,03	-0,78	-0,71	-0,72	-0,95
103	-0,57	-0,52	-0,32	-0,93	-0,59	-0,70	-0,78
104	-0,48	-0,79	-0,69	-0,73	-0,43	-0,55	-0,48
105	-0,15	-0,14	-0,10	-0,16	-0,39	-0,51	-0,47
106	-0,62	-0,48	-0,38	-0,52	-0,77	-0,74	-0,90
107	-0,73	-0,64	-0,47	-0,82	-0,62	-0,71	-0,84
108	-0,79	-0,95	-0,86	-0,87	-0,59	-0,71	-0,64

Tabela C.2: c_p média resultante do modelo de três picos - R0305t

Número da tomada	0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°
1	-0,10	-0,21	-0,01	0,21	0,03	-0,27	-0,21
2	0,06	-0,12	-0,11	-0,02	-0,19	-0,40	-0,30
3	-0,25	-0,35	-0,40	-0,41	-0,47	-0,59	-0,68
4	-0,50	-0,53	-0,57	-0,52	-0,62	-0,69	-1,05
5	-0,34	-0,40	-0,38	-0,33	-0,42	-0,64	-0,91
6	0,54	0,34	0,42	0,39	0,13	-0,13	-0,26
7	0,44	0,22	0,19	-0,07	-0,31	-0,49	-0,58
8	0,40	0,25	0,08	-0,28	-0,49	-0,48	-0,76
9	0,04	-0,21	-0,26	-0,51	-0,68	-0,75	-0,98
10	0,52	0,71	0,68	0,40	0,28	0,16	-0,03

Tabela C.2: c_p média resultante do modelo de três picos - R0305t (cont.)

Número da tomada	0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°
11	0,45	0,66	0,33	0,16	0,00	-0,26	-0,56
12	0,62	0,82	0,39	0,08	-0,20	-0,48	-0,64
13	0,51	0,68	0,17	-0,20	-0,59	-0,67	-0,91
14	0,36	0,39	-0,07	-0,32	-0,60	-0,74	-1,00
15	0,34	0,51	0,19	0,21	0,18	-0,08	-0,31
16	0,18	0,30	0,21	0,30	0,10	-0,29	-0,62
17	0,27	0,57	0,28	0,47	0,12	-0,31	-0,72
18	0,07	0,38	-0,01	0,11	-0,29	-0,74	-1,13
19	0,10	0,29	0,40	0,40	0,28	0,05	-0,14
20	-0,03	0,15	0,43	0,57	0,51	0,47	0,28
21	-0,34	-0,22	0,38	0,74	0,61	0,43	0,03
22	-0,48	-0,25	0,20	0,65	0,52	0,28	-0,25
23	-0,28	-0,02	0,05	0,42	0,37	0,13	-0,41
24	-0,32	-0,11	0,07	0,22	0,47	0,63	0,72
25	-0,57	-0,36	0,08	0,25	0,54	0,64	0,58
26	-0,48	-0,50	0,11	0,30	0,55	0,71	0,53
27	-0,55	-0,49	-0,04	0,10	0,34	0,48	0,19
28	-0,26	-0,20	-0,26	-0,36	-0,17	0,09	0,44
29	-0,41	-0,36	-0,35	-0,22	-0,13	0,07	0,33
30	-0,66	-0,83	-0,58	-0,35	-0,22	-0,03	0,13
31	-0,67	-0,83	-0,86	-0,73	-0,53	-0,17	-0,09
32	-0,51	-0,55	-0,66	-0,81	-0,57	-0,19	-0,20
33	-0,32	-0,26	-0,28	-0,29	-0,45	-0,42	-0,28
34	-0,70	-0,76	-0,68	-0,52	-0,73	-0,79	-0,60
35	-0,70	-0,80	-0,76	-0,54	-0,69	-0,75	-0,74
36	-0,48	-0,56	-0,61	-0,59	-0,69	-0,59	-0,68
37	-0,15	-0,05	-0,01	-0,13	-0,26	-0,58	-0,83
38	-0,35	-0,25	-0,18	-0,34	-0,41	-0,60	-0,65
39	-0,55	-0,55	-0,49	-0,56	-0,62	-0,87	-1,01
40	-0,59	-0,71	-0,60	-0,60	-0,63	-0,74	-1,11
41	-0,49	-0,64	-0,48	-0,49	-0,50	-0,61	-0,96
42	-0,31	-0,09	0,06	-0,27	-0,29	-0,43	-0,55
43	-0,60	-0,36	-0,34	-0,81	-0,74	-0,92	-0,99
44	-0,71	-0,69	-0,66	-0,93	-0,84	-1,03	-1,31
45	-0,63	-0,73	-0,57	-0,57	-0,60	-0,69	-1,09
46	0,12	0,11	0,07	-0,01	-0,17	-0,34	-0,42
47	-0,13	0,00	0,09	-0,17	-0,34	-0,54	-0,52
48	-0,52	-0,38	-0,26	-0,93	-0,85	-0,95	-1,13
49	-0,54	-0,50	-0,41	-0,75	-0,65	-0,78	-1,11
50	-0,56	-0,62	-0,51	-0,53	-0,54	-0,66	-0,94
51	-0,15	-0,18	-0,16	-0,17	-0,38	-0,51	-0,49
52	-0,35	-0,23	-0,20	-0,44	-0,70	-0,65	-0,82

Tabela C.2: c_p média resultante do modelo de três picos - R0305t (cont.)

Número da tomada	0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°
53	-0,48	-0,27	-0,34	-0,60	-0,61	-0,64	-0,98
54	-0,68	-0,55	-0,53	-0,50	-0,53	-0,72	-0,99
55	0,08	-0,14	-0,08	0,06	-0,04	-0,16	-0,33
56	0,13	0,00	-0,13	0,00	-0,16	-0,27	-0,39
57	-0,25	-0,34	-0,41	-0,44	-0,52	-0,45	-0,68
58	-0,35	-0,49	-0,47	-0,56	-0,42	-0,54	-0,76
59	-0,88	-0,84	-0,88	-0,69	-0,52	-0,66	-0,66
60	0,42	0,19	0,08	0,25	0,11	-0,20	-0,25
61	0,38	0,13	-0,01	-0,14	-0,34	-0,51	-0,57
62	0,39	0,16	-0,02	-0,32	-0,50	-0,70	-0,77
63	0,09	-0,15	-0,41	-0,77	-0,78	-0,87	-0,74
64	0,46	0,63	0,59	0,49	0,21	0,01	0,01
65	0,49	0,58	0,45	0,36	0,06	-0,29	-0,38
66	0,66	0,70	0,47	0,20	-0,18	-0,63	-0,78
67	0,70	0,70	0,37	-0,10	-0,49	-0,88	-0,89
68	0,56	0,62	0,17	-0,32	-0,54	-0,86	-0,84
69	0,39	0,80	1,06	0,41	0,21	-0,09	-0,26
70	0,32	0,45	0,51	0,57	0,27	-0,22	-0,54
71	0,28	0,55	0,56	0,59	0,18	-0,40	-0,77
72	0,17	0,53	0,40	0,25	-0,06	-0,60	-0,87
73	0,27	0,65	0,69	0,45	0,22	0,00	-0,08
74	0,00	0,32	0,62	0,41	0,39	0,41	0,27
75	-0,25	0,02	0,41	0,72	0,57	0,41	0,11
76	-0,59	-0,15	0,37	0,66	0,52	0,27	-0,09
77	-0,82	-0,32	0,14	0,20	0,22	-0,03	-0,36
78	-0,25	-0,12	0,12	0,18	0,40	0,65	0,67
79	-0,47	-0,37	-0,16	0,21	0,44	0,61	0,63
80	-0,60	-0,28	-0,12	0,40	0,58	0,68	0,65
81	-0,83	-0,52	-0,10	-0,07	0,27	0,46	0,43
82	-0,15	-0,18	-0,13	-0,11	0,20	0,49	0,55
83	-0,27	-0,34	-0,31	-0,12	-0,01	0,30	0,54
84	-0,47	-0,63	-0,85	-0,22	-0,14	0,14	0,48
85	-0,77	-0,62	-0,92	-0,72	-0,41	-0,04	0,26
86	-0,71	-0,69	-0,70	-0,85	-0,47	-0,06	0,20
87	-0,21	-0,19	-0,29	-0,28	-0,40	-0,27	-0,03
88	-0,63	-0,60	-0,98	-0,64	-0,75	-0,66	-0,29
89	-0,79	-0,67	-1,07	-1,00	-0,86	-0,86	-0,60
90	-0,73	-0,67	-0,91	-1,08	-0,93	-0,86	-0,61
91	-0,01	0,02	-0,03	-0,20	-0,52	-0,64	-0,57
92	-0,36	-0,24	-0,25	-0,39	-0,64	-0,79	-0,69
93	-0,74	-0,57	-0,69	-0,84	-0,78	-1,01	-0,79
94	-0,72	-0,68	-0,77	-1,08	-0,85	-0,87	-0,94

Tabela C.2: c_p média resultante do modelo de três picos - R0305t (cont.)

Número da tomada	0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°
95	-0,71	-0,79	-0,89	-1,01	-0,85	-0,94	-1,01
96	-0,40	-0,26	-0,09	-0,27	-0,50	-0,63	-0,65
97	-0,59	-0,40	-0,31	-0,86	-0,78	-0,84	-0,88
98	-0,62	-0,56	-0,56	-1,09	-0,77	-0,82	-0,95
99	-0,68	-0,73	-0,79	-0,97	-0,76	-0,67	-0,82
100	-0,25	0,01	0,04	-0,01	-0,11	-0,24	-0,31
101	-0,36	-0,19	-0,11	-0,29	-0,49	-0,55	-0,53
102	-0,47	-0,26	-0,16	-0,72	-0,82	-0,76	-0,96
103	-0,56	-0,48	-0,47	-0,98	-0,73	-0,78	-0,90
104	-0,53	-0,73	-0,84	-0,79	-0,57	-0,65	-0,63
105	-0,15	-0,11	-0,12	-0,23	-0,39	-0,53	-0,46
106	-0,62	-0,43	-0,39	-0,54	-0,86	-0,80	-0,91
107	-0,75	-0,59	-0,49	-0,82	-0,75	-0,79	-0,96
108	-0,79	-0,82	-0,91	-0,93	-0,71	-0,78	-0,81
109	-0,14	-0,28	-0,18	0,10	0,01	-0,13	-0,09
110	0,21	0,00	0,03	-0,03	-0,14	-0,17	-0,27
111	-0,15	-0,29	-0,22	-0,38	-0,44	-0,48	-0,72
112	-0,42	-0,32	-0,22	-0,29	-0,44	-0,61	-0,77
113	-0,65	-0,69	-0,45	-0,39	-0,61	-0,93	-0,88
114	0,45	0,33	0,25	0,16	-0,12	-0,37	-0,35
115	0,48	0,27	-0,06	-0,22	-0,30	-0,42	-0,55
116	0,27	-0,04	-0,32	-0,40	-0,48	-0,59	-0,85
117	-0,07	-0,47	-0,46	-0,46	-0,63	-0,84	-0,82
118	0,62	0,71	0,39	-0,01	-0,22	-0,43	-0,62
119	0,73	0,75	0,48	0,30	0,05	-0,23	-0,44
120	0,77	0,73	0,39	0,11	-0,22	-0,48	-0,69
121	0,66	0,54	0,25	-0,06	-0,43	-0,60	-0,79
122	0,31	0,02	-0,15	-0,35	-0,72	-0,88	-0,92
123	0,70	0,82	0,69	0,63	0,50	0,31	-0,01
124	0,40	0,58	0,71	0,66	0,43	0,15	-0,44
125	0,33	0,53	0,65	0,58	0,22	-0,25	-0,84
126	0,16	0,30	0,37	0,32	0,00	-0,53	-0,88
127	-0,23	0,09	0,35	0,65	0,79	0,83	0,21
128	-0,06	0,29	0,55	0,77	0,86	0,83	0,38
129	-0,35	0,00	0,48	0,80	0,87	0,71	0,12
130	-0,58	-0,32	0,21	0,59	0,70	0,43	-0,06
131	-0,51	-0,29	0,00	0,32	0,49	0,18	-0,14
132	-0,55	-0,37	0,00	0,39	0,68	0,85	0,84
133	-0,93	-0,62	-0,17	0,25	0,55	0,67	0,59
134	-0,71	-0,82	-0,32	0,14	0,54	0,65	0,55
135	-0,69	-0,78	-0,58	-0,23	0,21	0,25	0,21
136	-0,56	-0,61	-0,75	-0,51	-0,24	0,08	0,54

Tabela C.2: c_p média resultante do modelo de três picos - R0305t (cont.)

Número da tomada	0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°
137	-0,62	-0,58	-0,48	-0,25	-0,01	0,25	0,51
138	-0,97	-1,00	-0,59	-0,45	-0,22	0,00	0,28
139	-0,75	-0,96	-0,58	-0,48	-0,20	0,01	0,27
140	-0,56	-0,76	-0,69	-0,70	-0,42	-0,19	0,05
141	-0,41	-0,31	-0,31	-0,31	-0,33	-0,21	0,01
142	-0,76	-0,89	-0,56	-0,53	-0,73	-0,65	-0,38
143	-0,72	-0,99	-0,65	-0,53	-0,75	-0,93	-0,62
144	-0,57	-0,58	-0,42	-0,51	-0,56	-0,57	-0,37
145	-0,13	-0,03	-0,01	0,20	0,03	-0,34	-0,50
146	-0,35	-0,30	-0,38	-0,19	-0,21	-0,34	-0,43
147	-0,66	-0,95	-0,77	-0,56	-0,75	-0,93	-0,86
148	-0,55	-0,82	-0,56	-0,45	-0,67	-0,88	-0,76
149	-0,49	-0,53	-0,27	-0,29	-0,35	-0,71	-0,61
150	-0,20	-0,34	-0,41	-0,36	-0,10	-0,21	-0,40
151	-0,53	-0,58	-0,83	-0,73	-0,61	-0,88	-0,83
152	-0,55	-0,61	-0,67	-0,51	-0,62	-0,99	-0,85
153	-0,74	-0,81	-0,51	-0,49	-0,62	-0,90	-0,93
154	0,16	0,26	-0,04	-0,05	-0,08	-0,17	-0,29
155	-0,08	-0,18	-0,40	-0,42	-0,39	-0,47	-0,46
156	-0,41	-0,31	-0,53	-0,74	-0,66	-0,95	-0,79
157	-0,65	-0,53	-0,56	-0,50	-0,64	-1,02	-0,90
158	-0,62	-0,69	-0,34	-0,30	-0,50	-0,80	-0,82
159	-0,07	-0,20	-0,20	-0,27	-0,41	-0,23	-0,39
160	-0,36	-0,24	-0,25	-0,58	-0,59	-0,55	-0,65
161	-0,59	-0,35	-0,38	-0,48	-0,58	-0,78	-0,82
162	-0,72	-0,62	-0,29	-0,31	-0,56	-0,87	-0,83